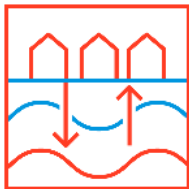


WINDOW *fase 1*



C1

Literatuurstudie brontechniek

3 december 2020

C1 – Literatuurstudie brontechniek



Dit rapport is opgesteld door KWR als onderdeel van WINDOW fase 1.

Auteurs

Martin Bloemendal, Jan van Lopik (KWR)
Frederik Jansen, Benno Drijver (IF Technology)
Frank van Bergen, Marielle Koenen, Anisa Noor Corina (TNO)
Ivo Pothof, Lieke van der Most, Negar Khoshnevis (Deltares)

Met input van: Pieter Bruinen (EBN), Laurens van der Sluijs (Shell)

3 december 2020

Kwaliteitsborger(s)

Niels Hartog (KWR)

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie en TKI-Watertechnologie uit de Toeslag voor TopConsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau.

Projectnummer 402656 Rapportnummer KWR 2020.145

Keywords
Ondergrondse warmteopslag, HTO, brontechniek

Jaar van publicatie
2020

Meer informatie
Martin Bloemendal
E martin.bloemendal@kwrwater.nl

December 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, 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.

Afkortingen

AICD	Autonomous Inflow Control Device
AOC	Assimileerbaar Organisch Koolstof
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASR	Aquifer Storage and Recovery
ATR	Aquifer Transport and Recovery
ATSR	Aquifer Storage, Transport and Recovery
BHA	Bottom-Hole Assembly
BHP	Bottom-Hole Pressure
BRL	Beoordelingsrichtlijn
BS	British Standards
BTS	Bedrijfsgerichte Technologische Samenwerkingprojecten
CBHP	Constant Bottom-Hole Pressure
CEN	European Committee for Standardization
CMC	Carboxy Methyl Cellulose
DS	Danish Standard
DHM	Down Hole Measurements
DTH	Down-the-Hole
DTS	Distributed Temperature Sensing
ECW	Expertise Centrum Warmte
EGV	Elektrisch Geleidend Vermogen
ESP	Electric Submersible Pump
HEX	Heat Exchanger
GVK/GRE	Glasvezelversterkt Kunststof / Glassfiber Reinforced Epoxy
GOR	Gas/Oil Ratio
HT-ATES	High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage
HTO	Hoge Temperatuur Opslag
IAOG	International Association of Oil & Gas Producers
ICD	Inflow Control Device
ICV	Interval Control Valve
ID	Inner Diameter (Well)
IEC	International Electrotechnical Commission
IO	Isomerized Olefins
IP	Institute of Petroleum
ISO	International, such as International Organization for Standardization
KPM	Kilo Pound per Meter
LAO	Linear Alpha-Olefins
LSP	Line Shaft Pump
MFI	Membrane Infiltration Index
MPPW	Multi Partially Penetrating Wells
NEN	Netherlands Standardization Institute
NORSOK	Norwegian Competitive Position on the Continental Shelf
NPV	Net Present Value
NPT	Non-Productive Times
NVOE	Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energie Opslag (nu BodemenergieNL)
OBES	Open Bodemenergiesystemen
OD	Outer Diameter (Well)

PAC	PolyAnionic Cellulose
PDM	Positive Displacement Motor
PDW	Passief Duale Weerstand
PE	Poly Ethyleen
PMCD	Pressurized Mud-Cap Drilling
PSO	Particle Swarm Optimization
PVC	PolyVinylChloride
RSS	Rotary Steerable System
RVS	Roestvrijstaal
SPSA	Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation
SODM	Staatstoezicht op de Mijnen
TDS	Total Dissolved Solids
TSA	Tegenstroom Apparaat
VFG	Variable Frequency Generators
VSD	Variable Speed Drive
WKO	Warmte-Koude Opslag (OBES)

Inhoud

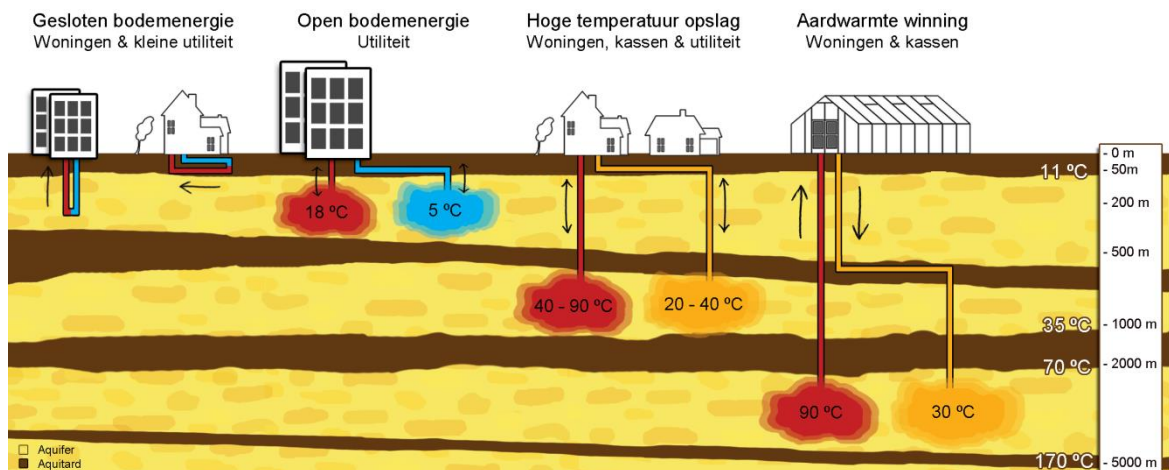
Afkortingen	3
1. Inleiding	7
1.1. Aanleiding en doel	7
1.2. Onderverdeling van het takenpakket	9
2. Bronontwerp	10
2.1. Onttrekkings- en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater	10
2.2. Open bodemenergiesystemen	19
2.3. Geohydrologisch en hydrochemisch vooronderzoek	26
2.4. Geothermiewinning	28
2.5. Olie- en gaswinning	32
2.6. Discussie en samenvatting	45
3. Boortechnieken	49
3.1. Boortechnieken voor HTO in ondiepe, (semi-)ongeconsolideerde pakketten	50
3.2. Boortechnieken voor HTO in diepere formaties	67
3.3. Discussie en samenvatting	77
4. Ontwikkelen en schoonpompen	83
4.1. Bronontwikkelingsmethodes voor OBES- en onttrekkingsbronnen	83
4.2. Geothermie	89
4.3. Discussie en samenvatting	89
5. Bronafwerking en materiaalkeuze	91
5.1. Onttrekking- en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater	91
5.2. Open bodemenergiesystemen	98
5.3. Geothermiewinning	108
5.4. Olie- en gaswinning	114
5.5. Discussie en samenvatting	128
6. Voorkomen van bronverstopping	130
6.1. Bronverstopping door deeltjes	130
6.2. Chemische/biologische bronverstopping	133
6.3. Preventie en aanpak	136
6.4. Bronverstopping door gasbellen	136
6.6. Geothermie	140
6.7. Olie- en gaswinning	141
6.8. Discussie en samenvatting	142
7. Beheer en waterbehandeling	144
7.1. Regeneratie van onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater	144
7.2. Open bodemenergie	148
7.3. Waterbehandeling voor open bodemenergiesystemen	149

7.4.	Olie-, gas- en geothermiewinning	152
7.5.	Discussie en samenvatting	152
8.	Conclusies	154
8.1.	Wat is (direct) bruikbaar/toepasbaar voor HTO?	154
8.2.	Welke onderwerpen vragen om nader onderzoek?	157
	Referenties	159
	Bijlage A. Bronontwerp, olie/gas	163
	Bijlage B. Algorithms of well optimization in oil & gas wells.....	164
	Derivate-based or gradient-based method	164
	Derivative-free or gradient-free method	165
	Search algorithms using surrogates	166
	Hybrid methods	166
	Bijlage C. Considerations for ESP Pump for HTO wells	167

1. Inleiding

1.1. Aanleiding en doel

Opslag van warmte in de ondergrond is een belangrijke schakel in de warmtetransitie en is een van de goedkoopste vormen van warmteopslag (Hartog et al 2017). Het is belangrijk dat warmteoverschotten in de zomer (van geothermie, industriële restwarmte, zon) kunnen worden opgeslagen en gebruikt in de winter. Ondergrondse warmteopslag bij lagere temperaturen in open bodemsystemen (OBES, ook bekend als warmte-koude opslag) en gesloten bodemenergiesystemen (GBES) wordt op grote schaal toegepast in Nederland (zie Figuur 1-1).



Figuur 1-1. Overzicht van verschillende type bodemenergiesystemen (Bloemendal, 2018)

Naast seizoensgebonden opslag van warmte en koude in de ondergrond bij lage temperatuur contrasten kan ook bij hogere temperaturen water in de bodem worden opgeslagen. Doorgaans wordt bij OBES met een opslagtemperatuur van hoger dan 30°C vaak gesproken over hoge temperatuur opslag (HTO). De opslag bij hogere temperaturen (met temperatuurniveaus hoger dan 30°C, oplopend tot >90°C) wordt echter nog beperkt toegepast in de Nederlandse ondergrond.

Het doel van het WINDOW programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht te krijgen in de effecten voor het verantwoord kunnen toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast.

De brontechniek is een belangrijk technisch aspect die de infiltratie en onttrekking van grondwater met grondwaterbronnen mogelijk moet maken. De volgende onderdelen die essentieel zijn voor goede bronnen zijn:

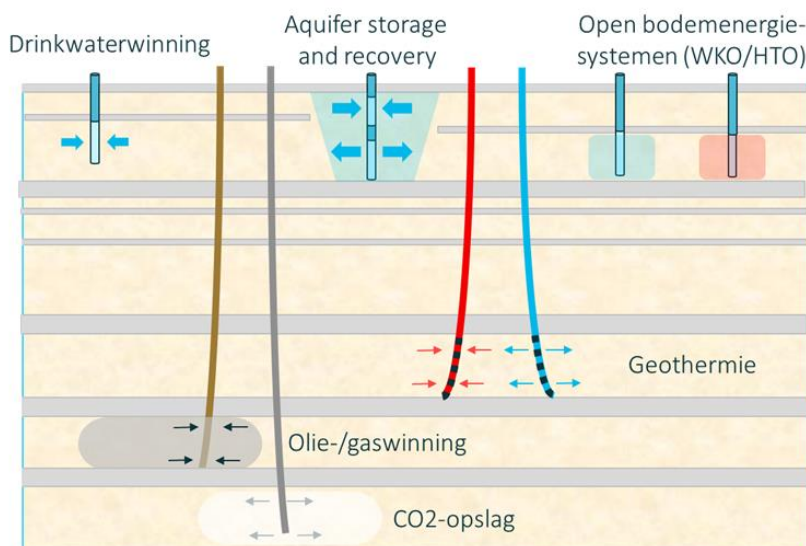
- **het bronontwerp** van een onttrekkings-, en infiltratiebron (zie Ho. 2)
- **de boortechniek** voor het plaatsen van een onttrekkings-, en infiltratiebron voor een HTO-systeem in de Nederlandse ondergrond (zie Ho. 3)
- **het ontwikkelen en schoonpompen** van de onttrekkings-, en infiltratiebron (zie Ho. 4)
- de **bronafterwerking** en de **materiaalkeuze** van de onttrekkings-, en infiltratiebron (zie Ho. 5)
- het voorkomen van **bronverstopping** (zie Ho. 6)
- het **bronbeheer** en de **waterbehandeling** (zie Ho. 6).

Omdat we bij HTO te maken hebben met hogere temperaturen en deels ook met aquifers die minder goed doorlatend zijn dan gebruikelijk, is het nodig om in WINDOW een verbetering te maken op de huidige stand der techniek van grondwaterbronnen. Het doel is om de risico's en kosten na te gaan voor de toe te passen brontechniek voor een HTO-systeem in de Nederlandse ondergrond, met zoveel mogelijk concrete richtlijnen, en de benoeming van belangrijke afwegingspunten. De eerste fase van werkpakket C-brontechniek binnen WINDOW richt zich op de volgende vragen:

- Welke bestaande kennis vanuit de werkvelden grondwater onttrekkings-, en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater, bodemenergie (WKO), geothermie én olie & gas (zie Figuur 1-2) is nuttig voor het ontwerp, realisatie en exploitatie van ondergrondse warmteopslag? Hiervoor is in voorliggend kennisdocument een overzicht gepresenteerd van de stand der techniek bij deze toepassingen.
- Welk aanvullend onderzoek is nodig voor de optimalisatie van de brontechniek voor ondergrondse warmteopslag bij hogere temperaturen? Hierbij is er gekeken naar de rendementsverbetering van bron, en de kostenbesparing en risicobeperking tijdens aanleg en beheer. Op basis van de stand der techniek worden de kennislacunes geïdentificeerd die de grootste verbetering leveren aan de potentie voor toepassing van HTO in de Nederlandse ondergrond.

1.1.1. Vervolgonderzoek

In de fase 2 van WINDOW werkpakket C1-Brontechniek worden de belangrijkste/ meest beperkende kennislacunes in de stand der techniek voor de brontechniek voor het succesvol toepassen van HTO in de Nederlandse ondergrond. Voorliggende literatuurstudie wordt gebruikt om de onderwerpen voor fase 2 vast te stellen. Het uiteindelijke doel is om te komen tot een efficiënte brontechnieken voor HTO-systeem die op grote schaal kunnen worden toegepast. De opzet van dit vervolgonderzoek is geen onderdeel van deze rapportage.



Figuur 1-2. Overzicht van brontechnologie die van toepassing kan zijn bij HTO (Lopik, 2020)

1.2. Onderverdeling van het takenpakket

Voor dit literatuur onderzoek is er geput uit bestaande kennisdocumenten zoals bekend bij de leden van het WINDOW consortium. In Tabel 1-1 is de onderverdeling van welke partijen hebben bijgedragen aan welke onderwerpen. Hierbij is er geput uit de verschillende vakgebieden, zoals winning van grondwater ten behoeve van drinkwater, open bodemenergiesystemen (OBES, zowel WKO, als HTO), olie-, gas-, en geothermiewinning (zie Figuur 1-2 en Figuur 1-1).

Tabel 1-1. Overzicht werkzaamheden voor literatuuronderzoek brontechniek

	Waterwinning	OBES	Geothermie	Olie- en gaswinning
Deltares	H. 2-7	H. 2	H. 2-7 H. 5 H. 5, 7 H. 2-7 H. 2-7	H. 2
IF Technology		H. 2-7		H. 5 H. 2-7
KWR		H. 2-7		
TNO				
Engie				H. 2-7
EBN				
HydrecoGeomec				
Shell				H. 2-7

NB. De voertaal van dit rapport is Nederlands. Echter, omdat de achtergrond informatie uit de geothermie, olie en gas sectoren in veel gevallen alleen in het Engels beschikbaar is en er niet-Nederlands-sprekende onderzoekers hebben bijgedragen aan dit document, zijn een aantal paragrafen in de Engelse taal¹. De hoofdstuk samenvattingen met daarin de conclusies over de bruikbare of kansrijke technieken voor HTO zijn wel altijd in het Nederlands.

¹ Aannee is dat geïnteresseerde lezers de Engelse taal voldoende machtig is dat dit geen probleem is. Het niet vertalen van de Engelse passages is ook een budgettaire afweging.geweest.

2. Bronontwerp

Het doel van het ontwerpproces van een bron voor hoge temperatuuropslag (HTO) is om te komen tot een zo optimaal mogelijke bron ten aanzien van de ontwerpcriteria en kosten voor materiaal, aanleg en onderhoud. Hiertoe moet een aantal vragen worden beantwoord die afhangen van de lokale geohydrologische situatie, zoals op welke diepte en in wat voor pakket het HTO-systeem wordt aangelegd, en welke afpompings- en stroomsnelheid acceptabel zijn. Daarbij moet er voor HTO-bronnen rekening worden gehouden met hoe de warmwater bel zich over de tijd tijdens infiltratie, opslag en onttrekking gedraagt om te komen tot een optimale filterstelling van de infiltratie- en onttrekkingsbron. Ook moeten keuzes worden gemaakt ten aanzien van de constructie van de bron zelf: welk materiaal, welke boorteknik, welke filterlengtes en -diameters en wel of geen omstorting.

2.1. Onttrekkings- en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater

2.1.1. Verticale onttrekkingsbron

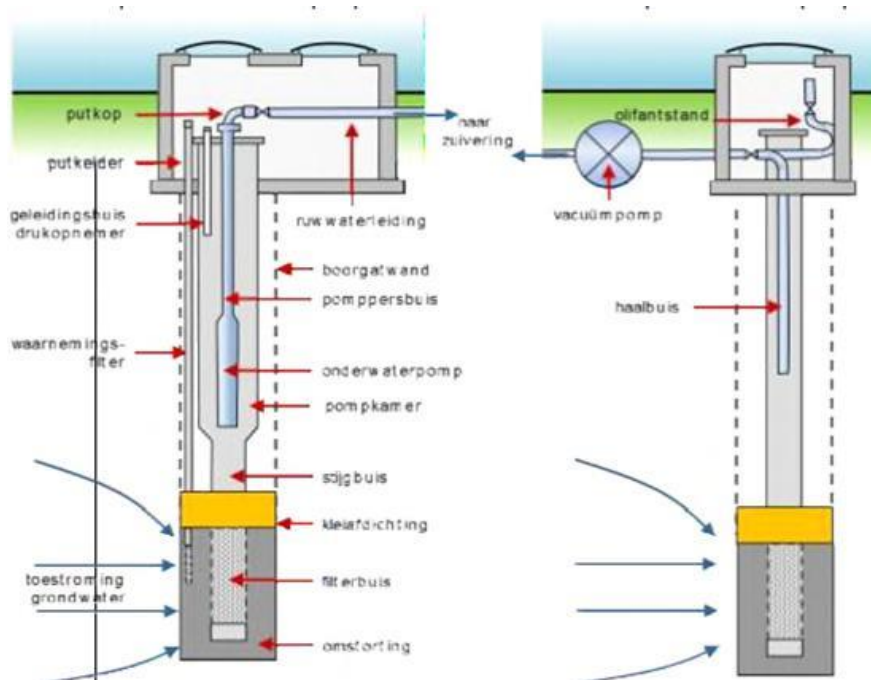
Door middel van verticale onttrekkingsbronnen kan grondwater worden gewonnen uit zowel ondiepe als diepere watervoerende pakketten (Figuur 2-1). In uitzonderlijke gevallen wordt in Nederland voor de waterwinning ten behoeve van de bereiding van drinkwater geboord tot 400 m diepte. Meestal wordt er voor diepere onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater geboord tot circa 100-150 m-mv. Verticale onttrekkingsbronnen worden ook toegepast voor het winnen van oeverfiltraat en kunstmatige infiltratie. In dat geval worden veel ondiepe onttrekkingsbronnen met een relatief korte filterlengte gebruikt. Bij de toepassing van te diepe en/of lange bronfilters zou het aandeel oorspronkelijk grondwater te groot kunnen worden.

Verticale winmiddelen worden het meest toegepast voor de winning van grondwater en zijn over het algemeen verhoudingsgewijs goedkoop. Daarnaast is het relatief eenvoudig om de filterstelling af te stemmen op de bodemopbouw en de gewenste onttrekkingsdiepte.

Een nadeel van verticale winmiddelen is dat de maximale filterlengte afhankelijk is van de samenstelling en de dikte van het watervoerende pakket. Het maximale debiet per bron is relatief klein. In de praktijk varieert het debiet per bron tussen 30 en 300 m³/uur, afhankelijk van het bodemtype waar grondwater uit wordt gewonnen. Een ander nadeel van een verticale winmiddelen is de grote verlaging van de grondwaterstand, die vooral direct rondom de bron optreedt (kleine, maar diepe afpompskegel).

2.1.1.1. Bronontwerp van verticale onttrekkingsbronnen

Bij de aanleg van een zo'n optimaal mogelijke verticale onttrekkingsbron moet er in het bronontwerp rekening worden gehouden met de kosten voor materiaal, operationele levensduur van de bron, aanleg en onderhoud. De hydrologische aspecten, zoals welke afpompings- en stroomsnelheid acceptabel zijn, en de constructieve aspecten hangen met elkaar samen bij het bronontwerp. Dit maakt het ontwerp van een bron tot een iteratief proces. Figuur 2-1 toont de verschillende onderdelen van de onttrekkingsbron die moeten worden ontworpen. De bron in dit voorbeeld is een veel in Nederland en Vlaanderen toegepast ontwerp voor de winning van grondwater en kan worden gezien als het basisontwerp. De bronnen in vast gesteente en bronnen als onderdeel van een vacuümsysteem wijken op onderdelen af.

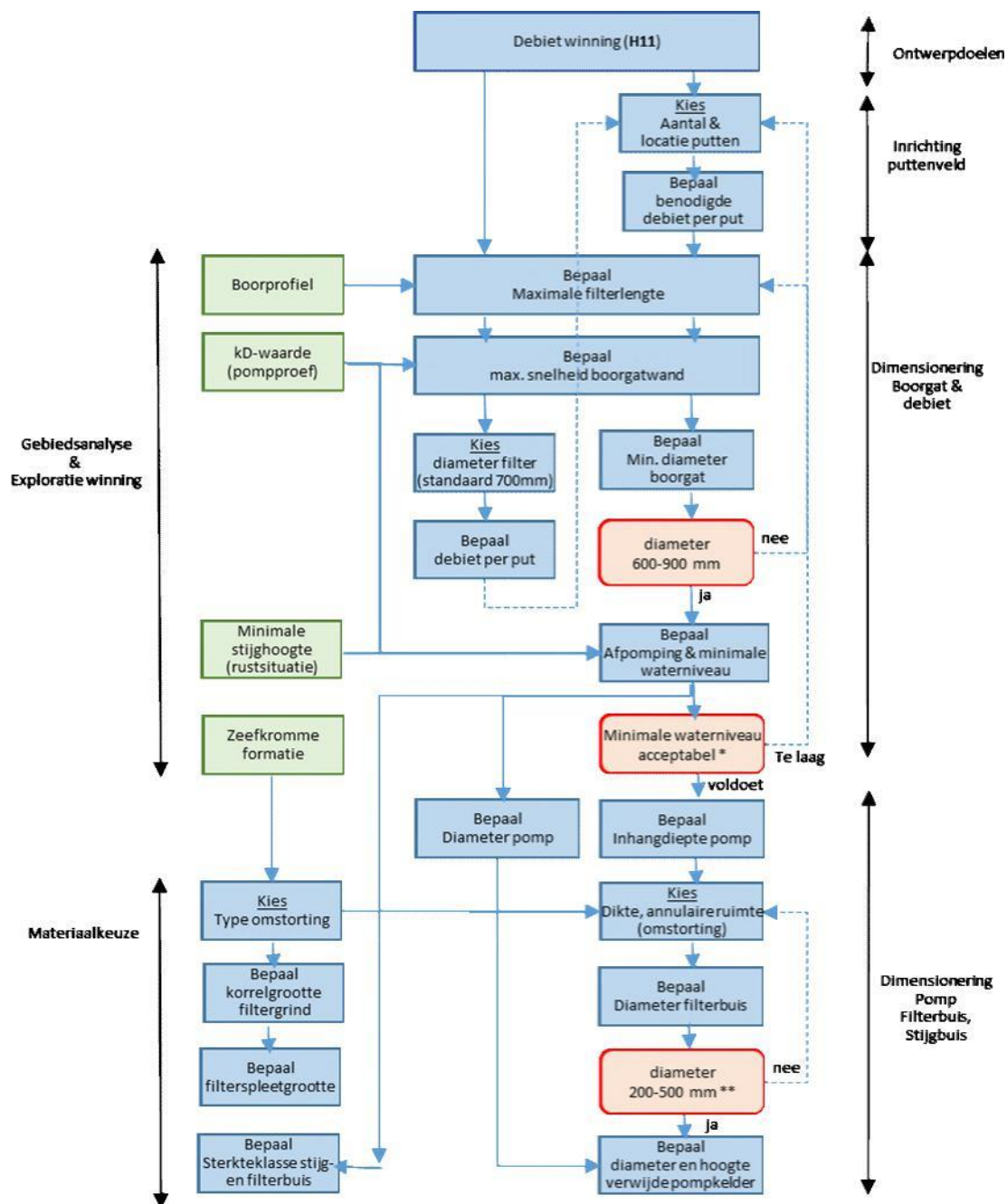


Figuur 2-1. Naamgeving onderdelen onttrekkingsbron met onderwaterpomp (links) en vacuümsysteem (rechts) in geconsolideerde formatie (KWR 2019b)

Figuur 2-2 toont de stappen die moeten worden doorlopen voor het dimensioneren van het debiet, diameters en dieptes van een onttrekkingsbron. Let op: dit schema dekt slechts een deel van de onderdelen van een onttrekkingsbron.

Na een goede geohydrologische inventarisatie kan men bepalen welke afpompings- en welke stroomsnelheden kunnen worden gehanteerd. In de meeste gevallen staat het gewenste debiet voor een gegeven winning vast voor het drinkwaterbedrijf, maar is het aantal bronnen nog nader vast te stellen. De eerste stap is dan het bepalen van de maximale volumestroom per onttrekkingsbron. Hiermee kan het aantal benodigde bronnen worden bepaald en ook hun locatie. Soms staat het aantal, de ligging en het debiet per onttrekkingsbron al vast (bijvoorbeeld om upconing te voorkomen of in verband met het garanderen van een minimale verblijftijd). Er moet dan nog wel worden gecontroleerd of het gewenste debiet haalbaar is met een realistische diameter en filterlengte, en of de afpompings- niet te groot is.

Daarna moeten keuzes worden gemaakt ten aanzien van de constructie van de bron zelf: welke materialen, welke lengtes en diameters van de filter- en stijgbuis en wel of geen omstorting. Zo is de diameter van de filterbuis afhankelijk van het type omstorting en de diameter van het boorgat. Een verwijde stijgbuis is nodig als de diameter van de onderwaterpomp (of haalbuis bij een vacuümpompsysteem) groter is dan de diameter van de filterbuis.



Figuur 2-2. Stroomschema voor dimensionering van een onttrekkingsbron (debet, diameters, hoogtes) (KWR, 2019b).

2.1.1.2. Debiet van de onttrekkingsbron en diameter boorgat

Het debiet van een onttrekkingsbron wordt bepaald door het product van de volgende parameters:

- Lengte van het filter;
- Toelaatbare stroomsnelheid op de boorgatwand;
- Diameter van het boorgat.

Daarnaast kan het minimale waterniveau (afpompings) limiterend zijn.

Filterdiepte en lengte

Bij het bepalen van het filtertraject van een onttrekkingsbron moet rekening worden gehouden met de volgende factoren:

- Het filter moet ruim worden gesteld ten opzichte van kleilagen en veenlagen op een afstand van minimaal 1 m.
- Het bronfilter wordt bij voorkeur uitsluitend in de grove delen van een watervoerend pakket geplaatst, zodat ook een grove omstorting kan worden gebruikt. De aanbeveling wordt gedaan om zandlagen met fijne fracties in het doelpakket zoveel mogelijk te vermijden, om te voorkomen dat ongewenst zandtransport kan ontstaan. Deze fijnere delen zijn bovendien maatgevend voor het ontwerp van de omstorting. De toepassing van een kleinere diameter omstortingsgrind van de bron resulteert in meer verstoppingsgevoelige bronnen, een lagere capaciteit en minder goed ontwikkelbare en regenerereerbare bronnen.
- In het geval een watervoerend pakket uit afwisselend fijne en grove zandlagen bestaat, wordt er vaak voor gekozen om de fijne delen af te blinden. Zijn er veel fijnere lagen dan kan er ook voor worden gekozen om het gehele traject van een filter te voorzien door één type filter en filtergrind aan te brengen, en daarbij de fijnere lagen als maatgevend te beschouwen. Een derde mogelijkheid is om voor de fijnere lagen een fijnere maat filterspleten en filtergrind toe te passen. Het uiteindelijke ontwerp is dus situatieafhankelijk.
- Er dient voldoende afstand te worden gehouden tot redoxgrenzen (het mengen van aeroob en anaeroob water moet worden voorkomen) en zoet-zout-overgangen.
- Bij gebruik van biologisch afbreekbare additieven in de boorspoeling kan bij blinde delen in het filtertraject microbiologische groei optreden, omdat de annulus rond de blinddelen slecht is ontwikkelt en er nog veel skin op de boorgatwand aanwezig is.
- Als een weerstand biedende laag uitsluitend lokaal aanwezig is, zal er waarschijnlijk ook geen stijghoogteverschil optreden. Om te bepalen of een scheidende laag lokaal is, is kennis nodig over de bodemopbouw en stijghoogten in beide lagen in nabijgelegen bronnen en waarnemingsfilters. Dit vergt een gedegen geohydrologische inventarisatie.
- Bij een dik watervoerend pakket kan een lang filtertraject (eventueel bestaande uit meerdere filtertrajecten) worden aangelegd. Dit is echter niet altijd raadzaam als verschillende typen water worden onttrokken, geeft dit extra kans op:
 - 1) bronverstopping, bijvoorbeeld als ondieper (sub)oxisch (zuurstof/nitraat-houdend) en diep anoxisch (ijzerhoudend) water worden gemengd;
 - 2) regeneratie van bronnen met meerdere en/of lange filtersecties is moeilijker en verloopt vaak minder effectief.

De meeste grondwateronttrekkingsbronnen met onderwaterpomp hebben een filterlengte van 20 – 40 m.

Maximale stroomsnelheid op de boorgatwand

Er zijn vele methoden in omloop voor het berekenen van de maximaal toelaatbare stroomsnelheden

op de boorgatwand en de filterspleten van een onttrekkingsbron. De criteria die daaraan ten grondslag liggen zijn in drie groepen te verdelen:

- het leveren van zandvrij water;
- het voorkomen van dichtslibben van de omgeving van de bron (mechanische verstopping);
- het voorkomen van (bio-)chemische verstopping.

Hieronder volgt een korte beschouwing van enkele meest toegepaste waarden.

Er zijn verschillende studies die een limiet voorstellen aan de toelaatbare snelheid op de filterspleten, vanuit het oogpunt dat er bij turbulente stroming teveel stijghoogteverlies optreedt en verstopping door chemische neerslagen. Een veel gehanteerde waarde is 0,03 m/s in de filterspleten (Discroll 1986). Bij deze en vergelijkbare waarden ontbreekt een theoretische onderbouwing (Houben 2015).

Daarnaast zijn er vuistregels die beperkingen stellen aan de maximale afpompingshoogte (bijvoorbeeld 2 m) ter voorkoming van kalkneerslagen door drukverlaging rond de bron. Ook daarbij ontbreekt onderbouwing. Uit verschillende onderzoeken is nooit naar voren gekomen dat bronverstopping overwegend uit kalk bestaat (Den Blanken 1977).

Een in het verleden veel toegepaste methode voor het berekenen van de maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand (v_b) is de formule van Sichardt (Kobus et al. 1976):

$$v_b = \frac{\sqrt{K}}{15} \quad (2.1)$$

Waarin v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is en K de gemiddelde horizontale doorlatendheid van het grondwaterpakket in m/s. De formule mist een goede onderbouwing en is daarom in feite ongefundeerd (Olsthoorn, T.N., 1976). In de praktijk wordt door drinkwaterbedrijven gewerkt met de conservatievere formule van Huisman (Sichardt gedeeld door 2):

$$v_b = \frac{\sqrt{K}}{30} \quad (2.2)$$

Volgens de onttrekkingsnorm (NVOE, 2006) hangt de maximale Darcy snelheid in de formatie af van de doorlatendheid.

$$v_b = \frac{K}{12} \quad (2.3)$$

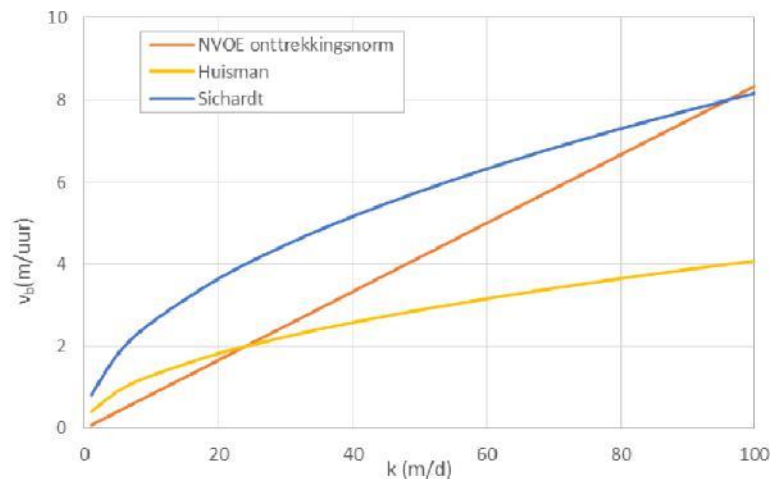
Waar v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is [m/h]. Deze onttrekkingsnorm wordt gebruikt voor het bronontwerp van OBES-systemen. De NVOE onttrekkingsnorm geeft de toegestane snelheid op de boorgatwand welke gebaseerd is op een minimale zandlevering van de bron (Buik, 2001). Deze toegestane snelheid op de boorgatwand is empirisch afgeleid, en gebaseerd op de wet van Darcy, de aanname dat er een lineair verband is tussen de stroomsnelheid en de doorlatendheid van de aquifer. De maximale toegestane hydraulische gradiënt is empirisch afgeleid op twee.

Uit Kiwa-laboratoriumonderzoek is gebleken dat bij een zorgvuldig aangebrachte omstorting van enkele mm dikte in theorie veel hogere stroomsnelheden mogelijk zijn alvorens deeltjestransport zal optreden. Dat in de praktijk soms toch zandtransport plaatsvindt, heeft vermoedelijk te maken met onvolkomenheden bij het aanbrengen van de omstorting of fijnzandige tussenlagen (Kobus et al. 1976). Uit een evaluatie van praktijkgegevens in 32 bronnen (IF, 2001) blijkt dat bij toepassing van zowel de NVOE onttrekkingsnorm als de formule van Huisman geen problemen optreden met zandlevering.

Een overweging om toch een lager ontwerpdebiet te kiezen, is dat bronnen dan minder snel verstoppem. Dit komt vermoedelijk omdat de concentratie aan verstoppende deeltjes afneemt bij een lagere stroomsnelheid (Leunk 2012, Leunk et al. 2013). Hierbij is het wel de vraag of een tragere verstopping per tijdseenheid ook leidt tot een tragere verstoppingssnelheid per m³ onttrokken water. Uit analyses van bronverstoppingsgegevens op enkele Nederlandse bronnenvelden door (Vonk en van der Schans 2019) blijkt namelijk dat de stroomsnelheid een beperkte invloed heeft op de verstoppingssnelheid.

De aanbeveling wordt gedaan om voor onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater de formule van Huisman te gebruiken, tenzij op basis van informatie van omliggende onttrekkingsbronnen een andere snelheid aantoonbaar niet leidt tot te snelle verstopping.

Voor het bepalen van de k-waarde wordt het gemiddelde genomen over het diepte-interval van het winfilter. Het idee hierbij is dat de stroomsnelheid in lagen met een lagere k-waarde automatisch navenant lager is. Deze redenering gaat in theorie overigens niet helemaal op, omdat de formule van Huisman uitgaat van een kwadratisch verband tussen k-waarde en stroomsnelheid, terwijl de stroomsnelheid zich in werkelijkheid volgens de wet van Darcy lineair verhoudt met de k-waarde.



Figuur 2-3. Maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand (v_b, y-as) als functie van de doorlatendheid (K, x-as) voor verschillende ontwerpcriteria (KWR, 2019b).

Diameter boorgat

In de praktijk wordt een boorgat tussen de 700 en 800 mm het meest toegepast voor grondwaterwinningen met een kunstmatige omstorting. Bij een boorgat groter dan 800 mm wordt de omstorting relatief dik, waardoor deze lastig is te ontwikkelen. Dit komt mede doordat er voor het type filterbuizen geen voldoende grote diameters beschikbaar zijn op de markt. Boven 500 mm diameter lopen de kosten sterk op vanwege de beperkte vraag en benodigde dikte van het wandmateriaal en de sterkte. Bovendien is veel apparatuur voor regeneratie niet standaard toegerust voor grotere diameters.

Een diameter kleiner dan 700 mm pakt economisch meestal minder gunstig uit (omdat de volumestroom navenant lager is en de bouwkosten nagenoeg gelijk). Als de benodigde diameter kleiner is, kan worden overwogen om de filterlengte of het aantal bronnen te verminderen. In de praktijk levert het inkorten van een filter overigens relatief weinig besparing op, zodat doorgaans hiervoor niet wordt gekozen.

Een uitzondering betreft onttrekkingsbronnen waarbij het debiet is begrensd tot een bepaald maximum, omdat anders de reistijden te kort worden (microbiologisch risico) of er een te groot risico bestaat op upconing van zout grondwater. In dergelijke gevallen kunnen kleinere diameters wel aantrekkelijk zijn, omdat er toch niet meer mag worden onttrokken.

2.1.2. Infiltratiebronnen

De aanvulling van grondwatersystemen kan worden gedaan met infiltratiebronnen. De constructie van diepinfiltratiebronnen komt grotendeels overeen met verticale onttrekkingsbronnen, maar wordt dusdanig ingericht om water op een zekere diepte in de bodem aan te brengen. Er zijn vaak extra voorzieningen om water zowel te injecteren als op te pompen (back-flushen). Ook worden grotere diameters toegepast, om de verstopping te beperken.

Tijdens ondergrondse waterberging (Engels: Aquifer Storage and Recovery, ASR) ondergaat het water een seizoensberging in de ondergrond. Voor infiltratie en terugwinnen worden dezelfde bronnen gebruikt. Bij ATR (Aquifer Transport and Recovery) ondergaat het water een bodempassage na injectie via een infiltratiebron. Er worden dus verschillende bronnen gebruikt voor het injecteren en terugwinnen van water. Dit is een continu proces, dat meer is gericht op het verbeteren van de waterkwaliteit. Vaak is er ook sprake van buffer- en voorraadvorming. Het proces wordt daarom ook wel aangeduid als ASTR (Aquifer Storage, Transport and Recovery) (Stuyfzand et al. 2012).

2.1.3. Alternatieve win- en infiltratiemethodes

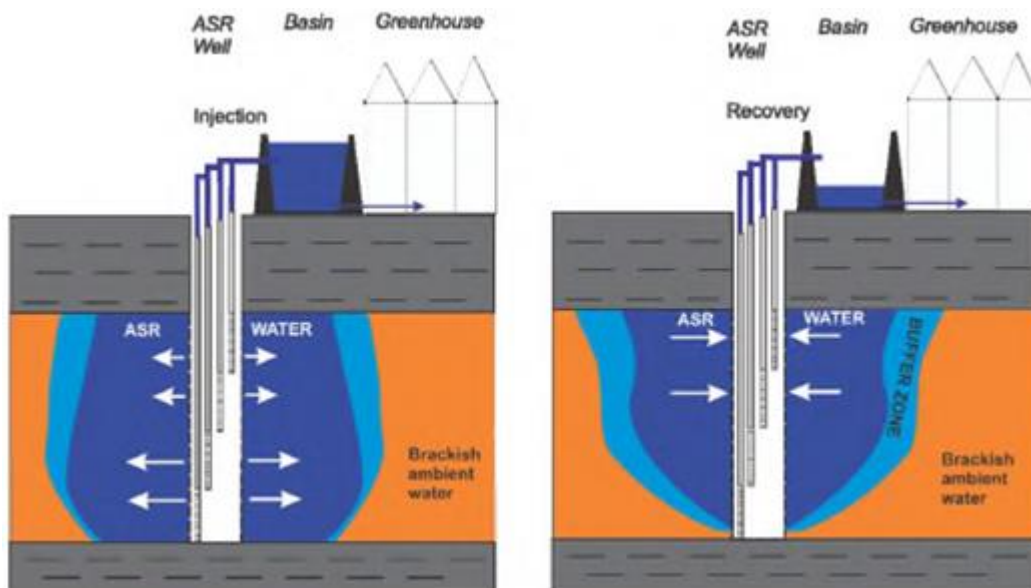
2.1.3.1. Bronconfiguratie voor gestratificeerd winnen

Er zijn verschillende bronconfiguraties mogelijk om het grondwater uit een watervoerend pakket gescheiden te winnen:

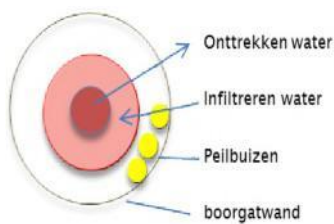
- **Aparte boorgaten.** Door het plaatsen van verschillende bronnen naast elkaar (in aparte boorgaten). Dit is de meest robuuste oplossing, maar brengt ook extra boorkosten met zich mee.
- **MPPW.** Het betreft het in één boorgat plaatsen van verschillende stijgbuizen met elk een eigen filterbuis. Er worden dus meerdere onvolkomen bronfilters met een kleinere diameter aangebracht in één boorgat. Nadeel is dat de diameter per stijgbuis wordt beperkt en de omstorting vrij dik is. Deze techniek wordt aangeduid als Multi Partially Penetrating Wells (MPPW), als er meerdere onvolkomen filters in één pakket worden geplaatst. Deze constructie wordt in de Nederlandse glastuinbouw toegepast (zie voorbeeld MPPW). Conventionele bronsystemen die voor ASR worden toegepast, bestaan uit één buis, waarbij op één diepte water wordt geïnjecteerd en onttrokken. Gebleken is dat in brakke of zoute aquifers het zoete water opdrijft waardoor onderin de onttrekkingsbron al snel brak water wordt aangetrokken. Hierdoor is het overgrote deel van het geïnjecteerde zoete water niet terug winbaar, resulterend in een relatief laag rendement. Uit experimenten in het Westland ('s Gravenzande) is gebleken dat het rendement van deze systemen kan worden verhoogd door het water onderin de aquifer te injecteren en ondieper terug te winnen. Volgens SEAWAT berekeningen kon op deze locatie het theoretische rendement zelfs worden verhoogd van 35% naar 60%.
- **Duo-bron.** Het gaat om het fysiek scheiden van de waterstromen van verschillende filters door het plaatsen van een binnenbuis of afdichters. Voordeel is dat beide filters middenin het boorgat zijn gepositioneerd. In de OBES-sector was het gebruikelijk om twee filters onder elkaar te plaatsen, waarbij de stijgbuis van het onderste filter door het midden van de bovenste filterbuis wordt bevestigd. Het onderste filter wordt dan bijvoorbeeld gebruikt voor het onttrekken van koud water, terwijl gelijktijdig warm water in het bovenste filter wordt

geïnjecteerd. Deze techniek is ook toegepast in de waterwinning bij Kerk-Avezaath (zie voorbeeld).

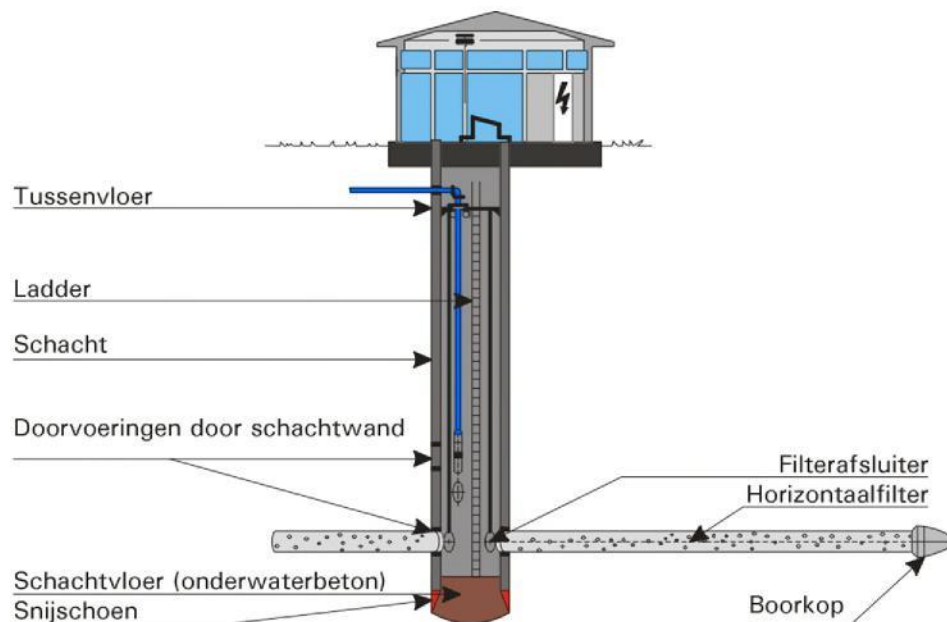
- **Meerdere aanzuigpunten.** Het is mogelijk om het water in één open buis gescheiden te winnen door meerdere onderwaterpompen of haalbuizen op verschillende diepte te installeren. De debieten per pomp moeten dan zodanig worden afgesteld dat de scheiding van water in de filterbuis overeenkomt met de overgang in waterkwaliteit. Deze oplossing is flexibel en ook toepasbaar in bestaande onttrekkingsbronnen. Nadeel is dat de methode lastiger is om in te regelen.
- **Radiaalbron.** Een radiaalbron bestaat uit een aantal horizontaalfilters die vanuit een verticale schacht zijn geboord. De maximale filterlengte bedraagt ongeveer 90 m. In een schacht met een binnendiameter van circa 3,0 m kunnen op een en hetzelfde niveau acht strengen worden aangebracht met een gezamenlijke maximale filterlengte van 720 m. In radiaalbronnen met een droge schacht is ieder filter aangesloten op een individuele leiding naar boven met een eigen onderwaterpomp. De horizontale toestroming van het grondwater zorgt ook voor een geringere kans op menging van verschillende watertypen dan verticale winmiddelen. Bij de winning van grondwater reduceert deze manier van onttrekking de kans op chemische bronverstopping. In theorie zijn horizontale bronnen dus minder gevoelig voor verstopping als het filter in het meest grove deel van het watervoerende pakket (waar minder deeltjes aanwezig zijn) is geplaatst. Boorgatwandverstopping treedt in de praktijk echter ook op voor horizontale bronnen. Aan het gebruik van een radiaal bron kleven ook nadelen. De schacht kan alleen in ondiepere lagen kan worden aangebracht. De maximale diepte van de bronschacht van een radiaalbron bedraagt ongeveer 60 m. De aanleg van een schacht met radiaalstrengen is duur wordt significant duurder met toenemende winningsdiepte grondwater. Hierdoor zijn bij verticale winmiddelen de onttrekkingsdiepte flexibeler te kiezen dan bij horizontale winmiddelen. Met toenemende diepte van de schacht nemen de kosten toe. De onttrekkingsdiepte is dus beperkt in vergelijking met verticale onttrekkingsbronnen.



Figuur 2-4. Conceptueel schema van gestratificeerd winnen met een MPPW (Zuurbier, 2012).



Figuur 2-5. Bovenaanzicht bronontwerp monobronstelsel (duo-bron) met drie waarnemingsbronnen (Van Doorn et al., 2014).



Figuur 2-6. Radiaalbron (Rambags et al. 2010)

Meet- en regelconcepten bij gestratificeerd winnen

In het geval er geen scheidende laag is tussen de verschillende filters is het noodzakelijk om de brondebieten aan te sturen op basis van de positie van waterkwaliteitsgrensvlakken in de ondergrond. Dit vergt monitoring van verschuivingen van deze grensvlakken. Monitoring kan bestaan uit handmetingen of een continue registratie via sensoren, waarbij de inzet van monitoring kosten-effectiever wordt naarmate de meetfrequentie toeneemt. Vooralsnog zijn er uitsluitend goede ervaringen met sensoren die EGV, TDS en temperatuur meten. Andere sensoren vergen regelmatige kalibratie en onderhoud (O₂, pH, NH₄⁺) en/ of zijn minder betrouwbaar (NO₃⁻). Voor temperatuurmetingen kan ook gebruik worden gemaakt van glasvezelkabels (DTS, Distributed Temperature Sensing).

2.2. Open bodemenergiesystemen

2.2.1. Ontwerpnormen voor OBES-bronnen

2.2.1.1. Ontwerpdebiet van een OBES-bron

Voor OBES-bronnen worden specifieke normen gehanteerd tijdens infiltratie (infiltratienorm) en onttrekking.

Onttrekkingsnorm

Voor OBES-bronnen wordt een minder conservatieve onttrekkingsnorm gehanteerd dan voor onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater (zie paragraaf 2.1.1). De onttrekkingsnorm is bedoeld om zandlevering te voorkomen. Hieruit volgt een maximale Darcy snelheid in de aquifer. Bij de NVOE-onttrekkingsnorm (2006) hangt de maximale Darcy snelheid in de formatie af van de doorlatendheid:

$$v_b = \frac{K}{12} \quad (\text{zie (2.3)})$$

Waarin v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is (in m/uur) en K de gemiddelde doorlatendheid in m/d. Deze formule laat een veel hogere snelheid op de boorgatwand toe dan de conservatieve formule van Huisman die wordt gebruikt voor conventionele onttrekkingsbronnen ten behoeve van grondwateronttrekking. Met name in grovere zandpakketten met een doorlatendheid K van meer dan 40 m/d kan er significant meer onttrokken worden met deze infiltratienorm. Het grote verschil tussen onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater en OBES-bronnen, is dat OBES-bronnen niet langdurig bij een continue debiet onttrekken, waarbij er seizoenaal gebonden ook nog wordt geïnfiltrerd op dezelfde bron. Dit kan verklaren waarom in veel gevallen de minder conservatieve NVOE-onttrekkingsnorm werkt voor OBES-bronnen in grovere zandpakketten.

Infiltratienorm

De infiltratienorm is bedoeld om de verstopping van de infiltratiebron te beperken. Hieruit volgt de maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand en daarmee ook het maximale debiet bij infiltratie. De maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand bij infiltratie (NVOE, 2006) is niet alleen afhankelijk van de doorlatendheid (k -waarde), maar ook van de mate waarin het infiltratiewater een verstoppende werking heeft (uitgedrukt in de MFI-waarde), de hoeveelheid grondwater die geïnfiltrerd wordt (uitgedrukt in het aantal equivalente vullasturen) en hoe snel de bron mag verstoppelen (uitgedrukt in de specifieke verstoppingssnelheid).

$$v_{max} = 1000 \left(\frac{K}{150} \right)^{0.6} \sqrt{\frac{v_v}{2 MFI u_{eq}}} \quad (2.5)$$

v_{max}	=	ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
K	=	doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d]
v_v	=	specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
MFI	=	MFI [s/l ²]
u_{eq}	=	aantal equivalente vullasturen per jaar [uur]

De afleiding van deze ontwerpnorm is beschreven in IF Technology (2001). Als geen MFI bekend is kan voor energieopslag (waarbij grondwater wordt geïnfiltrerd, en geen oppervlaktewater) uitgegaan worden van een MFI van 2. In de meeste gevallen is de MFI van grondwater dat onttrokken wordt aan goed schoon gepompte bronnen lager dan 2. Incidenteel worden hogere MFI-waarden gemeten (3 tot 4). In dat geval zou iets vaker onderhoud plaats moeten vinden. Voorgesteld wordt om als standaard toegelaten verstoppingssnelheid een waarde van 0,1 m/jaar aan te nemen. Indien gewenst kunnen

hogere of lagere verstoppingsnelheden worden aangehouden, dit vertaalt zich dan in een infiltratiebron met een kleinere respectievelijk grotere diameter (als wordt uitgegaan van hetzelfde debiet en dezelfde filterlengte).

2.2.1.2. Voorkomen bodemsplijting

2.2.1.3. Ontwerp infiltratiebronnen

Als gevolg van het injecteren van water in de infiltratiebron, neemt de stijghoogte in deze bron toe. Deze toename in de stijghoogte komt overeen met een zekere druktoename en wordt de injectiedruk genoemd. Als de injectiedruk te hoog wordt, dan kan bodemsplijting optreden. Voor infiltratiebronnen geldt er een maximaal toelaatbare injectiedruk. Deze wordt gehanteerd om bezwijking van de kleirop en/of deklaag te voorkomen. Bij ondiepere filters van de infiltratiebronnen, baant de scheur zich vaak een weg omhoog naar het maaiveld, waarna het infiltratiewater langs de stijgbuis, maar soms ook op allerlei andere plaatsen in de buurt van de bron, uit de grond kan gaan stromen en de bron door uitspoeling van bodemmateriaal onherstelbare schade oploopt. In dat geval is de bron onderloops (Figuur 2-7).

Vaak wordt de formule van Olsthoorn (1982) gebruikt om de maximaal toelaatbare injectiedruk te berekenen voor een infiltratiebron. In de regel kan worden gesteld dat als de injectiedruk (in meter waterkolom) niet meer bedraagt dan een vijfde van de diepte van de top van het filter, bodemsplijting niet zal optreden. Als vuistregel kan worden aangehouden dat:

$$h < 0,20 z \quad (2.4)$$

Waar z (m) de diepte is van het meest kritische punt onder het maaiveld (onderkant deklaag) en h de maximaal toelaatbare stijghoogte boven het maaiveld. Deze formule is afgeleid voor een bodem die hoofdzakelijk bestaat uit een ongeveer gelijke dichtheid, bijvoorbeeld on-geconsolideerd zand (porositeit 35-40 %), waarvoor een natte bulk dichtheid van ongeveer 2000 kg/m³ geldt.

Dit is opgenomen in het protocol BRL-11001 en moet er voor open bodemenergiesystemen worden voldaan aan de volgende eisen: *'Bepaal aan de hand van de maximaal te verwachten stijghoogte of de kritische injectiedruk (zie bijlage 3) voor opbarsten van de bronnen niet overschreden wordt. De kritische injectiedruk en de minimale diepte van de bovenkant van het filter ten opzichte van de onderkant van een aanwezige kleilaag of het maaiveld worden vastgelegd.'* Hiervoor moet er worden voldaan aan de onderstaande richtlijnen (zie bijlage 2 in Protocol BRL-11001).

Om te bepalen welke maximale stijghoogteveranderingen ter hoogte van het meest kritische punt onder maaiveld mogen optreden is het nodig de horizontale korrelspanning te kennen. Dit meest kritische punt is de bovenzijde van de filter-omstorting of de onderzijde van de scheidende laag. De horizontale spanning kan met behulp van de wet van Coulomb worden bepaald uit de verticale korrelspanning. Deze laatste kan weer bepaald worden uit de grondspanning en waterspanning. Deze formules worden in Olsthoorn (KIWA-mededeling nr. 71 Verstopping van persbronnen) en andere literatuur over grondmechanica omschreven.

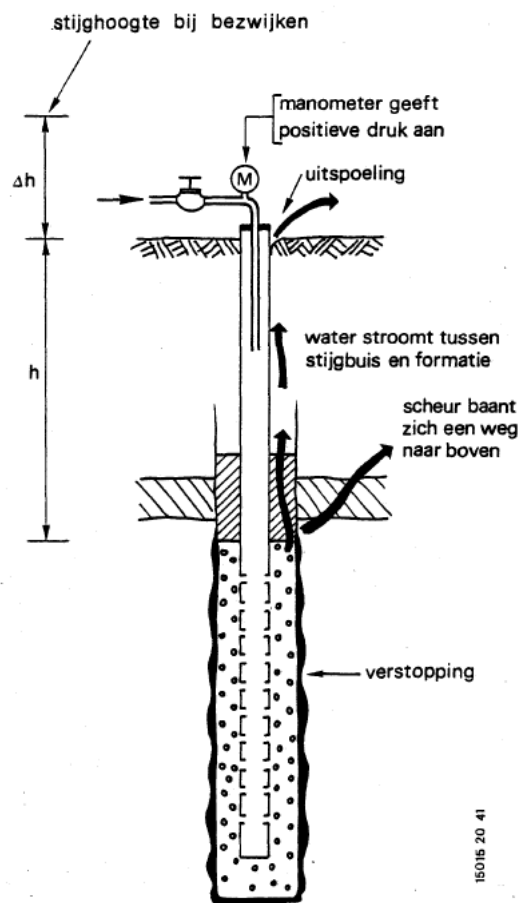
Tijdens het infiltreren van water in de bodem zal de stijghoogte in het opslagpakket in en direct rond de bron worden verhoogd. De mate van verhoging is afhankelijk van het debiet waarmee geïnjecteerd wordt en van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket. Bij een groot doorlaatvermogen zal de verhoging minder groot zijn dan bij een klein doorlaatvermogen (uitgaande van hetzelfde debiet). Uitgaande van volkomen bronfilters (filters worden geplaatst over de gehele hoogte van het

watervoerende pakket) kan de stijghoogteverandering voor een doublet aan de hand van de volgende formule worden berekend:

$$\Delta h = \frac{24 \cdot q_v}{2\pi K H} \ln\left(\frac{L}{r_b}\right) \quad (2.6)$$

Δh is de stijghoogteverandering [m], q_v is het debiet [m³/h], K is de doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d], H is de filterlengte [m], L is de bronafstand [m], r_b is de straal van het boorgatboorgat [m]

Een belangrijk aspect om rekening mee te houden is dat de injectiedruk bij het maximale debiet in de loop van de tijd kan toenemen als gevolg van bronverstopping. Zo wordt er voor het ontwerp van OBES-bronnen tijdens het ontwerp een veiligheidsmarge van (minimaal) een factor 1,2 tot 2 toegepast op de te verwachten injectiedruk (berekend voor de situatie zonder bronverstopping). Dit om de extra stijghoogteveranderingen als gevolg van eventuele bronverstopping op te kunnen vangen. Zodoende wordt voorkomen, dat enige mate van bronverstopping alsnog tot bodemsplijting leidt. Een andere belangrijke beheersmaatregel is het meten van de injectiedruk en het instellen van een beveiliging die ervoor zorgt dat het systeem wordt uitgeschakeld als de injectiedruk te ver oploopt.



Figuur 2-7. Onderloopsheid van een infiltratiebron (Olsthoorn, 1982)

2.2.2. Ontwerpnormen voor hoge temperatuur opslag

Voor hoge temperatuuropslag wordt vaak gebruik gemaakt van fijn-zandige aquifers. Deze aquifers hebben namelijk een relatief lage doorlatendheid, waardoor warmteverliezen als gevolg van dichtheidsstroming worden onderdrukt en het opslagrendement toeneemt. Een belangrijk nadeel van fijn-zandige aquifers is dat er volgens de huidige ontwerpnormen slechts een beperkt debiet aan kan worden onttrokken. Bij een beperkt debiet per bron zijn de systemen economisch gezien moeilijk rendabel te maken.

Voor hoge temperatuuropslag is het van belang, dat de doorlatendheid van de aquifer geen constante waarde heeft, maar afhankelijk is van de temperatuur. Dat komt doordat de doorlatendheid niet alleen wordt bepaald door de eigenschappen van het poreuze medium (de intrinsieke permeabiliteit), maar ook door de eigenschappen van de vloeistof. De eigenschappen van de vloeistof (dichtheid en viscositeit) zijn afhankelijk van de temperatuur (en in geringe mate ook van het zoutgehalte en de druk).

$$K = \frac{\rho_f g}{\mu} k_i \quad (2.7)$$

K = doorlatendheid [m/s]
 ρ_f = dichtheid van de vloeistof [kg/m³]
 g = de valversnelling [9,8 m/s²]
 μ = dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
 k_i = de intrinsieke permeabiliteit [m²]

Bij hoge temperatuuropslagsystemen hebben het zoutgehalte en de druk geen grote invloed op de viscositeit en dichtheid. De viscositeit van water neemt echter sterk af bij hogere temperaturen. Bij het dimensioneren van bronnen voor hoge temperatuur opslag is het dus noodzakelijk om rekening te houden met de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid. De doorlatendheid in de reeds bestaande normen dient hiertoe vervangen te worden door de intrinsieke permeabiliteit. Verder dient de dichtheid en de viscositeit van het water bij de temperatuur van het onttrokken en geïnfiltreerde te worden meegenomen. Zowel voor de onttrekkingsnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpsnelheid bij een hogere temperatuur hoger zijn.

Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de onttrekkingsnorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_b = 7200 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \quad (2.8)$$

v_b = ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij onttrekking [m/uur]

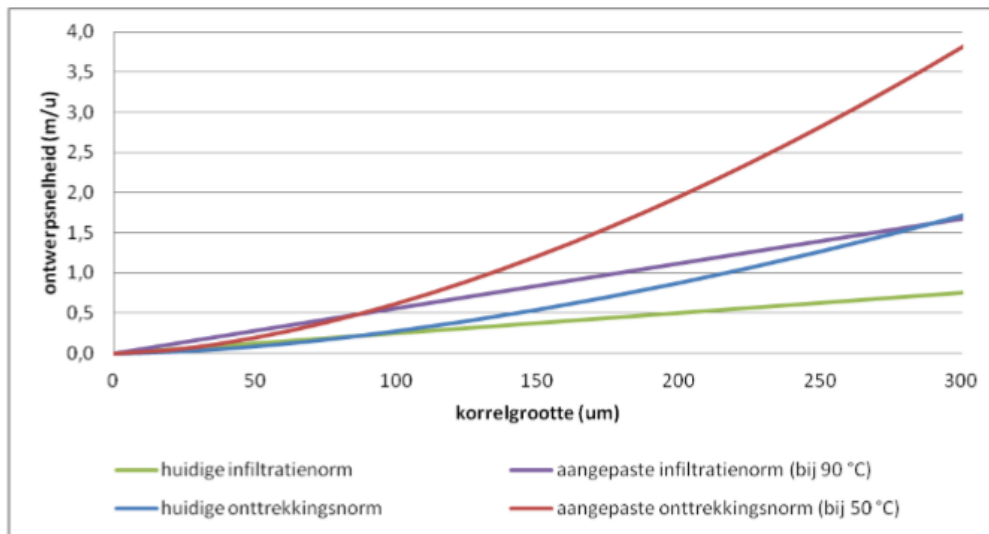
Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de infiltratienorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_{max} = 1000 \left(576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (2.9)$$

v_{max} = ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
 ρ_f = dichtheid van de vloeistof [kg/m³]
 g = de valversnelling [9,8 m/s²]
 μ = dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
 k_i = de intrinsieke permeabiliteit [m²]
 v_v = specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
 MFI = MFI [s/l²]
 U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [uur]

In fijnzandige aquifers is de norm voor infiltratie minder kritisch dan de norm voor onttrekking. Verder kan de infiltratienorm positief worden beïnvloed door het te infiltreren water bovengronds te filteren voorafgaande aan de infiltratie (verlagen van de MFI waarde).

In Figuur 2-8 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron 50°C en de infiltratietemperatuur 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpsnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



Figuur 2-8. Vergelijking tussen de ontwerpnormen voor OBES-systemen, en de ontwerpnormen voor HTO-systemen (met afhankelijkheid van viscositeit) (IF Technology, 2012)

2.2.2.1. Praktijkervaringen met betrekking tot de onttrekkings- en infiltratie norm

Van enkele bronnen is bekend dat er zandlevering optreedt. De oorzaak van deze zandlevering hoeft niet direct te liggen bij het overschrijden van de ontwerpnormen. Mogelijke oorzaken kunnen ook zijn een verkeerde keuze van filtergrind en -spleten, grote variatie in korrelgrootte, filters in kalksteen en scheve debietverdeling over het filtertraject of een combinatie van deze oorzaken. Een directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering is (nog) niet gevonden (IF Technology en Universiteit Utrecht, 2012).

Volgens onderzoek naar de ontwerpnormen voor bronnen bij ondiepe geothermie projecten (IF Technology, 2019), mede gebaseerd op ervaringen in de olie- en gasindustrie, kunnen op grotere dieptes hogere snelheden worden toegepast zonder dat daarbij (onacceptabele) zandlevering optreedt. De spanningen in de ongeconsolideerde lagen in de ondiepe ondergrond worden hoofdzakelijk bepaald door het gewicht van de bovenliggende lagen en de zwaartekracht. Daardoor nemen de spanningen in de ondergrond steeds verder toe met toenemende diepte. Hoe groter de krachten op de korrels, hoe moeilijker de korrels te mobiliseren zijn. Hieruit volgt dat op grotere dieptes hogere debieten mogelijk zijn dan in ondiepere aquifers (als wordt aangenomen dat de eigenschappen van de gebruikte bodemlaag gelijk blijven).

Met dit aspect wordt in de bestaande onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen geen rekening gehouden. De onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen is op grote schaal toegepast voor het ontwerp van deze systemen (> 1.000 systemen) en het aantal projecten met zandlevering is zeer gering. De bronsystemen voor open bodemenergiesystemen staan bekend als robuust en onderhoudsarm. Dit geeft enerzijds aan dat de ontwerpnormen veilig zijn en anderzijds dat er wellicht ruimte is om hogere snelheden toe te staan.

2.2.2.2. Praktijktesten ECW (Wieringermeer)

Het overgrote deel van de open bodemenergiesystemen maakt gebruik van zandlagen in het dieptebereik van 20 tot 250 meter. Bij ECW in de Wieringermeer polder is een hoge temperatuur

opslag project beoogd in een watervoerende zandlaag tussen 360 en 383 m diepte. Aangezien bij ECW gebruik wordt gemaakt van een aquifer op aanzienlijk grotere diepte dan gebruikelijk, is de verwachting dat aanmerkelijk hogere debieten mogelijk zijn. Om dit nader te onderzoeken zijn testen uitgevoerd in het bronfilter van de proefboring die ten behoeve van het project is gerealiseerd. Bij deze testen is het onttrekkingsdebiet in een aantal stappen verhoogd tot ruim boven de huidige onttrekkingsnorm. Uit de praktijktesten blijkt, dat de zandlevering minimaal is bij snelheden op de boorgatwand tot 2,44 maal de huidige onttrekkingsnorm. Hogere snelheden konden vanwege praktische beperkingen niet worden getest (IF Technology, 2020).

Deze ervaringen suggereren dat er, met name op grotere dieptes, hogere debieten kunnen worden gerealiseerd dan wat de huidige ontwerpnormen aangeven. Het is echter nog te vroeg om bij andere projecten op grotere dieptes “zomaar” hogere snelheden toe te passen. Bij het HTO project van ECW is de keuze voor een hoger debiet gebaseerd op een combinatie tussen theorie en (kortdurende) praktijktesten. Die resultaten zijn positief, maar geven nog geen zekerheid. Een punt van aandacht is bijvoorbeeld nog het functioneren van de bronnen op de lange termijn.

Bij eventuele andere projecten op grotere dieptes wordt aanbevolen om vergelijkbare testen uit te voeren om de haalbaarheid van sterk verhoogde debieten voor de betreffende formatie op die locatie te onderzoeken. Als de haalbaarheid van verhoogde debieten op meerdere locaties middels praktijktesten is aangetoond en de praktijkervaring met de betreffende bronnen tijdens bedrijfsvoering op de langere termijn ook positief is, dan kan dit aanleiding zijn voor een aanpassing van de ontwerpnormen. Mogelijk ontstaat daarmee dan ook ruimte om in ondiepere aquifers hogere debieten toe te staan.

Door de relatief hoge stroomsnelheden in de directe omgeving van de onttrekkingsbron worden deeltjes in de aquifer gemobiliseerd en meegevoerd met het grondwater dat in de richting van de bron stroomt. Bij hoge stroomsnelheden (hogere dan waar tot op heden ervaring mee is bij open bodemenergiesystemen), ontstaan hogere sleepkrachten en is de verwachting dat er meer deeltjes gemobiliseerd gaan worden. Bovendien wordt het gebied waarbinnen een bepaalde stroomsnelheid optreedt groter. Dit leidt naar verwachting ook tot een toename van de concentratie aan deeltjes in het toestromende water. Bij hogere concentraties aan deeltjes en hogere stroomsnelheden neemt de kans op de brugvorming toe (deeltjes lopen vast als ze tegelijkertijd door dezelfde poriehal willen: de deeltjes vormen bruggetjes die een verstoppend effect hebben). Dit fenomeen is bekend uit onderzoek dat is uitgevoerd in de drinkwatersector (zie b.v. Timmer et al., 2000 en 2003; De Zwart, 2007 en Van Beek et al., 2009).

In de metingen van de tot nu toe uitgevoerde bronproeven zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van bronverstopping: de verlaging in de proefboring neemt niet of nauwelijks toe ten opzichte van de verlaging die wordt berekend aan de hand van de eigenschappen van het watervoerende pakket die zijn afgeleid uit stopproeven. De testen waren echter van relatief korte duur (6 uur). Hiermee is dus nog niet duidelijk in hoeverre er op de langere termijn wellicht toch merkbare effecten van bronverstopping door brugvorming verwacht mogen worden.

Er zijn meerdere maatregelen beschikbaar om de verstopping door deeltjes te voorkomen dan wel te beheersen. Allereerst worden de deeltjes die gemobiliseerd kunnen worden in de omgeving van het bronfilter zo veel mogelijk verwijderd tijdens de fase van het ontwikkelen van de bron. Het goed ontwikkelen van de bron is dan ook een belangrijk middel om de kans op bronverstopping door deeltjes te beperken (Timmer et al., 2000; Breedveld et al., 2007; Houben, 2015). Mocht er in de operationele fase toch bronverstopping door deeltjes gaan optreden in de onttrekkingsbron, dan kan worden overgegaan tot frequent schakelen. Dit is een beheersmaatregel die in de praktijk goed blijkt

te werken (zie Van Beek et al., 2007 en 2009). Ten opzichte van drinkwaterbronnen is hier het voordeel dat de pomprichting elk half jaar wordt omgekeerd. Bij het omkeren van de stromingsrichting worden eventueel gevormde deeltjesbruggetjes namelijk weer afgebroken (Van Beek et al., 2009). Indien nodig kan ervoor worden gekozen om tijdens een langdurige periode één kant oppompen (b.v. tijdens warmteopslag in de zomerperiode) regelmatig de pomp kort uit te zetten of zelfs even kort de andere kant op te pompen om de deeltjesbruggetjes weer af te breken. In hoeverre deze beheersmaatregelen bij ECW daadwerkelijk nodig zijn, moet blijken uit de praktijk.

2.3. Geohydrologisch en hydrochemisch vooronderzoek

Bij aanleg van nieuwe bronnen (zowel onttrekkingsbronnen ten behoeve van grondwater als OBES-bronnen) zijn altijd aanvullende veldmetingen noodzakelijk. Wanneer op een gegeven locatie nieuwe winningen worden aangelegd, ontbreekt vaak gedetailleerde informatie over de grondwaterdynamiek en -referentiesituatie, textuur van de bodem (o.a. korreldiameter, korrelverdeling), doorlaatvermogen van het watervoerend pakket, weerstand van scheidende lagen en de grondwaterwaterkwaliteit. In veel gevallen wordt er gekozen om vooraf proefboringen uit te voeren om een beter beeld te krijgen van de lithologie.

Hieronder worden methoden beschreven voor veldmetingen die gebruikt kunnen worden tijdens de ontwerpfase (filterstelling), en de gebruiksfase van bronnen (ontwerpdebiet).

Tabel 2-1. Methodes voor exploratie en monitoring van bronnen (uit KWR/PCD 13-2, 2019, aangepast voor OBES/HTO-bronnen)

Type onderzoek	Methode	Doel	Wanneer nuttig?		
			Ontwerp	Aanleg	Beheer
Geofysische metingen aan maaiveld	Seismiek	Bodemopbouw, breuken	+/-		
	Ground Penetrating Radar	Detectie van kabels en leidingen		+/-	
	Geo-elektrische oppervlaktemeting (VES)	Zoutgehalte, bodemopbouw, breuken	+/-		
	Airborne geofysica	Zoutgehalte, bodemopbouw (regionaal)	+/-		
Boormonsterprofiel		bodemopbouw, permeabiliteit	+	+	
Boormonsterfoto		bodemopbouw, afzettingsmilieu	+/-		
Boormonsteranalyse	Korrelgrootteverdeling doorlatendheidsproeven	Korrelgrootteverdeling Permeabiliteit	+/- +/-	+/-	
	Lithochemische samenstelling en schudproeven	Geochemie bodem	+	+	
Geofysische boorgatmetingen	Downhole-EGV	Zoutgehalte, bodemopbouw Detectie lekstromen HTO-bron en waarnemingsfilters	+/-	+/-	+/-
	Downhole-temperatuur				
Permanente geofysische metingen en sensoren	EGV en temperatuursensor	Monitoring temperatuuroorbraak en zoutconcentratie			+/-
	DTS-kabel		+/-	+/-	+/-

Type onderzoek	Methode	Doel	Wanneer nuttig?		
			Ontwerp	Aanleg	Beheer
Geohydrologisch veldonderzoek	stijghoogtemetingen	Doorlatendheidsbepaling grondwaterpakket, c-waarden	+		+
	bronproef			+	+
	pompproef	Beoordeling onttrekkings- en infiltratie capaciteit HTO-bron	+		
	filterflowmeting			+	+/-
	Filterflowmeting (rustsituatie)	Beoordeling integriteit HTO-bron en waarnemingsfilters	+/-		+/-
Hydrochemisch- en microbiologisch veldonderzoek	Waterkwaliteitsanalyse (steekmonsters)	Waterkwaliteit, injectiviteit van water, bepalen waterbehandelingsmethodes, zoutgehalte,	+	+	+
	Waterkwaliteitsanalyse bij schoonpompen	Detectie lekstromen HTO-bron en waarnemingsfilters			+/-
	MFI	Verstopingspotentie van infiltratiewater			+/-
(Kunstmatige) tracers	Temperatuur, zouten, isotopen, fluoriserende stoffen, kunstmatige zoetstoffen	Bepalen preferentiële stroombanen tijdens onttrekking/infiltratie. Detectie lekstromen HTO-bron en waarnemingsfilters			+/-
Inspectie van winmiddelen	Camera-inspectie	Status van HTO-bron			+/-
	Packertest	Detectie lekstromen HTO-bron en waarnemingsfilters			+/-

(+) = meting standaard uitvoeren; (+/-) = meting uitsluitend uitvoeren bij aanvullende vragen

2.4. Geothermiewinning

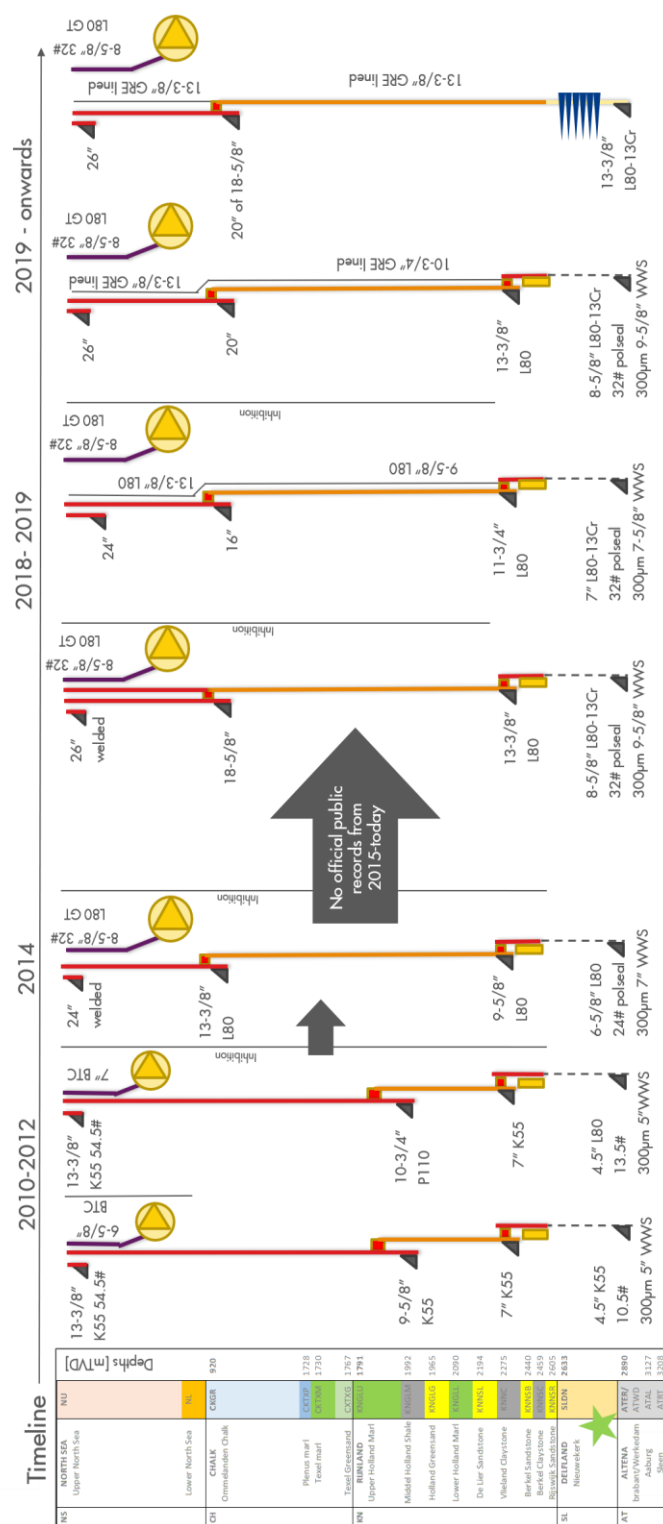
Bij diepere geothermie worden de ontwerpnormen voor open bodemenergiesystemen niet gebruikt. Dat komt onder meer doordat bij geothermie vaak gebruik wordt gemaakt van (semi-)geconsolideerde formaties, waardoor minder snel sprake is van mobilisatie van zanddeeltjes. Toch is zandlevering ook bij geothermie (evenals bij olie- en gaswinning) wel degelijk een risico (zie ook paragraaf 5.3) in verband met slijtage van componenten en erosie/corrosie van de casings. De belangrijkste aspecten bij het ontwerp van geothermie systemen zijn de economie en de veiligheid van het systeem. Voor de economie gaat het om de investerings- en exploitatiekosten (sterk gerelateerd aan de diepte en diameters van de bronnen en het energieverbruik van de pompen) in relatie tot de opbrengsten (debiet van het systeem, temperatuur van het geproduceerde en geïnjecteerde water, bedrijfsuren, tarieven afgezette warmte, subsidies). Bij de veiligheid kan onderscheid worden gemaakt tussen de

realisatiefase (b.v. het risico voor aanboren van ondiep gas) en de bedrijfsfase (b.v. het voorkomen van te hoge injectiedrukken, lekkage door corrosie en geïnduceerde seismiciteit).

Voor geothermiebronnen is de beoogde warmtevraag leidend om de beoogde broncapaciteit te bepalen. In de praktijk wordt dit voor de Nederlandse ondergrond berekend met de calculatietool DoubletCalc v1.4. DoubletCalc v1.4 is een door TNO beschikbaar gesteld programma waarmee een indicatief geothermisch vermogen van een toekomstig aardwarmtedoublet berekend kan worden. Berekeningen met DoubletCalc vormen de basis voor de bepaling van de overschrijdingskans-grafiek van het indicatief geothermisch vermogen in dat opgegeven moet worden in de Regeling SEI 'Risico's dekken voor aardwarmte'. De software is te downloaden op www.nlog.nl onder Aardwarmte. Dit document dient als handleiding en theoretische onderbouwing van de software.

Bij ondiepe geothermie is vaker sprake van on-geconsolideerde of zwak geconsolideerde lagen. Met ondiepe geothermie is echter nog maar weinig ervaring in Nederland. Wel is in het kader van de Kennisagenda Aardwarmte een studie uitgevoerd naar geothermie bronnen in ondiepe fijn-zandige formaties (IF Technology, 2019). Bij ondiepe geothermie wordt warm grondwater onttrokken uit veelal fijnzandige ongeconsolideerde reservoirs tussen de 300 en 1.250 m-mv met temperaturen tussen de 20 en 40 °C. Bronnen die produceren uit ongeconsolideerde fijnzandige formaties kunnen deeltjes (slib en fijn zand) vanuit de formatie mobiliseren. Door de toepassing van de juiste zandfilters kan productie van dit zand grotendeels worden voorkomen. Als er toch kleine deeltjes geproduceerd blijven worden kan dit leiden tot versnelde slijtage van de bovengrondse installatie en kan het specifiek debiet van de productiebron verminderen door vorming van een skin. Fijn-zandige formaties hebben in het algemeen een D50 (zandmediaan) die kleiner is dan 180 µm. Dit is aanzienlijk lager dan voor de grovere formaties op dieptes van 50 - 300 m-mv waarin win- en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater en OBES-bronnen doorgaans worden geplaatst.

Volgens deze studie, mede gebaseerd op ervaringen in de olie- en gasindustrie, kunnen op grotere dieptes hogere snelheden worden toegepast zonder dat daarbij (onacceptabele) zandlevering optreedt. Voor meer informatie hierover, wordt verwezen naar de voorgaande paragraaf.



Figuur 2-9. Architectuur van geothermiebron door de jaren heen

Tabel 2-2. Boorgat en casing diameters voor geothermiebronnen in Nederland

Jaar van realisering	Debiet	Diameter	Boormethode (uitvoerende partij)	Boren met telescopische constructie [inch]		
				1 ^{ste} deel	2 ^{de} deel	3 ^{de} deel
2010-2012	~200m ³ /hr	Boorgat	Zuigboring Haitjema	12,25	8,5	6
		Casing	13-3/8" Casing/conductor	9,63 - 10,75	7	4,5
>2012	~300m ³ /hr	Boorgat	N/A of zuigboring (Haitjema)	16	12,25	8,5
		Casing	24-26" conductor	13,39	9,63	6,63
>2018	~300m ³ /hr	Boorgat	N/A of zuigboring (Haitjema)	22, 24	16 - 17,5	12,25
		Casing	24, 26 of 30" conductor	18,63 - 20	13,38	8,63
>2018	~300m ³ /hr	Boorgat	N/A of zuigboring (Haitjema)	20	14,75	10,63
		Casing	24" conductor	16	11,75	7
>2018	~300m ³ /hr	Boorgat	N/A of zuigboring (Haitjema)	22, 24	16 of 17,5	
		Casing	24, 26 of 30" conductor	18,63 - 20	13,38	

2.4.1. Alternatieve aanlegmethodes voor geothermiebronnen

Naast verticale geothermiebronnen, kunnen geothermiebronnen ook op een alternatieve manier worden aangelegd. Men kan hierbij denken aan:

- Een gedeveierde of horizontale bron
- Een bron met radials
- Een multi-lateral bron

Om de productiviteit van een geothermiebron te verhogen in relatief ondoorlatend formatiemateriaal kan met ervoor kiezen om de bron hydraulisch te stimuleren. Een hydraulisch gestimuleerde bron wordt gecreëerd door het reservoir te fracken. Dit wordt veelal gedaan door een mengsel van water, zand/proppant en chemicaliën onder hoge druk in het boorgat te pompen, waardoor het gesteente breekt. Doordat het zand/proppant in de scheurtjes gaat zitten blijven deze open en wordt de productiviteit van de formatie rondom de bron verhoogd. Het productie-verbeterende effect van een frack wordt in een negatieve skin uitgedrukt.

2.4.1.1. Gedeveierde- en horizontale bron

Gedeveierde bronnen hebben een hellingshoek tot ca. 80° met de verticaal. Wanneer de hellingshoek groter is dan 80° wordt de bron als horizontaal beschouwd. Geothermische bronnen zijn vaak gedeveierd omdat dit over het algemeen een productiviteit-verbeterend effect heeft

2.4.1.2. Bron met radials

Dit is een techniek waarbij een waterstraal onder hoge druk gaten spuit in het gesteente. Deze gaten kunnen momenteel een lengte van maximaal 100 m bereiken. Vaak worden 4, 6 of 8 gaten radiaal in een horizontaal vlak gerealiseerd. Het effect van radials op de productiviteit kan, net zoals voor

fracks, worden omgezet in een negatieve skin (Peters et al., 2015). Voor de garantiefaciliteit moeten de bron of bronnen zowel vooraf als na het zetten van de radials afzonderlijk getest worden.

2.4.1.3. Multi-lateral bron

Een multi-lateral bron is een speciale bronconfiguratie waarbij er vanuit het moederboorgat één of meerdere boorgaten (laterals) geboord worden die de aquifer aantappen. Voor de garantiefaciliteit moeten zowel het moedergat als de laterals afzonderlijk getest worden. Het moedergat kan direct na het boren getest worden. Na het boren van de laterals is het mogelijk deze afzonderlijk te testen door een of meerdere packers te plaatsen. Indien bij de test van de lateral meerdere gaten openstaan, dienen zo mogelijk voorzieningen getroffen te worden teneinde skin en transmissiviteit van het nog niet geteste gat (lateral) eenduidig te kunnen bepalen.

2.5. Olie- en gaswinning

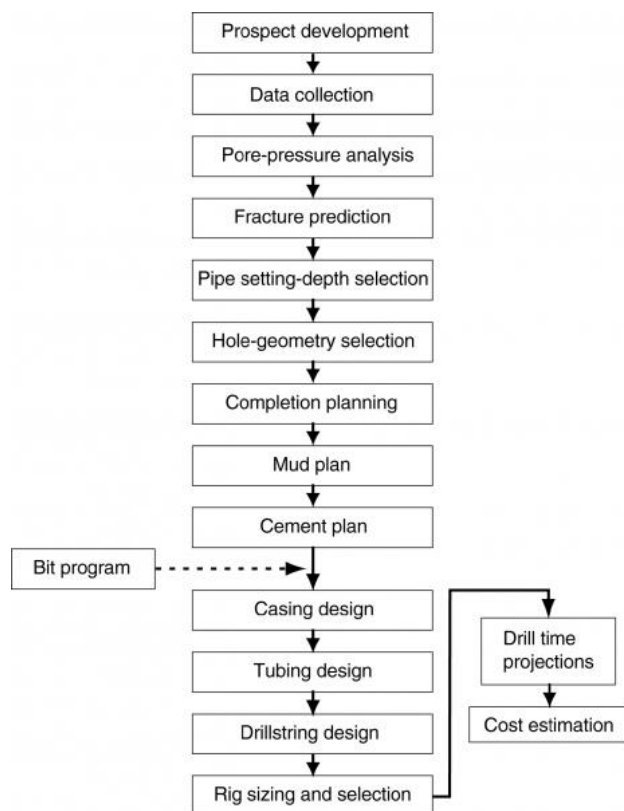
2.5.1. Well design of oil and gas wells

The proposal for drilling the well is prepared by the geologist, geophysics, and reservoir engineers in the operating company. The information typically consists of information such as the well objective, the depth and location of the reservoir target, the geological information, and the pore and fracture profile prediction. Upon the given information, the well planning is performed by the drilling team by formulating a drilling program that is safe, minimum cost, and usable to achieve the well objectives. The process of well planning requires the integration of engineering principles, the company philosophies, and experience factors.

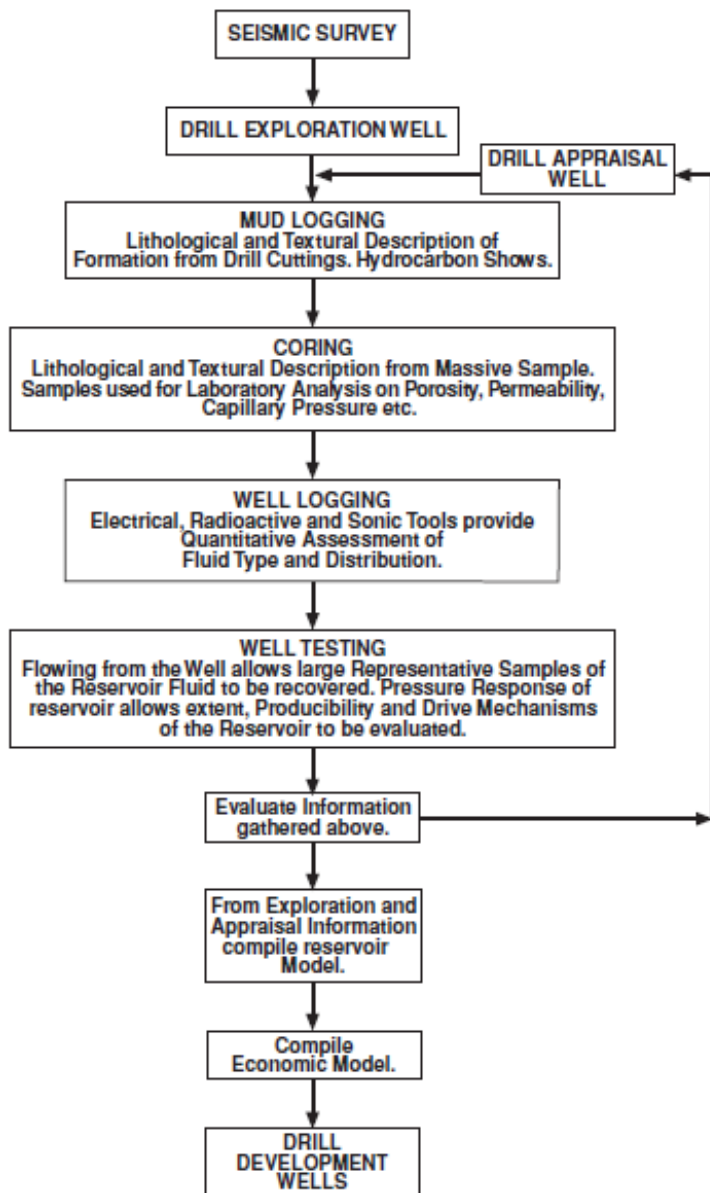
The drilling program contains the following information:

- Drilling rig types
- Drilling rig location
- Hole size and depths
- Casing size and depth
- Drilling fluids
- Directional drilling information
- Well control equipment
- Bits and hydraulics programs
- Drillstring design

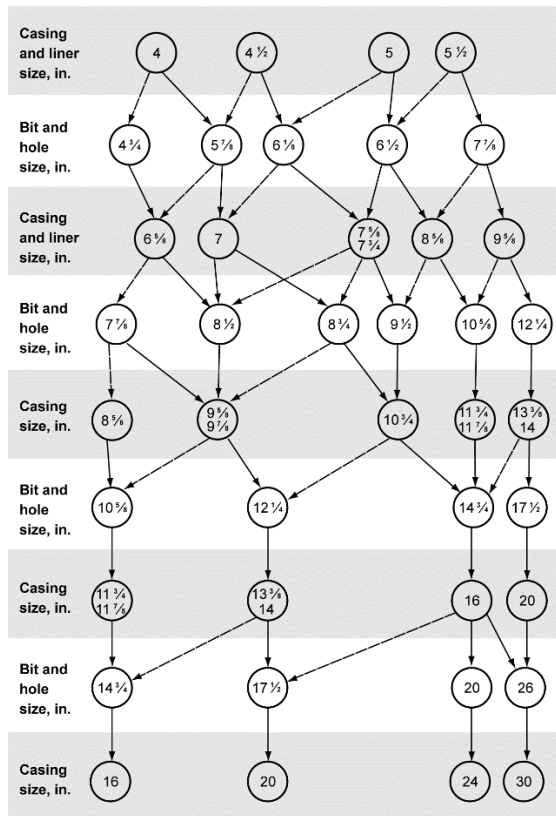
The process of planning on well design can be seen in Figuur 2-10. The process can be systematic because some aspects need to be planned before developing other items, though it may be altered for different types of wells. The well must be designed following the relevant standards applied by the local regulators (further discussed), and it also can be based on the drilling records of the offset wells, such as the exploration, appraisal, or other development wells, as indicated in Figuur 2-10.



Figuur 2-10. The systematic of the well design process (Adams, 2006)

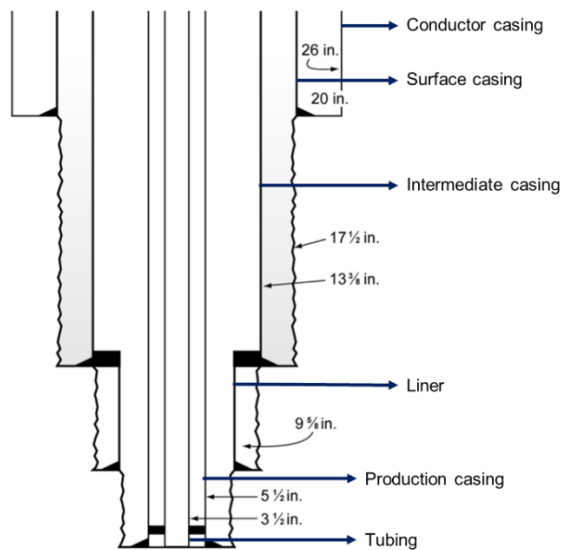


Figuur 2-11. Role of drilling activity in field development starting from the exploration phase (Heriot Watt University, 2005)



Figuur 2-12. Combination of hole and casing size for conventional wellbore (Adams, 2006)

The typical borehole design of conventional well has a similar geometry to an inverted telescope, with the hole and casing size decrease incrementally down the hole. The well is constructed by driving a conductor casing first, approximately 100 ft (30.5 m) below ground level to prevent the collapse of surface formation and to avoid disturbance of fresh groundwater resources. Afterward, the first hole section is drilled by a drilling bit with a diameter less than the inner diameter (ID) of conductor casing. Once the drilling bit reaches a certain depth, the drill string is pulled out and a casing, with an outer diameter (OD) less than bit diameter, is run into downhole and cemented. The process of drilling the hole, placing a casing, and cementing is repeated until the target depth is reached. The typical combination of the hole size and casing size can be seen in Figuur 2-13. The use of a telescope-casing is done to ensure well bore stability during drilling and to avoid reservoir fluids migration through the borehole annulus to the surface.



Figuur 2-13. Conventional wellbore design (Adams, 2006)

In certain cases, a liner is placed after the intermediate casing (Figuur 2-14). Liner is a type of string that can be tieback to the previous casing string, which is different from the casing that is run as a full string. The use of liner can be cost savings, but it must be weighed against additional risks and costs of a successful and leak-free tieback operation. The recent development of wellbore design is the slim wellbore, where the hole size of each section is smaller than that of the conventional well (Figuur 2-13).

2.5.1.1 Design standards

The technical acceptable solutions and operational requirements for different oil and gas development activities are documented as standard. Three typical categories of standards have been established as follows (OGP, 2010):

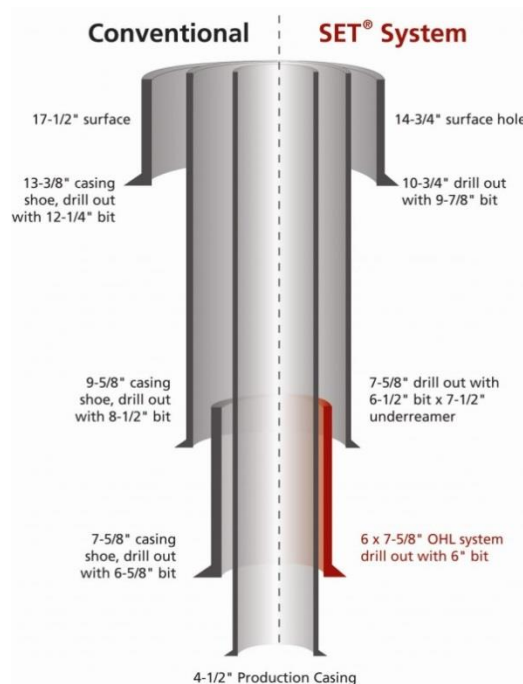
- International, such as International Organization for Standardization (ISO)² and International Electrotechnical Commission (IEC)
- Industry, such as American Petroleum Institute (API), American Society of Mechanical Engineers (ASME), Institute of Petroleum (IP), etc.
- National, such as European Committee for Standardization (CEN), Netherlands Standardization Institute (NEN), Norwegian Competitive Position on the Continental Shelf (NORSOK), British Standards (BS), Danish Standard (DS), etc.¹

In The Netherlands, the national regulator is State Supervision of Mines (SODM) who supervises on on- and offshore mining activities (oil, gas, salt exploration, and production and terrestrial heat and underground storage of substances i.e. CO₂). The OGP (2010) report states that SODM is referring to only four standards in their regulatory documents. This follows from the point of view that SODM prefers not to be prescriptive on the standards to be used, but rather stimulates

² Several national and industry standards have been transferred and developed into a package of international standards for global use, e.g. ISO/TC67 (<https://committee.iso.org/home/tc67>)

industry to develop their own standards. SODM then supervises the compliance towards these adopted standards.

1International Association of Oil & Gas Producers (IOGP) summarized the relevant standards and guidelines that address well construction and well operations (OGP, 2010)³. These documents provide the specifications and recommended practices, including calculation formulas, required for designing each well component (e.g. casing, drilling fluid). Several handbooks also provide the formulas for the drilling program, and often operating company owns and develops individual handbooks or manuals based on their experience and gathered information of drilling wells (Austin, 2012; Gabolde & Nguyen, 2006).



Figuur 2-14. Well design comparison of the conventional well and slim well (Enventure GT, 2017)

22.5.2. Productie optimalisatie

Binnen de olie en gas industrie is er veel ervaring met het ontwikkelen van intelligente bronnen. Door het controleren van onttrekking- of injectiezones in bronnen kan de productiviteit worden vergroot, en het doorbreken van gas of water worden vertraagd. Dergelijke gecontroleerde zones zijn interessant voor het verhogen van de efficiëntie van HTO. Omdat de warmtebel in een HTO-systeem zich aan de bovenkant van de filterbuis bevindt, is het wenselijk warmte te onttrekken aan de bovenkant, en te injecteren aan de onderkant van de bron.

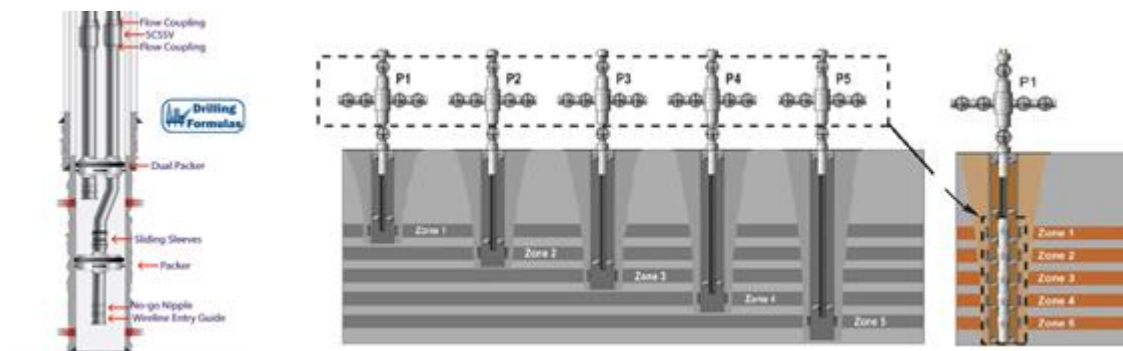
Dit fenomeen van onttrekking- en injectiezones vindt van nature al plaats in OBES; In het theoretische geval van twee zones in een bron ontstaat er bij warmteonttrekking een voorkeur voor de bovenste zone, die afhangt van de verhouding tussen de weerstand van het grondpakket en de weerstand over

³ <https://ge0mlib.ru/papers/Standards/485.pdf>

de stijgbuis tussen de twee zones. Verder zorgt de hogere snelheid langs de bovenste zone voor extra zuiging tijdens onttrekking. Dit effect werkt nadelig voor de bovenste zone bij injectie. Dit kan verschillen in onttrekkings-/injectiedebiet opleveren tussen beide zones van 5% a 10%, zie Bijlage A voor berekeningen. Het controleren van dit proces, en vergroten van het effect zou de efficiënte van HTO kunnen vergroten.

Het afwerken van een bron op een wijze die leidt tot controleerbare productiezones gebeurt binnen de olie en gas industrie op twee manieren. 1) *Meervoudig afgewerkte bronnen*: door het installeren van meerdere productiebuizen in een enkele bron kan er gelijktijdig in verschillende zones worden geproduceerd/geïnjecteerd (zie Figuur 2-15a) (drillingformulas.com). 2) *Annulaire isolatie methodes en technieken*: Door het toepassen van instroomregelsystemen en packers kunnen injectie-/onttrekkingszones onafhankelijk worden gecontroleerd in een enkele boorbron (zie Figuur 2-15) (Carvajal et al. 2018).

Meervoudig afgewerkte bronnen zijn duurder en gecompliceerder te installeren dan bronnen met een enkele productiebuis. Voor toepassingen in HTO kijken we daarom naar annulaire isolatie methodes en technieken.

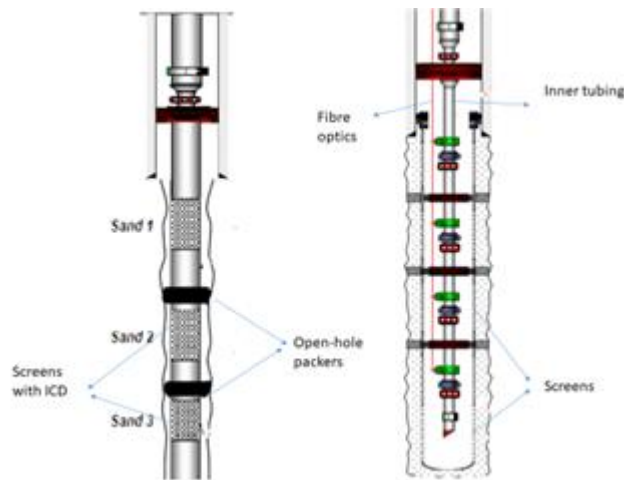


Figuur 2-15. Bronafwerkingen die leiden tot controleerbare onttrekkings-injectiezones. a) Meervoudig afgewerkte bron (drillingformulas.com), b) Intelligente bron waarbij er van onafhankelijke lagen kan worden geproduceerd uit een enkele bron (Carvajal et al. 2018)

2.5.2.1. Hoge Annulaire isolatiemethodes en technieken

Bij annulaire isolatie methodes worden packers gebruikt om geïsoleerde zones langs de bron te creëren (Figuur 2-16). Opblaasbare packers bestaan voornamelijk uit rubberen elementen, die in de bron uitzetten van een kleinere tot een grotere diameter om de bron te isoleren en af te sluiten. In de olie en gas industrie worden dergelijke opzwelbare packers ook ingezet om af te sluiten van ongewenste productievloeistoffen als water of gas. Opzwelbare packers bestaan dan uit elastomeren die opzwellen bij aanwezigheid van water en vloeistoffen op waterbasis. Door de productie uit ongewenste zones te elimineren kan de productiviteit van een bron worden geoptimaliseerd (Armenta et al. 2007).

De productie-instroom in de geïsoleerde zones wordt vervolgens gecontroleerd door instroomregelsystemen. In de olie- en gasindustrie worden momenteel twee hoofdtypen instroomregelsystemen gebruikt bij de afwerking van boorbronnen: instroomregelapparaten (passief) en intervalregelkleppen (actief), zie Figuur 2-16).



Figuur 2-16. ICD (links) en een ICV (rechts) met PT (druk en temperatuur regeling) (Haeberle et al. 2008)

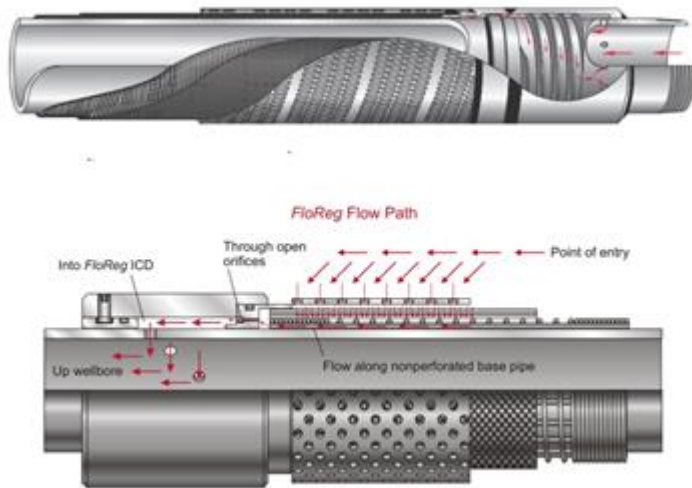
2.5.2.2. Hoge Instroomregelsystemen olie/gas industrie

Instroomregelapparaten

De meest gebruikte instroomregelsystemen in O&G zijn **passieve** instroom regelapparaten (Inflow Control Devices, ICDs) geïnstalleerd in zandschermen. ICDs zijn afwerkingsfilter die de vloeistofstroom van de annulaire ruimte naar de leiding beperken d.m.v. kanalen en/of spuitmonden/perforaties (Figuur 2-17 top) (Taha and Amani, 2019a). Op deze manier wordt er hydraulische weerstand toegepast om een drukval tussen de ondergrond en de bron te creëren, waardoor de drukvermindering op de ondergrond verandert (Figuur 2-17). De hydraulische weerstand wordt geselecteerd op basis van gegevens die zijn verkregen na het boren of d.m.v. opnames tijdens het boren en kan worden ingesteld door het selecteren van een bepaalde diameter van het mondstuk of de lengte en diameter van het buis / kanaalsysteem.

ICDs zijn een beproefde methode om de efficiëntie van bronnen te verbeteren. De gecreëerde drukdaling zorgt ervoor dat de productie uit de verschillende zones in evenwicht wordt gehouden en verbetert de algehele stabiliteit in de bron en het productieprofiel. Ze worden voornamelijk preventief en dan reactief ingezet om ongewenste productiedaling bij doorbraak van water/gas te voorkomen. Het grootste nadeel van dergelijke systemen is dat de instelling niet meer kan worden veranderd nadat de apparatuur in de bron is geïnstalleerd. In de praktijk veranderen de eigenschappen (viscositeit en dichtheid) van de onttrokken formatievloeistof over de tijd, terwijl de passieve ICD

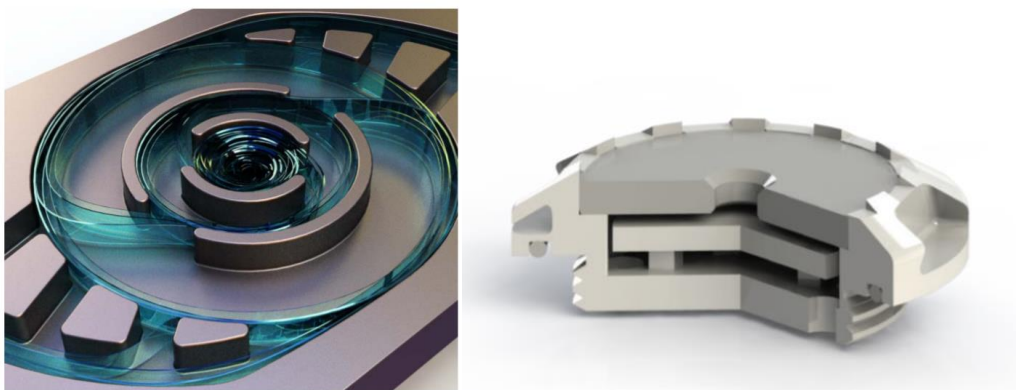
daarop niet kan worden aangepast. Hierdoor kan na verloop van tijd de efficiëntie van de bron achteruit gaan



Figuur 2-17. Schets van een ICD met kanalen (courtesy Baker Oil Tools (boven)), en een ICD met perforaties

Autonome instroomregelapparaten

Autonome instroomregelapparaten (Autonomous Inflow Control Devices, AICDs, Figuur 2-18) zijn zelfregulerende kleppen die de vloeistofstroom kunnen beperken zonder besturingslijnen, bewegende delen of mechanische/elektrische apparaten. De werking van AICDs is voornamelijk gebaseerd op de verschillen in dichtheid en viscositeit van de geproduceerde vloeistoffen (Taha and Amani, 2019a). Het beperkt de productie/injectie van een bepaalde vloeistof op basis van zijn eigenschappen. Door de relatief kleine verschillen in vloeistofeigenschappen bij de injectie-/onttrekkingstemperaturen van water is dit systeem niet toepasbaar als isolatiemethode in een HTO.



Figuur 2-18. Developments of AICD: (left) Equiflow® AICD with fluid diode principle (Halliburton, 2017) and (right) FloSure AICD with levitating disc (TENDEKA, 2018)

Intervalregelkleppen

Het tweede type instroomregelsystemen zijn **actieve** systemen met hydraulisch gestuurde kleppen (Interval control valves, ICVs) die op de productiebuisk, in de afwerking, of in de zandschermen

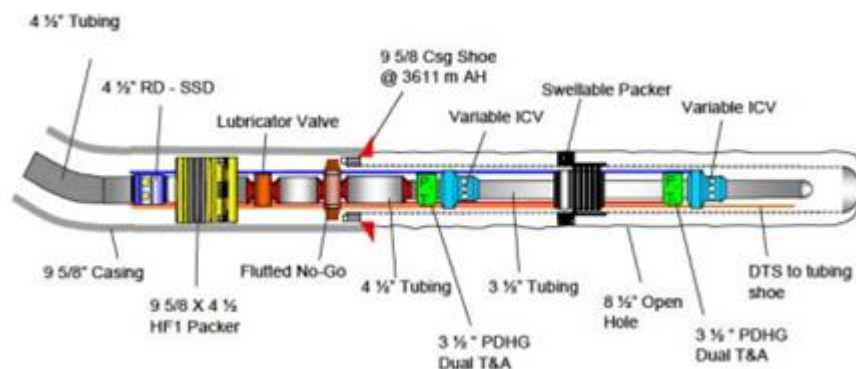
worden geïnstalleerd. De bron wordt met packers onderverdeeld in zones en d.m.v. regelkleppen kan de instroom in elke zone vanaf de oppervlakte worden geregeld, zie Figuur 2-19.

Een slimme bron maakt gebruik van ICVs in combinatie met packers, hydraulische en / of elektrische besturingslijnen en een besturingseenheid op het oppervlakte. De ICV maakt het mogelijk om verschillende zones te blokkeren of af te sluiten. De besturingslijnen worden gebruikt voor krachtoverdracht naar de ICV en overdracht van meetgegevens in het boorgat, zoals druk en temperatuur. De besturingseenheid wordt gebruikt voor het verwerken van alle meetgegevens en voor bediening op afstand van de ICVs in het boorgat.

Honderden olie- en gasbronnen over de hele wereld zijn al uitgerust met op afstand bedienbare ICVs van verschillende complexiteit en capaciteit die worden gebruikt om de instroom actief te controleren vanaf meerdere productiezones. Slimme bronnen zijn gewoonlijk uitgerust met druk- en temperatuurmeters bij elke ICV (Abdullah Taha, 2019).

De belangrijkste nadelen van dergelijke reactieve systemen zijn de hoge kosten van apparatuur en onderhoudswerkzaamheden tijdens installatie en bediening, beperkte daaldiepte en lage bedrijfszekerheid. Daarnaast vereisen ze continue monitoring en aanpassing van de klepstand om productie/injectie te optimaliseren.

In vergelijking tot de ICDs hebben ICVs vaak een grootschalige instroomcontrole. Bij ICDs kan er door middel van opzwellbare packers in de annulaire ruimte (in direct contact met zandschermen) een ongelimiteerd aantal zones worden aangebracht. Bij ICVs worden het aantal zones beperkt door gelimiteerde ruimte voor control lijnen.



Figuur 2-19. Voorbeeld van een ICV afwerking met zwelbare packers (Taha and Amani, 2019a)

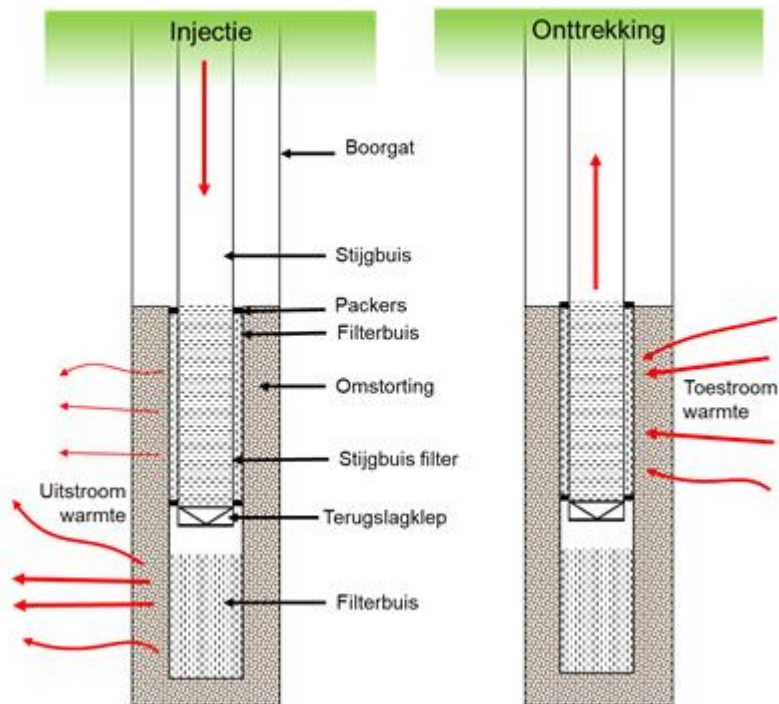
Gestratificeerd winnen met pijp-in-pijp systeem en terugslagklep

Een mogelijke toepassing in HTO die geïnspireerd is op ICDs is de installatie van een tweede filterbuis met een diameter van ongeveer 300 mm in de 500 mm filterbuis met onderaan een terugslagklep die alleen flow neerwaarts doorlaat met weinig weerstand (Figuur 2-20). Doordat het water bij injectie een dubbel filter moet passeren, en de weerstand over de terugslagklep klein is, zal er meer water in de onderste helft van de bron geïnjecteerd worden. Bij onttrekking sluit de terugslagklep en zal er uitsluitend uit de bovenste helft water onttrokken worden; zie Figuur 2-20. De flowverdeling in het pijp-in-pijp systeem met terugslagklep kan op de volgende manieren worden ingesteld:

1. Verhouding tussen de lengte van de onttrekkings- en injectiezone/ lengte van de binnenbuis
2. Filterweerstand van binnenbuis t.o.v. de 500 mm filterbuis

3. Met een gat in het kleplichaam van de DN300 terugslagklep kan nog een deelstroom uit de onderste helft onttrokken worden.

Na installatie in de bron kunnen de instellingen van het pijp-in-pijp systeem niet meer worden aangepast.

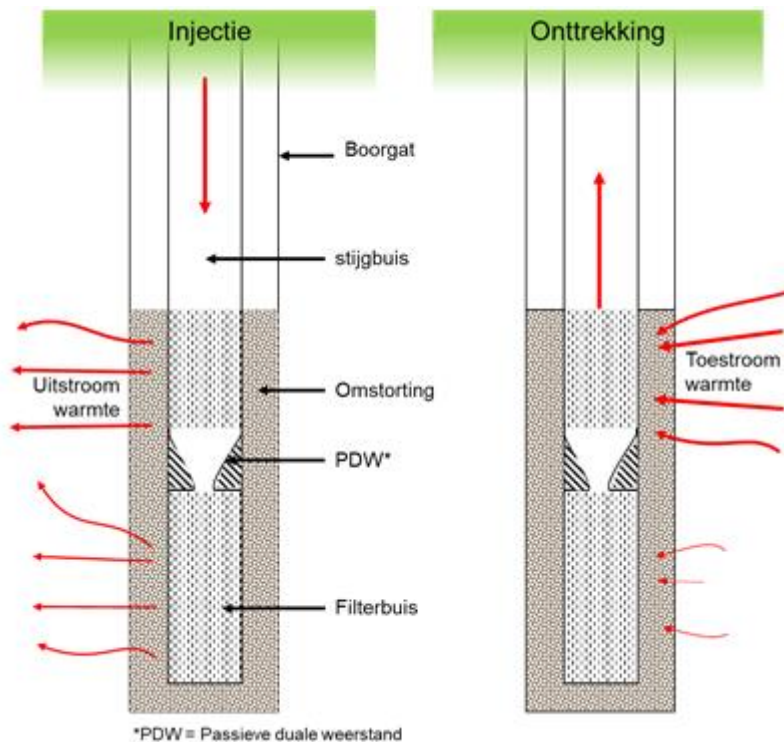


Figuur 2-20. Pijp-in-pijp systeem met terugslagklep (ontwerp Deltares)

Passief duale weerstand

Door het implementeren van een weerstand in vorm van een nozzle tussen twee zones in een HTO kan het effect van een onttrekkingszone (bovenkant) en injectiezone (onderkant) worden vergroot. Door een nozzle aan het eind van het bovenste deel van de filterbuis te monteren worden er vertragsverliezen gecreëerd, met als resultaat dat er bij onttrekking een grotere toestroom in het bovenste deel van de filterbuis plaatsvindt (zie Figuur 2-21 rechts). Tijdens injectie vinden er uitstroomverliezen plaats door de plotselinge verwijding naar het onderste deel van de filterbuis. Door het verloop van het nozzle zijn de uitstroomverliezen bij injectie veel kleiner dan de introomverliezen, en zal er ook injectie in het onderste deel van de filterbuis plaatsvinden.

De weerstandfactor die door de nozzle ontstaat is direct afhankelijk van de vorm en diameter van de nozzle en kan tijdens de ontwerpfase voor de bron bepaald worden om de verticale flowverdeling in de bron in te stellen. Evenals de ICDs en de terugslagklep kan een passief duale weerstand na installatie in de bron niet meer worden bijgesteld. Stel dat het nozzle doorlaatoppervlak de helft is van het doorlaatoppervlak van de filterbuis. Dan is de verliesfactor bij onttrekking ruim 4x zo groot als bij injectie.



Figuur 2-21. Passief duale weerstand (ontwerp Deltares)

2.5.3. Optimalisatie van bronplaatsing tijdens ontwerp in de olie en gasindustrie

2.5.3.1. Introductie

A HT-ATES system could involve the drilling and exploitation of a variable number of wells, ranging from a single well (alternating injection and production) to more than a dozen wells per system with a varying ratio of production and injection wells. In case the system is designed to comprise more than 1 wells it is important to consider the distance between the wells. This distance (and the number of wells) will be partly determined by surface and subsurface constraints, technical abilities and costs but should also be defined in such a way that overall performance of the system is optimized. This is also valid in the oil and gas industry where hydrocarbon fields are often produced by multiple wells. Much effort has been put in recent years in finding the optimal well placement in hydrocarbon production systems. The experience and lessons learned in the oil and gas industry could be applied to optimize multi-well HT-ATES systems.

The optimization of well placement can be solved by numerical modelling, which is subject of research in WINDOW-C2 work package. Because well design depends on this optimization, this is briefly discussed here, but the further optimization and assessment of the additional benefit of multiple wells is carried out in C2 work package.

Field development planning is the process of finding suitable placement and design of wells and other infrastructure to be used for the exploitation of a subsurface reservoir (Barros et al, in press). The search for a 'best' development plan can be formulated as a mathematical optimization problem that can be solved with the help of numerical methods. The application of ensemble based optimization

techniques to large-scale well rate and pressure control problems have been shown to produce useful results of practical value. These techniques are also valuable for other types of reservoir optimization problems including vertical well placement, well drilling scheduling and water-alternating-gas strategy optimization and may lead to improved development strategies (Hanea et al. 2019). Other authors give additional examples of the added value of using optimization techniques for the optimal performance of hydrocarbon fields. Ciaurri et al. (2012) demonstrate that a decision-making approach for the oil and gas industry leads to substantial improvement in field production. Application of robust multi-objective optimization to the Mariner asset, with optimization problems included drilling order and well trajectory, indicated that significant increases between 5% and 20% in the expected value of the objective function were achieved⁴. An example from geothermal industry illustrated the added value of model based geothermal field development optimization at the regional scale in a positive trade-off with economic performance of single assets⁵.

2.5.3.2. Well optimalisatie bij olie & gas bronnen

In the oil & gas industry, the optimization problems are ranging from production optimization to well placement optimization in order to maximize net present value (NPV) or cumulative oil recovered. For well placement optimization, the decision is difficult to make because the optimal placement depends on a large number of parameters. Moreover, the reservoir performance is influenced by non-linearly interacting parameters, which may change with time, and hence a professional judgment approach, in general, fails to predict the most optimum well configurations (Bouzarkouna, 2012). Appendix 1 gives an overview of the different algorithms that can be applied for well optimization.

Well placement optimization has also been used to inform the placement of geothermal wells, see for example Ansari et al. (2014), Kong et al. (2017) and Chen et al. (2015).

2.5.3.3. Uitdagingen bij bronontwerp optimalisatie in olie & gas reservoirs

As discussed in the previous section and in the appendix, different techniques have been used to tackle the well optimization problems. However, only few existing studies were comparing the algorithms on case studies representative of industrial problems; Bangerth et al. (2006) compared SPSSA, finite different gradient, very fast simulated annealing, Nelder-Mead simplex, and a genetic algorithm; Minton (2002) compared genetic algorithm, simulated annealing, PSO, and variants of the hill-climbing algorithm to define well location. These studies provided a comprehensive understanding of the behavior and performance of algorithms, thus the improvement and even development of new, novel algorithms could be directed.

Geological uncertainty is one of the uncertainties during the application of well optimization and represents a key outstanding challenge. It is because, in order to represent the high degree of uncertainty in reservoir geology, many realizations must be considered. If a large number of realizations are considered at every iteration of the optimization, it will lead to a large increase in the number of performed reservoir simulations, which can be costly and time-consuming.

In the context of geological uncertainty, we will denote f as the objective function to optimize, and a number $\mathcal{N}_r$ of geological realizations denoted by $(R_i)_{i=1,\dots,\mathcal{N}_r}$. We denote by $f(\mathbf{p}, R_i)$ the objective

⁴ Hanea et al. Robust Multi-Objective Field Development Optimization for the Mariner Asset, SPE-193883-MS, SPE Reservoir Simulation Conference

⁵ Kahrobaei et al. (2019). Regional Scale Geothermal Field Development Optimization under Geological Uncertainties. European Geothermal Congress 2019. Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019

function value on the well configuration $\mathbf{p}$ on the realization R_i . Thus, we want to find the parameter $\mathbf{p}_{\max,R} \in \mathbb{R}^n$ such that:

$$f^R(\mathbf{p}_{\max}, R) = \max_{\mathbf{p}} \{f^R(\mathbf{p})\}$$

where f^R is an averaged sum of the objective function evaluations on the well configuration $\mathbf{p}$ over all the realizations:

$$f^R(\mathbf{p}) = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} f(\mathbf{p}, R_i)$$

The main reference for expected NPV optimization is Van Essen et al., 2009. Several existing studies considered a number of N_R by formulating the expected value of NPV over all realizations (Schulze-riegert, Bagheri, Krosche, Kueck, & Ma, 2011), applying closed-loop production optimization using the optimizer EnOpt (Chen, Oliver, & Zhang, 2009), or by taking into account the decision maker's attitude toward risk (Alhuthali, Datta-Gupta, Yuen, & Fontanilla, 2010). However, due to the expensive computational effort in evaluating the objective function over one realization R_i , the function usually approximated in a way to use a fewer number of realizations, $N_s \leq N_R$. The approach can be by averaging, using retrospective optimization (Wang et al., 2012), or using the objective function evaluations of already simulated well configurations in the neighborhood of each well configuration (Bouzarkouna et al., 2012).

Lastly, a constraint optimization problem requires handling during well optimization process. Constraints are placed to ensure the physical feasibility of the solution wells to avoid wells that violate common engineering practices (Jesmani, Bellout, Hanea, & Foss, 2016). See also Leeuwenburgh et al. 2015.

2.5.3.4. Conclusie

Although there are clearly differences between hydrocarbon fields and HT-ATES systems, there are also many similarities. For example, many oil fields are produced by multiple production wells that are pressure supported by a number of injection wells which is in a way comparable to injection and production of water for heat storage. Temporary field shut-ins occur in oilfields as well, which is also the case in HT-ATES. It is therefore recommended to consider the application of the well optimization

It is therefore recommended to identify system design parameters and objectives that may typically appear in HT-ATES projects. This will provide the framework to evaluate whether it will be possible to formulate an optimization problem.

2.6. Discussie en samenvatting

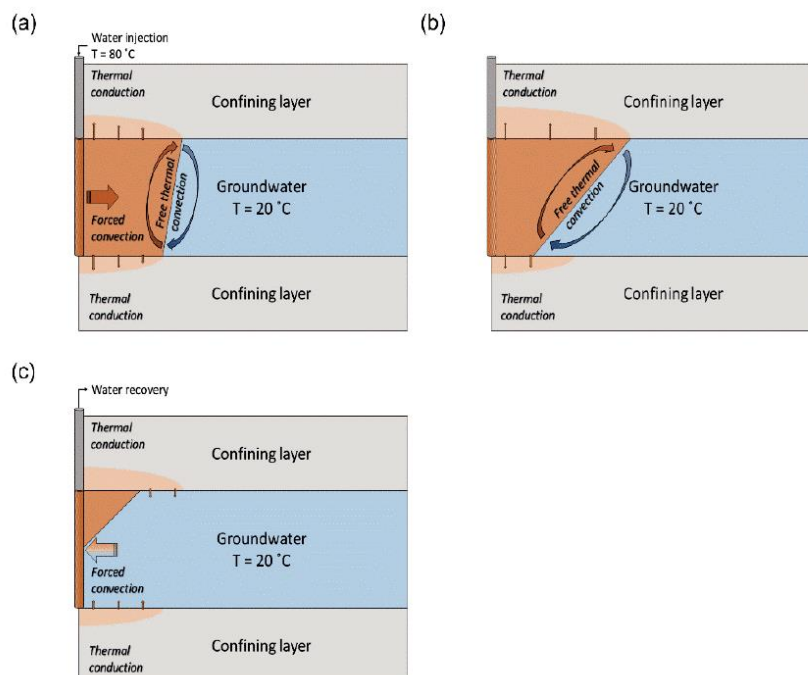
In dit hoofdstuk wordt er een korte analyse gegeven aan de hand van de beschikbare beschikbare literatuur betreft bronontwerp voor onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater, ondergrondse waterberging (*aquifer storage and recovery*, ASR), warmte-koude opslag (WKO), hoge temperatuur opslag systemen, geothermie-, olie- en gasbronnen. Daarnaast wordt er beschreven op welke punten er kennislacunes zijn om tot een zo optimaal mogelijk bronontwerp te komen voor de condities die gelden voor HTO-bronnen in Nederland.

2.6.1. Opdrijving tijdens HTO

Naast warmteverlies door thermische conductie naar het omringende grondwaterpakket en de scheidende lagen, is dichtheidsgedrevenstroming een belangrijke bepalende factor voor de

terugwinefficiëntie van een HTO-systeem (zie Figuur 2-22). Dichtheidsgedrevenstroming bij een groot temperatuurcontrast tussen infiltratie- en omringend grondwater kan resulteren in een dusdanig lage terugwinrendement dat het HTO-systeem bij een klein opslag volume niet rendabel is. Met name in doorlatende grondwaterpakketten en bij hoge temperatuurcontrasten moet men rekening houden met de opdrijvingscomponent. Wanneer het kantelen van het warmwaterfront dicht bij de bron plaats vindt heeft dat een grote invloed op het terugwinrendement. Kleinere opslagsystemen in doorlatende grondwaterpakketten zijn dus gevoelig voor veel warmteverlies door dichtheidsgedrevenstroming. Daar waar de verliezen door dichtheidsgedrevenstroming bepalend zijn voor de terugwinefficiëntie kunnen er mitigerende maatregelen en aanpassingen in het bronontwerp gemaakt worden om het effect van dichtheidsgedrevenstroming te minimaliseren. Ook wordt de invloed van dichtheidsstroming verkleind door de selectie van een bodempakket met de volgende eigenschappen:

- dunnere grondwaterpakketten,
- minder doorlatende grondwaterpakketten ,
- heterogenere grondwaterpakketten,
- bij grotere opslagvolumes,
- bij kleiner temperatuur verschil tussen de opslag met de achtergrondtemperatuur.



Figuur 2-22. Schematisch overzicht van een recovery-cyclus tijdens HTO (Van Lopik et al. 2020)

2.6.2. Het ontwerpdebiet

Voor het afwerken van HTO-bronnen in ongeconsolideerde ondergrond met annulaire isolatiemethodes en technieken is voldoende ruimte in de bron een vereiste. Gangbare boordiameters voor OBES variëren van 400 mm tot maximaal 800 mm. Omdat je een filter/bronnibuis nooit strak tegen een boorgatwand geïnstalleerd krijgt is een annulaire ruimte noodzakelijk. Deze annulus wordt conventioneel gevuld met filtergrind en kleikorrels om scheidende lagen aan te brengen. Wegens de minimale diameter van de storkoker is een minimale werkruimte (en dus annulaire ruimte rondom)

van 150 mm vereist om op grote diepte de omstorting op de juiste plek te krijgen. Bij een bron met een diameter van 800 mm blijft er dus ruimte over voor een 500 mm filterbuis.

In de praktijk wordt er voor onttrekkingsbronnen gewerkt met een maximaal toelaatbare stroomsnelheid op de boorgatwand. Te hoge stroomsnelheden op de boorgatwand en de filterspleten van een winput kunnen een negatieve invloed hebben. De criteria die daaraan ten grondslag liggen zijn in drie groepen te verdelen:

- het leveren van zandvrij water;
- het voorkomen van dichtslibben van de omgeving van de bron (mechanische verstopping);
- het voorkomen van (bio-)chemische verstopping.

In de praktijk wordt er zowel een onttrekkings-, als een infiltratienorm gehanteerd voor het ontwerpdebiet van win- en infiltratiebronnen op basis van de maximaal toelaatbare stroomsnelheden op de boorgatwand en de filterspleten van een onttrekkingsbron (Eq. 2.1-2.3, 2.5-2.9). Deze zijn doorgaans gebaseerd op het risico op zandlevering en het voorkomen van mechanische verstopping.

Uit Kiwa-laboratoriumonderzoek (Kobus et al. 1976) is gebleken dat bij een zorgvuldig aangebrachte omstorting van enkele mm dikte veel hogere stroomsnelheden mogelijk zijn alvorens deeltjestransport zal optreden dan worden berekend met de onttrekkingsnorm. Dat in de praktijk soms toch zandtransport plaatsvindt, heeft vermoedelijk te maken met onvolkomenheden bij het aanbrengen van de omstorting of met de aanwezigheid van fijnzandige tussenlagen. Uit een evaluatie van praktijkgegevens in 32 bronnen blijkt dat bij toepassing van zowel de NVOE onttrekkingsnorm als de formule van Huisman geen problemen optreden met zandlevering.

Voor OBES-bronnen worden momenteel de onttrekkingsnorm en de infiltratienorm NVOE (2006) gehanteerd. In Nederland worden de meeste OBES-bronnen geplaatst in matig tot zeer grofzandige watervoerende pakketten (<150 m-mv). Echter, voor HTO-systemen wordt er ook gekeken naar diepere, fijnzandige watervoerende pakketten. Het nadeel van deze fijnzandige aquifers is dat er volgens de huidige ontwerpnorm slechts een beperkt debiet kan worden onttrokken en geïnfilteerd. Bij een dergelijk debiet zijn de systemen economisch gezien moeilijk rendabel te maken.

Er zijn infiltratie en onttrekkingsnormen opgesteld voor HTO-systemen (IF, 2012) (zie § 2.2.2). Tot op heden is er weinig wetenschappelijke onderbouwing voor de ontwerpnormen om het maximale debiet tijdens onttrekking en infiltratie vast te stellen. Tot op heden is er geen directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering gevonden? (IF Technology, 2012).

Zoals boven vermeldt is er bij evaluatie van praktijkgegevens in 32 bronnen (IF, 2001) gebleken dat bij toepassing van zowel de NVOE onttrekkingsnorm als de formule van Huisman geen problemen optreden met zandlevering. Bij HTO moet er ook rekening worden gehouden met de thermische effecten en veranderde mechanische effecten in het grondwaterpakket.

Bij HTO hebben de thermische effecten invloed op de doorlatendheid. De viscositeit is lager als gevolg van een hogere temperatuur en om die reden kan je met hogere debieten onttrekken en infiltreren volgens de huidige ontwerpnormen (zie Eq. 2.5-2.9). Wanneer de temperatuur van het water hoger is zal dit resulteren in lagere viscositeit en hogere doorlatendheid. In de praktijk zal dit dus resulteren in een hogere snelheid op de boorgatwand. Echter, dient men ook rekening te houden met andere effecten. Zo is er een lagere doorlatendheid (positieve skin) rondom de bron mogelijk als gevolg van mogelijke mobilisatie van deeltjes (fijne fractie silica, kleideeltjes in bodemmateriaal) door verhoging van de stroomsnelheid:

- Deeltjes uit het watervoerende pakket zelf (diep bed filtratie is het grootste risico)
- Deeltjes uit natuurlijke kleien die het WVP omsluiten of die als kleilenzen zijn omsloten door het WVP
- Deeltjes uit aanvulklei die gebruikt worden om de bron te omstorten. (klein risico, omdat deze kleien slechts zeer beperkt worden aangestroomd)

De mechanische effecten bij de mobilisatie van deeltjes als gevolg van hogere debieten kunnen potentieel het risico op zandlevering en de mobilisatie van fijne deeltjes verhogen door de hogere toegestane debieten volgens de nieuwe ontwerpnormen (zie Eq 2.5). Er moet worden onderzocht of een hogere temperatuur in het watervoerende pakket resulteert in minder sleepkracht op de fijne fractie aan korrels in het bodemmateriaal als gevolg van een lagere viscositeit. In theorie zou dit minder zandlevering/minder mobilisatie van fijne deeltjes moeten opleveren en het risico van verstopping op de boorgatwand door deeltjes (diep bed filtratie) moeten verminderen. De vraag is tot op welk niveau dit daadwerkelijk opgaat. Het is dus zeer de vraag of de genoemde ontwerpnormen (Eq. 2.8 en 2.9) voor HTO opgaan. Door middel van geomechanische analyses, labtesten om het nagaan van zandlevering en diep-bedfiltratie na te gaan en praktijkproeven op een proefbron kan men nagaan of de huidige ontwerpnormen voldoen, of moeten worden aangepast.

Het is raadzaam om te kijken welke normen kunnen worden gehanteerd in fijnzandige pakketten bij hogere temperaturen.. Men zou aan de hand van labtesten kunnen kijken vanaf welke stroomsnelheden fijn bodemmateriaal wordt getransporteerd in het omstortingsmateriaal. Hierbij kan men rekening houden met het bodemmateriaal (doorlatendheid, porositeit, korrelgrootte en de korrelverdeling (de hoeveelheid fijner bodemmateriaal, mate van uniformiteit), de invloed van een veranderende viscositeit en de gekozen korreldiameter van het omstortingsmateriaal (zie §5).

Allereerst dient men rekening te houden dat de bodem heterogeen is en dat waardoor er in de praktijk er een variabele snelheid op de boorgatwand in de verticale richting over de het gehele filtertraject optreedt. Wanneer er relatief fijne zandlagen zijn, zullen deze limiterend zijn bij het bronontwerp.

Men kan gebruik maken van o.a. de methode van Shepherd en Kozeny-Carman om op basis van korrelgrootte een inschatting te maken van de doorlatendheid (zie ook IF, 2012). Volgens de methode van Kozeny-Carman is de doorlatendheid sterk afhankelijk van de porositeit. De porositeit is echter meestal niet bekend. Het verdient de aanbeveling om na te gaan of de porositeit vooraf kan worden ingeschat. Mogelijkheden zijn de methoden van Archie (op basis van EC-metingen en VES-metingen) of porositeit-diepte relaties.

Een ander belangrijk aspect dat van invloed is op het ontwerp van bronnen is de mate van sortering van het zand in de bodem. De sortering van het zand heeft een directe invloed op de mate van zandtransport in de bodem. De gemiddelde poriediameter is kleiner dan de gemiddelde korrelgrootte van het formatiemateriaal. Theoretisch gezien is zandtransport door een volledig homogeen zand daarom niet mogelijk en zijn in dat geval hoge ontwerpsnelheden toegestaan. Immers, geen van de korrels heeft een diameter die door de poriën past. Echter, in de praktijk is de samenstelling van natuurlijk bodemmateriaal heterogeen en kunnen de kleinere korrels door de poriestructuur van het bodemmateriaal getransporteerd worden. Hoe slechter de sortering, hoe groter het risico van zandtransport en dus op de zandlevering en mogelijke erosie/corrosie van de bron.

3. Boortechnieken

In de onderstaande paragrafen worden de gangbare boortechnieken voor het plaatsen onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater, OBES-bronnen en geothermie, olie- en gasbronnen toegelicht.

Boringen voor het plaatsen van onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater en OBES-bronnen worden uitsluitend met mechanische boortechnieken uitgevoerd. In het protocol van de beoordelingsrichtlijn BRL-SIKB 2101 Mechanisch Boren zijn de toegestane boortechnieken met een einddiepte tot maximaal 500 m-mv en een diameter kleiner dan 1,5 m beschreven. Bij dieptes groter dan 500 m-mv moet er worden voldaan aan de mijnbouwwet. In dit geval verleend het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat de vergunning en wordt het ministerie geadviseerd door de Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

Mechanisch boringen worden uitgevoerd met een verbuisd of een open (onverbuisd) boorgat. Een boorgat kan instorten wanneer er wordt geboord door ongeconsolideerd materiaal en de grond te weinig samenhangend is. Het instorten van de boorgatwand kan worden voorkomen door het toepassen van steunbuizen ('verbuisd boren'). Bij onverbuisde boortechnieken wordt de boorgatwand ondersteund met een vloeistofoverdruk.

Voorbeelden van verbuisde boortechnieken zijn pulsen, boren met holle avegaar, sonisch boren, lepelboren, boren met poliepgrijper, kernboren en counterflush boren. In de praktijk worden verbuisde boringen amper toegepast voor het plaatsen van win- infiltratiebronnen. Deze boringen komen niet in aanmerking, omdat enerzijds de boordiepte, en anderzijds de boordiameter niet toereikend is. Pulsboringen worden soms toegepast voor het plaatsen van kleinere bronnen op specifieke projectlocaties, zoals verstoppingsgevoelige gebieden, of wanneer er noodzaak is te boren met zo min mogelijk werkwater. Bij de aanleg van de strengen van radiaalbronnen wordt er gebruik gemaakt van gestuurde avegaarboringen die met een mantelbuis worden aangebracht om de stabiliteit van het boorgat te waarborgen.

Voorbeelden van onverbuisd boren zijn roterend zuigboren (+ luchtliften), roterend spoelboren, spuitboren en DTH-hamerboren. Roterend zuigboren (reverse-circulation rotary) en roterend spoelboren (straight-flush rotary) zijn twee manieren van roterend spoelboren. Daarbij wordt een beitel (boorbit) met behulp van een boorstang rondgedraaid. De beitel maakt de grond los en een snelstromende boerspoeling (werkwater of drilling mud) voert het boorgruis naar het maaiveld waar het in bakken bezinkt. Door de boerspoeling direct weer het boorgat in te pompen of onder vrij verval in laten lopen, ontstaat een ononderbroken vloeistofcirculatie.

In Tabel 3-1. Overzicht van verbuisde en onverbuisde boortechnieken in verschillende bodemtypes. is een overzicht gegeven van de mogelijke boortechnieken in zowel geconsolideerde als ongeconsolideerde bodem. In de onderstaande paragrafen worden de gangbare boortechnieken voor het plaatsen van HTO-bronnen toegelicht. Binnen het certificeringschema BRL- 2100 worden voornamelijk zuigboringen toegepast voor de aanleg van win-, infiltratie-, OBES. In enkele gevallen worden ondiepere bronnen geplaatst met een puls boring. Voor diepere boringen (>500 m-mv) die vallen binnen de mijnbouwwet, worden voornamelijk spoelboringen gebruikt voor het plaatsen van olie-, gas- of geothermiebronnen.

Tabel 3-1. Overzicht van verbuisde en onverbuisde boortechnieken in verschillende bodemtypes.

	Vast gesteente			Los gesteente			
	Kristalijn gesteente Stolling	Metamorf	Afzettingen Geconsolideerd	Ongeconsolideerd materiaal			
Verbuisde boortechniek				Klei	Leem	Zand	Grind
				Boren met polieprijper Lepelboren Pulsboren ² (Holle) avegaarboren Gestuurde avegaarborings ⁴ Sonisch boren			
				Counterflush			
	Kernboren						
Onverbuisde boortechniek				Spuitsboren ⁶ Onverbuisd avegaarboren			
				Zuigboren (met luchtliften) ¹			
				Spoelboren (straight flush rotary) ³ Horizontaal gestuurd boren (HDD) ^{4,5}			
	DTH-Hamerboren*						

1) Zuigboren (met luchtliften) wordt over het algemeen toegepast voor het plaatsen van win- infiltratie- en OBES-bronnen in Nederland.

2) Pulsboren wordt soms toegepast voor het plaatsen van onttrekkingsbronnen in Nederland (tot een diepte van maximaal 100 m-mv).

3) Straight-flush rotary is de meest gebruikte techniek voor het plaatsen van diepe olie-, gas, en geothermie bronnen.

4) Horizontale boortechnieken die ondiep worden toegepast voor de aanleg van onttrekkingsbronnen/drainen.

5) Horizontaal en diagonaal gestuurd boren wordt vaak gebruikt voor het plaatsen van diepe olie-, gas, en geothermie bronnen.

6) Valt niet binnen de certificeringsreikwijdte van BRL-2100, wanneer er scheidende lagen moeten worden doorboord.

3.1. Boortechnieken voor HTO in ondiepe, (semi-)ongeconsolideerde pakketten

3.1.1. Roterend zuigboren/ luchtliften

In Nederland is worden de meeste win-, infiltratie-, en OBES bronnen aangelegd met de zuigboormethode (al dan niet met het gebruik van luchtlift). Een zuigboring is een onverbuisde boortechniek. Bij een roterende zuigboring wordt de bodem losgewoeld met een boorbeitel. Het boorgruis wordt vervolgens door de holle boorstang omhoog getransporteerd naar een bezinkbak, waarna de boorspoeling weer via de mantelbuis en annulaire ruimte naar beneden stroomt (zie Fig.).

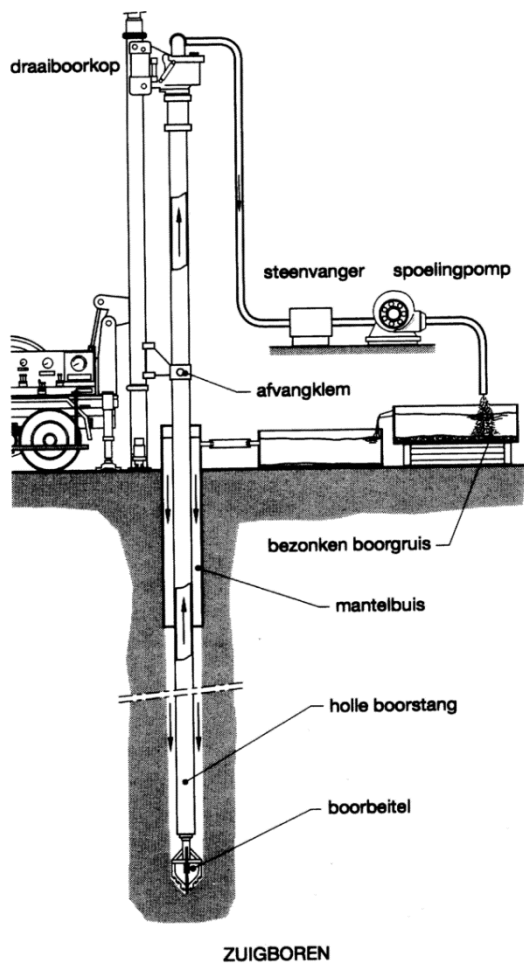
Na plaatsing van de mantelbuis in de grond wordt de boorstelling op zijn plaats gebracht. De mantelbuis heeft meestal een lengte van enkele meters en wordt geplaatst door middel van indrijven of droog voorboren tot aan de grondwaterspiegel. De mantelbuis wordt aangesloten op de hoog geplaatste overstort aan de eerste van een aantal in serie geplaatste spoelbakken die met water worden gevuld. De mantelbuis moet voorkomen dat de bovenste grondlagen wegspoelen. De mantelbuis steekt meestal ongeveer 1 m boven het maaiveld uit. Het peil van de boorspoeling in de mantelbuis moet boven het grondwaterpeil staan (in de praktijk minimaal 2 m (0,2 bar) hoger, zie

paragraaf 22.1). Is dit verschil te klein, dan kan de overdruk zo laag worden dat het boorgatwand instort. Het is dus van groot belang dat er steeds voldoende werkwater aanwezig is. Afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem is er tijdens het boren werkwater nodig van 5 à 150 m³/h (zie paragraaf 22.2). Ter vergelijking: pulsen vraagt slechts een paar m³ water per boring. Bij doorboringen van grovere zandlagen zal er relatief veel werkwaterverlies zijn. Een gedegen vooronderzoek van de lokale bodemomstandigheden is noodzakelijk om in te schatten wat het werkwaterverlies is tijdens het boren. Eventueel kan er worden gekozen voor een dikkere boorspoeling om het werkwaterverlies te reduceren, maar dit heeft als nadeel dat het bronfilter grondiger zal moeten worden ontwikkeld na oplevering.

Om de boorgatwand in stand te houden, is overdruk alleen niet altijd voldoende. Een zandlaag kan zeer poreus zijn of een kleiwand kan zwellen en inkalven. Het boorgat kan dan gemakkelijk instorten. Om dit gevaar te verkleinen, kunnen of moeten bepaalde stoffen aan de boorspoeling worden toegevoegd. De juiste samenstelling van de boorspoeling is erg belangrijk. Als die verkeerd is, kan het boorgat alsnog instorten.

De bezinkbakken (suppletiebakken) doen dienst als bezinkreservoir voor het boorgruis en als bufferreservoir voor de boorspoeling. In het algemeen staan de mantelbuis en de bezinkbak in open verbinding met elkaar. Ideaal is als al het boorgruis bezinkt. In de praktijk is dit bijna niet mogelijk. Klei en slib bezinken moeilijk en blijven voor een klein deel in het spoelingwater zweven. Bevat het omhoog gehaalde mengsel veel fijne materiaaldeeltjes dan kunnen cyclonen en schudzeven worden ingezet. Aan de straalbreker zit een spruitstuk (kraan) om een deel van het mengsel af te tappen voor het nemen van grondmonsters. Ook kan worden gekozen het water geheel te verversen op het moment dat de diepte wordt bereikt waarop de bronfilters worden geplaatst, waardoor het hele filtertraject met schoon water wordt geboord.

De boorstang moet regelmatig worden verlengd met een nieuw stuk. Vanwege de snelheid worden meestal schroefdraadverbindingen toegepast.



Figuur 3-1. Schematisch overzicht van het principe van de zuigboring (KWR PCD 13-3, 2019)

Wegens de beperkte zuighoogte van de zuigpomp neemt de boorproductie af naarmate het gat dieper wordt. Na ongeveer 50 m loont het nauwelijks meer om door te gaan. Voor diepere boorgaten wordt vaak al eerder overgegaan op luchtliften. Dat gebeurt met dezelfde boorinstallatie.

Bij luchtliften wordt de boorspoeling met boorgruis in de boorstang omhoog gebracht door er lucht aan toe te voegen. Lucht maakt het mengsel lichter waardoor de zwaardere kolom vloeistof in de annulaire ruimte de vloeistof in beweging brengt. Een continue luchttoevoer houdt de circulatie in stand. Luchtliften is een variant op roterend zuigboren waarbij de lucht als pomp werkt. De boorwagen is voorzien van een compressor en de boorstangen zijn uitgerust met luchtkanalen en luchtgaten (luchtkamers). Om te voorkomen dat de lucht aan de onderkant van de boorstang ontwijkt en/of dat de vloeistofcirculatie onregelmatig verloopt, moet eerst 20 à 30 m zuigboren plaatsvinden, voordat op luchtliften kan worden overgegaan. De lucht wordt in de boorstang geperst via een boorstang met luchtkamer (injectiepunt). Dat gebeurt tussen ongeveer 20 en ongeveer 60 m beneden maaiveld. Omdat tijdens het boren het injectiepunt steeds lager komt te zitten, zal de beschikbare persdruk op zeker moment ontoereikend zijn. Daarom wordt het injectiepunt telkens weer (na bijvoorbeeld 40 m boren) op ongeveer 20 m beneden maaiveld aangebracht. Voor het plaatsen van een nieuwe boorstang met luchtkamer moet de boorstang iedere keer 20 m worden uitgebouwd.

Ten opzichte van zuigboren (met zuigpomp) heeft luchtliften vooral de volgende voordelen: (i) het dieptebereik is veel groter (vele honderden meters), (ii) door de grotere stromingssnelheid is de boorproductie hoger (afhankelijk van grondsoort en boordiameter 20 à 100 m per dag) en (iii) de geroerde grondmonsters zijn beter. Om te zorgen dat de geroerde grondmonsters representatief blijven voor de boordiepte stelt de boormeester vast bij welke boorsnelheid, in relatie tot de boordiameter, dit zo nauwkeurig mogelijk wordt gerealiseerd. In de praktijk moet de boorsnelheid niet groter zijn dan 10 m/uur. De nauwkeurigheid van het boren en het kunnen herkennen van afwisselende lithologie (bijv. dunne kleilagen) is minder dan bij pulsen, maar beter dan bij spoelboren.

Voor de diverse grondsoorten zijn verschillende beitels ontwikkeld. Meestal wordt een gat geheel geboord met één en dezelfde boorbeitel, namelijk de vleugelboor die geschikt is voor kleilagen. Met deze beitel wordt de grond los gekrabbd en los geschraapt. Voor rotsachtig materiaal wordt de rotsboor (roller-bit) gebruikt, die voorzien is van getande rollers.

Meestal laat de wand van het boorgat wat grond los, die op de bodem van het gat terecht komt. Dit fenomeen wordt aangeduid als naval. De naval bedraagt vaak 2 à 3% van de diepte van het boorgat en kan enkele meters per dag bedragen. In verband hiermee wordt het boorgat meestal een paar meter dieper gemaakt dan nodig is.

Het grote voordeel van zuigboren en luchtliften is dat boorgaten met grote diameter tot grote diepte kunnen worden gemaakt. Dit maakt zuigboren een goede boortechniek voor de aanleg van HTO infiltratie- en onttrekkingsbronnen.

3.1.2. Stabiliteit boorgat tijdens boren

3.1.2.1. Werkwater

Tijdens het zuigboren is 5 à 150 m³/uur werkwater nodig. Het werkwatervolume dat nodig is hangt af van de doorlatendheid van het grondwaterpakket, de samenstelling van de boorspoeling, en de overdruk ten opzichte van het grondwaterpakket die er gehanteerd wordt tijdens de boring. De hoeveelheid werkwater tijdens zuigboren is aanzienlijk meer dan tijdens pulsen, waar slechts een paar m³ werkwater per boring nodig is. Gedurende de boorwerkzaamheden moet volledig worden vertrouwd op de beschikbaarheid van werkwater, aangezien een kleine verstoring van het boorproces al kan leiden tot het instorten van het boorgat. Daarom is het raadzaam een dubbele werkwatervoorziening aan te brengen, zodat bij uitval van de reguliere watervoorziening een noodvoorziening kan worden ingezet. Zo kan bijvoorbeeld een bronnering van twee pompen worden voorzien.

Om zo schoon mogelijk werkwater te garanderen tijdens de aanleg van OBES of HTO bronnen kan men het werkwater aanleveren met:

- Een bronnering;
- Leidingwater (m.b.v een standpijp)
- Aanvoer met tankwagen(s).

In geen geval mag oppervlaktewater of ondiep grondwater met significant andere grondwaterkwaliteit als werkwater worden gebruikt.

In de praktijk is de uiteindelijke keuze afhankelijk van zowel de gewenste, of verplicht gestelde kwaliteit van het te gebruiken werkwater, als de beschikbaarheid van de genoemde bronnen voor werkwater op de locatie van de boring.

Het gebruik van werkwater mag niet tot verontreiniging van bodem en grondwater (zie [Protocol 2101](#) van de beoordelingsrichtlijn [BRL SIKB 2100](#)). Bij het boren van waarnemingsbronnen op grote afstand van bestaande waterbronnen kan eventueel gebruik worden gemaakt van bronneringswater. In dit geval moet vooraf worden bepaald of het water aan de gestelde eisen van de beoordelingsrichtlijn [BRL SIKB 2100](#) voldoet. wenselijk. Als er geen andere keuze is dan moet ook dat water aan de gestelde eisen voldoen.

Als er geen werkwater aanwezig is op de gekozen boorlocatie aanwezig of mogelijk is, dan is aanvoer met behulp van een tankwagen de enige oplossing om de boring te kunnen uitvoeren. Voordeel is dat kan worden beschikt over de gewenste waterkwaliteit. Van de genoemde bronnen is deze optie de meest kostbare.

Werkwaterbron

Schoon werkwater kan worden onttrokken door middel van een aan te leggen werkwaterbron, of een aanwezige bron op de boorlocatie. Om de gebruikte hoeveelheid werkwater bij te houden, kan er aan het eind van de verzamelleiding van de werkwaterbron een watermeter worden gemonteerd.

Zoals boven vermeldt, moet het werkwater uit een bronnering voldoen aan bepaalde eisen om verontreiniging van bodem en grondwater te voorkomen (zie [Protocol 2101](#) van de beoordelingsrichtlijn [BRL SIKB 2100](#)). Hierin staat dat het boorbedrijf verplicht is aan te tonen dat het grondwater, afkomstig van een tijdelijke of bestaande onttrekkingsbron; *geen van de stoffen uit het pakket 'grondwater' van de NEN 5740, aangevuld met de stoffen waarvan bekend is dat deze door niet-natuurlijke oorzaken in verhoogde concentraties voorkomen in het grondwater van het gebied waarin de boring wordt uitgevoerd, is aangetroffen in concentraties hoger dan de streefwaarde voor grondwater uit de Circulaire bodemsanering, of, indien van toepassing, in concentraties hoger dan de in het betreffende gebied voor de betreffende stof vastgestelde achtergrondwaarde.* Wanneer er in de afgelopen 5 jaar geen analyse is uitgevoerd op het grondwater van de desbetreffende locatie (watervoerende pakket waar de bronnering is aangebracht), is het boorbedrijf is verplicht om monsters uit de bestaande of tijdelijke onttrekkingsbron te nemen en de benodigde analyses te laten uitvoeren.

Wanneer de bronnering voor werkwater buiten gebruik is moet deze op de juiste wijze worden afgedicht om te voorkomen dat er kortsluitstroming kan optreden tussen watervoerende pakketten (beoordelingsrichtlijn [BRL SIKB 2100](#)).

Leidingwater

Indien het werkwater wordt betrokken van een leidingnet, dan wordt idealiter, na overleg en goedkeuring van het drinkwaterbedrijf, gebruik gemaakt van water uit de dichtstbijzijnde op de boorlocatie gelegen brandkraan. Op deze brandkraan kan een standpijp worden gemonteerd (ook wel opzetstuk genoemd) van waaruit het water met brandslangen naar het boorgat wordt getransporteerd. In deze gevallen moet er worden voldaan aan het bouwbesluit.

Aanvoer met tankwagen(s)

Om ook in dit geval de aanwezigheid van werkwater te waarborgen, is het raadzaam om minimaal twee tankwagens in te zetten. Op deze manier zal er steeds minimaal één tankwagen op de boorlocatie stand-by zijn. Daarnaast kan men ook gebruik maken van een bufferbak, die gedurende het gehele boorproces tijdig wordt aangevuld door één tankwagen.

3.1.2.2. Stabiliteit en benodigde overdruk in het boorgat

De stabiliteit van het boorgat is van groot belang tijdens het boren, het plaatsen van het filter en de afwerking van het boorgat. Meestal levert de stabiliteit van boorgaten geen problemen. Er zijn echter

situaties waarin er kans op instabiliteit bestaat. Wordt het boorgat tijdens het boren of het inbouwen van de bron instabiel, dan bestaat er kans dat het boorgat instort waardoor het project niet meer volgens plan kan worden uitgevoerd.

Het instorten van het boorgat kan leiden tot aanzienlijke vertraging en significant hogere kosten. Bij het instorten van een boorgat waarbij geen kleilaag is doorboord hoeft dit geen ernstige gevolgen te hebben. Instorten gebeurt in de praktijk juist vaak op grotere diepten, waarbij in de praktijk vaak kleilagen zijn doorboord. Vaak is het mogelijk de boorstangen en de boorbeitel omhoog te halen wanneer een boorgat (deels) ingestort is. Lukt dit echter niet, dan moeten deze in de bodem achter worden gelaten, of moet men eromheen boren om het boormateriaal omhoog te krijgen. Voor de waterhuishouding in de bodem zijn de gevolgen vaak veel ernstiger. Als er kleilagen moeten worden hersteld dan zal men voor deze laatste optie moeten kiezen. Wanneer de scheidende kleilagen zijn doorboord en niet netjes kunnen worden afgedicht door het instorten van het boorgat, zijn de watervoerende pakketten tussen de kleilagen met elkaar verbonden. Hierdoor kan er via dit boorgat kortsluitstroming ontstaan tussen de verschillende watervoerende pakketten. Eventuele verontreinigingen kunnen in lagen doordringen van waaruit ook water wordt opgepompt ten behoeve van de bereiding van drinkwater. Ook kan spanningswater uit lager gelegen lagen naar hoger gelegen lagen afvloeien, met alle gevolgen van dien. De kleilagen kunnen uitsluitend worden hersteld door het ingestorte gat weer open te boren.

Om het boorgat in stand te houden, is overdruk nodig. In theorie is het mogelijk om de benodigde overdruk te berekenen met grondmechanische berekeningen. In de praktijk zijn deze berekeningen zeer complex omdat ook rekening moet worden gehouden met de boogspanning en het ontstaan van glijvlakken door heterogeniteit van de bodem op centimeterschaal rondom het boorgat. In de praktijk wordt in Nederland daarom met een vuistregel gewerkt dat, er een overdruk nodig is van 0,2 bar om het boorgat open te houden. Dit komt meestal neer op 2 m boven grondwaterstand. Echter, voordat er geboord wordt moet de boormeester een inschatting maken of er factoren spelen die invloed hebben op de stabiliteit van het boorgat:

- Controleer of de stijghoogte in de te doorboren grondwaterpakketten hoger is dan de freatische grondwaterstand (bijvoorbeeld spanningswater; kwelsituatie). Het waterniveau in het boorgat dient ten minste 2 meter hoger te zijn om voldoende overdruk in het boorgat te behouden.
- Het voornemen om de boorspoeling met de daarin zwevende deeltjes te vervangen door reinwater of drinkwater om verstopping van de boorgatwand te voorkomen. Omdat hierdoor de dichtheid van de boorspoeling afneemt, neemt ook de overdruk van het water in het boorgat af;
- Doorboring van kleilagen, zoals een weinig geconsolideerde kleilaag bij een situatie met weinig overdruk, of zeer compacte potklei met een verhoogd risico op afbrokkelen en bijbehorende naval in het boorgat.
- Verhoogde dichtheid van brak/zout grondwater.
- Er zijn verschillende manieren om de stabiliteit van een boorgat te verhogen:
- Het verhogen van het waterniveau in het boorgat dat verhoogd kan worden door de mantelbuis te verlengen én de boorinstallatie omhoog te brengen
- De dichtheid (soortelijke massa) van de boorspoeling. Deze dichtheid kan worden verhoogd door verzwaringsmiddelen aan de boorspoeling toe te voegen, maar dat doen we alleen als het echt niet anders kan
- De stijghoogten van het grondwater in de watervoerende pakketten tijdens de boring.
- Verhoogde dichtheid van brak/zout grondwater.

3.2.2.3. Verhoogd opstellen

In de praktijk kan blijken dat er een hoger waterniveau in de mantelbuis nodig is om het boorgat stabiel te houden. Dit vergt een verhoogde opstelling van de boorinstallatie. Wanneer er een hogere overdruk in het boorgat wordt gehanteerd, zal dit leiden tot een grotere waterbehoefte.

Een andere mogelijkheid is het verhogen van de dichtheid van de boorspoeling door toevoeging van additieven. In de praktijk wordt er voor het boren van onttrekkingsbronnen vaak gekozen om te boren met schoon werkwater (reinwater of drinkwater) om verstopping van de boorgatwand te voorkomen. Om de boorgatstabiliteit te waarborgen wordt er in de meeste gevallen geopteerd om verhoogd opstellen.



Figuur 3-2. Voorbeeld van een verhoogde opstelling van de boorinstallatie en de mantelbuis tijdens een zuigboring.

3.1.3. Boorspoeling

Bij roterend zuigboren moet de boorgatwand tijdens het boren en filterstellen in stand worden gehouden. Enerzijds wordt dit bereikt door het creëren van een overdruk van boorspoeling in het boorgat, anderzijds zal de boorgatwand enigszins worden afgepleisterd met natuurlijk materiaal (zand of klei uit doorboorde lagen) al dan niet in combinatie met kunstmatige additieven. De indringing van deeltjes in het bodempakket rondom de boorgatwand dient zo klein mogelijk te zijn, zodat de deeltjes kunnen worden verwijderd tijdens het ontwikkelen van de bron. De mate van afpleistering en indringing tijdens het boor- en afwerkingsproces van de bron wordt onder meer bepaald door de

doorlatendheid van de doorboorde laag, het type boorspoeling en de tijdspanne waarin het boorgat open staat. Als de deeltjes niet snel worden verwijderd, kan dit leiden tot een initiële skinlaag bij aanleg en daaropvolgende versnelling van het verstoppingsproces van de bron.

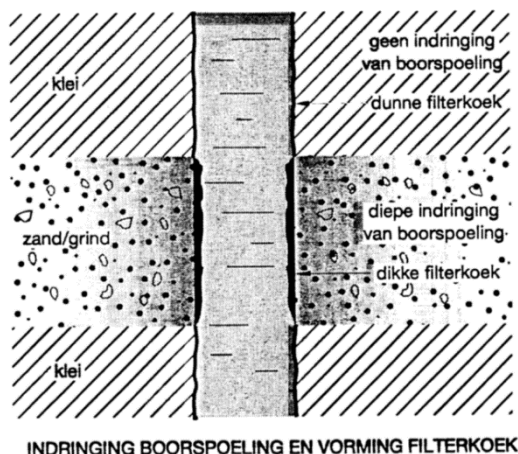
3.1.3.1. Functies en type boorspoeling

Onder een boorspoeling wordt zowel het werkwater, als het natuurlijk spoelingsmateriaal (zand of kleideeltjes uit de doorboorde lagen) in het werkwater, en de boorspoelingsadditieven verstaan. De functies van de boorspoeling zijn:

- Boorgruis uit boorgat verwijderen (zo nodig de viscositeit verhogen om dragend vermogen te verhogen);
- Uitoefenen van voldoende tegendruk op de boorgatwand om naval en het instorten van de boorgatwand te voorkomen.
- Boorgatwand afpleisteren om verlies van boorspoeling te beperken;
- Zwellen van doorboorde kleilagen verhinderen;
- Beitel schoonhouden;
- Beitel koelen en smeren (uitsluitend bij roller-bits; deze worden zo nodig gebruikt in de verharde formaties in Zuid-Limburg en het oosten van Nederland).

Als de samenstelling en doorlatendheid van de te doorboren formatie en de heersende stijghoogte in de watervoerende lagen dat toelaten, kan worden volstaan met een boorspoeling zonder toevoegingen (de zogenaamde natuurlijke boorspoeling). Natuurlijke boorspoeling bestaat uit werkwater met zwevende deeltjes en natuurlijke kleideeltjes uit het opgeboorde boorgruis, die geen gelegenheid hebben gekregen in de bezinkbakken te bezinken. In veel gevallen voldoet natuurlijke boorspoeling om de boring naar wens uit te voeren.

Bij het doorboren van grofkorrelige watervoerende lagen en/of een watervoerend pakket kan een natuurlijke boorspoeling onvoldoende zijn om het waterverlies te beperken en/of het boorgat in stand te houden. In die gevallen moeten boorspoelingsadditieven worden toegepast. Hiermee worden de gewenste eigenschappen van de boorspoeling verbeterd. Het gebruik van boorspoelingsadditieven werkt kostenverhogend. Het leidt er in de praktijk ook vaak toe dat de afpleistering van de boorgatwand slecht kan worden verwijderd tijdens bronontwikkeling, waardoor in het ergste geval de broncapaciteit lager uit kan vallen dan gewenst. Door de initiële indringing van natuurlijke boorspoelingsresten (fijne zand- en kleideeltjes) in de formatie kan, voordat de boorgatwand is afgepleisterd, kan de doorlatendheid van de aanliggende formatie ook afnemen (zie Figuur 3-3). Een hogere viscositeit van de boorspoeling kan deze indringingsdiepte verlagen. Bovendien wordt de kans op bacteriegroei vergroot bij toepassing van een biologisch afbreekbaar additief.



Figuur 3-3 Indringing van boorspoeling en vorming van filterkoek (drillingformulas.com).

In Tabel 3-2 zijn de gangbare spoelingsadditieven bij het boren van onttrekkingsbronnen en hun functies op een rij gezet. Deze worden in de navolgende subparagrafen toegelicht.

Tabel 3-2 Boorspoelingsadditieven en hun functies.

Boorspoelingsadditief	Functie
PAC (organisch) CMC (organisch) Bentoniet (anorganisch)	verdikking en beperking vloeistofverlies klei- en zandlagen
Xanthaan Soda ash, natronloog (anorganisch)	verdikking en beperking vloeistofverlies zandlagen; wordt niet meer gebruikt bij boringen van bronnen voor drinkwater
mica, walnootschillen, houtsnippers, cellofaansnippers	verdikking en beperking vloeistofverlies zandlagen verdikking en beperking vloeistofverlies zandlagen, basisch houden boorspoeling Beperken waterverlies in lagen met grof bodemmateriaal (grind)

PAC (polyanionic cellulose)

Het product met de handelsnaam Antisol (een gemodificeerd zetmeelproduct) is de bekendste PAC-component. Het product is gemodificeerd om de stof de gewenste eigenschappen te geven, zodat het product in wateroplosbaar is en de viscositeit van de boorspoeling wordt verhoogd.

PAC-producten zijn relatief eenvoudig in het gebruik, want er zijn maar kleine hoeveelheden nodig. De benodigde hoeveelheid is afhankelijk van factoren als grofheid van de formatie, diepte van het boorgat, boorgatdiameter, beschikbaarheid van hoeveelheid werkwater en kans op naval van klei in het boorgat.

PAC-componenten dienen in beperkte concentraties en hoeveelheden te worden gebruikt. In de praktijk wordt doorgaans gewerkt met concentraties tot $0,3 \text{ kg/m}^3$, met uitschieters tot $1,0 \text{ kg/m}^3$. Om een idee te krijgen van de vereiste hoeveelheden moet eerder worden gedacht aan enkele tientallen kilogrammen dan aan enkele honderden kilogrammen per boring. Bij hogere concentraties neemt de kans toe dat de spoelingsadditieven niet meer volledig kunnen worden verwijderd.

PAC-producten zijn biologisch afbreekbaar. PAC is een bron voor bacteriegroei. Volgens onderzoek is PAC niet toxisch [S. Bloemendaal en J. Griffioen⁶].

CMC (natrium-carboxymethylcellulose)

CMC heeft ongeveer dezelfde structuur als zetmeel. Cellulose zelf is niet in water oplosbaar, maar door verbindingen aan te gaan met carboxy- en methylgroepen krijgt het die eigenschap. Aanhechting van een natriumatoom maakt de stof nog beter oplosbaar. Evenals PAC is CMC biologisch afbreekbaar, wat ook CMC bestempelt als mogelijke bron van bacteriegroei. Volgens het bij PAC aangehaalde onderzoek kan Na-CMC toxisch zijn. Daarom wordt CMC **niet** meer gebruikt bij boringen van bronnen voor drinkwater.

Bentoniet

Bentoniet is een kleisoort afkomstig van verweerde vulkanische assen. Het voornaamste mineraal daarin is montmorilloniet dat een specifieke plaatstructuur heeft. Door die structuur heeft het mineraal de neiging watermoleculen te absorberen. Deze absorptie veroorzaakt zwelling van het bentonietpoeder. De mate van zwelcapaciteit van het bentonietpoeder, hangt af van de samenstelling van het bentoniet en het zoutgehalte van de vloeistof.. De zwelcapaciteit neemt af met toenemend zoutgehalte. Over het algemeen kan er met bentoniet een goede afpleistering op de boorgatwand worden gerealiseerd om zo een stabiel boorgat te genereren en het verlies van boorspoeling te beperken tijdens de boring. Organisch materiaal in doorboorde kleilagen kan door absorptie van water opzwellen, waardoor klei naar buiten wordt gedrukt (naval van klei). Dit kan worden beperkt door dergelijke organische kleien goed met een bentoniet spoeling af te smeren (water kan hierdoor niet in deze klei trekken).

Bentoniet kan worden verwijderd met behulp van een dispergeermiddel. Door het toepassen van een dispergeermiddel wordt de verbinding tussen de kleiplaatjes verbroken. Hierdoor wordt de bentoniet boorspoeling minder viskeus en verliest deze zijn gelvormende eigenschappen. Als dispergeermiddel kan gebruik worden gemaakt van producten op basis van polyacrylamide (bijvoorbeeld het handelsproduct Aquaclear). Dit is een flocculant (vlokhulpmiddel) dat frequent in waterzuiveringsprocessen wordt toegepast.

De benodigde hoeveelheden bentoniet hangen af van dezelfde factoren als bij PAC. Voor hetzelfde resultaat is ongeveer tien keer zoveel bentoniet als PAC nodig.

Het gebruik van bentoniet moet zoveel mogelijk worden voorkomen, omdat de afpleistering op de boorgatwand zorgt voor een initiële positieve skinlaag na aanleg van een win- of infiltratiebron. Het verwijderen van deze skinlaag tijdens bronontwikkeling is lastig en tijdrovend. Als bentoniet beslist noodzakelijk is (bijvoorbeeld bij grote kans op instorten van het boorgat), wordt aangeraden het materiaal in combinatie met PAC te gebruiken. PAC zorgt ervoor dat het bentoniet zich beter en gelijkmatiger verspreidt. Op deze manier wordt de effectiviteit van bentoniet vergroot, waardoor er minder van nodig is.

Bentoniet heeft een lage microbiologische groeipotentie vergeleken met boorvloeistoffen op basis van polymeren.

Xanthaan

Xanthaan is een boorvloeistof op basis van organische polymeren. De stof bestaat uit lange

⁶ Dit rapport bevat de resultaten van onderzoek naar onder meer de milieu-hygiënische kenmerken van bentoniet en organische spoelingsadditieven en ook bij lozing en stort, en milieuwetgeving met betrekking tot boorspoelingen.

suikerketens en heeft gelvormende eigenschappen. De organische polymeren van xanthaan hebben vergelijkbare eigenschappen als bentoniet. Beide boorspoelingen zijn Binghamse vloeistoffen. Binghamse vloeistoffen stromen alleen als de schuifspanning boven een bepaalde grenswaarde (de *zwichtspanning*) komt. Een zwichtspanning heeft voordelen bij de vorming van de filterkoek en het dragend vermogen van de spoeling in rust. Overige boorspoelingen geven geen zwichtspanning. De meest optimale samenstelling van xanthaan is 5 kg/m³.

Het nadeel van xanthaan is dat de microbiologische groeipotentie relatief groot is.

pH-waarde verhogende boorspoelingsadditieven

Er kunnen hardheid verlagende en pH-waarde verhogende boorspoelingsadditieven, zoals natriumcarbonaat (soda ash) of natronloog (natriumhydroxide opgelost in water) worden toegevoegd aan de boorspoeling. Een pH van 8,5 – 9,5 is in het algemeen het meest gunstig voor de stabiliteit van het boorgat. Bovendien kunnen bij dergelijk waarden voor de pH de eigenschappen van de boorspoeling beter onder controle worden gehouden dan bij lagere of hogere waarden. Het gebruik van soda ash of natronloog heeft als voordeel dat toegevoegde bentoniet en/of polymeren aan de boorspoeling beter hydrateren in een basische oplossing. Hierdoor hoeft er minder van deze producten worden toegevoegd.

Mica, walnootschillen, houtsnippers, cellofaansnippers

Deze producten worden toegepast om het waterverlies bij lagen van grof materiaal te beperken. In Nederland worden ze in de praktijk amper meer gebruikt. Als dergelijke pakketten moeten worden doorboord, wordt eerder overgestapt op de verbuisde pulsboormethode.

3.1.3.2. Keuze boorspoeling

Voor het gebruik van een spoelingsadditief is het belangrijk om het doel ervan te bepalen: verhogen dichtheid boorspoeling, afsluiten zwellende kleilagen en afsluiten grove zandlagen om waterverlies te beperken. Aan de hand hiervan en in overleg met de leverancier van de additieven kunnen dan de juiste additieven worden bepaald, alsmede de optimale (lage) concentratie.

Ten aanzien van het gebruik en de hoeveelheden van kunstmatige spoelingsadditieven zijn verschillende visies. De eerste visie is dat er zo weinig mogelijk of liefst geen spoelingsadditieven moeten worden gebruikt. Het spoelingsadditief zou zich op de boorgatwand hechten en een initiële verstopping veroorzaken die moeilijk is te verwijderen. Een andere visie is dat juist door het aanbrengen van een dunne laag spoelingsadditief wordt voorkomen dat tijdens het boren fijne natuurlijke zand- en kleideeltjes in de boorspoeling dieper in het pakket infiltreren, waar ze lastig zijn te verwijderen. Voorwaarde is wel dat de dunne laag spoelingsadditief bij het ontwikkelen wordt verwijderd. Ervaring bij drinkwaterbedrijven leert dat met de onderstaande richtlijnen over het algemeen goede resultaten worden verkregen.

Gebruik uitsluitend biologisch en/of chemisch afbreekbare spoelingsadditieven. Als deze componenten niet op een mechanische manier kunnen worden verwijderd, kan altijd worden overgegaan op een biologische of chemische verwijderingsmethode.

Er moet rekening worden gehouden met het feit dat sommige componenten van spoelingsadditieven die op de boorgatwand achterblijven, kunnen leiden tot microbiologische verontreiniging van de onttrekkingsbron ten behoeve van drinkwater. Om de kans op die verontreiniging zo laag mogelijk te houden, dienen de concentraties van spoelingsadditieven beperkt te blijven.

CMC zorgt voor een verhoogde dispersie en dus een betere verspreiding/verdeling van het bentoniet door de boorspoeling. Hierdoor is het gebruik van bentoniet effectiever en kan minder worden gebruikt.

3.1.3.3. Verversen boorspoeling

In het geval het niet lukt om in één dag het gat te boren en weer aan te vullen, moeten maatregelen worden getroffen om de overdruk op peil te houden als het werk stil ligt. Vaak wordt in de bezinkbak een vlottermechaniek geplaatst dat de waterstand automatisch op peil houdt. In de meeste gevallen zijn de vlotters uitgerust met beveiligings- en signaleringsopties die met een gegeven tijdsinterval de waterniveau loggen. De boormeester wordt automatisch gewaarschuwd via SMS meldingen, wanneer zich problemen voordoen met de waterniveau. In enkele gevallen zijn de genomen voorzorgsmaatregelen niet voldoende en wordt de aanbeveling gedaan enkele keren poolhoogte te nemen. Als er geen automatische beveiliging is toegepast, dan moet het boorgat continu worden bewaakt. Soms zijn de omstandigheden zodanig dat er geen risico's kunnen worden genomen. Er wordt dan doorgewerkt totdat het gat is geboord, de pompfilters zijn afgesteld en het boorgat is aangevuld.

3.1.3.4. Ontzanden boorspoeling

Het boorgruis dat door de beitel is los geboord, wordt met behulp van de circulerende boorspoeling uit het boorgat verwijderd. Ook de fijnere zanddeeltjes en andere meegevoerde kleine deeltjes moeten zo snel en zo veel mogelijk uit de vloeistofstroom worden afgescheiden. Om deze ontzanding uit te voeren, kan gebruik worden gemaakt van ontzanders (cyclonen en schudzeven), kunnen meer suppletiebakken worden ingezet, kunnen de suppletiebakken worden schoongemaakt voordat in het watervoerende pakket wordt geboord, kan de boorspoeling aanpassen, enzovoort.

Blijven de fijne materiaaldeeltjes in de vloeistofstroom circuleren, dan zal een deel ervan in de formaties dringen waardoor de doorlatendheid kleiner wordt. Ontzanding voorkomt dat de doorlatendheid van de delen van de formatie die van belang zijn voor de waterwinning kleiner wordt dan wenselijk is.

Bij het boren van onttrekkingsbronnen voor drinkwater dienen het boorgruis en de fijne materiaaldeeltjes te worden verwijderd met:

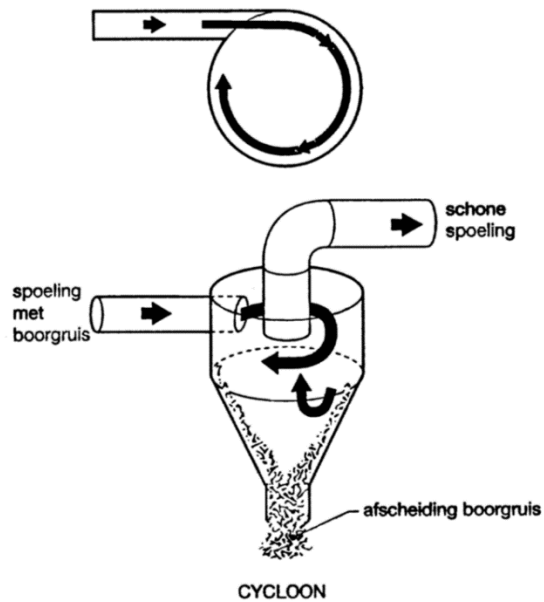
- Bezinkbakken;
- Cyclonen;
- Schudzeven.

Bezinkbakken (spoelbakken)

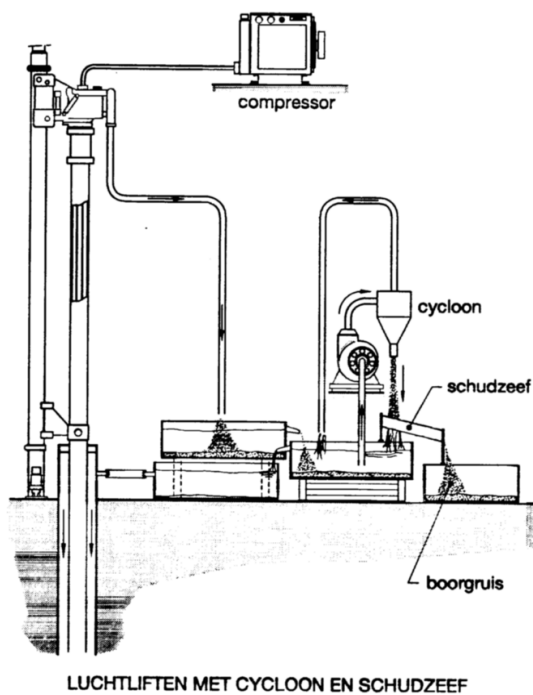
Bij roterend zuigboren worden altijd bezinkbakken geplaatst. Richtlijn is minimaal twee bezinkbakken. Soms worden drie of vier bezinkbakken in serie geplaatst. De eerste bak is de bak waarin de boorvloeistof met boorgruis vanuit de boorstang terechtkomt en waar zich de straalbreker bevindt. Hier bezinkt het grofste materiaal. Bij deze bak worden ook de grondmonsters genomen voor de boorbeschrijving. Vervolgens stort de boorspoeling over in de volgende bak(ken) waarin het fijnere materiaal verder bezinkt. De laatste bezinkbak is rechtstreeks op de mantelbuis (geen boorbuis!) van het boorgat aangesloten.

Hoe meer fijn zand er zich in de boorspoeling bevindt, des te langer het bezinktraject moet zijn. Dat kan worden gerealiseerd door meer bezinkbakken te gebruiken. De afscheiding kan ook worden verbeterd door de stroomsnelheid in het bezinktraject te beperken via de toepassing van brede overstortranden of de bezinkbakken parallel te plaatsen.

Bij het doorboren van veenlagen of sterk slibhoudende lagen is het aan te bevelen de boorspoeling te verversen voordat het geplande filtertraject wordt bereikt. De bezinkbakken moeten dan in elk geval worden schoongemaakt.



Figuur 3-4. Cycloon (KWR PCD 13-3, 2019)



Figuur 3-5. Luchtliften met cycloon en schudzeef (KWR PCD 13-3, 2019)

Cyclonen en schudzeven

Cyclonen en schudzeven worden ingezet om de ontzanding van de boorspoeling te bevorderen. De cycloon is een apparaat dat door middel van centrifugaal krachten het boorgruis en de spoeling scheidt op basis van verschil in soortelijk gewicht (Figuur 3-4). Schudzeven worden gebruikt in combinatie met bezinkbakken en cyclonen (zie Figuur 3-5). De boorspoeling wordt uit de tweede (of derde) bezinkbak opgepompt en toegevoerd naar een aantal cyclonen (100 à 125 mm) die zich boven de trillende schudzeef bevinden. De laatste bezinkbak kan als communicerend vat aan de tweede bezinkbak worden verbonden. Dankzij de schudbeweging van de zeef wordt het opgevangen materiaal naar één kant geleid, waardoor het in een bak met uitsluitend boorgruis terechtkomt. De maaswijdte van de schudzeef en het type cycloon bepalen de maat van de fractie die uit de boorspoeling wordt verwijderd. In de praktijk wordt er vaak gebruik gemaakt van bezinkbakken en cyclonen, en worden schudzeven zelden gebruikt.

3.1.4. Roterend spoelboren

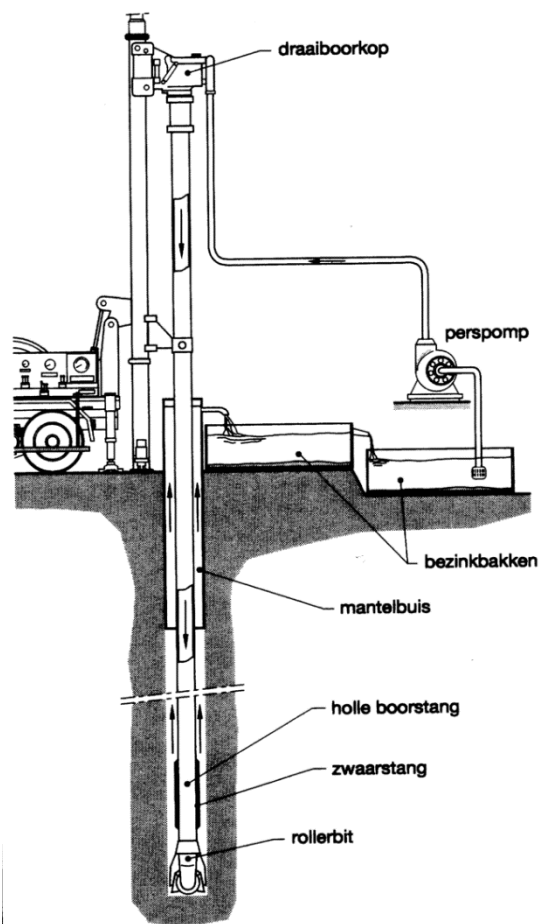
Bij een roterende spoelboringen (ook wel 'straight flush rotary' of 'direct-flush rotary') wordt de boorspoeling door de holle boorstang naar beneden geperst en vervolgens (samen met het door de boorbeitel losgewoelde boorgruis) door de annulaire ruimte van het boorgat omhoog gevoerd. Uit het uitstromende mengsel van boorvloeistof worden het opgeboorde materiaal gefilterd, waarna de boorspoeling weer het boorgat wordt ingepompt. Voor ondiepere boringen wordt er gebruik gemaakt van een spoelboringsinstallatie op een rupsonderstel of vrachtwagen.

Een belangrijk onderscheid met de zuigboring is dus dat het boorgruis door de annulaire ruimte naar maaiveld wordt afgevoerd. De opvoersnelheid in de annulaire ruimte is kleiner dan in de boorbuis (die een kleiner doorstroomd oppervlak heeft). Daarom is een dikkere, visceuzere boorspoeling nodig om het boorgruis omhoog te krijgen.

Spoelboringen in ondiepere, ongeconsolideerde formaties worden veel toegepast in de bronbemaling en bij het plaatsen van gesloten bodem energiesystemen in ondiepere formaties (<500 m-mv) die vallen binnen de certificeringsreikwijdte van BRL-2100. Diepe boringen (>500 m-mv) voor olie-, gas, CO₂-opslag en zoutwinningen worden in het algemeen uitgevoerd met de roterende spoelboortechniek. Dit wordt verder belicht in § 3.2.

Voor win- en infiltratiebronnen in ongeconsolideerde ondiepe formaties is spoelboren geen gangbare techniek. Het gebruik van een dikke boorspoelingshulpmiddelen zorgt voor een significante skinlaag op de boorgatwand. Het is lastiger om deze tijdens bronontwikkeling uit de formatie te verwijderen. Daarnaast zijn spoelboringen bruikbaar voor gaten met een diameter tot ongeveer 400 mm. Ook leidt de lage opvoersnelheid tot ontmenging van de grond en dus tot zeer slechte grondmonsters. Hierdoor is laagdetectie tijdens spoelboren niet nauwkeurig.

In de het protocol BRL-11001 wordt expliciet vermeldt dat de boring voor open bodemenergiesystemen niet worden niet verricht met de spoelboortechniek. Hierdoor zullen spoelboringen in de praktijk dus niet worden toegepast voor HTO win- en infiltratiebronnen in ondiepe ongeconsolideerde formaties die langdurig operationeel moeten zijn.



Figuur 3-6 Roterende spoelboring (drillingformulas.com).

3.1.5. Pulsboren

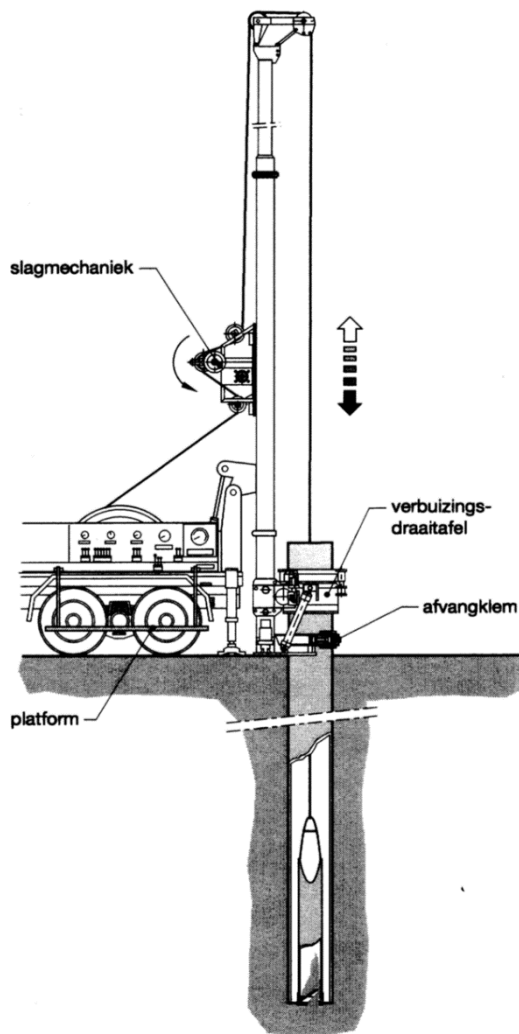
Pulsen is een eeuwenoude grondboorteknik die in Nederland tot omstreeks 1960 veel werd gebruikt. Daarna deed roterend spuitboren zijn intrede en vervolgens roterend zuigboren. Als gevolg van bodemverontreinigingen en het hiermee samenhangende milieukundig bodemonderzoek kwam de pulsboorteknik in de jaren tachtig weer in de belangstelling. Pulsboringen zijn toepasbaar in ongeconsolideerde bodemlagen, met uitzondering van extreem stijve klei en lagen met grote stenen, en niet massieve harde lagen.

Voor een puls boring zijn een puls, boorbuis en een pulsboorinstallatie nodig (zie Figuur 3-7). De puls is een zware, holle stalen cilinder met onderin een rubberen of stalen klep, die aan een scharnier naar binnen opengaat. Bovenaan is een bevestigingsbeugel voor de kabel gemonteerd. De onderkant van de puls is voorzien van een korte snij schoen met snijrand. Er zijn zand-, klei- en grindpulsen. De boorbuis (ook wel steunbuis genoemd) bestaat uit een aantal stalen buizen met schroefdraad aan de boven- en onderzijde die tot één boorbuis aan elkaar kunnen worden geschroefd. Ook de onderste boorbuis (boor schoen, voorloper) is voorzien van een snijrand of een rand met snijtanden, die bij het omlaag brengen als snijmes werkt. Voor de gangbare toepassingen worden de buiselementen

meestal met schroefdraadverbindingen aan elkaar verbonden (gemakkelijk en snel), terwijl voor de grotere boorgaten vaak steekverbindingen worden gebruikt.

Diepe pulsboringen (diameter tot ongeveer 400 mm en diepte tot ongeveer 150 m) worden uitgevoerd met een grotere, hydraulische pulsboorinstallatie op een vrachtwagen of op een rubsonderstel. Voor grotere boorgatdiameters dan 400 mm en taaie grond moet extra zwaar materieel worden ingezet, bijvoorbeeld een dragline.

Voor boringen groter dan 800 mm wordt pulsen zo moeilijk, dat de grond met een poliepgrijper uit de boorbuis wordt verwijderd. Dit geldt ook voor het pulsen door grindlagen, waar grote keien of grind met een grote korreldiameter worden aangeboord. In dat geval kan er worden gewerkt met een ondersteunende boortechnieken zoals lepelboren of boren met de poliepgrijper. Dit geldt soms ook voor het boren met de poliepgrijper. Met een lepelboor worden bijvoorbeeld grind, harde of taaie klei, zachte sedimenten en zand boven de waterspiegel geboord (geschept). De poliepgrijper die is voorzien van schalen (bladen of grijpers), wordt gebruikt om grond, stenen of andere voorwerpen uit boorgaten (al of niet verbuisd) te verwijderen of om droog voor te boren bij een pulsbooring in het geval de boorbuizen een grote diameter hebben.



MOBIELE HYDRAULISCHE PULSBOORINSTALLATIE

Figuur 3-7. Mobiele hydraulische pulsboorinstallatie, (drillingformulas.com).

Bij het uitvoeren van een pulsbooring kan de eerste buis in een met de avegaar of knijpbak gegraven gat geplaatst. Na toevoeging van werkwater kan worden begonnen met pulsen. De pulsboorinstallatie beweegt de puls in de boorbuis aan een kabel 30 à 40 cm op en neer op de bodem van het boorgat. Bij elke val woelt de puls de grond los en omdat de klep dan open is, welt er grond de puls in (de puls zakt over het mengsel van grond en water). Bij de omhooggaande beweging sluit de klep zich en wordt de grond met de puls gevangen. Zo schuift bij elke op- en neergaande beweging de grond verder de puls in. Bij elke omhooggaande beweging ontstaat onder de puls onderdruk, waardoor water en grond worden meegezogen en de boorbuis telkens iets zakt. Na elke 10 à 20 pulsbevingen wordt de gevulde puls opgehaald en leeggemaakt in een daarvoor bestemde bak op het maaiveld. Ook als de puls het water in de boorbuis verlaat, zakt de boorbuis.

Het waterpeil in de boorbuis moet steeds iets boven het grondwaterpeil staan. Is het waterpeil te laag dan wordt grond omhoog gebracht zonder dat de boorbuis zakt. Als het peil te hoog is, wervelt er

geen grond van de bodem los. In beide gevallen is pulsen zinloos. Bij het pulsen wordt dus een betrekkelijk geringe hoeveelheid werkwater in het boorgat ingebracht.

Omdat de boorbuis zakt, wordt regelmatig aan de bovenkant een nieuwe boorbuis boven op gezet. Naarmate de boorbuis dieper de grond in gaat, zal de wrijving tussen de boorbuis en de grond toenemen. Deze wrijving is te verminderen door de buis te draaien of te wrikken en/of op en neer te bewegen. De boormeester kan de verbuizing met behulp van een draaitafel roteren op en neer bewegen. Wanneer de wandwrijving op de verbuizing te groot wordt kan een nieuwe verbuizing met een kleinere diameter worden aangebracht. Dit wordt vertoeren genoemd. Het pulsen wordt vervolgens in de tweede buis voortgezet. Zo nodig kan nog worden vertoerd naar een derde of vierde buis. Op deze wijze kan een diepte van ongeveer 150 m worden bereikt. Algemeen beschikbare verbuizingsdiameters voor pulsboren variëren van 170 mm tot 1.000 mm. Bij het boren tot dieptes van meer dan 100 meter zal er meermaals moeten worden vertoerd tot een kleinere diameter. Op deze boordieptes is maximale boorgatdiameter dusdanig klein geworden dat het plaatsen van een filter voor een win-, infiltratie niet meer mogelijk is. In de praktijk worden er voornamelijk peilbuizen geplaatst met pulsboringen tot deze dieptes.

Het boorgat wordt gereinigd na het bereiken van de gewenste einddiepte. Na het bereiken van de einddiepte wordt er gewacht om alle bodemdeeltjes in het werkwater te laten bezinken en deze met de puls omhoog te halen. Hierbij wordt er, indien nodig, water van bovenaf aangevuld, of met een pomp in het boorgat gepompt, om de boorbuis met schoon water te vullen. Na inbouw van de bronconstructie wordt de annulaire ruimte aangevuld, waarbij de stabiliteit van het boorgat wordt gehandhaafd door de boorbuis met het aanvulniveau mee op trekken.

Een voordeel van pulsboren is dat bij het trekken van de casing door de drukontlasting het stukje vrijgekomen boorgat eronder deels instort; daardoor is bepleistering / cementatie van de boorgatwand een minder groot probleem dan bij een open boorgat (onverbuisd). Vooral bij waarnemingsbronnen met bijv. glasvezelkabels t.b.v. temperatuurmetingen met DTS en/of minifilters kan dit een voordeel zijn, omdat in deze gevallen de filtercake op de boorgatwand niet kan worden verwijderd met behulp van schoonpompen. Dit speelt minder bij onttrekkingsbronnen waar men wel de mogelijkheid heeft tot schoonpompen, en de filtercake goed kan worden verwijderd mits de bron adequaat wordt aangelegd en ontwikkeld.

Het grote voordeel van pulsboren is dat de bodemonsters redelijk ongeroerd naar boven komen. Hierdoor is er nauwkeurig een inschatting te maken van de bodemopbouw, waarbij ook dunne (klei)lagen worden herkend. Doordat nauwkeurig is geboord, is de vorm van het boorgat (diameter) ook goed bekend. Er zijn geen onbekende holle ruimtes ontstaan, waardoor dit de meest nauwkeurige boorgaten maakt.

Nadeel is de beperkte diepte en diameter, maar ook de snelheid is lager dan bij andere technieken, wat pulsboren relatief duur maakt.

3.2. Boortechnieken voor HTO in diepere formaties

Zoals boven vermeldt worden de meeste boringen voor olie, gas en geothermie gedaan met spoelboren (straight/direct-flush drilling, zie ook §3.1.4). Wanneer men in de diepe ondergrond van Nederland water met hoge temperatuur wil opslaan zal een zuigboring (met luchtlift) niet volstaan, en moet men overgaan op deze boortechniek.

Aardwarmteboringen zijn vergelijkbaar met boringen voor gaswinning of zoutwinning. Afhankelijk van de diepte, de boorgatdiameter op einddiepte, inclinatie en de benodigde koppel kan met zwaardere of lichtere torens worden geboord. Het werkterrein is ca. 0,5 tot 1 ha groot en de toren heeft een hoogte

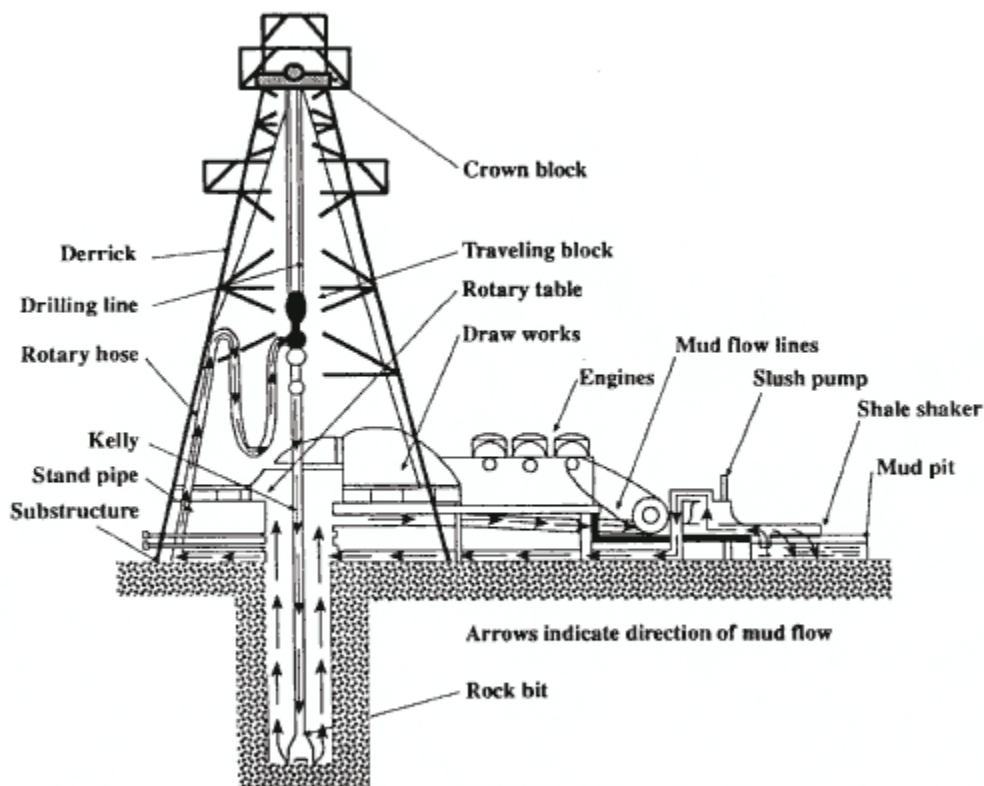
van ca. 30 m. Een aardwarmteboring neemt, afhankelijk van de totale diepte, enkele maanden in beslag.

De productie-en injectiebron delen doorgaans dezelfde oppervlaktelocatie. In de ondergrond hebben beide bronnen een gedeveerd verloop waardoor de onderlinge afstand op einddiepte ca. 1500 m is. Aardwarmteboringen worden bij voorkeur tussen de einddiepte locaties van de productie-en injectiebron geplaatst.

Het plaatsen van een boring is in Nederland aan strenge regels gebonden. Er zijn een omgevingsvergunningen nodig, er dient een BARMM-melding gedaan te worden en er zijn verplichtingen volgend uit de mijnbouw-en arbo-wetgeving. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) ziet toe op de milieu en veiligheid technische aspecten van de boring, zoals de bronintegriteit.

3.2.1. Straight flush drilling

The conventional drilling operation was done by using a tool consists of a set of joints of hollow drill pipe (often dressed with functional tools known as *bottom hole assembly*, or BHA) connected to a *drilling bit* at the end of the pipe. The drill string is rotated on the top, and the transmitted rotary motion and the downward force from the weight of the drill string will aid the drill bit to remove the formation rock. While drilling, a drilling fluid is circulated to the downhole from the inner hollow part of the drill string, exiting through the nozzles of the drill bit. The hydraulic energy generated by fluid flow through nozzles will carry the cuttings – i.e., drilled rock fragments – along the annulus space formed between the hole and the drill string to the surface, and this process is referred to hole cleaning. The hydrostatic pressure exerted by the drilling fluids also acts to counterbalance the formation pressure at the downhole to avoid a hazardous event of inflow of downhole fluids (such as gas, oil, formation water) to the surface. Thus, the drilling fluid is designed with a certain density to overbalance the formation pressure.

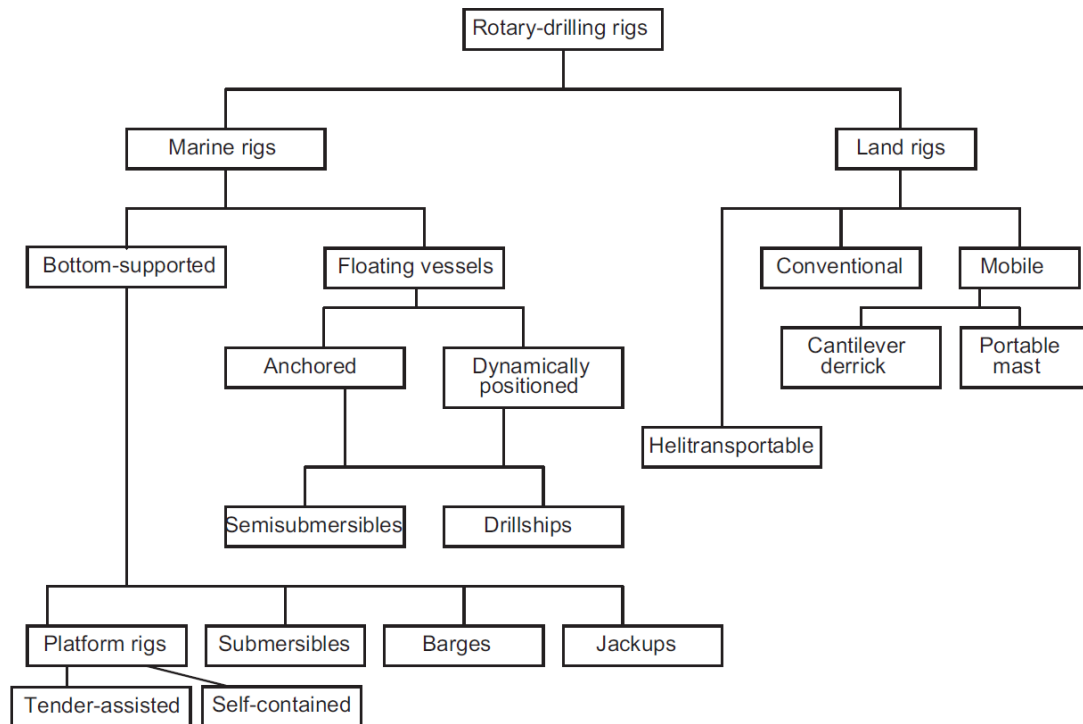


Figuur 3-8. Example of the straight flush method with a Derrick drilling rig.

3.2.2. Drilling rigs

The drilling operation involves many drilling parameters, such as the drilling fluid program, vertical or directional well path, drill string program, and the drilling bit, therefore many drilling techniques can be selected based on those parameters.

Until this date, the standard oilwell drilling method still implements rotary drilling rigs. Depending on the location, the drilling rig can be classified into onshore and offshore rigs (oil platform), see Figuur 3-9.



Figuur 3-9. Types of rotary drilling rigs (Bourgoyne, Millheim, Chenevert, & Young, 1986)

3.2.3. Drilling fluid

Besides hole cleaning and control the formation pressure, the drilling fluid is also used to cool and lubricates the drill string, hold the cuttings in place during the static condition (no circulation), and add buoyancy effect to the drill string.

Based on the types of the base fluid, drilling fluid can be categorized as follow (Eustes III, 2011; West, Hall, & Seaton, 2006):

- Water-based mud
- Oil-based mud
- Synthetic-based mud
- Pneumatic drilling fluid

Water-based mud is mostly used as drilling fluids and consists of a fluid mixture of water and bentonite. The base fluid can be freshwater, seawater, brine, saturated brine, and formation brine. Additives can also be mixed into the mud to give additional functionality and/or address drilling problems, such as weighting agents, thinners, dispersants, and lost-circulation materials.

Oil-based systems were introduced to address several drilling problems, for example drilling through swellable clay, increasing downhole temperatures, contaminants, and stuck pipe. The base oil can be diesel, mineral oil, or low-toxicity linear paraffin. However, the oil-based mud can be costly and require additional handling at the surface and disposal.

Synthetic-based mud can provide advantages equal to the oil-based mud. Both oil- and synthetic-based muds are proved to be economical in many offshore wells because the application leads to fast penetration rates and less mud-related non-productive times (NPT). The synthetic-based mud can be prepared by using linear alpha-olefins (LAO) and isomerized olefins (IO).

Pneumatic drilling fluids are used for avoiding drilling problems, such as lost circulation to the formation, prevent formation damage, and to achieve higher penetration rock. Three types of pneumatic drilling fluids have been developed, air or gas-only (1 phase), aerated fluid, or foam. This drilling fluid is mostly used for underbalanced drilling.

Depending on the differential pressure between the drilling fluid and the formation pressure, three different drilling techniques are categorized as follow:

- Overbalanced drilling, an operation where the hydrostatic pressure of drilling fluid is greater than the formation pressure. This method is the most common technique when drilling a well.
- Managed pressure drilling, an operation where the pressure profile is controlled continuously throughout the wellbore. The method is common for wells with highly uncertain and/or narrow drilling window (i.e. the difference in the pore- and fracture pressure), and deep water wells. The techniques of managed pressure drilling are constant bottom-hole pressure (CBHP), pressurized mud-cap drilling (PMCD), and dual gradient.
- Underbalanced drilling, an operation where the hydrostatic pressure of drilling fluid is lower than the formation pressure. Usually, this is achieved by using pneumatic drilling fluid. In underbalanced drilling, the well produces an influx of formation fluids that must be controlled continuously. Thus, this technique uses a closed-system BOP, which is different from conventional overbalance drilling (Nas, 2006). This technique can be used for selected reservoir types, as summarized in Figuur 3-10.

Will Benefit from UBD	Will Not Benefit from UBD
Formations that usually suffer major formation damage during drilling or completion operations. Wells with skin factors of 5 or higher.	Wells in areas of very low conventional drilling cost.
Formations that exhibit differential sticking tendencies.	Wells drilled in areas of extremely high ROP (that is, $ROP \geq 1,000$ ft/day).
Formations with zones with severe losses or fluid invasion from drilling or completion operations.	Extremely high-permeability wells.
Wells with large macroscopic fractures.	Ultralow-permeability wells.
Low-permeability wells.	Poorly consolidated formations.
Wells with massive heterogeneous or highly laminated formations characterized by differing permeabilities, porosities, and pore throat throughput.	Wells with low borehole stability.
High-production reservoirs with low to medium permeabilities.	Wells with loosely cemented laminar boundaries.
Formation, with rock fluid sensitivities.	Wells that contain multiple zones with different pressure regimes.
Formations that exhibit low ROP with OBD.	Reservoirs with interbedded shales or claystones.

Figuur 3-10. Selection criteria of underbalanced drilling (Nas, 2006)

Drilling fluid additives

The following drilling fluids additives are used during drilling of oil- and gas wells.

- Weighting agents, additives that are used to increase the density of the drilling fluid. Usually, the weighting agents are inert materials, such as barite, hematite, and calcium carbonate.
- Fluid-loss control additives. The residue of the drilling fluid can stick on the wall of rock formation. This is because the differential pressure between the drilling fluid and formation

leads the liquid phase to enter the formation, leaving a thin layer of filtrate on the formation wall, also known as mudcake. When drilling through a permeable zone, the drilling fluid may loss into the formation, and this problem can be mitigated by creating an impermeable mudcake. Several fluid-loss control additives are clays, starch, CMC, polyacrylates, lignosulphonates, and polyanionic cellulose.

- Viscosity control additives. The viscosity of the drilling fluid shall be maintained properly to ensure proper hole cleaning. It can be increased by adding more clays (e.g. bentonite). On the other hand, thinner chemicals are useful to reduce the drilling fluid viscosity, such as phosphates, lignite, lignosulphonates, and tannins.
- Lost-circulation materials. Lost circulation is a total fluid loss that occurs when drilling through a depleted or a weak zone. To overcome this problem, large organic particles are pumped with the drilling fluid to stop the loss. Some of the lost circulation materials are sized calcium carbonate, mica, fibrous material, cellophane, deformable graphitic materials, and lost-circulation pills.
- Surfactants or surface-active agents. Surfactants are used to change the colloidal state of the clay from the complete dispersion to controlled flocculation. Surfactants are used in drilling fluids as emulsifiers, dispersants, wetting agents, foamers, and defoamers, and to decrease the hydration of the clay surface.
- Other additives. Other additives are pH control, drill-string-corrosion mitigation, sodium acid polyphosphate (SAPP) to prevent cement contamination in drilling fluid, and lubricants (Eustes III, 2011).

1.2.4. Directional drilling

Depending on the well trajectory, the well can be drilled vertically or deviated (also horizontally).

Directional drilling is a drilling activity to reach a subsurface target located at some horizontal distance from the top of the hole (i.e. the target is not located right below the top of the hole). Thus, the hole will have a deviated geometry. There are different motives behind directional drilling, such as to enhance well production by drilling through multiple reservoir targets or multilateral drilling, avoid sensitive locations, drill well from onshore to reach targets below the sea or ocean, and avoid specific formation to prevent hole problems.

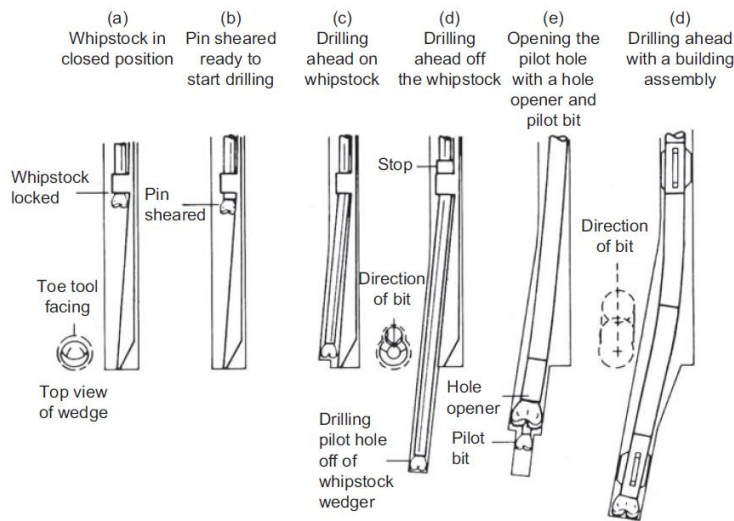
The development of horizontal drilling technology enables drilling extended-reach wells. Extended reach drilling is a type of directional drilling with a length of well from 20,000 – 40,000 ft. Greater than 40,000 ft is classified as ultra-extended-reach drilling. The drilling activity of deviated wells uses the advantage of logging-while-drilling technology by developing a *geosteering* method that can guide the wellbore path based on the real-time measurements of formation at the downhole (Miska, 2011a).

The deviated trajectory can be created by rotary assemblies and steerable motor assemblies. The rotary assemblies are not steerable, thus the azimuth (right/left turn) and the inclination change is nearly uncontrollable. It relies on the size and placement design of the stabilizer and drill collar near the bit, so then the drill string can bend from its weight and create a pivot point from the force against the side of the hole to build/drop the trajectory.

Steerable motor assemblies are more common in recent years, and there four types of steerable tools based on its principle to deviate the wellbore:

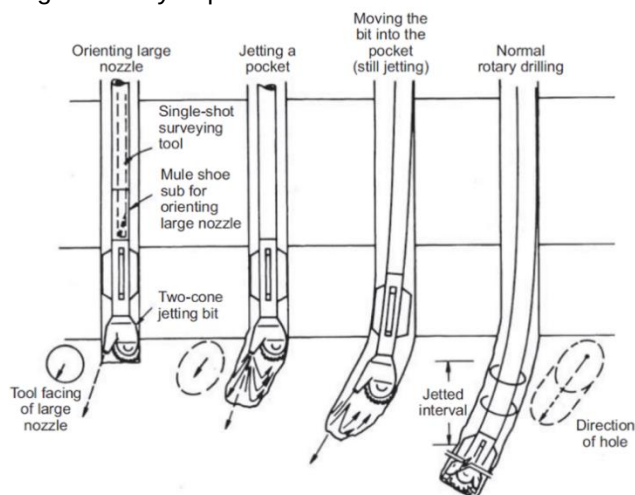
- **Whipstocks:** Whipstock implements the use of a wedge to guide the drill string to deviate from the kick-off point to the planned direction. Two types of whipstock tools, fixed- and

removable whipstocks. The fixed whipstocks can stay in the hold after directional drilling, while the removable whipstock is pulled out of the hole with drillstring.



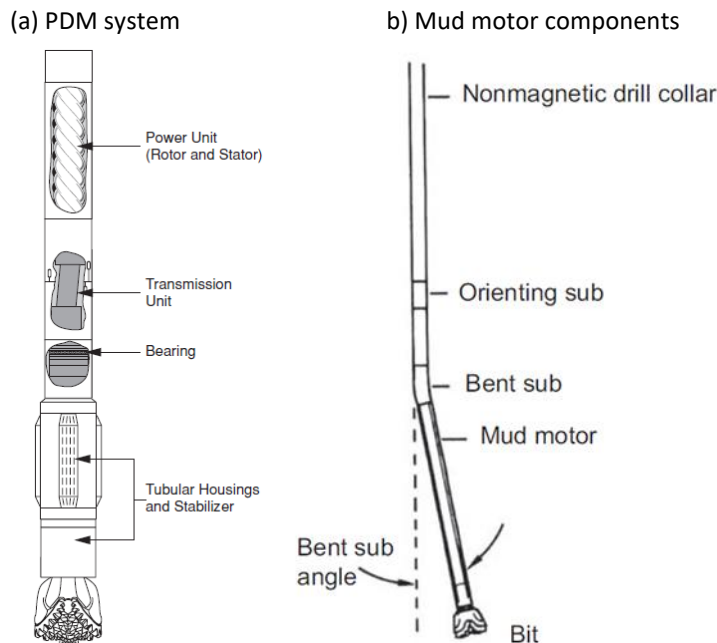
Figuur 3-11. Mechanisms of directional drilling with retrievable whipstocks (Bourgoyne et al., 1986)

- **Jetting bit:** This technique uses the fluid momentum from the bit nozzles to erode the rock formation. Typically, a rotary three-roller-cone bit with three nozzles, two small and one large, is run downhole. The drilling fluid is circulated to begin the washing action while the bit is advanced without rotation for a distance to create change in azimuth and inclination. The jetting efficiency depends on the hardness of the surrounding rocks.



Figuur 3-12. Jetting bit system to create wellbore deflection (Bourgoyne et al., 1986)

- **Positive displacement motor (PDM):** PDM is used in a directional-drilling system with a bent sub placed above the motor. The lower end of the bent sub is inclined in relation to the upper end of the bent sub. The PDM makes use of a power generation made up of a rotor/stator combination. The drilling fluid circulation provides the hydraulic power to rotate the bit, hence achieve the change in hole inclination and azimuth.



Figuur 3-13. PDM system for directional drilling (Bourgoyne et al., 1986; Heriot Watt University, 2005)

- **Rotary steerable system (RSS):** The difference of RSS from the PDM system is that the RSS system allows continuous rotation of the drill string while steering the bit. Thus, it can achieve benefits, such as better hole cleaning, low torque and drag, and better hole quality. There are two steering concepts of RSS system, push-the-bit, and point-the-bit. The push-the-bit system changes the trajectory by applying a side load to the bit using a stationary (non-rotating) sleeves or stabilizers that are pushed against the wall of the hole. On the other hand, the point-the-bit is equipped with a steering assembly that controls the direction by orienting a tilted shaft to which a drill bit is attached. The bit is deflected by using a hydraulic system (Miska, 2011a).

1.2.5. Drill string and drill bits

The typical drillstring consists of a kelly, a drill pipe with tool joints, drill collars, and stabilizers. The part of the drillstring above the bit is called the BHA. The design of a drillstring, e.g. size, pipe grade, and length, must be optimized to be sufficiently strong, yet entail minimum cost. The final design of drillstring should satisfy these major criteria (Miska, 2011b):

- The load capacity of the drillstring member should be greater than or equal to the maximum permissible load.
- The neighboring elements of drillstring member must be compatible with an appropriate bending-stress ratio (BSR).
- The drillstring shall be designed in conjunction with an optimal hydraulic and casing program.
- In deviated wells, the drillstring rotation should not damage the casing
- The total cost should be kept at a minimum.

The drilling bits are categorized into two types, *roller-cone* and *fixed-cutter bits*. Roller-cone bits have one or more cones containing cutters, which rotate about the axis of the cone as the bit is rotated. The cutters can be milled from the steel, known as milled-tooth bits, or a series of inserts pressed into cones. Milled-tooth bits are suitable for drilling soft formation, while the tungsten-carbide bits can be used for a wide range of formations, including the hardest one. Different from roller-cone bits, fixed-cutter bits consist of fixed blades that are integral with the body of the bit and rotate as a single component. Fixed-cutter bits, including PDC, impregnated, and diamond bits, can drill an extensive array of formations at various depths (Ozbayoglu, 2011).

3.2.4. Completion with one-stage or telescopic approach

It is preferred to use a one-stage-approach for drilling the well and installing the casing and screen: first drill the hole to end depth in the target reservoir and then install the total casing, screen and backfill in one stage. In the Netherlands this has been proven to be doable up to depths of more than 500 m. Important advantages:

1. it will maximize the borehole diameter at target aquifer
2. reduce costs significantly.

The other approach is a telescopic approach. This approach is more common for deep geothermal wells (>1000m): first drill to the sealing clay layer above the target reservoir, then install the casing and cement it. After this first stage, the target reservoir will be drilled into with a smaller diameter. This is a two stage approach, but it could be done in even more stages. This telescopic approach could be considered when drilling in complex geohydrological systems. Advantage is that drilling risks can be reduced. After installing a first casing the overlying formations above the aquifer will not influence the drilling in the aquifer anymore (no clay swelling, water losses, borehole collapse). Furthermore different muds can be used for overlying formations and for the target aquifer, as the mud specifications for the target aquifer are not only important for stabilizing the borehole but also for minimizing borehole damage after drilling. The need for a more expensive telescopic approach can be concluded after a test drilling has been performed.

3.2.5. Lost circulation

One of the most occurring and expensive problem encountered during drilling is lost circulation of the drilling fluid. It may lead to heavy financial costs in the form of lost rig time and lost mud fluid during well placement.

This loss is harmful for several reasons (and the tendency toward lost circulation is aggravated by the pressure imbalance between the relatively cool—denser—column of drilling fluid and the hot—lighter—geothermal fluids in the formation.)

- If the drilling fluid fails to clean the hole and return cuttings to the surface, the cuttings can fall back on the bottom-hole assembly and stick the drilling assembly.
- Drilling fluid, especially in many high-temperature formulations, is expensive and losing it to the formation instead of re-circulating it is costly.
- In geothermal wells, the production zone is usually a lost-circulation zone, so it is sometimes difficult to cure a harmful lost circulation zone while preserving its productive potential.
- Lost circulation can suddenly lower the fluid level in a well. Decreasing the static head of drilling fluid in a hot formation can allow the formation fluids, gas, hot water or steam, to enter the wellbore, causing a loss of well control. This can occur either in productive or non-productive zones.

- In the intervals that are not to be produced, the lost circulation zone must be “sealed” to provide a wellbore that can be cased and cemented to the surface, or the cementing process must accommodate getting a good cement job when a lost circulation zone is present. See the discussions of foam and backfill cementing in Section 4 under cementing. Adequately cementing the casing through lost circulation zones is a major problem and a major cost.
- Placement of lost circulation materials (LCM) is difficult because the top and bottom of the loss zone are often not well known. The LCM or cement being used to heal the loss zone are especially likely to migrate away from the targeted placement zone if drilling has continued well past it into another loss zone, or if there is considerable rat hole below the original loss zone.
- In many areas where geothermal drilling is done, water is in short supply. Combating lost circulation can be approached in different ways—drill ahead with lost circulation; drill with a lightweight drilling fluid that will have a static head less than the pore pressure in the formation; mix the drilling fluid with fibrous material or particles that will plug the loss apertures in the formation; or pause in the drilling and try to seal the loss zones with some material that can be drilled out as the hole advances.

In worst case, it potentially could lead to well blowout with serious environmental hazards and safety consequences. The loss of drilling fluid can be due to high permeability formations or fractures that are drilled. Lost circulation could have a large impact on the total costs of a geothermal project (depending on the drilled geological formations, used drilling fluid, drilling depth, etc.).

Lost circulation loss during drilling of geothermal wells

Lost circulation represents an average of 10% of total well costs in mature geothermal areas. Moreover, it often accounts for more than 20% of the costs in exploratory wells and developing fields. Well costs, in turn, represent 35-50% of the total capital costs of a typical geothermal project; therefore, roughly 3.5-10% of the total costs of a geothermal project can be attributable to lost circulation.

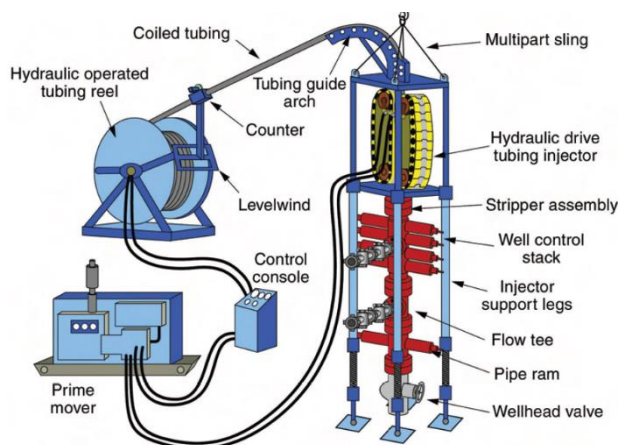
3.2.6. Alternative drilling techniques

3.2.6.1. Coiled tubing

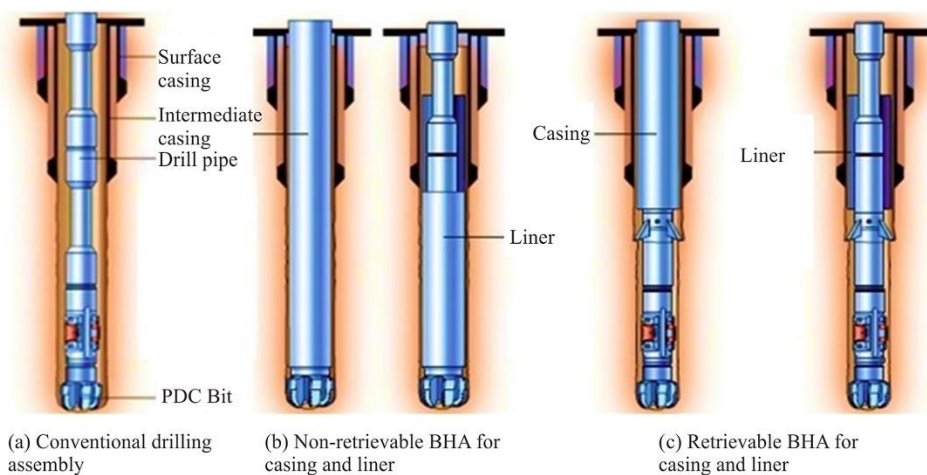
Coiled tubing is spoolable and flexible steel tubular with continuous length. The CT-technology is suitable for re-entry drilling/sidetracking from existing wellbores (often through the existing wellbore's production tubing) and underbalanced, managed-pressure, or low-bottomhole pressure drilling. It can also be used for running completion string, thus can be used in combination with the rotary drilling system (Sas-Jaworsky, Blount, & Tipton, 2011).

3.2.6.1. Casing while drilling

The casing while drilling activity implements casing string instead of the drill string to transmit rotary power to the bit and circulate drilling fluid. This operation saves some downhole trips by simultaneously perform drilling and casing activities. The use of this operation overcomes the drawback of conventional drillings, such as wellbore instability and loss circulation, due to the plastering effect. The low clearance at the annulus also benefits to optimize the hole cleaning. The casing while drilling can be performed by using a liner or a full-length of casing strings (Patel, Thakar, Pandian, Shah, & Sircar, 2019).



Figuur 3-14. The components of coiled tubing system (Sas-Jaworsky et al., 2011)



Figuur 3-15. Comparison of drilling techniques with different types of string (Patel et al., 2019)

3.3. Discussie en samenvatting

De keuze voor een boorteknik hangt af van verschillende factoren. De boordiepte, grondsoort, de opbouw van de bodem, de boorgatdiameter en de grondwaterstand bepalen in grote mate de keuze van het boorsysteem. Binnen het certificeringschema BRL- 2100 worden voornamelijk zuigboringen toegepast voor de aanleg van win-, infiltratie-, OBES bronnen. Vanwege zachte, zandige afzettingen is het grootste deel van de voor HTO relevante Nederlandse ondergrond bij uitstek geschikt voor zuigboringen (met luchtlift) en pulsen in ongeconsolideerd materiaal (zie Tabel 33). In enkele gevallen worden ondiepere bronnen geplaatst met een puls boring. Voor diepere boringen (>500 m-mv) die vallen binnen de mijnbouwwet, worden voornamelijk spoelboringen gebruikt voor het plaatsen van olie-, gas- of geothermiebronnen.

Tabel 3-3. Overzicht van verschillende boortechnieken.

Boortechniek	Diepte [m-mv]	Boorgatdiameter [mm]	Boorbeschrijving	Monstername	Opmerking BRL-2101	Met name geschikt voor
Pulsboring	150	170-1000	+	+		OBES-bron en monstername
Holle avegaar	25	120-600	+/-	0	2,3,7	
Onverbuisde avegaar	25		+/-	0	4	
Verbuisde avegaar	25		+	0	8	
Sonisch	40	90	+	++		Waarneminsbron en monstername
Sonisch (roterend)	150	150	+	++		Waarneminsbron en monstername
Counterflush	80	150	+	0	9	
Sputboring (roterend)	>500	100-350	-	-	5	
Spoelboring (roterend)	>500	100-350	-	0	9	Diepe HTO-bron
Zuigboring	100	200-1500	+	0	9	HTO-bron
Luchtlift	500	200-1500	+	0	9	HTO-Onttrekkingsbron
DHT			+	0		Vast gesteente

Boorbeschrijving

Nauwkeurigheid (<0.5m)

Nauwkeurigheid (>0.5m)

- Onnauwkeurig

Legenda

+

+/-

-

++

+

0

-

Monstername

Ongeroerd

Onverstoord

Geroerd

Zeer geroerd

Opmerkingen uit [Protocol 2101](#) bij tabel 3.3:

1) De boortechnieken zijn toegelicht in in KWR, 2019.

2) Alleen geschikt bij 'Milieukundig bodemonderzoek' en 'Plaatsen monitoringsfilter milieuonderzoek' tot maximaal 30 m-mv. 3)

Bij mechanische boringen ten behoeve van plaatsing van bronnen voor een in-situ sanering, kan het bevoegd gezag Wet bodembescherming toestemming geven voor gebruik van een onverbuisde holle avegaarboring (zie eis 17, punt 4). Dit kan het geval zijn indien vermenging van de bodem tijdens het boren bijdraagt aan verbetering van het saneringsresultaat.

4) Alleen geschikt voor boringen tot maximaal 5,0 m-mv die boven de grondwaterspiegel worden uitgevoerd.

5) Bij een spuitboring valt na het boren de waterdruk in het boorgat weg, het boorgat is dan niet meer stabiel en kan instorten. Deze techniek kan derhalve niet worden toegepast onder de scope van deze BRL.

6) Indien het boorgat helemaal wordt afgevuld met afdichtingsmateriaal, zijn de opmerkingen in deze kolom niet van toepassing. Indien het boorgat niet helemaal wordt afgevuld met afdichtingsmateriaal, dan detecteert het boorbedrijf de scheidende lagen, zoals beschreven in het toetsingskader van eis 14, en zijn de opmerkingen in deze kolom van toepassing.

7) Alleen geschikt indien een verbuisde continue bemonsteringstechniek wordt gebruikt of wanneer er vóór de holle avegaarbuis uit monsters worden gestoken.

8) Alleen geschikt bij gebruik van een verbuisde bemonsteringstechniek of als de exacte bodemopbouw voorafgaand aan de boring bekend is.

9) Bij deze boormethoden toont het bedrijf met een jaarlijks uit te voeren boorgatmeting aan dat het bedrijf in staat is de detectie van de scheidende lagen met de vereiste nauwkeurigheid uit te voeren (zie eis 14, aanvullend toetsingskader).

3.3.1. Boortechnieken voor HTO in de ondiepe ondergrond

3.3.1.1. Zuigboren en pulsbooren

Over het algemeen worden in Nederland onttrekkingsbronnen geboord door middel van de zuigboormethode, al dan niet met luchtliften, of de pulsboormethode. Dit geldt ook voor OBES-systemen. Deze boormethodes zijn ook het meest geschikt voor het plaatsen van HTO-bronnen in ongeconsolideerd materiaal. Voor HTO-bronnen wordt een zuigboring met luchtlift dus als standaard boortechniek gezien voor het boren van bronnen met een gewenste boorgatdiameter tot circa 200-500 m-mv (zie ook NVOE, 2006 en SIKB 2015). Een zuigboring garandeert een relatief schoon boorproces.

Bij het boren moet rekening worden gehouden met het [Protocol 2101](#):

- Het boorgat moet stabiel en vormvast zijn, zodat het niet instort tijdens of direct na het boren;
- Scheidende lagen kunnen voldoende nauwkeurig worden gedetecteerd (indien scheidende lagen laagsgewijs worden afgedicht in plaats van dat het gehele boorgat wordt afgedicht).

Als de samenstelling en doorlatendheid van de te doorboren formatie en de heersende stijghoogte in de watervoerende lagen dat toelaten, kan worden volstaan met een boorspoeling zonder toevoegingen (de zogenaamde natuurlijke boorspoeling). Natuurlijke boorspoeling bestaat uit werkwater met zwevende deeltjes en natuurlijke kleideeltjes uit het opgeboorde boorgruis, die geen gelegenheid hebben gekregen in de bezinkbakken te bezinken. In veel gevallen voldoet natuurlijke boorspoeling om de boring naar wens uit te voeren.

Bij het doorboren van grofkorrelige watervoerende lagen en/of een watervoerend pakket met een hoge stijghoogte, kan een natuurlijke boorspoeling onvoldoende zijn om het waterverlies te beperken en/of het boorgat in stand te houden. Bij voorkeur wordt de boorstelling verhoogd opgesteld en blijft men boren met relatief schoon werkwater. Echter in veel gevallen zal er gebruik moeten worden gemaakt van spoelingsadditieven. Hiermee worden de gewenste eigenschappen van de boorspoeling verbeterd. Het gebruik van spoelingsadditieven werkt kostenverhogend en het leidt er ook vaak toe dat door indringing in de boorgatwand de doorlatendheid van de aanliggende formatie afneemt.

Voor relatief ondiepe HTO-systemen tot 150 m, omdat dieper de boorgatdiameter, en dus de filterdiameter te klein wordt, zouden pulsboringen eventueel kunnen worden toegepast in bijzondere omstandigheden of als er specifieke eisen worden gesteld aan de bron of aan monsternamen, bijvoorbeeld::

- Als de grondlagen zo sterk ontsamenhangend zijn dat onverbuisd boren onmogelijk is;
- Bij grof grind of stenen (vaak wordt dan gepulst in combinatie met een grijper);
- Als de kwaliteit van het grondwater praktisch niet mag worden beïnvloed door werkwater (dit geldt met name voor waarnemingsbronnen);
- Als een nauwkeurige boorbeschrijving is gewenst (de geroerde grondmonsters zijn redelijk goed);
- Als er gestoken (ongeroerde) grondmonsters noodzakelijk zijn voor bijvoorbeeld geochemisch onderzoek (daarom worden diepere boorgaten voor milieukundig onderzoek en verkenningboringen vaak gepulst). Ook bij zuigboren is het wel mogelijk steekmonsters voor de boorkop uit te nemen.
- Als zo min mogelijk pleistering van de boorgatwand gewenst is.

3.3.1.2. Afpleistering van de boorgatwand en boorgatstabiliteit

De dikte van de skinlaag door afpleistering op de boorgatwand wordt bepaald door de eigenschappen van de boorvloeistof en de eigenschappen van de bodem (zie Figuur 3-3). Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen verschillende fases:

- Initiële indringing van de boorspoeling, inclusief de kleideeltjes: “de mudspurt”.
- De blokkering van de poriën in de formatie rond de boorgatwand. In grof materiaal met grotere poriëngrootte is de formatie die indringingsdiepte tijdens de mudspurt groter. De mate van blokkering van de poriën is dus afhankelijk van de materie in de boorvloeistof en de porie grootte verdeling van de omringende formatie.
- De consolidatie van de boorvloeistof door vorming van een externe filtercake. Door het drukverschil tussen het boorgat en de omringende formatie zal er water uit de boorvloeistof worden geperst, terwijl de kleideeltjes op het boorfront achterblijven.

Voor de HTO-bronnen van ECW is gebleken dat het ingewikkeld is om een goede boorspoeling te vinden. Dit heeft te maken met de samenstelling van het grondwater (pH, brijn/zout concentraties van het grondwater, temperatuur). Het doel is om de boorgatwand zo stabiel mogelijk te houden tijdens het boren, de aanleg en afwerking van de HTO-bron bij een zijn klein mogelijke effect van de versmering op de boorgatwand bij oplevering.

3.3.2 Boortechnieken voor HTO in de diepe ondergrond

3.3.2.1. Roterend spoelboren (Straight-flush rotary)

Wanneer er dieper dan 500 m-mv moet worden geboord is een zuigboring met luchtlift niet meer toereikend en zal men gebruik moeten maken van straight-flush rotary (spoelboren) met een drilling rig. De boorkosten voor HTO-bronnen in de diepere Nederlandse ondergrond zullen hoger zijn voor dergelijke boringen. Daarnaast worden er meerdere formaties doorboord, waarbij het boorproces, de keuze van de boorvloeistof met additieven en de circulatie-los van groot belang zijn. Circulatie-verlies van de boorvloeistof, en het zwellen van kleilagen zijn belangrijke zaken waar rekening mee dient te worden gehouden. Daarnaast zijn de diepere formaties in de Nederlandse ondergrond fijnzandige, minder doorlatende watervoerende pakketten. Het is hierdoor van groot belang dat de boorvloeistof goed worden afgestemd op het bodemmateriaal, om diepe infiltratie van fijn materiaal in het reservoir te voorkomen tijdens het boorproces. Daarbij is het ontzanden van de fijne fracties uit de boorspoeling van groot belang.

3.3.2.2. Aanvullende zaken waar rekening mee moet worden gehouden bij diepere boringen

In aanvulling op de protocollen en richtlijnen voor mechanisch boren (2101 en 11001) zijn de volgende punten aanvullend of extra belangrijk voor diepere boringen:

- Nagaan of de boorinstallatie geschikt is: verhoogde belasting nodig tijdens boorproces, hogere druk nodig, etc.
- Maak gebruik van zwaardere boorbuisen.
- Formaties met overdruk (Artesisch water). Diepere formaties kunnen door vroegere geologisch processen een hogere waterdruk hebben. Hier moet rekening mee worden gehouden tijdens het boorproces (bijv. het gebruik van zwaardere boorspoeling en/of verhoogd opstellen van de boorwagen).
- Met de diepte neemt het zoutgehalte in de te doorboren formaties toe.
- Hou rekening met het aanboren van formaties waar gas aanwezig is. In de praktijk zal men in de Bovenste Noordzee Groep dergelijke zones niet aanboren. Echter is het raadzaam om dit wel na te gaan in het vooronderzoek.

- Zoals boven vermeldt is de keuze voor het boorspoelingsadditief cruciaal om een stabiel boorgat te waarborgen en het instorten van het boorgat te voorkomen. In veel gevallen is PAC (Antisol) voldoende. In het uiterste geval kan men overgaan op bentoniet.
- Voor straight-flush rotary (spoelboringen) tot aan de basis van de Krijtkalkgroep formatie wordt meestal boorvloeistof op waterbasis (water-based mud) toegepast. Afhankelijk van het gegeven kader voor het gehele boorproces (hydrostatische druk, fracture gradient) wordt dichtheid van de te gebruiken boorvloeistof verhoogd. De concentraties moeten niet te hoog zijn, om vorming/afpleistering op de boorgatwand te voorkomen ter hoogte van het bronfilter. Gebruikelijke boorvloeistofdichtheden zijn 1.15-1.30 KPM (kilo pound per meter).
- Er dient voldoende hydratatie tijd (ten minste 24 uur) in acht te worden genomen voor het gebruik van de boorvloeistofadditieven (bentoniet/polymeren).
- Overweeg input van een boorvloeistofspecialist om op voorhand juiste boorvloeistof te kiezen, en deze te monitoren en checken/handhaven op de benodigde kwaliteit gedurende het boorproces en de bronafwerking. Hierbij dient de pH, viscositeit, dichtheid,
- en de concentratie aan zand/klei fractie te worden te worden gemonitord.
- Het is raadzaam om de kwaliteit van de boorvloeistof regelmatig te checken. Voor diepere boringen, waar meerdere formaties met andere geohydrologische samenstelling, en met water met een variërende grondwaterkwaliteit worden doorboord, is dit van veel groter belang dan voor ondiepe boringen.
- De kwaliteit van de boorvloeistof moet voldoende. Wanneer er teveel zand/silt fractie in de boorvloeistof aanwezig is moet deze worden verwijderd, of dient men gebruik te maken van een nieuwe, schone boorvloeistof. Het is in de praktijk noodzakelijk om gebruik te maken van voldoende bezinkbakken, schudzeven, en cyclonen om de boorvloeistof voldoende te ontzanden.
- Wanneer de annulus van het boorgat nog niet is aangevuld met aanvulmateriaal (filtergrind, afdichtingsmateriaal en aanvulgrind), dient de boorvloeistof te worden gecirculeerd in het boorgat om neerslag van de boorvloeistof te voorkomen.

4. Ontwikkelen en schoonpompen

OBES, infiltratie- en onttrekkingsbronnen dienen zodanig te worden schoongepompt en ontwikkeld dat ze geschikt zijn voor het langdurig onttrekken en infiltreren van grondwater op ontwerpcapaciteit. Het ontwikkelen van een win- en infiltratiebronnen omvat het verwijderen van natuurlijke boorspoelingscomponenten en additieven uit de onttrekkingsbron, uit de omstorting en van de boorgatwand, en het verwijderen van de fijnere fracties uit de formatie rond het pompfilter. Het doel is de onttrekkingsbron in optimale conditie te brengen zodanig dat bij oplevering een zo groot mogelijke specifieke volumestroom wordt verkregen. Hiermee wordt voorkomen dat de onttrekkingsbron door restanten boorspoelingscomponenten en/of fijn materiaal verstopt raakt. Om initiële bronverstopping te voorkomen moet de bron maximaal worden ontwikkeld.

In de literatuur wordt meerdere keren gewezen op het grote belang van het omkeren van de stroming tijdens het ontwikkelen van bronnen (zogenoemd flushen en back-flushen). Langdurig schoonpompen op hoge capaciteit wordt sterk afgeraden omdat hierbij zandbruggen ontstaan die de doorlatendheid verkleinen (met andere woorden de bron levert geen zand, maar de capaciteit is gering).

4.1. Bronontwikkelingsmethodes voor OBES- en onttrekkingsbronnen

In deze paragraaf is een opsomming gegeven van de meest toegepaste ontwikkelingsmethoden. Met de volgende ontwikkelstappen zijn goede ervaringen opgedaan:

- **Schoonpompen**
Zodra de afdichtende kleilaag boven het bronfilter is aangebracht, is het raadzaam de onttrekkingsbron zo gauw mogelijk (liefst binnen 24 uur) schoon te pompen om restanten van de boorspoelingscomponenten (met name op de boorgatwand) te verwijderen. Als het boorgat dan nog niet helemaal is aangevuld, moet de pompcapaciteit (afhankelijk van de toelaatbare afpomping) op een niet al te hoge waarde worden gesteld (om instorten te voorkomen).
- **Sectiegewijs schoonpompen**
Bij sectiegewijs schoonpompen wordt water onttrokken aan een sectie van het bronfilter door middel van een sectieapparaat. Hierdoor ontstaat lokaal een hogere stroomsnelheid in de omstorting en op de boorgatwand. Zo wordt het fijne materiaal en de restanten van boorspoelingscomponenten rond de onttrekkingsbron beter verwijderd.
- **Jutten**
Hierbij wordt de waterkolom in de stijgbuis onder druk weggeduwd en vervolgens losgelaten, waardoor een versnelling ontstaat van het water. Het is belangrijk om te stoppen met jutten als de jutterdruk niet meer sneller opbouwt.
- **Intermitterend pompen**
Gedurende 12 uur (1 nacht) pompen.
- **Chemisch behandelen** (zie ook regenereren in paragraaf 7)
- **Behandeling van de bron met een oplossing van natriumhypochloriet of aangezuurde waterstofperoxide.** Chemische behandeling wordt toegepast om eventuele boorspoelingsadditieven te verwijderen. Op basis van het gebruikte additief kan de chemische behandelingsmethode worden geselecteerd.

Minder vaak toegepaste mechanische methoden zijn:

- 'surgen' of 'bailen'. Met behulp van een zuiger in de onttrekkingsbron bewegen we het water in de formatie heen en weer. Dit noemen we 'surgen'. Als we een puls inzetten in plaats van een zuiger spreken we van 'bailen' (Olsthoorn, 1982)
- gebruik van explosieven
- hoogfrequent trillen (ultrasoon).

4.1.1. Schoonpompen bronbodem ('bodemstofzuigen')

Als gevolg van het ontwikkelen van de onttrekkingsbron kunnen er fijn zand, grindkorreltjes en organisch materiaal op de bronbodem bezinken. Daarom moet na het ontwikkelen van de onttrekkingsbron de bronbodem worden schoongepompt. Soms moet dit ook gebeuren vóór het ontwikkelen, namelijk als dat op grond van de dieptemeting noodzakelijk zou zijn.

De bronbodem wordt schoongepompt met een 'air lift'. Dit is een haalbuis die tot de bronbodem wordt gesloten en waaruit water wordt onttrokken door het inbrengen van perslucht op circa 30 m-mv.

4.1.2. Intermitterend of sectiegewijs afpompen en jutteren

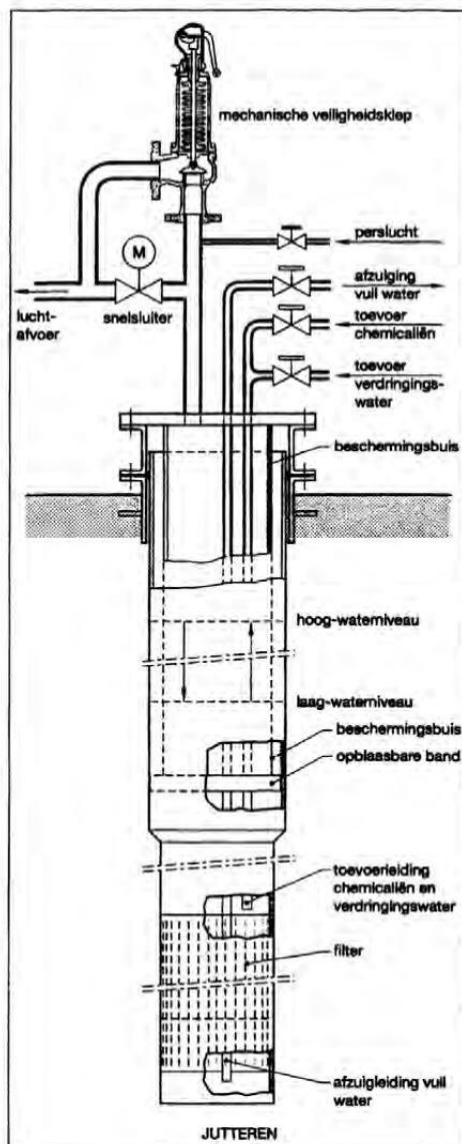
Als fijn zand, slib of resten van boorspoelingshulpmiddelen de toestroming van grondwater belemmeren, kan het opvoeren van de stroomsnelheid gedurende korte tijd een remedie zijn om deze belemmering op te heffen.

Bij intermitterend pompen staat de onderwaterpomp niet continu aan om grondwater te onttrekken. Door de pomp op intermitterend in te schakelen zal de pomp gedurende een aantal minuten in werking zijn om vervolgens weer uit bedrijf te gaan. Dit duurt eveneens enkele minuten. Deze actie is met name gericht op het verwijderen van de boorspoeling die in de formatie is gekomen voordat de boorgatwand werd gepleisterd.

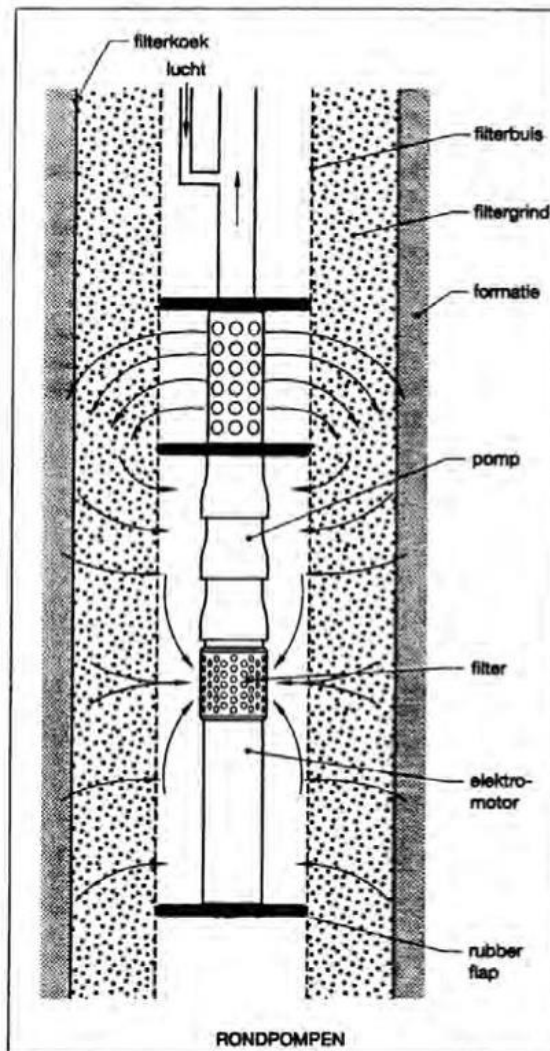
Bij sectiegewijs onttrekken en rondpompen wordt het filtertraject per sectie ontwikkeld. De lengte van een sectie varieert van 1,5 tot 2,0 m. De capaciteit van het sectiepompen moet afhankelijk worden gesteld van de doorlatendheid. Deze actie is gericht op het verwijderen van ondermaats fijn zand en de filterkoek. Bij het sectiegewijs ontwikkelen wordt water uit een sectie onttrokken en vervolgens geloosd. Bij het sectiegewijs rondpompen wordt eveneens water onttrokken uit een sectie, maar wordt een deel van het onttrokken water weer in een andere (bovenliggende) sectie geïnfilteerd. Het rondpompen veroorzaakt een steeds wisselende stromingsrichting als het sectie-apparaat op en neer wordt gehaald. Het filter van een input intermitterend en/of sectiegewijs afpompen levert in de praktijk wisselende resultaten op.

Ook jutteren we de onttrekkingsbron wel. Bij jutteren verlagen we de waterspiegel door met perslucht het water in de onttrekkingsbron weg te drukken (zie Figuur 4-1. a) Jutteren en b) rondpompen (SWB, 1997)). Daarna laten we de lucht in een keer ontsnappen. Afhankelijk van de diepte van het wegdrukken van de waterspiegel, ontstaat hierdoor gedurende korte tijd een hoge stroomsnelheid. In de praktijk wordt er ook vaak gejutterd met toegevoerde chemicaliën om deze goed met de verstopping in contact te brengen.

a)



b)



Figuur 4-1. a) Jutteren en b) rondpompen (SWB, 1997)

4.1.3. Rondpompen

Voor het reinigen van het bronfilter en van de filteromstorting zijn allerlei sectieapparaten met verschillende kamers (compartimenten) ontwikkeld, waarbij één kamer (de middelste) met een onderwaterpomp is uitgerust. Bij deze sectieapparaten wordt het water, al of niet met toevoeging van chemische middelen, met kracht door de omstorting en het filter rondgepompt. Om te voorkomen dat het losgemaakte vuil wordt rondgepompt, wordt vaak een deelstroom van het water afgevoerd (zie Figuur 4-1b). In de literatuur zijn onder andere de 'Kieswäscher' (Paul, 1993; Berger et al., 1992) en de 'Turbocleaner' beschreven. Momenteel is in Duitsland de Symmetrischen Doppelkolbenkammer

(SDKK) populair. Bij dit sectieapparaat wordt het filter boven en onder de kamer afgesloten met extra lange flappen, waardoor het bereik tot dieper in de omstorting reikt.

Ook in Nederland wordt rondpompapparatuur toegepast. Vroeger werd de rondpompapparatuur veel toegepast voor het ontwikkelen van OBES-bronnen, maar tegenwoordig wordt dit amper gedaan. Nadeel bij alle apparatuur, waarbij de omstorting met kracht wordt behandeld, is dat de omstorting kan worden verstoord, en de onttrekkingsbron zand kan gaan leveren.

Dergelijke rondpomconstructies kunnen ook worden ingezet bij het ontwikkelen van pompbronnen. Ook in dit geval wordt een deel van het vuile water continu verwijderd. Groot voordeel van deze werkwijze is dat de hoeveelheid te lozen water sterk wordt beperkt.

4.1.4. Beoordelingscriteria tijdens bronontwikkeling

Over het algemeen worden onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater ontwikkeld totdat wordt voldaan aan de ontwerpcriteria van de desbetreffende bron. Hierbij wordt rekening gehouden met:

- Het geval dat er geen verbetering meer zichtbaar is in de specifieke volumestroom. In het geval de bron verslechtert, moet direct worden gestopt.
- Het behalen van de gewenste specifieke volumestroom (conform ontwerpdebiet).
- De mate van zand- en slibhoudendheid.

4.1.4.1. Specifieke volumestroom

Het is raadzaam om in elke bron een capaciteitsproef uit te voeren op ontwerpcapaciteit gedurende minimaal 2 uur. Tijdens deze proef moet de stijghoogteverandering worden gemeten in de bron en bijbehorende stijgbuis. Het is wenselijk om ook in omliggende bronnen en peilbuizen de stijghoogte te meten (= pompproef, zie KWR, 2019b [§10.8.3]), zodat de doorlatendheid van het grondwaterpakket en de weerstand van de kleilagen nauwkeurig kan worden geschat (kD- en c-waarden). De specifieke volumestroom van niet verstopte, omringende bronnen in hetzelfde watervoerende pakket moet op één locatie nagenoeg overal gelijk zijn.

Aan de hand van gemeten waterniveaus (oftewel stijghoogteverandering) in de bronnen bij een bepaald debiet is een specifieke volumestroom uitgerekend. De specifieke volumestroom geeft aan hoeveel m³/h er uit een bron moet worden onttrokken om een waterniveauperandering van 1,0 meter te verkrijgen. Het specifiek debiet bepaalt het functioneren van een bron. Hoe hoger het specifiek debiet, hoe beter een bron functioneert en vice versa. Hiervoor geldt de formule:

$$SV = q_v / \Delta h \quad (4.1)$$

SV = Specifiek debiet [m³/h/m]

q_v = debiet [m³/h]

Δh = verandering waterniveau in de bron t.o.v. ruststand [m]

De specifieke volumestroom van de onttrekkingsbron voor drinkwater dient ten minste 90% bedragen van hetgeen theoretisch bereikbaar is, gegeven de bodemconstanten (kD- en c-waarden).

4.1.4.2. Zand- en slibhoudendheid

Voor het meten van zand- en slibhoudendheid is een protocol opgesteld voor OBES bronnen (Aalten en Witteveen, 2016). Deze werkwijze is ook toepasbaar voor onttrekkingsbronnen.

De zandhoudendheid geeft aan hoeveel vaste stof (massa zand en eventuele boorspoelingsadditieven) per volume waterstroom uit de bron wordt onttrokken. In de praktijk dient het vaste stof gehalte (zand) per volume water maximaal 0,01 mg/l te zijn (zie Protocol 11001). Zandhoudendheid wordt bepaald met behulp van een planktonnet en een opvangcilinder welke een maaswijdte van circa 70 μm hebben. Met het planktonnet worden de zandkorrels gescheiden van het onttrokken water, door een volledige waterstroom met een volume van 10 m³ door het planktonnet te laten stromen. Met de norm van 0,1 mg/l vaste stof per volume water betekent dit dat er maximaal 0,1 gram vaste stof mag zijn achtergebleven in het planktonnet met opvangcilinder.

Slibhoudendheid metingen geven een goede indicatie of een bron goed ontwikkeld is. Wanneer de slibhoudendheid hoog is kan dit een aantal oorzaken hebben:

- De versmering op de boorgatwand en eventuele fracties van boorspoelresten in de omstorting zijn nog niet voldoende verwijderd tijdens ontwikkeling;
- Een zekere hoeveelheid slibfractie afkomstig uit het formatiemateriaal wordt onttrokken;
- Het bronontwerp is niet goed en het bronfilter is ter hoogte van ongeschikte laag geplaatst. Ook kan het omstortingsmateriaal verkeerd zijn aangebracht, of is de keuze van de korrelgrootte verkeerd.

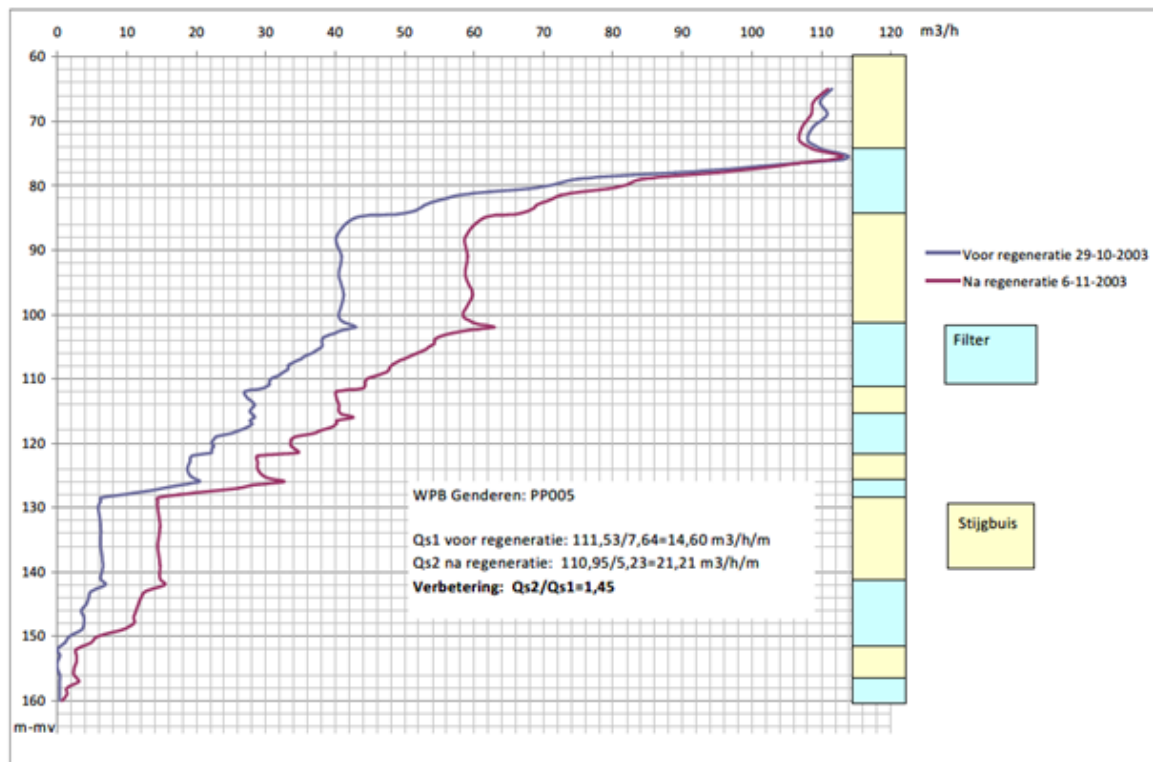
Doorgaans wordt de verstoppingspotentie van slibdeeltjes in het onttrokken water uitgedrukt met de Membraan Filter Index (MFI). In de praktijk is de maximaal toegestane waarde van MFI van het onttrokken water 2 s/l² (zie Protocol 11001).

4.1.5. Uitvoeren flowmeting

Een flowmeting wordt in feite niet uitgevoerd om de onttrekkings, of OBES-bron te beoordelen, maar om de beginsituatie van de bron vast te leggen. Dit wordt doorgaans na het opleveren van de schoongepompte bron gedaan. Later kunnen verschillen tussen flowmetingen juist na het boren en na het verstoppert van de bron inzicht geven in welke bodemlagen verstoppert. Verder kan worden nagegaan of de theoretische snelheid op de boorgatwand voor bepaalde filterdelen afwijkt van de werkelijke snelheid op de boorgatwand (zie Figuur 4-2).

Een flowmeting wordt uitsluitend uitgevoerd in een verbuisd boorgat (in verband met stabiliteit). In het geval van hard gesteente kan de meting ook plaatsvinden in een onverbuisd boorgat. De meting bij oplevering geeft inzicht in de doorlatendheidsverdeling binnen een watervoerend pakket en dient als referentie voor het vaststellen van verstopping. De gegevens kunnen soms helpen bij het verklaren van een eventuele toekomstige bronverstopping.

De meting omvat het plaatsen van een flowmeter, die in de stijgbuis tot de bovenkant van het bovenste filter aan een kabel hangt. Gelijktijdig wordt er een constante volumestroom onttrokken met een onderwaterpomp die zich in de verwijde stijgbuis bevindt. Vervolgens wordt de flowmeter met constante snelheid van boven naar beneden verplaatst en vice versa. Het debiet wordt tot slot grafisch tegen de diepte uitgezet. Meestal wordt alleen de meting naar beneden gebruikt voor de interpretatie. Bij de opwaartse meting veroorzaakt de tool eerder verstoring van de stroming en is de netto stroomsnelheid lager, waardoor de stroomsnelheid onder in de bron over een groter diepte-interval beneden de detectielimiet valt.



Figuur 4-2. Voorbeeld van een filterflowmeting van een onttrekkingsbron ten behoeve van drinkwater vóór en na regeneratie bij constante afpompings. In dit geval blijken vooral de onderste filters meer water te leveren na regeneratie. Blijkbaar was dit deel van de bron verstopt (bron: Brabant Water, KWR, 2019b).

4.1.6. Open bodemenergiesystemen

Voor OBES zijn worden de volgende mechanische technieken vaak gebruikt voor het ontwikkelen van de bron:

- Schoonpompen met een gering debiet en langzaam opvoeren tot ontwerp debiet
- Jutten,
- Sectiegewijs onttrekken en rondpompen (dit werd met name vroeger toegepast)
- Intermitterend pompen

Voor diepere boringen kan er sprake zijn van meer afpleistering van de boorgatwand door gebruik van een dikkere boorspoeling (al dan niet met boorspoelingsadditieven). Hierdoor is het mogelijk dat bij toepassing van HTO op grotere dieptes de skin wel hardnekkiger, waardoor de benodigde inspanning bij het ontwikkelen groter kan zijn.

Een OBES bron moet na het ontwikkelen aan de volgende eisen voldoen (NVOE, 2006):

- Het vaste stof gehalte moet lager zijn dan 0,1 mg/l;
- Het MFI-getal moet in principe lager zijn dan 2 s/l²;
- Bepalen van het specifiek debiet (debiet per meter verlaging) door het uitvoeren van een capaciteitsproef. De te bereiken waarde moet gebaseerd worden op een te verwachten kD-waarde, spreidingslengte en een bron-efficiëntiefactor

4.2. Geothermie

Bij geothermie projecten volgt er na het boren een test- & ontwikkelfase. Een puttest is hier een van de onderdelen van, waarbij de put tegelijk wordt schoongespoeld (Kas als Energiebron, 2014).

Een puttest (onttrekkingstest) vindt na elke boring plaats om de productiecapaciteit, de temperatuur en samenstelling van het te winnen water en het meegeproduceerde gas, en de connectiviteit te bepalen. Idealiter wordt ook de injectiviteit bepaald, waarvoor o.a. wellhead en pompen moeten worden geplaatst en chemische waterbehandeling nodig is. Zoals gezegd wordt bij de puttest ook de boorvloeistof verwijderd (schoonspoelen). Hierbij moet voldoende lang worden geproduceerd om te voorkomen dat er later verstoppingen in de injector ontstaan en/of een moeilijke productie (een grote 'draw-down' van de producer). De boorvloeistof is chemisch afval, af te voeren naar een erkende verwerker. Het bronwater kan (als alle boorvloeistof is geproduceerd) eventueel worden opgeslagen en teruggepompt, mits van zuurstof ontdaan en goed gefilterd en gereinigd. Bij een puttest kan gebruik worden gemaakt van een ESP. Dit veronderstelt wel dat de ESP al gedimensioneerd en geïnstalleerd is, maar er is een kans dat de ESP beschadigt door het (zand in) eerste formatiewater. Een schoonmaakoperatie zoals de inzet van 'coil tubing' is te overwegen als de productie tegenvalt. De ESP wordt daarvoor verwijderd en later weer teruggehangen. Alternatief voor het gebruik van de ESP is de air-lift-techniek. In het laatste geval wordt het geothermiewater omhoog gevoerd met behulp van perslucht. Het voordeel is dat de ESP niet beschadigd raakt door meegevoerd zand uit het reservoir, een nadeel is dat het opgeloste gas niet kan worden bepaald. De stappen van een puttest zijn verder toegelicht in het handboek.

Het schoonmaken van de injector duurt circa twee tot vier weken. Het schoonmaken van de formatie gebeurt deels bij het schoonmaken van de putten, maar deels is dit een langzamer proces. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van zuurinjectie of andere (vet-/olie oplopende) middelen die geïnjecteerd en weer opgepompt moeten worden.

4.3. Discussie en samenvatting

Voor hoge temperatuur opslag worden dezelfde ontwikkeltechnieken toegepast als bij reguliere OBES. De boortechniek (zuigboring) en de formaties (ongeachtconsolideerd) zijn hetzelfde als bij OBES. Mogelijk is bij toepassing op grotere dieptes door de hogere druk de skin wel hardnekkiger, waardoor de benodigde inspanning bij het ontwikkelen groter kan zijn. In de praktijk kunnen de volgende ontwikkelingsmethodes worden toegepast voor het ontwikkelen van een HTO-bron:

- Schoonpompen met een gering debiet en langzaam opvoeren tot ontwerp debiet
- Jutten,
- Sectiegevijs onttrekken
- Intermitterend pompen

Stopcriteria bij het ontwikkelproces van de HTO-bron kunnen net zoals onttrekkings- en OBES-bronnen worden gebaseerd op:

- Het vaste stof gehalte moet lager zijn dan 0,1 mg/l;
- Het MFI-getal moet in principe lager zijn dan 2 s/l²;

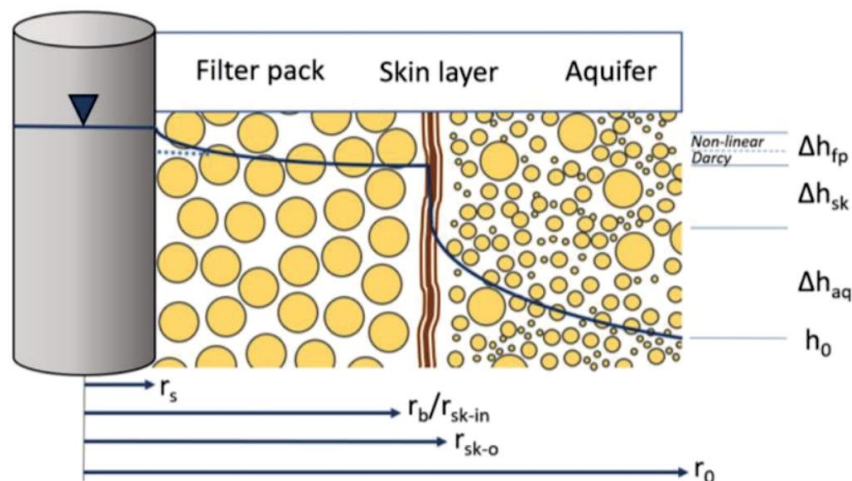
- Bepalen van het specifiek debiet (debiet per meter verlaging) door het uitvoeren van een capaciteitsproef. De te bereiken waarde moet gebaseerd worden op een te verwachten kD -waarde, spreidingslengte en een bron-efficiëntiefactor

5. Bronafwerking en materiaalkeuze

5.1. Onttrekking- en infiltratiebronnen ten behoeve van drinkwater

5.1.1. Omstortingsmateriaal

Voor de omstorting van onttrekkings- en infiltratie bronnen wordt in de regel zogenaamd filtergrind gebruikt. Hoewel de term 'grind' gebruikelijk is, gaat het hierbij om gezeefd grof zand en grind met doorgaans een korrelgrootte tussen 500– 2.500 μm . De korrelgrootteverdeling van het filtergrind wordt afgestemd op die van het formatiemateriaal (zie Figuur 5-1).



Figuur 5-1. Schematisch overzicht van het drukverlies in een infiltratiebron met omstortingsmateriaal (Van Lopik et al. 2020).

De omstorting moet aan de volgende eisen voldoen:

- Een zo laag mogelijke weerstand voor toestromend grondwater (bij voorkeur maximaal enkele cm. In Tabel wordt de doorlatendheid van filtergrind gegeven voor verschillende types zand.
- Het voorkomen van zandverplaatsing uit de formatie, zodanig dat tijdens normale productie het opgepompte water zandvrij is (1 g/10 m³)
- Stabilisatie van de omliggende formatie.

De afstemming van de korrelgrootte van het filtergrind moet zorgvuldig worden afgestemd op de formatie. Een te fijne omstorting beperkt de mogelijkheden om restanten boorspoeling en vastgelopen materiaal tijdens het ontwikkelen en de daaropvolgende regeneraties van de boorgatwand te verwijderen. Hierdoor is de bron gevoeliger voor verstopping. Een te fijne omstorting leidt tot een geringe (marginale) toename van de stromingsweerstand.

Bij een te grove omstorting kan formatiemateriaal de omstorting binnendringen. Dit kan resulteren in zandlevering van de bron en mogelijk ook in extra verstoppingsgevoeligheid door het opvullen van de poriën tussen het omstortingsgrind. Overigens vindt op dit moment bij bronnenveld Espelo (Vitens) een test plaats om te bepalen of bronnen die zand leveren juist minder verstoppingsgevoelig zijn.

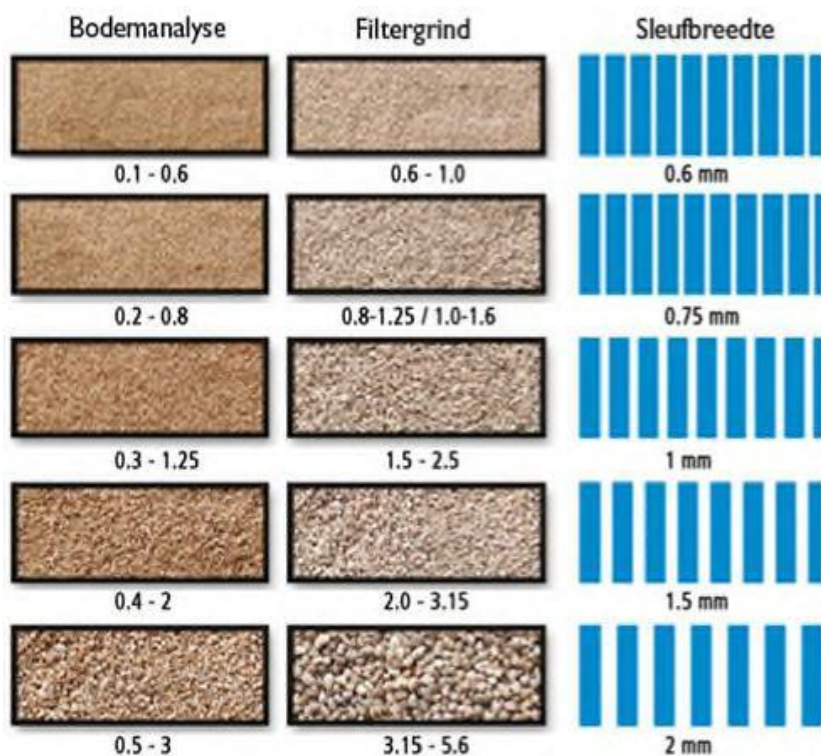
De korrelgrootteverdeling van het omstortingsgrind wordt gebaseerd op een schematisatie van de ondergrond op basis van gemeten korrelgrootteverdelingen (zeefkrommes) van tijdens het vooronderzoek verkregen formatiemateriaal (zie voorbeeld in Figuur 5-2).

Binnen de drinkwatersector worden een aantal vuistregels gehanteerd die op basis van ervaring en experimenteel onderzoek zijn ontwikkeld. De in Nederland meest toegepaste vuistregel gaat uit van de verhouding tussen de mediane diameter van het filtergrind (D50) en de mediaan van de zandfractie van de formatie (M63 of M_z = mediaan van de fractie 63 – 2.000 μm). De te gebruiken factor tussen formatie en omstortingsgrind is afhankelijk van de uniformiteit van het formatiemateriaal. In uniforme eolische afzettingen (duinzanden) kan een hogere factor (1:6) worden aangehouden dan in een slecht gesorteerde fluviatiele afzetting zoals de formatie van Kreftenheije (1:4).

In de praktijk wordt de korrelgrootte van het omstortingsmateriaal rond het filter bepaald op de bodemlaag met het fijnste materiaal. Drinkwaterbedrijven kiezen ervoor om fijnere zandlagen af te werken met blindfilters, zodat men de korrelgrootte van het filtergrind kan kiezen op de lagen die het meest doorlatend zijn. Een deel van de drinkwaterbedrijven kiest ervoor om afgeblinde delen in een fijnere zandlaag ook te voorzien van een kleiprop of fijnere fractie filtergrind (of steunlaag), maar er wordt ook wel voor gekozen om filtergrind door te storten met als idee dat de toestroming (stroomsnelheid) boven- en onder de filterbuizen lager is.

Overigens hangt de uiteindelijk gekozen korrelgroot vaak ook af van welke korrelgrootte de leverancier beschikbaar heeft. Figuur 5-2 toont enkele beschikbare diameters van de firma Boode. Hieruit blijkt dat in veel gevallen er geen filtergrind beschikbaar is met een factor 4 grotere diameter. In dergelijke gevallen moet worden gewerkt met een kleinere factor (groter mag niet in verband met kans op zandlevering). De prijs wordt mede bepaald door de sorteringsgraad.

Voor het filtergrind wordt schoon, goed afgerond groeve- of rivierzand gebruikt. Het filtergrind dient voor minimaal 90% uit kwarts te bestaan zodat geen volumeverandering optreedt door oplossing van materiaal. Als alternatief kunnen glasparels worden toegepast. Een uniforme korrelgrootte verdeling resulteert in een lager stijghoogteverlies door de omstorting en minder ontmenging tijdens aanbrengen. De voorkeur gaat uit naar een uniformiteitscoëfficiënt (U_c) kleiner dan 1.4. U_c is de verhouding D_{60}/D_{10} waarbij respectievelijk 60% (m/m) en 10% (m/m) van de zandfractie van een monster kleiner is dan de bijbehorende korrelgrootten (zie Tabel 5-1).



Figuur 5-2. Diameter van filtergrind en sleufbreedte van de filter als functie van de zandmediaan in de formatie, zoals geadviseerd door de firma Boode (<https://www.boode.com/producten/filtergrind>).

Tabel 5-1. Indicatie doorlatendheid van filtergrind (FILCOM) bij een hoge compactiegraad aan de hand van permeameter testen (Van Lopik et al. 2017).

Filtergrind	d50 [mm]	K [m/d]	Porositeit	Uc
0.2-0.63	0.39	60	0,34	1,5
0.6-1.0	0.71	153	0,33	1,2
0.8-1.25	0.99	351	0,34	1,2
0.8-1.25	1.05	349	0,35	1,2
1.0-1.6	1.36	614	0,35	1,3
1.7-2.5	2.11	1339	0,36	1,2
5.0-8.0 (aanvulgrind)	6.34	10860	0,36	1,3

5.1.2. Materiaalkeuze filter en bronbuis

Doorgaans wordt er gebruik gemaakt van PVC of RVS buis- en filtermateriaal van een geschikte drukklasse voor de constructie van onttrekkingsbronnen voor drinkwater. Dit materiaal moet beschikken over een erkende kwaliteitsverklaring [98] en bestand zijn tegen te verwachten fysische en chemische belasting tijdens aanleg en exploitatie.

Tegenwoordig worden de meeste verticale onttrekkingsbronnen gemaakt van PVC en in mindere mate van RVS. PVC heeft als materiaal veel voordelen en voldoet aan uiteenlopende eisen die aan bronmateriaal worden gesteld. Zo is PVC:

- ongevoelig voor veel chemische stoffen waaronder gangbare schoonmaak en regeneratiemiddelen;
- ongevoelig voor microbiologische invloeden;
- goed te bewerken, te lijmen en te monteren;
- levert waterdichte verbindingen, mits goed verlijmd;
- als buismateriaal gangbaar tot lengtes van 5 m verkrijgbaar en op verzoek zelfs tot 10 m;
- voldoende sterk bij aanleg en exploitatie;
- relatief goedkoop;
- beschikbaar met een erkende kwaliteitsverklaring [98].

RVS filter- en buismateriaal wordt hoofdzakelijk voor speciale toepassingen ingezet.

Voordelen van RVS filters zijn dat een kleinere sleufbreedte mogelijk is, dat het filter sterker is en dat een beter toestromingsprofiel met kleinere intreeweerstand kan worden verkregen. Daarnaast heeft RVS als belangrijk voordeel dat met meer kracht regeneratie kan worden toegepast. Het materiaal wordt ook gebruikt als de bron bestand moet zijn tegen extra mechanische krachten. Het grote nadeel van RVS is dat het duurder is dan PVC. Bepaalde typen RVS kunnen ook gevoelig zijn voor regeneratiemiddelen. RVS filtermateriaal is standaard beschikbaar in de types 304, 304L, 316L en 904L. Andere legeringen zijn op aanvraag beschikbaar. een groot aantal RVS materialen is toelaatbaar.

Een belangrijk risico bij toepassing van PVC is extreme opwarming van de bron. PVC is bij temperaturen $> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ kwetsbaar voor vervorming. Een voorbeeld van een dergelijke opwarming is het geval dat de afsluiter niet is geopend voor het starten van de onderwaterpomp. Zowel pomp als bron kunnen hierdoor verloren gaan.

Er wordt expliciet afgeraden om voor de onttrekkingsbron, de onderdelen en de verbindingen, ander materiaal dan PVC of RVS te gebruiken. Gebruik van ander materiaal zoals gecoat staal, vezelversterkt cement of hout, heeft op den duur lekkage als belangrijkste risico. Een uitzondering hierop is het materiaal van de bronbodem. Hiervoor wordt meestal PE gebruikt en voor kleine bronnen soms nog hout. Afhankelijk van het soort hout bestaat er risico op bacteriegroei. Daarom heeft PE de voorkeur.

5.1.2.1. Drukklasse

Bij het ontwerpen van een winbron speelt de uitwendige druk een grote rol. Tijdens montage en exploitatie werken op de bron verschillende, voornamelijk uitwendige krachten die zo groot kunnen worden dat de bron kan bezwijken (dicht- of inklappen). De meest kritische fase vindt plaats tijdens de aanvulling van het boorgat. Het in de bron gebouwde materiaal moet dan ook bestand zijn tegen de grootste druk die kan worden verwacht. Op deze zogenaamde bezwijkdruk wordt de bronbuis ontworpen. Door de perforatie kan de filterbuis minder druk weerstaan dan een stijgbuis. De filterbuis is dus maatgevend voor de vereiste bezwijkdruk van de bronelementen. De term drukkklasse heeft betrekking op de inwendige bezwijkdruk van buizen en is voor drinkwaterbuizen meer van belang dan voor onttrekkingsbronnen. Bij een filterbuis is de inwendige bezwijkdruk (aangegeven door middel van de drukkklasse) in de meeste gevallen groter dan de bijbehorende uitwendige bezwijkdruk (Tabel 12-4).

5.1.2.2. Filterbuis

Het filter van de onttrekkingsbron moet voldoen aan de volgende eisen:

1. Het moet voldoende sterk zijn,

2. Het moet de formatie tegenhouden en het te winnen water doorlaten,
3. De intreeweerstand moet zo klein mogelijk zijn
4. Het open oppervlak moet zo hoog mogelijk zijn.

In Tabel 5-2 zijn voorbeelden gegeven van veel toegepaste filtertypes. Onttrekkingsbronnen voor de drinkwaterproductie worden in het algemeen uitgerust met filterbuizen die van sleuven in de lengterichting zijn voorzien.

De breedte van de filterspleten is afhankelijk van de korrelgrootte van de omstorting en de gewenste sterkte van het materiaal (zie Figuur 5-2). Bij conventionele axiaal gesleufde filters zijn sleufbreedten van 0,6 – 1,0 mm gangbaar in Nederlandse en Vlaamse ongeconsolideerde formaties. Sleuven smaller dan 0,6 mm resulteren in een laag open oppervlak, terwijl sleuven breder dan 1,0 mm weinig voorkomen, omdat op de meeste plaatsen de aanliggende bodemformatie via de filteromstorting geen grotere maat toestaat.

De filterbuizen met sleufbreedten van 0,6 – 1,0 mm hebben een open oppervlak van 7 – 11%. Deze percentages gelden voor de buitenzijde van de filterbuis. Het netto open oppervlak na installatie is kleiner, omdat ter plaatse van de moffen zich geen spleten bevinden en het doorlaatoppervlak verder wordt verkleind doordat zich omstortingsmateriaal voor de sleuf bevindt.

In de praktijk blijkt de intreeweerstand en daarmee de invloed op de productie verwaarloosbaar te zijn. Het open oppervlak is daarmee vooral van belang voor regeneraties.

Tabel 5-2. Voorbeelden van veelgebruikte filtertypes (KWR 2019b)

Filtergrind	Voordelen	Nadelen
Standaard gesleufd filter (lengte richting)	Sterk: kan meer trekkracht aan en is minder kwetsbaar bij vervoer en inbouwen	Minder goed te regenereren met behulp van hogedrukreiniging
Continue gesleufd (axiaal)	Hoog open oppervlak: Beter te regenereren met behulp van hogedrukreiniging vanwege de oriëntatie van de filterspleten	Borstelen werkt niet goed
Wikkeldraad Jognson V-wire (in zowel RVS als PVC)	Groot open oppervlak bij een fijne filterspleet: Gunstig bij winning uit dun watervoerend pakket door kleinere intreeweerstand Effect van ontwikkeling/regeneratie (middels jetten) drinkt verder door in de omstorting	Sectiegewijs afpompen lukt niet goed: door inwendige ribben kunnen secties niet goed worden afgesloten

5.1.3. Bronbodem en zandvang

De bronbodem is een stevige ronde plaat die aan de onderkant van de bron wordt bevestigd. Bronbodems worden in de buis van de zandvang verlijmd.

De zandvang is de onderste meter van de bron die in blinde buis is uitgevoerd. De zandvang vangt eventueel uitzakkend materiaal uit de formatie op tijdens exploitatie en onderhoud van de bron. Op deze manier wordt voorkomen dat het materiaal het onderste deel van het filter vult. Daarnaast kan door een zandvang ook het onderste deel van het filter mechanisch worden gereinigd (reinigingsapparatuur steekt vaak wat naar beneden uit ten opzichte van de werkzame diepte van het apparaat).

Een nadeel is dat er ook nalevering van bacteriën en regeneratieproducten uit de zandvang kan optreden (er zijn voorbeelden uit de praktijk bekend waarbij een geregenereerde bron pas voldeed aan de grenswaarden voor microbiologische parameters na een extra reinigingsbeurt van de

zandvang). Bij voldoende lange filters en een goede keuze voor de afstemming tussen formatie, omstortingsgrind en filterspleetwijdte is een zandvang niet noodzakelijk.

5.1.4. Aanvullen boorgat en afdichting scheidende lagen

Ter hoogte van niet-scheidende zandlagen waar een blindfilter is geplaatst wordt er in Nederland meestal gebruik gemaakt van aan vulgrind voor het aanvullen van het boorgat. Aan vulgrind heeft een diameter van 2 – 5 mm. Dit is een goedkope en efficiënte manier om het voorgat snel te kunnen aanvullen. Het is vaak hoekiger en slechter gesorteerd dan filtergrind. Het aan vulgrind dient te beschikken over een erkende kwaliteitsverklaring [98]. Een nadeel van aan vulgrind is dat het materiaal vaak een veel grotere doorlatendheid (k-waarde) heeft dan de oorspronkelijke formatie (zie tabel 1). Hierdoor kan binnen het boorgat verticale stroming optreden, wat bijvoorbeeld kan leiden tot extra toestroming van verontreinigingen naar diepere waarnemingsfilters en dientengevolge niet-representatieve waterkwaliteitsbeoordelingen. De mate waarin deze kortsluitstroming optreedt, is afhankelijk van het stijghoogteverschil binnen een watervoerend pakket [104].

Een alternatieve aanpak voor de toepassing van aan vulgrind is het afdichten van het gehele boorgat met zwelklei of hergebruik van uitgekomen materiaal. Het met zwelklei opvullen van de gehele annulus rond de stijgbuis wordt veel toegepast in andere Europese landen (bijvoorbeeld in Duitsland). Het voordeel hiervan is de kleinere kans op verticale kortsluitstroming. Hergebruik van uitgekomen materiaal tijdens het boren wordt door drinkwaterbedrijven vooral toegepast bij waarnemingsbronnen in freatische aquifers met dikke onverzadigde zones.

Herstellen van scheidende lagen

Na boring en plaatsing van de bron moet natuurlijk worden voorkomen dat verontreiniging of grondwater van een andere kwaliteit via het boorgat naar een andere goed doorlatende laag kan stromen (= BRL 2101, eis 17). Daarvoor wordt gebruikgemaakt van afdichtmateriaal dat voldoet aan BRL K5078. Men kan ervoor kiezen om na afstellen en omstorten van het filter het boorgat laagsgewijs herstellen ter hoogte van goed en slecht doorlatende lagen. Ook kan men het boorgat met volledig aanvullen met slecht doorlatend materiaal.

Voor het laagsgewijs herstellen van scheidende lagen wordt in de praktijk meestal zwellende klei gebruikt (hoewel ook 'groutmengsels' zijn toegestaan, zie § 12.9.3). Op de markt zijn diverse materialen op basis van zwellende klei beschikbaar. De diverse soorten afdichtingsklei onderscheiden zich voornamelijk door het percentage bentoniet dat het zwelvermogen van de klei bepaalt. Producten op de markt zijn onder meer CEBOgel en Mikoliet. Een recente innovatie is het toevoegen van magnetiet, waardoor de kleiafdichtingen na aanleg van de bron beter detecteerbaar zijn.

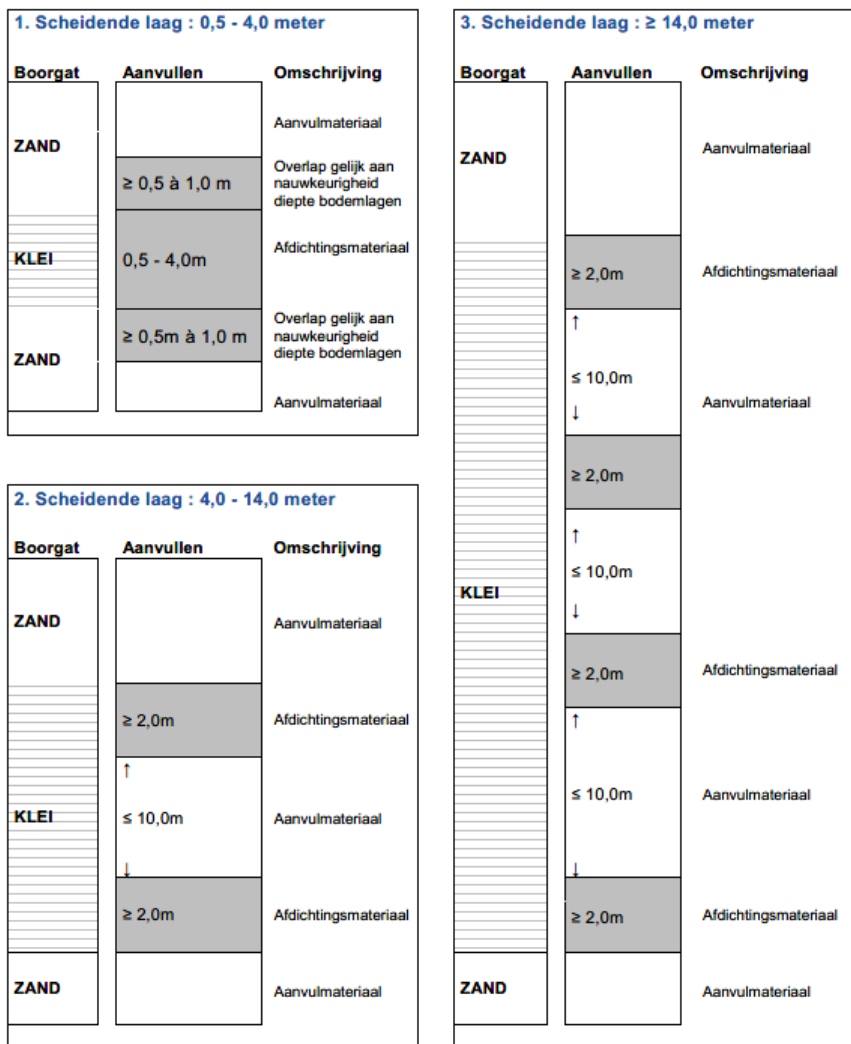
De eisen waaraan het afdichtingsmateriaal aan moet voldoen volgens BRL protocol 2101:

- Het aan vulmateriaal beschikt over een erkende kwaliteitsverklaring [98];
- Het afdichtingsmateriaal (na eventueel zwellen) heeft een maximaal toelaatbare doorlatendheid van 10^{-9} m/s;
- Aan vulklei dient vochtvrij te worden getransporteerd en opgeslagen;
- De klei wordt in plastic zakken of in big bags verpakt, zorgvuldig op pallets opgeslagen en met krimphoezen afgedekt.

Voor het afdichten van scheidende lagen is het gebruik van uitgekomen materiaal niet toegestaan [92].

Het BRL protocol 2101 stelt de volgende eisen aan het laagsgewijs afdichten:

- Van het traject tussen 0 – 1,0 m –mv wordt ten minste 0,5 meter afgedicht met afdichtingsmateriaal. Deze eis is niet van toepassing als dit traject tijdens de uitvoeringsperiode van het werk weer wordt afgegraven, omdat dit deel van de boring onderdeel is van een werk.
- Als in de bovenste 5 m van de bodem geen scheidende lagen voorkomen, wordt het boorgat daarin met minimaal 2 m aaneengesloten afdichtingsmateriaal aangevuld.
- Bij scheidende lagen met een dikte van minder dan 4 m wordt het afdichtingsmateriaal in één aaneengesloten laag aangebracht, met de volgende overlap:
 - Als de diepteligging van de bodemlagen met 1,0 m nauwkeurigheid is vastgelegd, wordt afdichtingsmateriaal vanaf 1,0 m onder de scheidende laag tot 1,0 m boven de scheidende laag aangebracht.
 - Als de diepteligging van de bodemlagen met 0,5 m nauwkeurigheid is vastgelegd, wordt afdichtingsmateriaal vanaf 0,5 m onder de scheidende laag tot 0,5 m boven de scheidende laag aangebracht.
 - Bij een andere nauwkeurigheid in het vaststellen van de diepteligging van de bodemlagen wordt het afdichtingsmateriaal tot boven en onder de scheidende laag aangebracht, overeenkomstig de aangehouden nauwkeurigheid.
- Bij scheidende lagen met een dikte van 4 m of meer wordt (vallend binnen het dieptetraject van de scheidende laag) zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde van de scheidende laag minimaal 2 m aaneengesloten afdichtingsmateriaal aangebracht.
- In aanvulling op de vorige bullet geldt bij scheidende lagen met een dikte van 14 m of meer dat een extra afdichting van minimaal 2,0 m dikte wordt aangebracht als de afstand tussen de afdichtingen groter is dan 10 m tussen deze afdichtingen.



Figuur 5-3. Afdichting van boorgaten ter hoogte van scheidende lagen conform BRL-2101

5.2. Open bodemenergiesystemen

5.2.1. OBES-bronnen

5.2.1.1. Materiaalkeuze van het filter en de bronbuis

Net als onttrekkingsbronnen worden conventionele bodemenergiesystemen voorzien van PVC bronbuizen (pompkamer, stijgbuizen, filterbuis en zandvang). PVC biedt een aantal voordelen ten opzichte van andere materialen (zoals bijvoorbeeld RVS):

- relatief goedkoop;
- in hoge mate bestand tegen veel chemische stoffen en bacteriologische invloeden;
- relatief licht van gewicht;
- gemakkelijk te bewerken;
- goed te lijmen;
- gemakkelijk en snel te monteren;

- levert waterdichte verbindingen op;
- voldoende sterk voor normale omstandigheden (afstemmen op boordiepte en verwachte maximale stijghoogte verandering).

De volgende eisen worden aan het bronfilter gesteld:

- het tegenhouden van het filtergrind, terwijl het te winnen water kan binnentreden;
- chemisch inert zijn;
- de intreeweerstand moet zo laag mogelijk zijn.

Als stelregel kan worden aangehouden dat de breedte van de perforaties (vaak verticale sleuven) van het filter 0,1 - 0,2 mm onder de fijnste fractie van de omstorting moet zitten (NVOE, 2006).

Druk klasse

De drukklasse bij conventionele bodemenergiesystemen wordt voornamelijk bepaald door de maximale druk die de ESP kan leveren. Veelal ligt dit tussen de 8 en 10 bar, de meest gebruikte drukklasse is dan ook PN10 bij bodemenergiesystemen. Bij grotere systemen kan het voorkomen dat dit PN12 of 16 dient te worden, dit is echter afhankelijk van de ESP in combinatie met de gasdruk.

Temperatuur klasse

De temperatuur voor de toepassing van PVC drukleidingen is begrensd tot 45 °C. In het gebied 25-45 °C wordt de toelaatbare werkdruk berekend met behulp van reductiefactoren.

For temperatures < 45°C, standard PVC can be considered but special attention should be given to decreased collapse and burst pressures because of these high temperatures (40% decrease @ 45°C). PVC could be considered for the cold wells as the injected water is cooled down. Restrictions: HEX needs to be operational and no possibility for bypassing the HEX (f.e. for maintenance or testing operations) (Geothermica, 2019)

Centreerringen

De buizen dienen gecentreerd in het boorgat te worden geplaatst. Dit wordt bereikt door het gebruik van centreerringen. De ringen worden veelal om de 5 m om de buis aangebracht (NVOE, 2006). Vaak zijn deze centreerringen van PVC.

5.2.1.2. Omstortingsmateriaal

De ruimte tussen de boorgatwand en de filter- en stijgbuis dient te worden aangevuld met verschillende soorten omstortingsmateriaal. Dit gebeurt op dezelfde wijze als ik beschreven in §5.1.4. Dit is afhankelijk van de bodemopbouw van de formatie, waarin het boorgat is geboord.

5.2.1.3. Gebruikte pomptype ESP

Open bodemenergiesystemen worden vrijwel altijd voorzien van een ESP (electric submersible pump). Afhankelijk van de waterkwaliteit wordt er voor een CrNi staal AISI 304 of AISI 316 ESP gekozen. Omdat grondwater vrijwel zuurstofloos is en de watertemperatuur de 30 °C niet overschrijdt treedt op de lange termijn geen corrosie op. Wanneer meer dan 200 mg/l chloride aanwezig is in het grondwater wordt voornamelijk de AISI 316 variant gekozen. In zoetgrondwater wordt de AISI 304 gebruikt.

De ESP-elektromotor wordt gekoeld middels het te verpompen grondwater. De koeling wordt binnen in de elektromotor verspreid door een water/glycol mengsel.

5.2.1.4. TSA's

De TSA (tegenstroomapparaat) is de scheiding tussen het gebouwsysteem en het grondwatersysteem. Uitgaande van een goede kwaliteit water in het gebouwsysteem is de materiaalkeuze net als bij e ESP afhankelijk van de grondwaterkwaliteit. Ook hier is de keuze tussen een AISI 304 of 316 platenwarmtewisselaar.

5.2.1.5. Drukhandhaving

Om te voorkomen dat het grondwater ontgast wordt het grondwatersysteem ten alle tijden op overdruk gehouden. Deze overdruk is afhankelijk van de gasdruk van het grondwater. Conventionele bodemenergiesystemen maken tegenwoordig vrijwel allemaal gebruik van drukhandhavingstoestellen. Een drukhandhavingstoestel wordt in de bron gemonteerd net boven de bronpomp. Afhankelijk van het type wordt deze ingesteld om op flow of op druk te regelen. Naast de ondergrondse injectieventielen worden er ok bovengrondse kleppen gebruikt. Deze worden echter minder toegepast dan de ondergrondse.

5.2.1.6. Corrosie

Conventionele bodemenergiesystemen hebben tegenwoordig vrijwel geen last meer van corrosie. Vanuit de BRL-11000 wordt voorgeschreven dat in het grondwatersysteem gebruikte materialen minimaal roestvaststaal of kunststof dienen te zijn. Daarnaast wordt het grondwater zo veel als mogelijk zuurstofvrij gehouden en constant op overdruk om zuurstof toetreding en daarmee corrosie te voorkomen.

5.2.2. Aanvullende eisen voor HTO-bronnen

5.2.2.1. Materiaalkeuze

Voor het aanleggen van bronnen is PVC (althans in Nederland) het meest gebruikte en goedkoopste materiaal. Echter, zoals boven vermeldt is het gebruik daarvan begrensd tot temperaturen van 45 °C Bij de bestaande hoge temperatuuropslagen (opslagtemperatuur circa 90 °C) is vooral RVS316 en GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof) gebruikt. De kosten van een opslagsysteem hangen in sterke mate af van de materiaalkeuze.

GVK is zeer geschikt voor de pompkamer en stijgbuis van de bronnen. De buizen kunnen waterdicht aan elkaar verbonden worden door een zogenaamde "Rubber seal lock joint". De verbinding betreft een trekvraste, waterdichte verbinding.

Er is veel ervaring met RVS wikkeldraadfilters voor deze toepassing. RVS wikkeldraadfilter is een vrij gangbaar product met bewezen kwaliteiten. Zo hebben deze filters een hoog open oppervlak van de buis. Het risico op corrosie is klein, aangezien het filter diep wordt geplaatst en daardoor alleen in contact komt met zuurstofloos water.

Het voorkeursmateriaal voor peilbuizen is RVS. GVK kan namelijk pas vanaf een bepaalde diameter geleverd worden. Dit is beduidend groter dan nodig is.

De bronconstructie wordt middels RVS bolcenters of centreerringen gecentreerd in het boorgat geplaatst. Op de manier wordt overal rondom de constructie voldoende omstorting aangebracht.

De druk klasse van het materiaal (uitwendige druk) is belangrijk. Bij hoge temperatuur opslag is het aannemelijk dat een grote afpompingsdruk optreedt. Debietten zijn in veel gevallen hoog en het opslagpakket is vaak beperkt doorlatend. Dit resulteert in grote drukverschillen.

Met onderstaande aspecten moet rekening worden gehouden bij het bepalen van de drukklasse:

- Effect van de temperatuur op de drukklasse van het materiaal.
- De druk die de omstorting en grond uitoefent op de buis. Er zijn aanwijzingen dat deze druk minimaal is vanwege:
 - silo werking (grondruk van de omstorting werkt niet door in de diepte vanwege de wrijving van korrels op de boorgatwand en op de (connecties van) de bronbuis. Hierdoor wordt de grondruk ook niet omgezet in een horizontale zijwaartse druk op de bronbuis. Boogwerking van de omliggende grond en de omstorting zorgt ervoor dat horizontale spanningen of actieve druk minimaal zijn.
- De drukverhoging buiten de buis in de annulaire ruimte tijdens omstorten.
- Afpompingsdruk tijdens het ontwikkelen in de realisatiefase.
- Afpompingsdruk tijdens bedrijfsfase. Afpompingsdruk bij hetzelfde debiet neemt af naarmate de temperatuur van het water toeneemt.

Verder moet rekening worden gehouden met het gewicht van de bronconstructie (GVK en RVS is veel zwaarder dan PVC). De verbindingen moeten bestand zijn tegen de trekkracht. Bovendien moet rekening worden gehouden met thermische expansie. Door hoge temperaturen en temperatuurwisselingen kan het GRE en RVS krimpen en uitzetten. Base of Design (2020)

Wells will be heated during operation and cool down during non-operating periods. With the high temperatures the expansion and shrinkage of the casing and wellhead need to be taken into account in the design to prevent damage during operation. This also accounts for monitoring pipes in or nearby the well. Damage can be prevented to provide enough space for expansion/shrinkage and to use special piping constructions or install compensators that will decrease expansion effects between wellhead and piping connections (Geothermica, 2019).

Druk klasse

Alle componenten van bronkop tot en met de warmtewisselaar dienen een minimale ontwerpdruk van 16 bar te hebben. De ontwerpdruk van 16 bar is benodigd om de nuldruk van de bronpomp aan te kunnen. De systeemdruk dient ten alle tijden onder de ontwerpdruk te blijven. Tijdens het opstarten zal de gasdruk onder de 2 bar blijven. Wanneer het water wordt opgewarmd bestaat de kans op een verhoogde gasdruk door extra methaan vorming in het 4e watervoerend pakket. De verwachting is dat de gasdruk oploopt tot 5 bar. Uiteindelijk is het systeem uitgelegd op een maximale gasdruk van 10 bar.

Indien de nuldruk van de bronpomp hoger is dan 16bar dient het systeem te worden uitgelegd op een hogere drukklasse. Dit is echter niet aan te bevelen omdat veel componenten aanzienlijk duurder worden wanneer de PN16 wordt overschreden, hierdoor stijgt de OPEX aanzienlijk.

Bij het ECW project is er daarom bewust voor gekozen om het 5e watervoerend pakket niet te gebruiken omdat het systeem daarvoor op PN 20 zou moeten worden uitgelegd. Bijvoorbeeld de CO₂ waterbehandeling kon niet functioneren op deze druk. (IF Technology, 2020a)

5.2.2.2. Cement job

The only insulation used for HT-ATES projects is a special light weight cement (Spherelite). This special cement can reduce heat losses compared to clay pellets as backfill. Spherelite minerals (hollow, fused, pressure-resistant mineral) can be mixed up with cement in different quantities. Most common and practical Spherelite cements at densities of 1.2-1.4 ton/m³ have average thermal conductivities of 0.4-0.5 W/Km. This is circa three times as low as a backfill of clay pellets. (Geothermica, 2019).

Het spherelite moet de warmteverliezen tot een minimum beperken. Uit modelanalyses is gebleken dat de toegevoerde waarde van spherelite beperkt is t.o.v. grind en klei. Daarnaast zijn de investeringskosten van spherelite vele malen hoger (ca € 2000 per ton volgt uit overleg met Schlumberger in 2018 en uit informatie van Halliburton uit 2016). Een belangrijk technisch risico voor het gebruik van isolerend beton is de werking (krimpen en uitzetting) van zowel GRE als het beton bij variatie in temperaturen. Hierdoor kan het beton op den duur minder goed aansluiten op het GRE, waardoor ongewenste kortsluitstromen ontstaan.

Bovenstaand risico treedt niet op bij de regulier omstorting voor OBES. Zwelklei is en blijft flexibeler en kan zwellen, waardoor de afdichtende werking behouden blijft. Mikoliet (type zwelklei) is ook bestand tegen hoge temperaturen. Tot een temperatuur van 105 graden blijft de klei structuur behouden.

Ter hoogte van het filter wordt net als bij OBES filtergrind toegepast. Daarnaast wordt daarbuiten ook nog aanvulgrind toegepast. Grind is noodzakelijk om de zwelklei voldoende aan te drukken (goede afdichting). Daarnaast vermindert het grind de kans op zettingen en zorgt het voor een alzijdige ondersteuning van de bronbuizen tegen het risico op bezwijken. Tevens wordt zakking van de bron voorkomen door grind onderin het boorgat te storten (IF, 2020)

5.2.2.3. Pompkeuze ESP VS LSP

Voor een hoge temperatuur opslag (HTO) is een pomp benodigd om het grondwater op te pompen uit de bron. Hiervoor zijn twee geschikte systemen beschikbaar die worden op dit moment worden toegepast in de geothermie en bij OBES. Een LSP (line shaft pump) heeft als grote verschil dat de elektromotor bovengronds wordt geplaatst. De waaiers die in de bron worden geplaatst worden doormiddel van een lange aandrijfas gekoppeld aan de elektromotor. Bij OBES wordt op dit moment alleen de ESP toegepast (Spijker en Ungemach, 2016). Bij geothermie projecten hangt dit af van het systeem (Mwawasi 2014).

LSP's worden voornamelijk gebruikt in bronnen met onttrekkingstemperatuur van rond de 150 - 200°C. ESP's worden voornamelijk gebruikt bij systemen met een temperatuur onder de 120°C. In De in het verleden gerealiseerde HTO's in Nederland hebben voor een deel tijdelijk gebruik gemaakt van LSP's. Bij sommige projecten zijn deze later vervangen voor ESP's en sommige projecten zijn gestopt.

LSP's zijn in het verleden veel gebruikt, maar voornamelijk omdat er destijds minder goede ESP's waren ontwikkeld. De markt voor de ESP's is gegroeid en de technologische vooruitgang is dusdanig geweest dat deze een betrouwbare oplossing is geworden. Voornamelijk wanneer de pomp op grote dieptes moet worden geplaatst is de ESP goedkoper.

Wanneer bij de LSP de pomp op maximaal 150m-mv wordt geplaatst is dit een goed alternatief voor de ESP. Door de kleine markt voor LSP's is er slechts een grote producent overgebleven. Zij zijn

gevestigd in IJsland (Deilir Technical services), een groot deel van de geothermie bronnen zijn uitgevoerd met LSP's van Deilir. (IF Technology, 2020b)

Tabel 5-3 op de volgende pagina zijn de voor en nadelen samengevat opgesomd.

De in het verleden gerealiseerde HTO's in Nederland hebben voor een deel tijdelijk gebruik gemaakt van LSP's. Bij sommige projecten zijn deze later vervangen voor ESP's en sommige projecten zijn gestopt.

LSP's zijn in het verleden veel gebruikt, maar voornamelijk omdat er destijds minder goede ESP's waren ontwikkeld. De markt voor de ESP's is gegroeid en de technologische vooruitgang is dusdanig geweest dat deze een betrouwbare oplossing is geworden. Voornamelijk wanneer de pomp op grote dieptes moet worden geplaatst is de ESP goedkoper.

Wanneer bij de LSP de pomp op maximaal 150m-mv wordt geplaatst is dit een goed alternatief voor de ESP. Door de kleine markt voor LSP's is er slechts een grote producent overgebleven. Zij zijn gevestigd in IJsland (Deilir Technical services), een groot deel van de geothermie bronnen zijn uitgevoerd met LSP's van Deilir. (IF Technology, 2020b)

Tabel 5-3. Overzicht van verschillende voor en nadelen pomptypes (1)

Type	Voordelen	Nadelen
LSP	- Geen elektrische onderdelen in de bron - Lagere snelheid en minder slijtage bij hoge temperaturen (tot 200 °C) - Motor afdichting bovengronds, langere levensduur (minder slijtage) - Algemeen gezien goedkoper - Efficiëntie van 68 – 78% - lagere toerentallen 1750 rpm of minder	- Maximale diepte 500 tot 600 meter - Langere installatie tijd - Grote pompkamerdiameter - Materiaal specificaties van leidingen en lagers - Positie van de pompkamer t.o.v. elektromotor dient in lijn te liggen (maximaal 4° afwijking)
ESP	- Diepe plaatsing mogelijk (+/- 3650 m) - Lange levensduur - Hoge flow / diameter pomp - Eenvoudige installatie - competitieve leveranciers markt (4 grote partijen) - pompkamer kan tot 4 graden afwijking per 30m hebben	- Lagere efficiëntie 50 – 78% - elektronische onderdelen in de bron - minder toegankelijke motor, seal, lagers - Hoge bedrijfssnelheid (meer slijtage) - Algemeen gezien duurder

Materiaalkeuze ESP en LSP

Bij een warmteopslag heeft voornamelijk de opslagtemperatuur de grootste invloed op de ESP of LSP. Tot ca. 50°C kunnen veel conventionele bronpompen worden gebruikt, dit scheelt aanzienlijk in kosten.

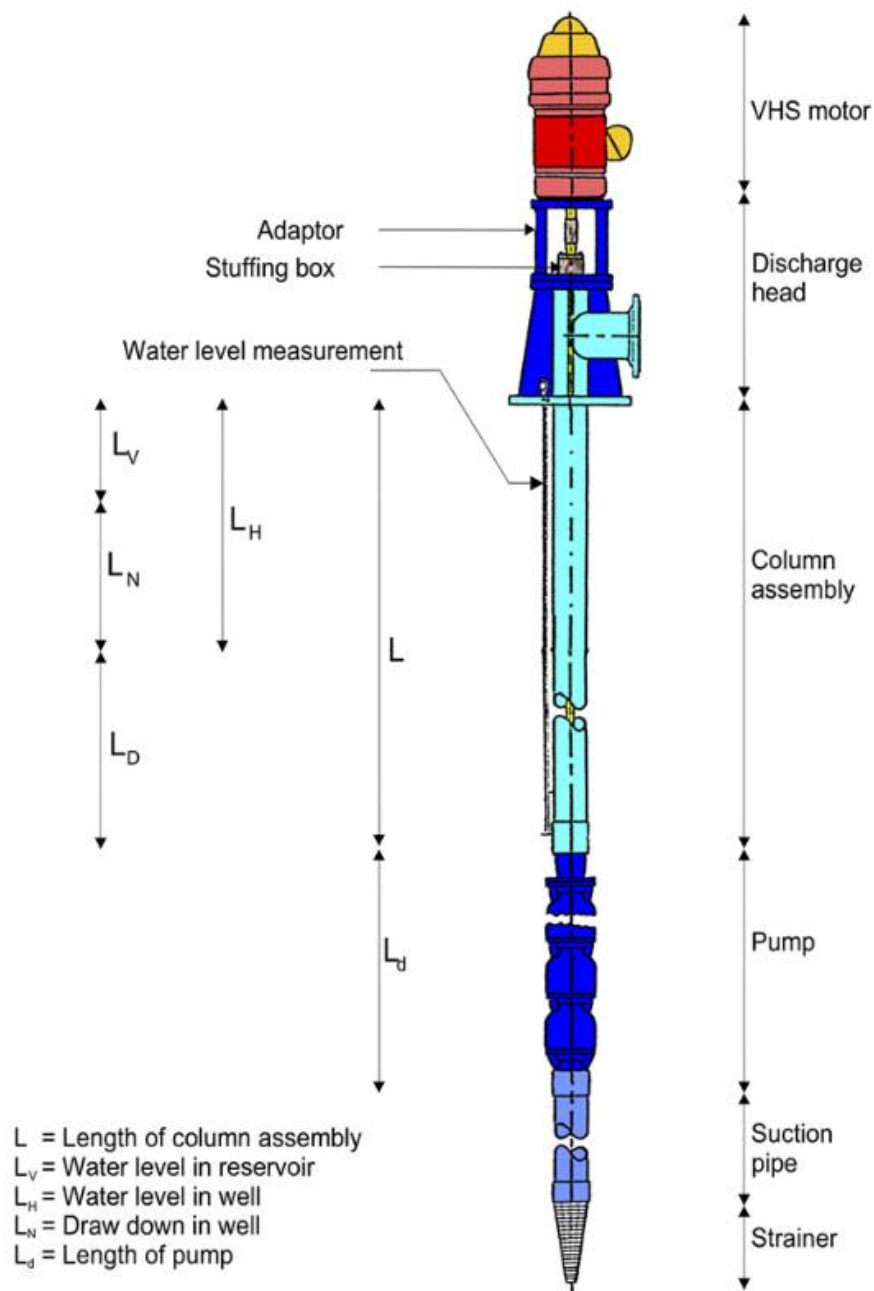
Wanneer de pomp in zoet grondwater wordt geplaatst kan worden volstaan met een RVS316 ESP of LSP. Echter gezien de voorkeur voor dieper watervoerend pakket is de kans op brak/ zout grondwater aanzienlijk. Hierdoor wordt er gekozen voor een 9Cr1Mo ESP of LSP. Tevens is het mogelijk om

Duplex stalen te gebruiken, uit de ervaringen die zijn opgedaan in de geothermie is er samen met de pompleveranciers voor gekozen dat dit niet benodigd is bij warmte opslagen.

Door de hogere temperatuurverschillen wordt er gebruik gemaakt van olie koeling in plaats van water glycol binnen in de ESP. Tevens wordt er een expansievoorziening geplaatst om de expansie van de olie op te kunnen vangen binnen in de ESP en om het grondwater buiten te houden. (IF Technology, 2020a)

Bronpomp kabel

In het verleden gebruikte voedingskabels naar de bronpomp hadden na enkele jaren last van corrosie. De kunststof mantel werd aangetast waardoor kortsluiting ontstond. In de warmteopslag wordt daarom gebruik gemaakt van RVS omvlochten voedingskabel om corrosie te voorkomen en ook beschadigingen aan de kabels te voorkomen.



Figuur 5-4. Schematisch overzicht van een LSP (<https://www.eeagrants.ro/>).

Sensoren op de ESP

Om te voorkomen dat de bronpompen onvoldoende waterdruk hebben dient het waterniveau in de bron ten alle tijden bewaakt te worden. Daarnaast geeft het waterniveau inzicht in de conditie van de bron. Wanneer de waterverlaging stijgt bij een gelijkblijvend debiet zijn er indicaties dat de bron verstopt raakt.

Geothermiebronnen hebben een sensor kop onderaan de pomp gemonteerd waarmee verschillende parameter worden gemonitord:

- druk
- Trillingen
- Druk uit de pomp
- Temperatuur van het water
- Temperatuur van de pomp

5.2.2.4. TSA's

Afhankelijk van de waterkwaliteit kan de TSA uit RVS 316 of Titanium worden vervaardigd. Doordat er voor de warmtewisselaar filters worden geplaatst is het mogelijk dat er tijdens filterwisseling zuurstof toetreedt waardoor het water dat door de wisselaar stroomt tijdelijk niet zuurstofloos is. Dit kan uiteindelijk corrosie veroorzaken bij RVS 316 warmtewisselaars. Afhankelijk van de resultaten uit de corrosie metingen kan uiteindelijk worden bepaald of met de aanzienlijk goedkopere RVS316 wisselaars kan worden gewerkt of dat toch de duurzame en corrosie resistente titanium wisselaars nodig zijn. (IF Technology, 2020a)

5.2.2.5. Drukhandhaving

Op basis van de proefboring dient de gasdruk te worden bepaald. De verwachting is dat de uiteindelijke gasdruk toeneemt door processen die optreden in de bodem en door het toevoegen van CO₂. Er zijn verschillende types drukhandhavingstoestellen om het bovengrondse leidingwerk op druk te houden. In de onderstaande paragrafen worden de verschillende methodes besproken.

5.2.2.6. Injectieventiel

Ondergronds injectieventiel

Om te voorkomen dat water in de injectiebuis gaat ontgassen heeft het de voorkeur om een in line onderwater injectieventiel toe te passen. Deze systemen worden bij standaard OBES veel gebruikt. De combinatie met het hoge zoutgehalte en de temperatuur zorgt ervoor dat de kans op corrosie toeneemt en de klep niet meer functioneert. Tot op heden zijn er geen leveranciers die deze ventielen kunnen leveren waarmee ervaring is opgedaan. Wanneer bekend is of RVS kan worden toegepast zijn er leveranciers die deze ventielen wel kunnen leveren. Zij moeten dan nog wel aanpassingen doen aan de pakkingen en de rubbers.

Het nadeel van het ondergrondse injectieventiel is dat deze diep in de bron wordt gemonteerd, bij de HTO in Middenmeer zou dit neerkomen op ca. 100 m diepte. Indien er een defect optreedt dient een groot deel van de stijgbuis uitgebouwd te worden.

Bovengronds injectieventiel

Het een bovengronds injectieventiel is de voorloper van het ondergrondse injectie ventiel. Een belangrijk nadeel hiervan t.o.v. de ondergrondse is de kans op ontgassing achter de klep. Wanneer de injectiedruk laag is moet de leiding achter de klep dusdanig zijn ontworpen dat er voldoende tegendruk is dat er geen ontgassing optreedt. Hierdoor kom je automatisch op dezelfde constructie als bij de injectieleidingen en is er geen winst t.o.v. de injectieleidingen. De regulier beschikbare injectiekleppen kunnen niet worden gebruikt boven de 82°C. Daarna geeft de producent geen garantie af omdat de afdichtingen hier niet tegen bestand zijn. Hierdoor is het alleen mogelijk om een injectieventiel bij de koude bron te plaatsen, hier zijn de temperaturen lager. Voornamelijk tijdens het

ontladen is een variabel debiet gewenst, tijdens het laden zal er voornamelijk op maximaal debiet worden geïnjecteerd en is een injectieklep niet vereist.

5.2.2.7. Injectieleidingen

Voor enkele oudere OBES wordt nog gebruik gemaakt van injectieleidingen. De injectieleidingen zijn zodanig gedimensioneerd dat deze voldoende tegendruk geven zodat de minimale systeemdruk gehandhaafd blijft. Afhankelijk van het aantal debiet stappen dat gewenst is worden er twee of drie injectie leidingen gemaakt. De injectie leidingen worden uiteindelijk dusdanig vormgegeven dat de systeemdruk gehandhaafd wordt. Deze worden bewust zeer klein gemaakt waardoor de leidingweerstand toeneemt.

Bij de injectieleidingen moet een systeem worden toegevoegd om onderdruk tijdens onttrekken te voorkomen boven in de injectieleidingen. Bij normale OBES is dat niet nodig geweest omdat daar de waterverlaging tijdens onttrekken aanzienlijk minder is (ca. 10m max.). in het HTO concept wordt een koppeling voorzien tussen de injectieleidingen naar de bron kop welke met een O/D afsluiter wordt voorzien. Wanneer de bron overschakelt op onttrekken wordt de klep geopend zodat er geen vacuüm boven in de injectieleidingen kan ontstaan.

Keuze drukhandhavingssysteem

Uiteindelijk wordt er gekozen voor injectieleidingen in het MDM-HTO systeem omdat dit de meest betrouwbare oplossing is om de systeemdruk te handhaven. Alle andere reguliere systemen zijn nog niet eerder toegepast bij temperaturen hoger dan 83°C. Uitgangspunt is als volgt:

- Injectieleidingen worden gedimensioneerd op de mid case;
- Voor de koude bron wordt er rekening gehouden met de minimum benodigde opvoerhoogte van de warme bronpomp onder minimum debiet;
- Indien de systeemdruk niet wordt gehaald kan tijdelijk worden doorgedraaid met een verhoogt debiet om toch de systeemdruk te bereiken. Hierdoor stijgt het minimum debiet;
- Na de productie test dient te worden geëvalueerd of de injectieleidingen voldoen;
- Aanpassing middels andere de diameters of lengtes van de injectieleidingen zijn relatief eenvoudig en kunnen worden doorgevoerd nadat de productietesten zijn uitgevoerd.

(IF Technology, 2020a)

5.2.2.8. Corrosie

Uit het overleg met ECW op 5-12-2019 is naar voren gekomen dat in de huidige geothermie installatie ook RVS316 wordt gebruikt. Tot op heden heeft dit geen significante corrosie opgeleverd. Dit komt mede door de afwezigheid van zuurstof in het geothermiewater en het gebruik van inhibitors. Ook het HTO water is zuurstof vrij maar maakt geen gebruik van inhibitors. Het chloridegehalte in het geothermiewater is ca. 4x zo hoog als in de HTO. Daarnaast is de temperatuur uiteindelijk vergelijkbaar. Bekeken moet worden wat de invloed is van het niet gebruiken van inhibitors. Mogelijk ontstaat er hierdoor toch corrosie op het RVS316 leidingwerk. (IF Technology, 2020a)

5.2.2.8 Transportleidingen

Het leiding werk is in principe ontworpen om de persdruk van de pompen bij geen flow te kunnen weerstaan, uitgangspunt hiervoor is PN16. Voor het transportleidingwerk in het terrein wordt uitgegaan van GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof). De GVK-leidingen dienen te zijn voorgeïsoleerd en de leidingen in de techniekruimte worden naderhand geïsoleerd om energieverlies te reduceren en verbrandingsgevaar te voorkomen.

Geadviseerd wordt om zo veel als mogelijk GVK toe te passen, ook in de technische ruimte. Indien dit door ruimtegebrek niet mogelijk is kan er RVS 316 worden gebruikt. Wel dient er rekening te worden gehouden dat de delen die van RVS 316 gemaakt worden in de toekomst eenvoudig vervangen kunnen worden.

Naast RVS leidingwerk en GVK kunnen kunststoffen (fusiolen® PP-R ERIKS) in de toekomst ook worden toegepast. Deze zijn aanzienlijk goedkoper in OPEX en hebben vrijwel dezelfde positieve eigenschappen als GVK. Echter is het nadeel dat dit type buizen niet lange tijd onder hoge druk kunnen worden toegepast. (IF Technology, 2020a)

5.2.2.9. Componenten

Kritische componenten zoals de O/D kleppen en regelkleppen in het grondwater dienen bij voorkeur te worden uitgevoerd in duplex staal. Bij RVS 316 zal corrosie optreden, onzeker is hoelang de afsluiters blijven functioneren onder deze omstandigheden.

De overige componenten dienen bij voorkeur uit Duplex te bestaan, indien niet mogelijk kan er gebruik worden gemaakt van RVS 316. (IF Technology, 2020a)

Toepassen van RVS 316 coupons

Om vast te stellen wat de corrosiesnelheid is van RVS316 onder de omstandigheden zoals bij de MDM-HTO wordt aanbevolen coupons te voorzien in de installatie. Deze dienen te worden geplaatst aan de warme kant van de HTO. Hiermee kan uiteindelijk ook beter worden bepaald of vervolg installaties dienen te worden opgebouwd uit het duurdere GVK of dat RVS316 volstaat. . (IF Technology, 2020a)

5.2.2.10 Stikstof overdruk op bronkop

Bij het opstarten van de bronpomp daalt het waterniveau in de bron en ontstaat een onderdruk in de gasfase boven de waterspiegel. Als gevolg van deze onderdruk kan lucht worden aangezogen en zodoende kan zuurstof in het systeem terecht komen. Om zuurstoftoetreding aan de bronkop te voorkomen wordt de gasfase boven de waterspiegel in de bronnen van de HTO van ECW op druk gehouden met stikstof. Omdat de productie van stikstof op locatie niet snel genoeg gaat om een overdruk te kunnen blijven garanderen bij een snelle daling van het waterniveau, wordt een buffervat geplaatst waarin een voorraad stikstof op druk gehouden wordt.

Wanneer de bron wordt ingezet voor het onttrekken van water verlaagt het waterniveau. Met een druktransmitter wordt er dan een drukverlaging gemeten en wordt de toevoer van stikstof vanuit het drukvat gestart. De toevoer van stikstof stopt als de gemeten druk weer gelijk is aan de ingestelde minimale druk.

Wanneer het onttrekken stopt of vermindert, dan stijgt het waterniveau in de bron. Hierdoor stijgt de druk in gasfase onder de bronkop. Als de druk boven de ingestelde maximale druk komt, dan pompt een compressor de stikstof terug in het drukvat. Telkens als de druk buiten het ingestelde drukbereik komt, wordt de druk weer teruggebracht naar het ingestelde drukbereik. (IF Technology, 2020a)

5.3. Geothermiewinning

5.3.1. Aanleg verbuizing

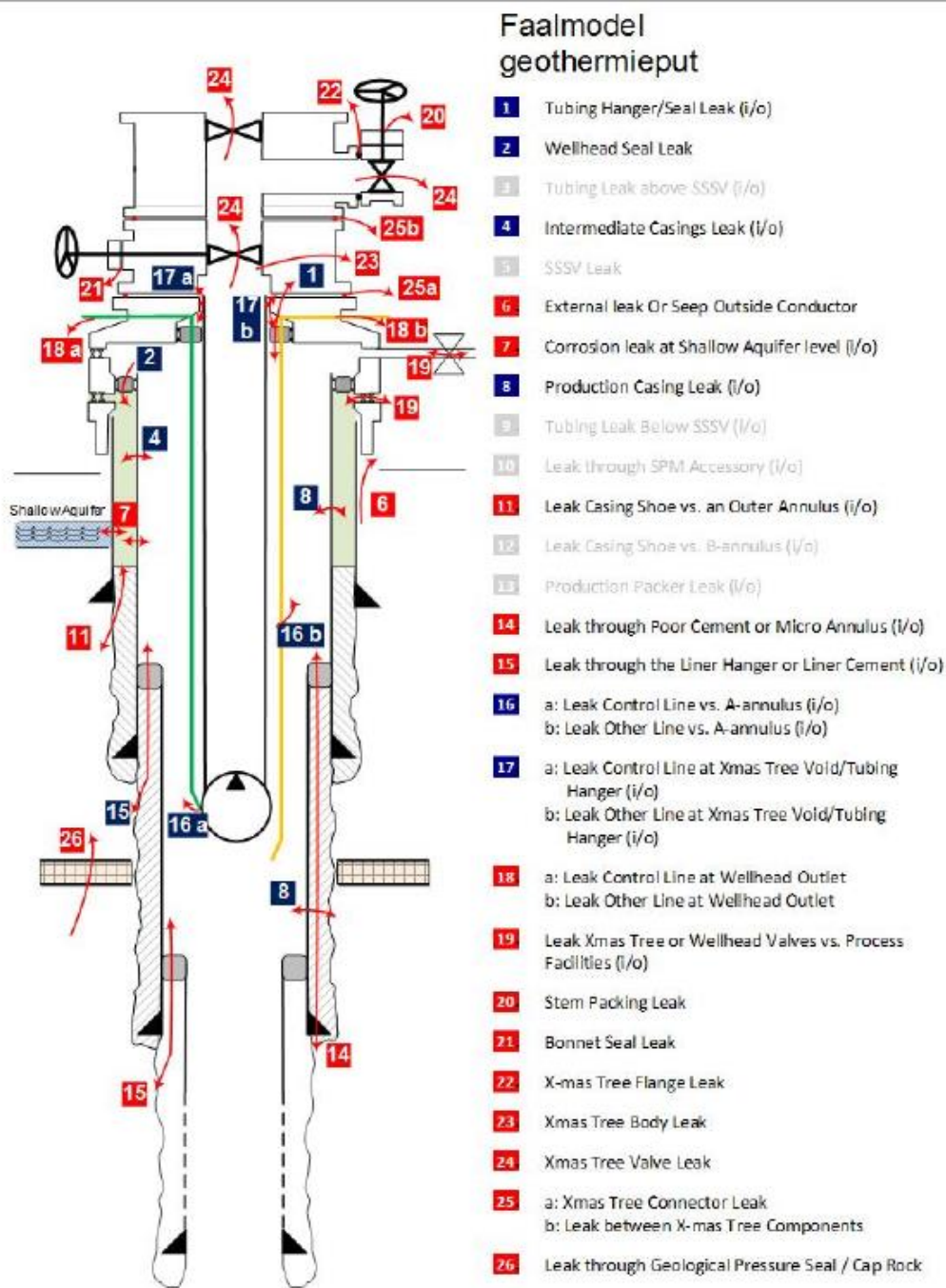
Bij het plaatsen en opereren van een diepe boring wordt de casing op verschillende manieren belast. De uitvoerder (operator) is daarbij ten alle tijden aansprakelijk voor het goed uitvoeren van de werkzaamheden en het gebruik van de juiste materialen (Mijnbouwbesluit, artikel 67 lid 2 (Mijnbouwbesluit, 2016)). In de mijnbouw wetgeving wordt op twee plaatsen in gegaan op het gebruik

van de casing. Centraal staat dat bij het aanleggen, gebruiken, onderhouden, repareren en buiten gebruikstellen van een bron alles wordt voorkomen om schade te veroorzaken. De casing van een bron dient dan ook als barrière ter voorkoming van ongecontroleerde uitstroming van vloeistoffen of gassen.

In het Mijnbouwbesluit (artikel 69) wordt dan ook o.a. geëist dat (Spidron, 2016):

- Een boorgat is voorzien van een geschikte verbuizing
- Elke serie verbuizing wordt over voldoende afstand gecementeerd

In de Mijnbouwregeling (Ministerie van Economische Zaken, 22) wordt hier in meer detail in gegaan waaraan het bronontwerp en dus de verbuizing in ieder geval moet voldoen. In artikel 8.3.2.2 wordt beschreven welke druktest uitgevoerd moeten worden op de drukhouden casing in een bron.



Figuur 5-5. Faalmodel van een geothermiebron met indicatie waar lekstroom kan plaatsvinden (SODM, 2019).

5.3.2. Casing materiaal

Over het algemeen wordt carbonstaal gebruikt bij geothermie in Nederland, en is dit ook de traditionele keuze bij olie- en gaswinning. Ook voor de ontwikkeling van geothermie projecten is

carbonstaal tot nu toe de meest voorkomende keuze. De initiële (aanschaf) kosten voor carbonstaal zullen lager zijn dan (hoogwaardiger) alternatieven. Echter, is carbonstaal gevoeliger voor corrosie en scaling (zie ook §5.3.3.)

Chroomstaal/Super Chroomstaal: Een alternatief voor carbonstaal is Chroomstaal (en Super Chroomstaal). Deze staalsoorten hebben een hoger percentage chroom (13%) ten opzichte van carbonstaal. Voor Super Chroomstaal geldt daarnaast dat het minder Carbon (0,2% → 0,02%), meer Nikkel (0,15% → 5%) en meer Molybdeen (0,02% → 2%) waardoor het metaal beter bestand is tegen een basisch-corrosieve omgeving. De kosten voor (Super)Chroomstaal liggen hoger dan carbonstaal, maar niet op het niveau van composiet.

Composiet: In olie-en gaswinning wordt (op beperkte schaal) gebruik gemaakt van composiet casing om corrosie en scaling problemen het hoofd te kunnen bieden. Op dit moment is er weinig bekend over de toepassing van composiet casing in geothermie. De verwachting is dat de corrosie-en scaling bestendigheid van composiet grote voordelen kan bieden tijdens de levensduur van de bron. Echter is het gebruik van composiet duurder dan het gebruik van carbonstaal. De markconsultatie moet uitwijzen of composiet ook voordelen kan bieden bij de installatie (bijvoorbeeld lichtere rigs omdat het materiaal lichter is). Speciale aandacht wordt besteed aan de thermische eigenschappen van de materialen van de mogelijke leveranciers.

5.3.3. Corrosion of geothermal wells

Production of geothermal energy in the Netherlands is commonly from deeper (>500m) aquifers that contain saline water. The salinity of the water, in combination with dissolved CO₂, makes this water very corrosive. The corrosion rates in the majority of waters do not allow the use of unprotected carbon steel. The Wood Group (2017) therefore proposes two design options, namely Carbon Steel plus Inhibition or Corrosion Resistant Materials. The first option has been the default choice for well construction⁵. The use of carbon steel (K55, for example) as casing material is adapted from the oil and gas industry. However, compared to oil, hot water flowing through wells causes different corrosion reactions. In geothermal systems, corrosion can happen at different parts of the wells, instead of uniform corrosion as often observed in oil and gas wells.

Types of corrosion

The major corrosion types are uniform corrosion, localized corrosion (pitting, crevice and filiform), (mechanical) erosion corrosion and environmentally induced cracking (including stress corrosion cracking). Especially uniform and pitting / crevice corrosion are expected in Dutch doublets.

The expected corrosion type in the subsurface installation is uniform corrosion on commonly applied low grade steel casings (L80, K55, etc). Higher grade carbon and / or stainless steels are more corrosion resistant but also more expensive. The expected corrosion type in the surface installation is pitting corrosion on higher alloy steels. Crevice corrosion is expected where crevices occur along the pipes, like around couplings.

Corrosion potential

The interplay of formation water chemistry, associated gas composition, pH, temperature, steel grade and scaling / corrosion is very complex.

The main corrosive species are the associated gases O₂, H₂S and CO₂. O₂ is in principle avoidable in the installation by using oxygen scavengers or nitrogen blanketing. H₂S is not encountered in current Dutch geothermal reservoirs. CO₂ occurs in all Dutch doublets. The main metallic corrosive species are the less noble metals like titanium, lead and copper.

Abundant available data of the brine and associated gas composition, collected from both the oil & gas and geothermal industry shows that the variation in formation water composition may be extreme, even at short distance, horizontally (between wells, typically kilometers) or vertically (samples taken at different depth within a well). Care should be taken not too hastily apply conclusions drawn from one doublet to another one, even if present in the same reservoir. There is much uncertainty in the associated gas composition measurements, especially concerning the CO₂ content. There is a very strong link between CO₂ content of the dissolved gas and the corrosion potential.

The main corrosion risks are CO₂ corrosion in the production well, galvanic corrosion, and lead and copper scaling in the injection well, which may also lead to corrosion by exchange of casing iron by less noble metals.

If a CO₂ containing brine is degassed, the risk of scaling in the injection well is limited due to the increased pH. The CO₂ corrosion rate increases with increasing CO₂ partial pressure, so corrosion can be most severe downhole in the production well. However, the formation of a protective scale can at the same time prevent corrosion. Top of line corrosion can also be severe but this can be prevented by maintaining a nitrogen blanket. The application of (expensive) high grade steel in the surface system may prevent or limit corrosion.

A high pH reduces the corrosion risk in limestone reservoirs. Degassing increases the pH, thereby reducing the CO₂ corrosion risk but at the same time increasing the scaling risk.

Corrosion models

There is abundant literature about CO₂ corrosion modelling in oil and gas wells, as well as (freeware) software modelling tools, both empirical and mechanistic. The predictive force of these models is limited, given the complexity of the processes involved. The spread of the corrosion rates predicted by the various models is large. Despite the limited predictive force on a practical scale, these tools do provide insight in the importance of different factors like pH, CO₂ partial pressure and temperature. As these tools were developed for the oil and gas industry and were not tested on geothermal wells, the calculated corrosion rates can at best be used indicatively.

The (empirical) NORSOK model shows that a temperature reduction from about 100°C to about 50°C increases the corrosion rate. The highest corrosion rate lies in the 50-70°C range. An increase of the CO₂ partial pressure increases the corrosion rate.

Empirical models cannot be used for extrapolation by definition. They are based on interpolation of sample data, and regressions on sample data relationships. The corrosion rate in geothermal installations having one or more parameters outside the sample range used for the construction of the model can therefore not be determined. Calculated corrosion rates can only be used indicatively.

Mechanistic models can be used for extrapolation and to gain insight in the underlying chemical processes. They are complex to build, they rely heavily on field data input and they may fail in their conceptual model setup.

Corrosion rates

For geothermal energy wells in the Netherlands, corrosion rates are difficult to model with currently available software tools. Indicative general / uniform corrosion rates strongly depend on the pH and partial CO₂ pressures and therefore measurements of the CO₂ content of the gas. The quality of the currently available gas composition measurements is unknown as many are performed on surface samples. High CO₂ partial pressures and hence high corrosion rates cannot be excluded. However, studies on doublets abroad show that the corrosion rate can be significantly reduced by using

inhibitors. Corrosion rate measurements are still hardly available and seldomly measured in situ. Crevice corrosion may lead to very quick failure (as has been observed in more than one Dutch doublet).

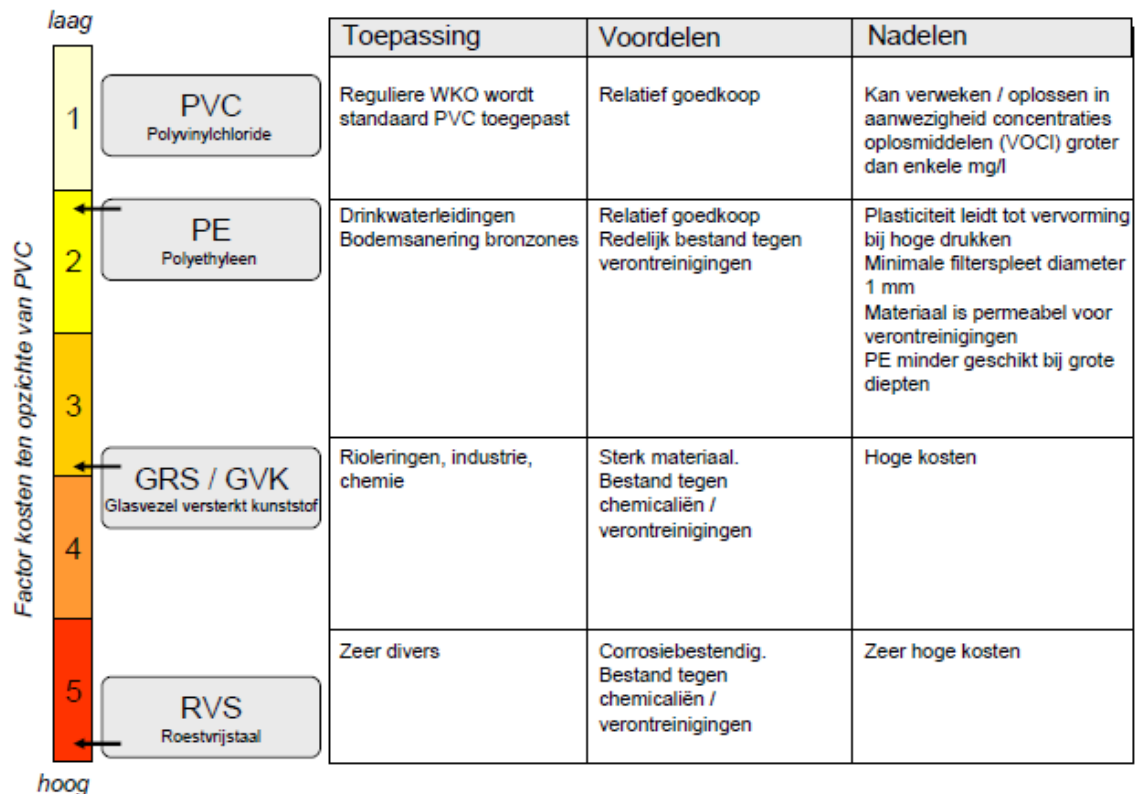
The corrosion rate can be lowered using inhibitors and by using a proper well design. The use of corrosion resistant materials in the installation, such as fibre glass and coated pipes, could in principle reduce the risk of corrosion. An optimal choice of couplings may reduce crevice and/or erosion corrosion. If steel grades with different potential are applied adjacently, isolators should be installed.

Inhibition

Naturally occurring oil serves as natural inhibitor in some geothermal well installations. A variety of synthetic corrosion inhibitors (e.g. cathodic and anodic inhibitors, oxygen scavengers) can be used to lower or altogether eliminate the corrosion potential. In order to offer complete protection, inhibitors should be added downhole in the production well via an injection tubing (which should preferably be installed during the completion of the well).

Different classes of chemical inhibitors are those that displace depolarizers from the metal surface, those that form films that are impermeable to depolarizers, and those that form bonds with depolarizers. Synthetic chemical corrosion inhibitors like tannic acids should be added along the entire well trajectory, starting at bottom hole, in order to offer complete protection. Care should be taken to ensure the dose is adequate to protect the whole installation. This is a practical and iterative process.

With HTO however, the system is positioned in an intermediate domain between OBES (~25°C, 100-200m; low mechanical and thermal stress) and geothermal (70-120°C, 2000-4000m, high mechanical and thermal stress) and the question is what materials should be used cost-effectively for this intermediate domain (100-300m, 90°C; low mechanical stress, high thermal stress). For most of the existing/designed HT-ATES systems up to 95°C, GRE (glass fiber reinforced epoxy) is used for casing. GRE is non-corrosive and has a minimum scaling risk and preferred above steel or stainless steel. As wells will be heated and cooled down during operation and non-operation, the expansion and shrinkage of the casing and well head (thermal stress) need to be taken into account. In HEATSTORE (2019) HT-ATES design analysis is performed, including design parameters of the existing/developing HT-ATES projects.



Figuur 5-6. Material used for casing in ATEs and other applications. From: NVOE (2010)

5.4. Olie- en gaswinning

Zoals hierboven is vermeld worden ESP gebruikt in geothermie systemen. Veel van de ontwikkelingen rondom de ESP zijn echter geïnitieerd en uitgevoerd door en voor de olie- en gas industrie. Hieronder volgt een overzicht van kennis en ervaringen die in deze bedrijfstak zijn opgedaan met de ESP en een vergelijking met de verwachte eisen aan een HTO systeem.

The first successful installations of ESP pumps in oil wells occurred in the late 1920s in Oklahoma City, and today almost 10% of the world's oil supply is produced with submersible pumping installations. With the minimal space requirement, more ESP pumps are installed in the offshore wells. Compared to other artificial lift methods, ESP installation is preferred when large volumes of fluid must be lifted. The ESP can operate over a wide range of depth up to 12,000 ft or 3,658 m and flow rate up to 45,000 bpd or 7152 m³/day (Guo, Liu, & Tan, 2017b). These ranges are specified for oil and gas applications.

The conventional oil well ESP was typically designed to be placed at a great depth, a moderate temperature up to 149°C, and handling high viscous fluid. Hence, the pump may be relevant for application in HTO wells, which have smaller TVD, lower temperature, and low fluid viscosity (compared to hydrocarbon phase). However, several parameters require further investigation, such as:

- A typical HTO well may have larger fluid volume displaced compared to the typical oil well.
- The seasonal storage cycle also implies the handling of the ESP in cyclic operation, with cycles varying between several months to half a year.

The typical operating characteristics between oil & gas and HT-ATES are shown below in Tabel 5-4.

The guidelines for design, installation, and handling of a conventional ESP system can refer to API RP 11S3 (American Petroleum Institute, 2013), as shown in Tabel 5-5. Besides API standards, Lea et al. (1994) provided a summary of failures and troubleshoots of ESP equipment on different oil field cases. In several cases where pumping operation was run outside standard variable limits, special design and manufacturing of ESP equipment may be required to avoid failure or shorten the lifetime of the ESP.

Tabel 5-4. Typical well characteristic between oil and HTO wells

Well characteristic	Oil wells	HT-ATES wells
Well temperature	LPLT: Temperature < 149° C HPHT: Temperature > 149° C	Cold well: Warm well: Up to 90° C
Fluid viscosity	Medium to high viscosity (oil fluids)	Low viscosity (water)
Corrosion issue	The problem arises when the aquifer fluid with high salinity is flowing (high watercut). The situation can be worsened if water reacts with oxygen or other components, e.g. CO ₂ and H ₂ S.	It can happen if the groundwater is saline. However, if no oxygen enters wells and the fluid temperature is low, corrosion can be avoided. If the wells are purely used for production (thus not alternating with injection), there is a low chance of O ₂ ingress in the production casing (hence ESP tubing).
Well design	Typically, has a production tubing	No tubing.
Sand production	Yes	Yes. Particle size distribution and fraction may vary from typical O&G applications.
Scaling issues?	Calcium carbonates Gypsum (calcium sulfate) Barite Sodium chloride Organic material (asphaltene)	Calcium carbonates Gypsum (calcium sulfate)
Gas production	It depends on the IPR. For wells with high GOR, other artificial lifts are considered.	Likely not

Tabel 5-5. API recommended practices for ESP systems (American Petroleum Institute, 2013),

Document Number	Document Title	Scope
RP11S	<i>Recommended Practice for the Operation, Maintenance, and Troubleshooting of Electric Submersible Pumps</i>	Covers all the major components that form the standard ESP pumping system—operation, maintenance, and troubleshooting. It is specifically prepared for installations in oil/water producing wells where the equipment is installed on tubing.
RP11S1	<i>Recommended Practice for Electric Submersible Pump Teardown Report</i>	Covers the recommended ESP teardown report form. It also includes equipment schematic drawings which may provide assistance in identifying equipment components.
RP11S2	<i>Recommended Practice for Electric Submersible Pump Testing</i>	Provides guidelines and procedures covering ESP pump performance testing intended to establish product consistency. It covers the acceptance testing of ESP pumps (sold as new) by the manufacturer, vendor, or user to the prescribed minimum specifications.
RP11S3	<i>Recommended Practice for Electric Submersible Pump Installations</i>	Covers the installation and replacement of all major components that form the typical, ESP system. Specifically, it covers installations in oil/gas operations where the equipment is installed on tubing. It does not cover equipment selection or application.
RP11S4	<i>Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations</i>	Addresses the fundamental procedures for sizing and selecting ESPs and related equipment for various well conditions.
RP11S5	<i>Recommended Practice for Application of Electric Submersible Cable Systems</i>	Covers the materials and application of ESP cable systems.
RP11S6	<i>Recommended Practice for Testing of Electric Submersible Pump Cable Systems</i>	Covers the testing of ESP cable systems. It includes only the field testing category, not factory testing.
RP11S7	<i>Recommended Practice for Application and Testing of Electric Submersible Pump Seal Chamber Sections</i>	It contains tutorial, testing, and failure evaluation information. It provides a general understanding of the construction and functioning of seal-chamber sections and identification of well conditions, system requirements, and characteristics that influence component selection and application.
RP11S8	<i>Recommended Practice for Electric Submersible Pump System Vibrations</i>	Provides guidelines to establish consistency in control and analysis of ESP system vibration. It covers the vibration limits, testing, and analysis of ESP systems and subsystems.

5.4.1. High-temperature wells

The standard ESP equipment can be applied to a maximum temperature of around 149°C, and hence enhanced materials and designs are applied for ensuring proper ESP performance at higher temperatures. Several effects of high downhole temperature on ESP equipment are as follows (Takács, 2018b):

- Weakened the protector (elastomer bag) and shortened its service life
- The dielectric properties of insulation materials (for motor & cable) deteriorate, causing burnouts. Based on the Arrhenius rule, the dielectric life is reduced by one-half for each 10° C temperature rise.
- The electrical resistance of the conductor in the cable caused an increased power loss.

- Reduced oil motor viscosity that leads to the reduced load-carrying capacity of the main thrust bearing
- Mechanical failures due to thermal expansion of different metals
- Overheat the ESP motors. The overheating may be worsened by,
 - Motor overload
 - Insufficient cooling
 - Scale deposition outside the motor
 - Presence of harmonic in the input power voltage.

There are also several solutions suggested to increase the service life of ESP (Takács, 2018b):

- Perform motor derating, so then the motor must be run at less than the full load to prevent overheating. The maximum allowed well temperature rapidly increased with reduced motor loadings. At the same time, the operating temperature falls below the motor's rating temperature.
- Check the liquid flow velocity pass the motor.
- Use of modified motor to reduce the temperature rise in operating ESP motors (Hunt et al., 2014)
- Increase clearances on the rotating members (e.g. protector, pump)
- Sealing materials, elastomers in motors, pumps, and protectors, and insulation and the jacket of cables must be made of ethylene propylene diene monomer (EPDM) materials.
- Insulating stator windings by epoxy.
- Special outside coatings on ESP to reduce scale deposition.

5.4.2. Corrosion issues

The problem of steel corrosion in ESP equipment can occur when the carbon steel exposed to oilfield brines and contaminated with oxygen. Moreover, the dissolved CO₂ in water can generate carbonic acid, which contributes to the corrosion reaction with iron. The presence of H₂S, which is weakly acidic when dissolved in water, also leads to corrosion reaction.

In a case study of an oil well with a high salinity of >320g/L (320,000 ppm) and a halite-deposition problem, several actions were taken to improve the lifetime of ESP equipment (Brahmi, 2016):

- Motors and protectors were changed to tandem (with a double number of shaft seals) to prevent water penetration inside the motor. In some cases, it was found that well fluid enters all three chambers of the protector (elastomer bag), or enter motor through Y-Point Adapter.
- Protector used tungsten bearings that resist wear and corrosion.
- The power cable armor was changed to Monel armor.
- Installation of water-dilution lines.
- ESP housing materials were upgraded from carbon steel to red-alloy (chrome) material.

In another field case, it was observed that the standard corrosion-resistant material (Ni-resist) of pump impellers was not resistant to corrosion. The material of pump impellers was changed to a thermoplastic component (Ryton, polyphenylene sulfide), which is corrosion-resistant, high temperature, lighter weight, but has low mechanical strength. For the ESP cable, MONEL was selected as the material of the pothead body and BELZONA was selected as the pothead coating (Shimokata & Yamada, 2010).

Besides experiences from oil and gas also lessons can be learned from other subsurface operations. In a CCS field, a high amount of CO₂ can lead to major problems. The carbon dioxide corrosion depends on several factors (Chambers et al., 2010):

- CO₂ partial pressure
- Temperature. Corrosion rates generally increase with temperature, and at a temperature below the limit of T_{max}, iron carbonate films are not typically formed and general corrosion dominates (T_{max} carbon steels: 60-80° C)
- Bulk pH and saturation pH of FeCO₃
- H₂S content. Although dissolved H₂S in water can lead to corrosion, the presence of H₂S in the CO₂ environment may decrease the corrosion rate significantly (certain ratio of CO₂:H₂S apply). Studies suggest that 15-30 ppm of H₂S can reduce the CO₂ corrosion rate.
- O₂ content. Studies suggested that the presence of O₂ in 'sweet' wells can increase corrosion up to 23 mpy per ppm of O₂.
- Fluid flow. High flow rate leads to significant wall shear stress, which may mechanically strip protective surface film, allowing the metal to be corroded.
- Alloy composition and microstructure. Austenitic stainless steels and nickel-based alloys have greater corrosion resistance compared to carbon steels and martensitic (low Ni) stainless steel. Increasing the chromium (Cr) content of the alloy was found to increase T_{max}.

5.4.3. Scaling

The most common deposited scales in oilfields are calcium carbonate, calcium sulfate, barium sulfate; and some other scales (iron scales, silica scales, halite, etc.). The deposited scale is typically a precipitation product or the product of a chemical reaction due to changes in the reservoir condition and/or the mixing downhole fluid with incompatible injection fluids. Such fluids can be related to acidizing operation and well kill operations by using seawater (Guo, Liu, & Tan, 2017a).

If ESP is present at downhole, scale accumulation can be found in pump stages and on the outside surface of the motor. Consequently, operational problems, such as plugged impellers and diffusers, plugged suction, and motor overheating, may happen. To eliminate the problem of scaling deposition on the motor housing, special paint or coating can be applied on the housing surface. There is a wide range of coating options, including glass, polymers (e.g. polytetra fluoroethylene), modified ceramics, or titanium dioxide with ethylenediamine tetra methylene phosphonic acid (EDTMPA), which is incorporated into epoxy resin (Wang et al., 2018). Aside of coating application, chemical scale inhibitors can be pumped to the downhole through (i) continuous chemical injection (Cramer & Bearden, 1985), and/or (ii) periodic batch squeeze treatments, and application of non-chemical methods (Heath, Bin Ruslan, McKay, & Ishkov, 2018; Shimokata & Yamada, 2010).

5.4.4. Gas production

The presence of free gas in the fluid mixture tends to reduce the amount of kinetic energy passed on by the impeller because of gas low density, and consequently, the pump develops reduced head. Due to slip between liquid and gas phase (i.e. not subjected to high centrifugal forces), increasing gas volume (gas pockets) in the ESP may cause pressure surges and gas lock, and eventually lead to cyclic shutdowns and restarts, reducing the ESP lifetime.

Phase segregation of gas and liquid in the pump's impeller (dispersed flow is preferred) and pump suction pressure are the essential design aspects for avoiding significant degradation in the pump performance. The phase segregation of two-phase mixture in the impeller is affected by parameters of

stage geometry, bubble size (Zhu & Zhang, 2014), phase densities, liquid viscosity, and pump rotational speed (Pineda et al., 2016).

Three main solutions for ESP application in wells with gas solutions (Wilson, 1994):

1. Natural separation of gas and liquid to prevent gas from entering the pump.
 - a. Gravitational gas separators
 - b. Placing pump below perforations (to avoid bubble point)
 - c. Use of motor shrouds
2. Separation of gas and liquid in the ESP system by using rotary gas separators (RGS). However, the application might be limited in the sandy fluid.
 - a. Paddle wheel (Bunnelle, 1975)
 - b. Rotating chamber (Tuzson, 1978)
 - c. Vortex separator
3. Use of a special pump that handles a large volume of free gas.
 - a. Tapered pumps
 - b. Advanced gas handling (AGH) units from Schlumberger (Schlumberger, 2016).
 - c. Poseidon, which adapted advanced a helicoaxial pump technology (Camilleri, Brunet, & Segui, 2011)
 - d. Multiphase gas handling from Schlumberger
 - e. Multivane pump
 - f. GasMaster

5.4.5. Abrasive solids production

The abrasive action from solid particles can damage the moving parts of the pump. The degree of damage depends on several factors (Takács, 2018b):

- The hardness of the attacked metal
- The concentration, size, shape, mineralogy and hardness of solid
- Particle distribution
- Fluid type and phase fractions
- Number of pump interstages

The metal surface of ESP in the abrasive environment must have larger hardness than the solids. Sand particles are harder than Ni-Resist (18% nickel, a typical alloy of pump stages), regular steel, or nickel. The clearance in ESP must be designed based on the size of solid particles (abrasion is the highest if the particle size is comparable to the clearance). The wear due to erosion also depends on the particle size and the square of particle velocity (Takács, 2018b).

Apart from a lower ESP efficiency resulted from the sand production, damages on the ESP equipment due to solid production can occur in different forms and locations (King, Traylor, & Stewart, 1983; Takács, 2018b):

- Erosion in the pump stage
 - The most damage occurs at the (i) entrances to the diffuser, (ii) entrances to the impeller, and (iii) stagnate fluid areas in the diffuser (below the bottom shroud of the impeller), which leads to swirl erosion. For the latter, mitigation is mounting swirl-suppressing ribs.
- Abrasion in radial bearings (radial wear)

- The radial bearing in ESP is a journal bearing; impeller hub as journal and diffuser bore as the bearing.
- The amount of wear of radial bearings increases with increased flow rates. Solid passing through the clearance can increase the clearance, hence the shaft starts to rotate eccentrically.
- Solution:
 - Use a material harder than sand (e.g. tungsten carbide, ceramics, zirconia, silicon carbide), but it is very brittle and easily fracture. It's also expensive, therefore few abrasion-resistant stages are installed with spacing. An example of developed material is CENTrilift ESP (Baker Hughes, 2020)
 - Soft materials, such as rubber, can be used in journal bearings (King et al., 1983)
- Abrasion in thrust washers and thrust bearings (axial wear)
 - Solution
 - Increase the surface area of washers
 - Use material harder than sand (e.g. tungsten carbide, ceramics, zirconia, silicon carbide).
- Broken shaft due to high torque resulted from pump clogging
 - Solution
 - Using Inconel materials for the shaft to improve its resistance in over-torqued events.
- Sand production could potentially lead to vibration issues which can affect bearings, mechanical seals, etc.
- Sand precipitation above the ESP discharge

There are ESP design modifications and selection which could potentially improve its lifetime under sand production;

- Employing mixed flow stages with radial and axial stabilization
- Increasing the flow area leading to a lower erosional velocity and hence lower wearing and vibration
- Selecting a pump with an extended pump curve which can adapt to a larger production rates, as the productivity could decline due to sand production
- Selecting a pump with a wider stage vane openings and less stages which gives a higher robustness to solid and gas handling
- Using downhole sand separator which can be installed at the ESP motor base (often without a moving part and separation is done by centrifugal forces)

Similar to the high GOR (gas oil ratio) wells, the use of other artificial lift technologies could be considered for the wells suffering from large sand/solid fractions.

5.4.6. Other problems

During the production phase of oil wells, production problems might be experienced, and consequently, the well is temporarily shut-off to perform well remediation. The following lists several considerations that are related to pump equipment during well shut-off. This may be very relevant for the cyclic HTO operations.

- During the shut-off condition, the ESP experiences maximum axial thrust because of the zero flow rate. To prevent burst on the pump, the maximum possible pressure at zero flow rate is

compared to the mechanical strength of pump housing (maximum allowed internal burst pressure) provided by the manufacturer (Takács, 2018c).

- When the ESP unit is started, there is an enormous instantaneous power required to create a motion of the stagnant fluid at the downhole. This means that the motor has to draw currents four to six times higher than its rated current during the short startup period, providing actual voltage above 95% of the rated value. The damage done during each startup can be significant and it is cumulative, even though the motor insulation system is designed to withstand higher currents than that of the nameplate. Thus, a frequent number of startups may lead the motor to deteriorate (indication: pump vibration), and eventually reduces the pump life. To avoid such problems, a soft start of ESP can be selected by using a variable speed drive (VSD) unit (Takács, 2018a).
- In solid-producing fluid, large amounts of suspended solid particles or abrasives may fall back from the tubing string and accumulate on the top stages of the pump. Consequently, it will prevent the pump to restart, and forcing restart may lead to other disastrous events such as damaged stages, broken shafts, or motor burnout. Additional equipment, such as a sand skirt, can be placed above the cable connector to prevent such accumulation (Takács, 2018d).
- To prevent reverse flow during well shut-down from the tubing down through the pump during the well shut-in, a check valve may be installed two or three joints above the ESP. Reverse rotation of the ESP unit can create damage, such as breaking the shaft or burning the motor or cable (Takács, 2018a).

5.4.7. Miscellaneous equipment

Variable-frequency operation

The variable-frequency tool is equipment used to control the pump speed by changing the motor's rotational speed. As a reference, typically the pump performance (pump speed and head) was constructed as a function of a range of electrical frequency. By using this equipment, the operational range can be extended, and it gives flexibility. There are two solutions to apply variable-frequency equipment in ESP systems (Takács, 2018a):

- VSD (variable speed drive). It implements three-phase electrical power from a utility source and control their output frequency electronically.
- VFG (variable frequency generators). By using a some kind of engine, electrical power is generated. Operator can control the output frequency by regulating the speed of engine.

Downhole measurements (DHM)

The DHM device contain different type of transducers (typically pressure, temperature, flow and vibration) that send signals from to the surface. The received signal can be stored, evaluated, and used for controlling the system's operation. Some of the operating parameters that are measured (Takács, 2018a):

- Pump intake pressure, temperature,
- Motor oil or motor winding temperature
- Pump discharge pressure, temperature
- Mechanical vibrations
- Electric current leakage

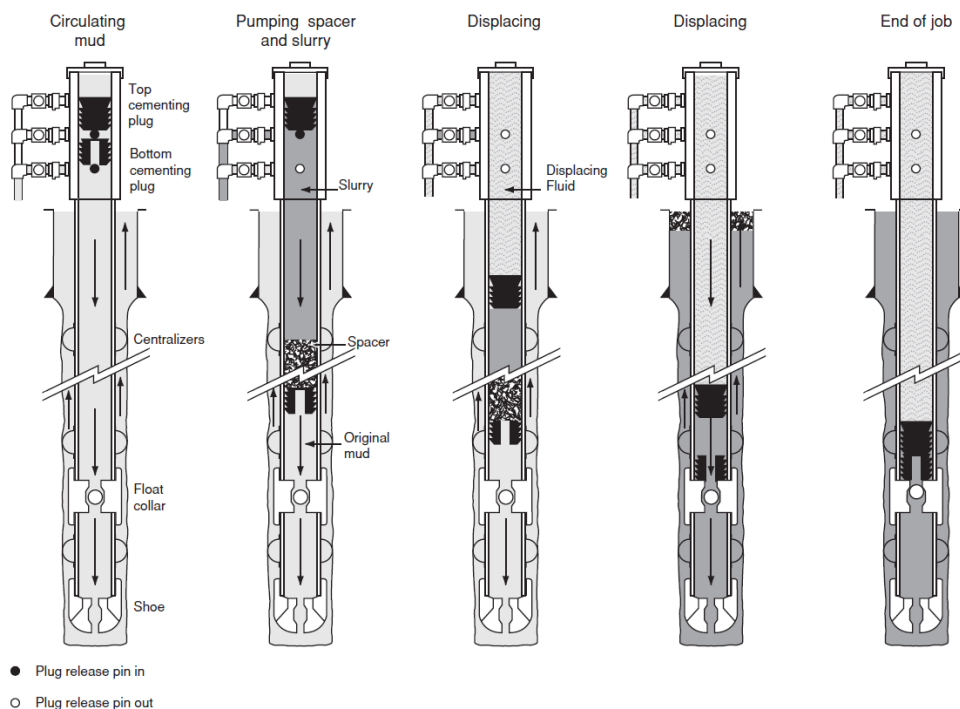
5.4.8. Well integrity en cement job

The types of cement are specified and classified by the API standard. Among those, cement Class-G is the most common cement used in oil and gas well. It is prepared by mixing the cement grain with

44% water by weight of cement (BWOC). Because the cement slurries are usually incompatible with most drilling fluids, preflushes are pumped as buffers to prevent contact between them and cement contamination. The preflushes fluids can be (i) washes, i.e. fluid with a density and viscosity very close to water or oil, or (ii) spacers, i.e. high viscous fluid containing small particle solids. An additional function of the preflushes fluid is to remove the solids from the casing walls.

In most cases, the cement slurry is pumped down through the casing in-place to fill up the annulus space between the casing and the hole. The sequences of the cementing operation can be seen in Figure 5-7. Other methods of primary cementing are a stab-in technique – i.e. a pumping technique through drillpipe, which is usually performed for a large-diameter casing –, or a reverse circulation cementing – i.e. pumping technique through the casing annulus, which is used for an extreme case of lost circulation zones or fragile formations (Piot & Cuvillier, 2006). After the cement is placed, cement is allowed to set or hydrates for a certain waiting-on-cement (WOC) time.

When casing is cemented, it is critical that no water be trapped between the cement and the casing, especially in intervals where one casing is inside another, because the water can thermally expand as the well goes on production and heats up. The casing will almost certainly collapse (if the trapped water location has formation outside it, the fracture gradient is usually low enough to allow the pressure to bleed off into a fracture.) These failures can be serious enough that the production casing is collapsed and ruptured to the extent that it will reduce production and will provide a path from the formation into the cased hole.



Figuur 5-7. Sequences of cementing operation (Heriot Watt University, 2005)

The set cement has an impermeable characteristic, which makes it preferred as a hydraulic seal. However, it was discussed that the conventional cement Class-G can leak because of cement shrinkage, thus different additives are added or special cement systems are used to give additional functions. Descriptions of several cement additives and special cement systems are described in

Tabel 5-6 and Tabel 5-7, respectively. Among these special cement systems, the expansive and flexible cement starts to be used to overcome the shrinkage issues and brittle characteristic of conventional cement. Special cement systems are also preferred for the deeper hole section, where the downhole conditions are more severe, for example, high temperature, high brine concentrations and high pressure.

Well integrity is defined as “application of technical, operational and organizational solutions to reduce risk of uncontrolled release of formation fluids throughout the life cycle of a well” (NORSOK Standard, 2004). The envelopes of one or several dependent well barrier elements (WBE) to prevent unintentional flow from the formation are referred to well barrier. In all well activities, two well barriers, namely primary- and secondary well barriers, shall be available and each of it shall be independent of each other without having the same well barrier elements. The well barriers are designed to withstand the downhole environment and maximum anticipated differential pressure without losing its competency over time. It shall be verified after being placed at the downhole and monitored over time.

Figuur 5-8 shows an example of primary- (blue) and secondary (red) well barriers during the drilling operation. For each of the well barrier element, the design feature, verification method, monitoring, and failure modes are provided in a WBE acceptable table, as shown by the table at the bottom of Figuur 5-8.

In Nederland worden olie- en gasbronnen afgewerkt met meerdere barrières. Het faalmodel voor eventuele lekstroom in een olie of gasbron is weergegeven in Figuur 5-8 en Figuur 5-8.

Het faalmodel van een gasbron kenmerkt zich door meerdere barrières door de hele bron heen (meerdere casings om elkaar heen) en meerdere barrières aan de bronkop in de vorm van afsluiters (Figuur 5-9).

De druk in het gasreservoir is boven- hydrostatisch waardoor het gas uit zichzelf omhoog komt.

In gasbronnen bevindt zich een tubing (productiebuis) waardoor het gas stroomt. De ringvormige ruimte (annulus) tussen de casing en de tubing is onderin de bron afgedicht met een zogenaamde packer. Hierdoor komt er geen gas tegen de casing. Alleen als er een defect is aan de tubing of packer kan gas in de annulus komen. De casing fungeert dan als tweede barrière tegen het gas. De meerdere casings om elkaar heen verzorgen verdere barrières.

Er zijn 5 bedrijven die verantwoordelijk zijn voor het totaal van de 986 gasbronnen gelegen op land.

Het faalmodel van een oliebron kenmerkt zich door een enkele barrière (enkele casing t.o.v. het gesteente) diep in de bron, meerdere barrières ondieper in de bron (meerdere casings om elkaar heen) en meerdere barrières aan de bronkop in de vorm van afsluiters (Figuur 5-8).

De druk in het oliereservoir zijn beneden- hydrostatisch waardoor de olie niet uit zichzelf omhoog komt. De olie kan alleen via kunstmatige opvoermethoden (longstroke pumping, vroeger met ‘ja-knikkers’) worden geproduceerd. De winning van de olie genereert daardoor weinig druk op de bron.

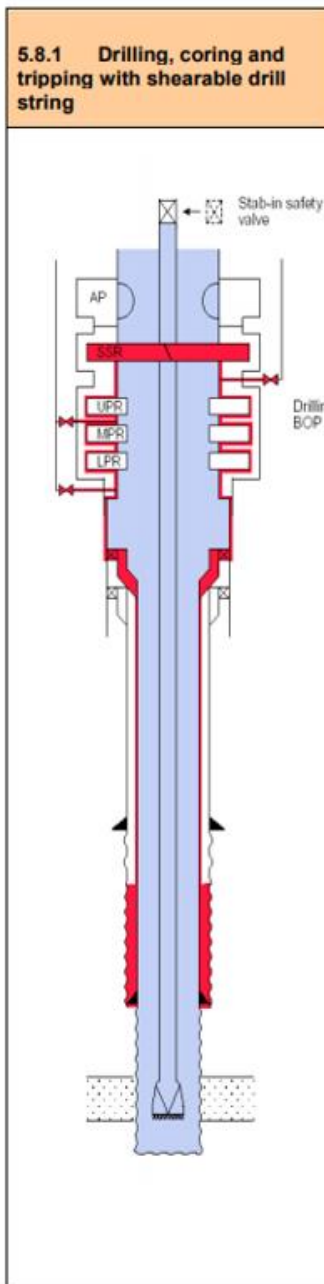
De olie komt in de casing omhoog tot de plunjer van de pomp, en vanaf hier verder door de tubing. Er is 1 bedrijf die alle 39 oliebronnen beheert en tevens het gros van alle gasbronnen op land beheert.

Tabel 5-6. List of cement additives (Nelson, Michaux, & Drochon, 2006)

Additive Category	Benefits	Chemical Composition	Mechanism of Action
Accelerator	Shorter thickening time	CaCl ₂ , NaCl, Na and Ca formates, nitrates, and nitrites	Increased permeability of C-S-H phase layer [†]
	Greater early compressive strength	Na silicates	Formation of C-S-H phase nuclei by reaction with Ca ²⁺ ions
Retarder [‡]	Longer thickening time	Lignosulfonates Hydroxycarboxylic acids Cellulose derivatives	Adsorption onto C-S-H phase layer, reducing permeability
		Organophosphonates	Prevention of nucleation and growth of hydration products
		Certain inorganic compounds	Precipitation of impermeable solids on C-S-H phase layer
Extender	Lower slurry density Greater slurry yield	Bentonite	Absorption of water
		Sodium silicates Pozzolans	Formation of C-S-H phase + absorption of water
		Gilsonite Powdered coal Microspheres	Lower density than cement
		Nitrogen	Foamed cement
Weighting agent	Higher slurry density	Barite (BaSO ₄) Hematite (Fe ₂ O ₃) Ilmenite (FeTiO ₃) Manganese tetraoxide (Mn ₃ O ₄)	Higher density than cement
Dispersant	Lower slurry viscosity	PNS PMS Lignosulfonates Polystyrene sulfonate	Induced electrostatic repulsion of cement grains
		Polycarboxylate Hydroxylated polysaccharides Hydroxycarboxylic acids	Steric hindrance that prevents flocculation of cement solids
Fluid-loss additive	Reduced slurry dehydration	Cellulosic polymers	Increased aqueous-phase viscosity
		Polyamines Sulfonated aromatic polymers PVP PVA AMPS copolymers and terpolymers	Reduced permeability of cement filtercake
		Bentonite Latexes Crosslinked PVA	Particle bridging across cement filtercake
Lost-circulation control agent	Prevention of loss of slurry to formation	Gilsonite Granular coal Cellophane flake Nut shells Fibrous additives	Bridging effect across formation
		Gypsum Certain soluble sulfate salts Bentonite Crosslinked cellulosic polymers	Induced thixotropic slurry behavior [§]
Antifoam agent	Reduced air entrainment during slurry mixing	Polyglycol ethers Silicones	Insoluble in foaming system Lower surface tension than foaming system
Strengthening agent	Increased tensile strength, flexural strength, and toughness	Glass and polymer fibers Metallic microribbons Ground rubber	Transmission of localized stresses more evenly throughout cement matrix
Radioactive tracers	Easier determination of cement location behind casing	⁵³ Ir ¹³¹ ⁷⁷ Ir ¹⁹²	Emission of radioactivity

Tabel 5-7. List of special cement systems (Nelson, Drochon, Michaux, & Griffin, 2006)

Cement System	Principal Uses	Chemical Compositions	Mechanisms of Action
Thixotropic cements	Lost circulation prevention Slurry fallback prevention Gas migration prevention	Portland cements containing one of the following additives	
		Bentonite	Increased gel strength
		Calcium sulfate hemihydrate Aluminum sulfate/iron sulfate	Formation of ettringite crystals
		Crosslinked cellulose polymer	Increased gel strength
Expansive cements	Improved cement/casing and cement/formation bond	Commercial expanding cements or Portland cement containing calcium sulfate hemihydrate	Formation of ettringite crystals
		Salt cements	Internal pressure exerted by crystallization of salt in pores
		Portland cement containing aluminum powder	Generation of hydrogen gas in situ
		Portland cement containing calcined magnesium oxide	Conversion of MgO (periclase) to Mg(OH) ₂ (brucite)
Freeze-protected cements	Cementing across permafrost zones	Calcium aluminate cement	Rapid strength development at low temperatures
		Gypsum-Portland cement blends	Rapid strength development at low temperatures; lower heat of hydration than calcium aluminate
		Ultrafine Portland cement	High surface area increases hydration rate
Salt cement systems	Cementing across salt zones or sensitive formations	Portland cements containing sodium chloride or potassium chloride at concentrations up to saturation	Systems do not disturb salt-bearing formations Systems do not disturb sensitive clays
Latex-modified cement systems	Improved cement/casing and cement/formation bond Improved fluid-loss control Gas migration prevention	Portland cements containing one of the following latexes	
		Polyvinylidene chloride	Film formation on bonding surfaces
		Polyvinyl acetate Styrene-butadiene copolymer	Latex particles plug small pores in cement matrix
Cements for corrosive environments	Cementing chemical waste disposal wells	Epoxy-based cement systems Elastomeric composites	Chemically inert to strong acids and bases
	Cementing CO ₂ injection wells	Pozzolanic cement systems BFS systems	Reduced cement-matrix permeability, improved chemical resistance
BFS systems	Alternative to or supplement for Portland cement Conversion of drilling fluid to cement	BFS + activator (e.g., sodium hydroxide or Portland cement) BFS + activator mixed with drilling fluid	Formation of C-S-H phase, with extensive incorporation of Al, Mg, Fe, and sulfate in structure
EPS cement systems	Systems with improved placement and set-cement properties over a wide slurry-density range	Cement blends with multimodal particle-size distributions	Particle-size distribution minimizes mix-water concentration required to prepare pumpable slurry; set cement is less permeable than conventional systems
Ultralow-density cement systems	Cementing across formations with low fracture gradients or that are vuggy or cavernous	Cements containing glass or ceramic microspheres Foamed cements	Low slurry density reduces hydrostatic pressure in wellbore and prevents formation breakdown
Flexible cement systems	Improved resistance to stresses induced by perforating, hydraulic fracturing, and tectonic movement	Cements containing flexible particles	Flexible particles decrease Young's modulus and increase Poisson's ratio
		Cements containing nylon or metallic fibers	Fibers act as reinforcement and improve flexural strength and toughness
		Elastomeric composites	Polymer matrix filler is flexible
Microfine cement systems	Squeeze cementing, sealing casing leaks	Portland or BFS cements with small particle size (4 to 15 µm) and high surface area (500 to 1,000 m ² /kg)	Smaller particles more readily enter cracks and formation pores
Acid-soluble cement systems	Temporary solution for lost circulation	Magnesium oxychloride (Sorel) cements	Principal binder phase is readily removed by contact with a strong acid (e.g., HCl)
Chemically bonded phosphate ceramics	Fast-setting cements that develop high compressive strength	Magnesium potassium phosphate	Acid-base reaction between an acid phosphate and a metal oxide
Storable cement slurries	Eliminates handling of dry powders during cementing operations	Portland, BFS or blended cements slurried in aqueous solution containing a strong cement retarder	During cement job, concentrated slurry is diluted with mix water containing activator (e.g., sodium silicate)



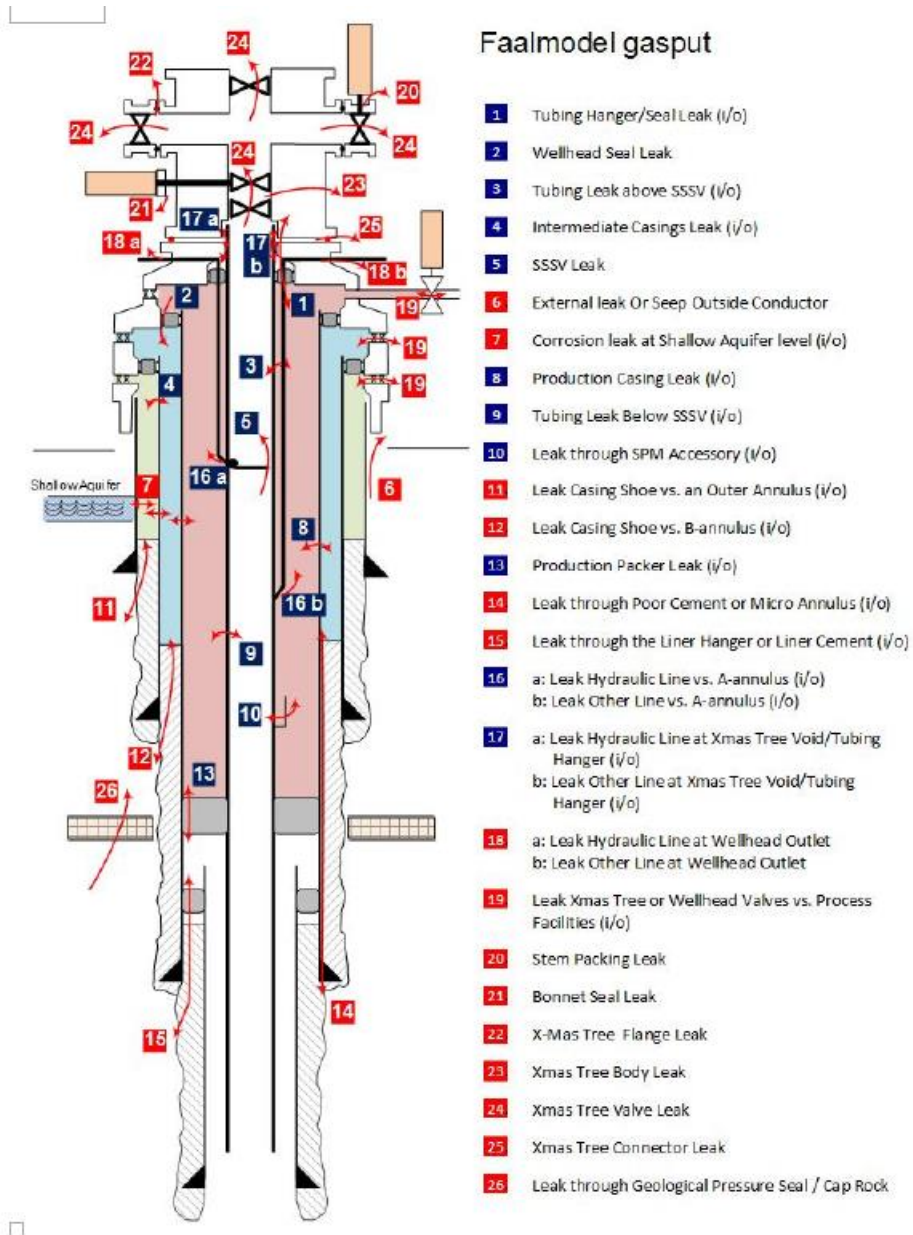
Well barrier elements	See Table	Comments
Primary well barrier		
1. Fluid column	1	
Secondary well barrier		
1. Casing cement	22	
2. Casing	2	Last casing set.
3. Wellhead	5	
4. High pressure riser	26	If installed.
5. Drilling BOP	4	

Note

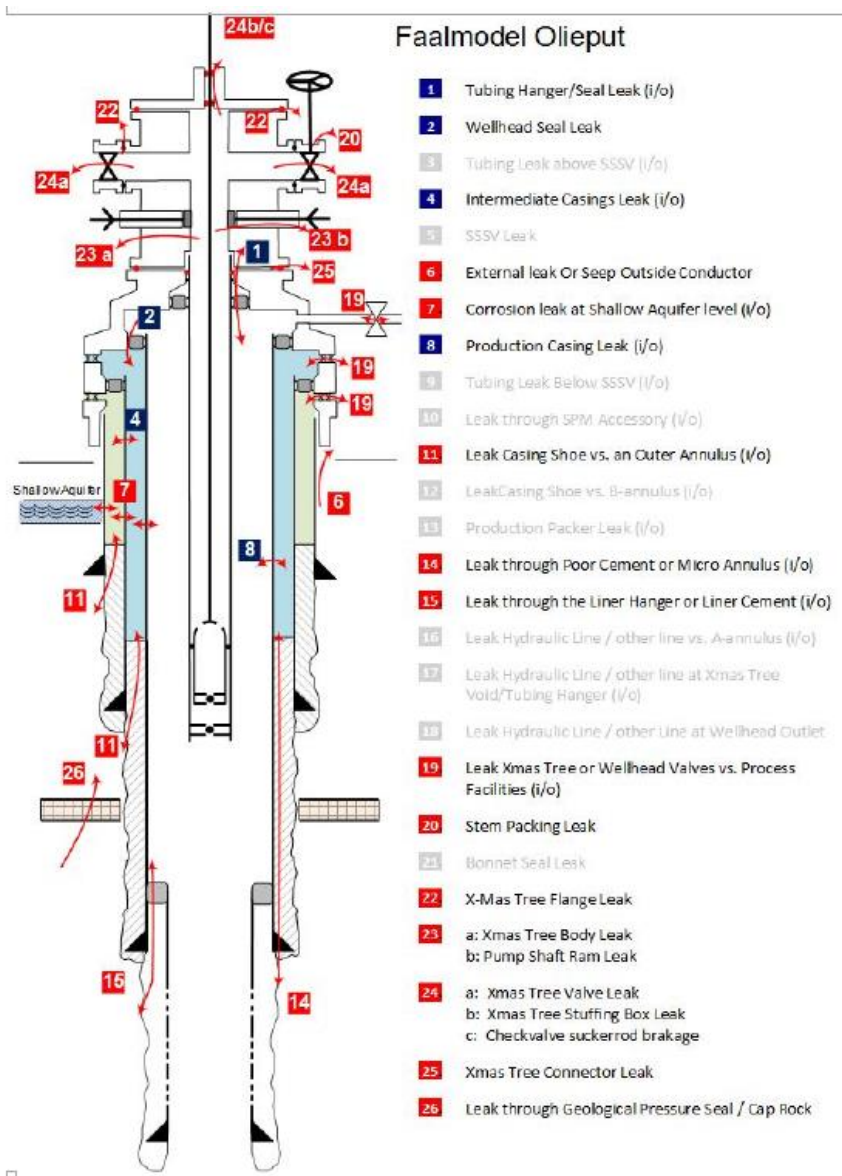
15.1 Table 1 – Fluid column

Features	Acceptance criteria	See
A. Description	This is the fluid in the well bore.	NORSOK D-001
B. Function	The purpose of the fluid column as a well barrier/WBE is to exert a hydrostatic pressure in the well bore that will prevent well influx/inflow (kick) of formation fluid.	
C. Design construction selection	- The hydrostatic pressure shall at all times be equal to the estimated or measured pore/reservoir pressure, plus a defined safety margin (e.g. riser margin, trip margin). - Critical fluid properties and specifications shall be described prior to any operation. - The density shall be stable within specified tolerances under down hole conditions for a specified period of time when no circulation is performed. - The hydrostatic pressure should not exceed the formation fracture pressure in the open hole including a safety margin or as defined by the kick margin. - Changes in well bore pressure caused by tripping (surge and swab) and circulation of fluid (ECD) should be estimated and included in the above safety margins.	ISO 10416
D. Initial test and verification	- Stable fluid level shall be verified. - Critical fluid properties, including density shall be within specifications.	
E. Use	- It shall at all times be possible to maintain the fluid level in the well through circulation or by filling. - It shall be possible to adjust critical fluid properties to maintain or modify specifications. - Acceptable static and dynamic loss rates of fluid to the formation shall be pre-defined. - There should be sufficient fluid materials, including contingency materials available on the location to maintain the fluid well barrier with the minimum acceptable density.	
F. Monitoring	- Fluid level in the well and active pits shall be monitored continuously. - Fluid return rate from the well shall be monitored continuously. - Flow checks should be performed upon indications of increased return rate, increased volume in surface pits, increased gas content, flow on connections or at specified regular intervals. The flow check should last for 10 min. HTHP: All flow checks should last 30 min. - Measurement of fluid density (in/out) during circulation shall be performed regularly. - Measurement of critical fluid properties shall be performed every 12 circulating hours and compared with specified properties. - Parameters required for killing of the well.	ISO 10414-1 ISO 10414-2
G. Failure modes	Non-fulfilment of the above mentioned requirements (shall) and the following: Flow of formation fluids.	

Figuur 5-8. Well barrier schematic for drilling operation describes the primary and secondary WBE envelopes the wellbore. (Bottom right) Acceptance criteria table of the fluid column as the primary barrier (NORSOK Standard, 2004)



Figuur 5-9. Faalmodeel van een gasbron met indicatie waar lekstroom kan plaatsvinden (SODM, 2019).



Figuur 5-10. Faamodel van een oliebron met indicatie waar lekstroom kan plaatsvinden (SODM, 2019).

5.5. Discussie en samenvatting

5.5.1. Bronafwerking van ondiepe HTO-bronnen

De volgende zaken zijn van belang bij het afwerken van ondiepe bronnen die zijn geboord met een zuigboring (of een pulsborring):

- **Korrelgrootte filteromstorting:** De te gebruiken korrelgroottefactor tussen formatie en omstortingsgrind is afhankelijk van de uniformiteit van het formatiemateriaal. In uniforme eolische afzettingen (duinzanden) kan een hogere factor (1:6) worden aangehouden dan in een slecht gesorteerde fluviatiele afzetting zoals de formatie van Kreftenheije (1:4). In diepere zandlagen is er relatief weinig bekend over het risico op zandlevering.

- **Keuze filterbuis:** De breedte van de filterspleten is afhankelijk van de korrelgrootte van de omstorting en de gewenste sterkte van het materiaal. Bij conventionele axiaal gesleufde filters (die ook worden toegepast voor OBES-bronnen) zijn sleufbreedten van 0,6 – 1,0 mm gangbaar in Nederlandse en Vlaamse ongeconsolideerde formaties. Sleuven smaller dan 0,6 mm resulteren in een klein open oppervlak, terwijl sleuven breder dan 1,0 mm weinig voorkomen, omdat op de meeste plaatsen de aanliggende bodemformatie via de filteromstorting geen grotere maat toestaat.
- **Materiaalkeuze:** Onttrekkings- en OBES-bronnen worden doorgaans voorzien van PVC bronbuizen (pompkamer, stijgbuizen, filterbuis en zandvang). PVC biedt een aantal voordelen ten opzichte van andere materialen (zoals bijvoorbeeld RVS): PVC-buizen zijn echter niet te gebruiken bij temperaturen hoger dan 45 °C. Door de hoge onttrekkings-, en infiltratietemperaturen dient er ander materiaal te worden gebruikt. Tot op heden is er bij de bestaande hoge temperatuuropslagen (opslagtemperatuur circa 90 °C) voornamelijk RVS316 en GVK (Glasvezel Versterkt Kunststof) gebruikt. In de olie, gas en geothermiewereld wordt er gekeken naar composiet en chroomstaal om effecten als scaling het hoofd te bieden. Of dit materiaal dient te worden toegepast zal mede afhangen van de waterkwaliteit en de waterbehandeling.

5.5.2. Pompkeuze

Voor HTO-bronnen kunnen er line shaft pumps (LSP) en LSP's worden voornamelijk gebruikt in bronnen met onttrekkingstemperatuur van rond de 150 - 200°C. ESP's worden voornamelijk gebruikt bij systemen met een temperatuur onder de 120°C. Wanneer bij de LSP de pomp op maximaal 150 m-mv wordt geplaatst is dit een goed alternatief voor de ESP. Door de kleine markt voor LSP's is er slechts een grote producent overgebleven. In de praktijk zal dus in de meeste gevallen gebruik worden gemaakt van ESP's.

5.5.3. Afwerking van de casing en integriteit voor diepe boringen

Tot op heden worden de meeste geothermie-, olie- en gasbronnen afgewerkt met casings van carbonstaal. Dit materiaal is relatief gevoelig voor corrosie en scaling. Andere opties, zoals composiet casing staan erom bekend dat het zeer resistent is tegen chemicaliën. Chroom casing wordt in de olie en gasindustrie toegepast als de bronnen H₂S of veel CO₂ bevatten.

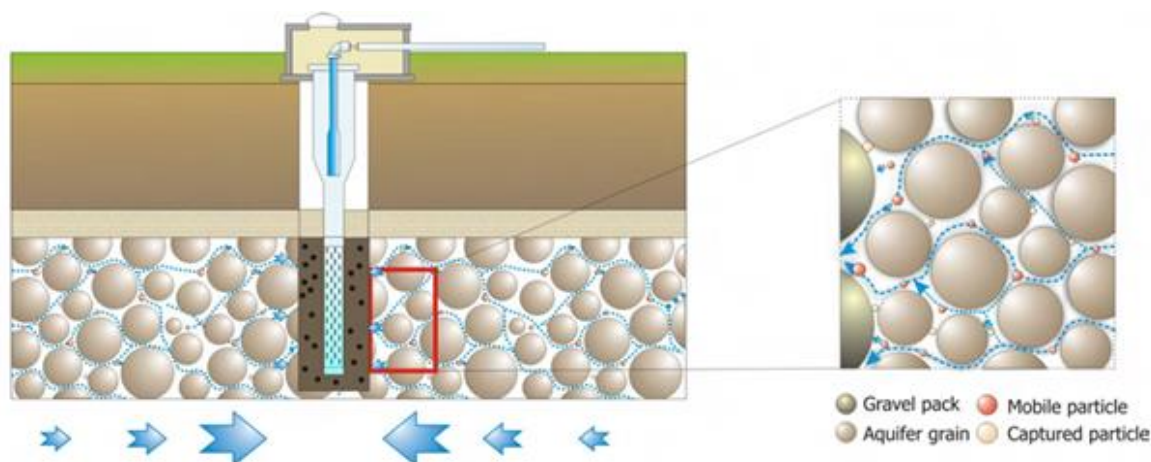
Op basis van de condities in Nederland blijkt dat voor meest gangbare temperatuur-bereiken zowel composiet als chroomstaal een technische oplossing kunnen zijn tegen de corrosieproblemen van HTO bronnen. Echter, voor het overgrote deel van de pakketten die in Nederland worden gebruikt voor HTO zijn de zoutgehalten en CO₂ spanning voldoende laag dat chroom casings niet nodig zijn

Het toepassen van RVS 316 leidingwerk staat ter discussie. Om vast te stellen wat de corrosiesnelheid is van RVS316 onder de omstandigheden zoals bij de MDM-HTO wordt aanbevolen coupons te voorzien in de installatie. Deze dienen te worden geplaatst aan de warme kant van de HTO. Hiermee kan uiteindelijk ook beter worden bepaald of vervolg installaties dienen te worden opgebouwd uit het duurdere GVK of dat RVS316 volstaat. Daarnaast kan hiermee worden bepaald wat de levensduur van de RVS316 componenten zal zijn.

6. Voorkomen van bronverstopping

6.1. Bronverstopping door deeltjes

In de aquifers die worden gebruikt voor ondergrondse warmteopslag met open systemen zijn deeltjes aanwezig, die zowel bij onttrekking als bij infiltratie tot bronverstopping kunnen leiden (zie Figuur 6-1). Bronverstopping door deeltjes is uitgebreid onderzocht in het kader van het programma Bedrijfsgerichte Technologische Samenwerkingprojecten ofwel BTS (Oasen, 2006) en het promotieonderzoek van Kees van Beek (Van Beek, 2010). Ook voor OBES-systemen is de verstopping door deeltjes onderzocht en vertaald in ontwerpnormen (Buik en Willemsen, 2002; NVOE, 2006).

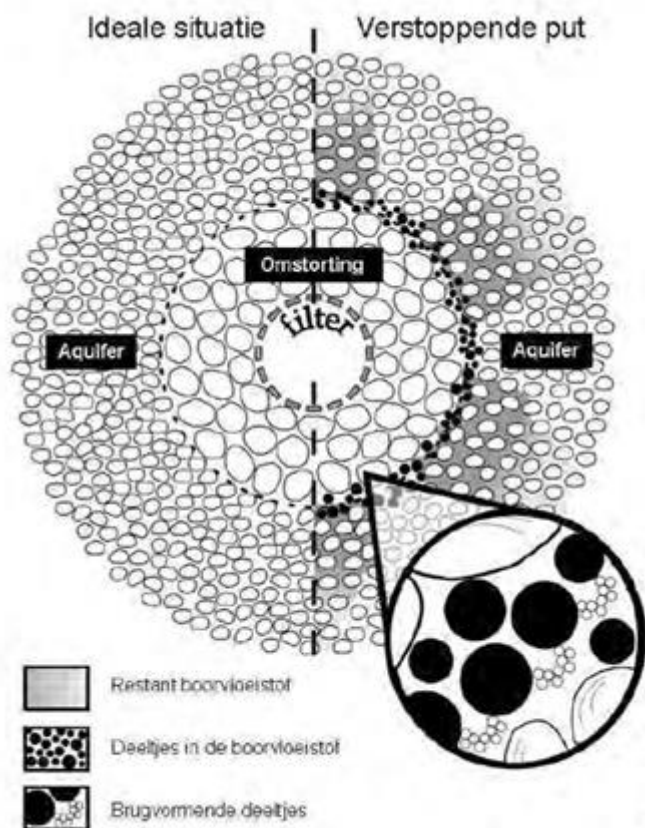


Figuur 6-1. Schematische weergave bronverstopping door deeltjes (Bron: de Zwart, 2007).

Veel kennis over bronverstopping is opgedaan in de drinkwaterwereld (KIWA, 1982; KIWA, 2000). Bronnen van OBES zijn echter minder gevoelig voor verstopping door deeltjes dan bronnen van drinkwaterbedrijven (zie ook Vermaas, 2008). De belangrijkste oorzaken voor dit verschil zijn:

1. De grotere dynamiek van OBES-bronnen

Uit verschillende onderzoeken (van Beek et al., 2004; Oasen, 2006; de Zwart, 2007; van Beek et al., 2009), is gebleken dat frequent schakelen in debiet mechanische bronverstopping beperkt. Bij drinkwaterbedrijven wordt veel gewerkt met pompen met een vast debiet: deze pompen staan aan of uit. Bij OBES-bronnen wordt gebruik gemaakt van bronpompen waarvan het debiet kan worden geregeld (frequentiegestuurde pompen), zodat sprake is van meer variatie in het debiet dat uit de betreffende bron wordt onttrokken (en dus dat er meer geschakeld wordt). Belangrijk is ook dat bij de meeste OBES-systemen de pomprichting bij verwarming en bij koeling tegengesteld is (dit geldt niet voor recirculatiesystemen). Afhankelijk van de energievraag van de gebruiker kan het debiet van een OBES-bron tijdens onttrekking variëren. Daarnaast zal over het gehele jaar zowel onttrekking en infiltratie plaatsvinden waardoor de stromingsrichting omgekeerd plaatsvindt op de boorgatwand. Het schakelen tussen onttrekking en infiltratie werkt waarschijnlijk nog beter voor het afbreken van deeltjesverstoppingen dan het aan- en uitschakelen van de pomp, omdat de deeltjesbruggetjes (die de basis vormen voor deeltjesverstoppingen, zie Figuur 6-2) effectiever worden afgebroken bij het omkeren van de stromingsrichting dan bij het stopzetten van de stroming.



Figuur 6-2. Brugvorming bij een verstoppende onttrekkingsbron

2. netto onttrekking (vrijwel) nul

OBES verpompen in het zomerseizoen grondwater van de koude naar de warme bron(nen) en in het winterseizoen in omgekeerde richting (dat geldt niet voor recirculatiesystemen). Netto wordt geen grondwater onttrokken, behoudens een beperkte hoeveelheid voor (preventief) onderhoud. Doordat jaarlijks vaak een vergelijkbare hoeveelheid water van de warme naar de koude bron(nen) wordt verpompt als omgekeerd, wordt voor het overgrote deel steeds “hetzelfde water” verplaatst. Als nogmaals hetzelfde water wordt verpompt zal dit niet of nauwelijks nog verstopping veroorzaken: de eventuele deeltjes zullen de eerste keer tot verstopping leiden en de volgende keren niet of nauwelijks meer.

Bij onttrekkingen zonder herinfiltratie (zoals bij drinkwaterbedrijven) wordt steeds nieuw grondwater (met een zekere concentratie aan deeltjes) aangetrokken, waardoor de bronverstopping zich steeds verder kan opbouwen. Ook kan grondwater met een andere samenstelling worden aangetrokken, bijvoorbeeld als een onttrekking in ijzerhoudend (anoxisch) grondwater op termijn zuurstofhoudend (oxisch) grondwater aantrekt, wat leidt tot (bio)chemische bronverstopping.

Om verstopping door deeltjes beperkt te houden, wordt bij OBES-systemen vaak enkele keren per jaar enige tijd grondwater onttrokken uit de infiltratiebron (in de zomer is dat de warme bron en in de winter de koude bron) en geloosd op de riolering of het oppervlaktewater. De opgehoopte deeltjes worden op die manier periodiek verwijderd. Dit wordt ook wel preventief spuien genoemd.

6.1.1. Voorkomen van verstopping op de boorgatwand (BRL-11001)

Een boorbedrijf dient te voorkomen dat de boorspoelingsresten zich ter hoogte van het filtertraject hecht op de boorgatwand. Ook dienen zij ervoor te zorgen dat er tussen het tijdstip van het beëindigen van de boorwerkzaamheden en het aanstorten van het filter bezinking plaatsvindt in het boorgat. Hiervoor zijn richtlijnen opgesteld in BRL-10001 waaraan een boormeester dient te voldoen. Het boorbedrijf neemt in ieder geval de volgende maatregelen:

- bij boringen voor open systemen dient te allen tijde van iedere boring een boorbeschrijving, een aanvulstaat en een afstelstaat te worden gemaakt;
- als veen is doorboord: verversen van het boorwater voordat dit het te gebruiken opslagpakket bereikt, waarbij het spoelen minimaal het equivalent bedraagt van twee keer de inhoud van de bufferbakken en het boorgat;
- de boring zodanig plannen dat na het op diepte komen van de bron direct of de volgende ochtend gestart kan worden met inbouwen;
- als direct na het uitbouwen van de boorstangen een buis (meestal de stortkoker, ook wel valpijp genoemd) wordt ingebouwd tot de einddiepte van de boring: de inhoud van het boorgat circuleren middels zuigen via deze buis, totdat het aanstorten van het filter start.
- het werkproces voor het aanbrengen van de omstorting mag pas onderbroken worden zodra de afscheidende kleilaag boven het filter(deel) is geplaatst.

6.1.2. In-situ monsters van boorgatwandverstopping (skinlaag)

Er zijn weinig in-situ metingen van de daadwerkelijke dikte en weerstand van een skinlaag op de boorgatwand. In Tabel 6-1. Overzicht van volledig anoxische onttrekkingsbronnen met boorgatwandverstopping waarbij in-situ steekmonsters zijn genomen van de boorgatwand en omliggende formatie. is een overzicht gegeven van volledig anoxische onttrekkingsbronnen met boorgatwandverstopping waarbij in-situ steekmonsters zijn genomen van de boorgatwand en omliggende formatie. De skinlaag kan primair zijn (tijdens aanleg van de bron door achterblijven van boorspoelingsresten) en secundair (door verstopping). Uit het overzicht (Tabel 6-1. Overzicht van volledig anoxische onttrekkingsbronnen met boorgatwandverstopping waarbij in-situ steekmonsters zijn genomen van de boorgatwand en omliggende formatie.) zijn de volgende inzichten verkregen:

- De skinlaag kan over tijd aangroeien door mechanische verstopping.
- Boorgatwandverstopping heeft verschillende verschijningsvormen. Accumulatie van deeltjes uit de formatie (diep bed filtratie) en restanten boorspoeling (cake) zijn het meest frequent waargenomen. Chemische neerslagen komen minder vaak voor en vormen ook een veel kleiner aandeel van het verstoppingsmateriaal. Biologische activiteit is op één winveld als oorzaak geïdentificeerd.
- De samenstelling van de verstopping is heterogeen. De cake wordt gevormd door booradditieven en boorresten van andere doorboorde lagen en heeft daarom een andere samenstelling dan de diep bed filtratie deeltjes welke afkomstig zijn uit de winformatie. De doorlatendheid lijkt te worden gedomineerd door scheuren in de cake. De verstoppende deeltjes hebben een range aan korrelgrootte die varieert van klei ($<1\ \mu\text{m}$) tot zand ($>63\ \mu\text{m}$) (Houben et al., 2016).
- Tijdens het boren kan een significante cake vormen, ook zonder gebruik van additieven. Deze cake is zodanig cohesief dat ze de mechanische stress, veroorzaakt door aanvullen van de gravelpack en schoonpompen van de bron, kan weerstaan (Houben et al., 2016).
- Accumulatie van deeltjes kan ook optreden door diep bed filtratie in bronnen zonder duidelijk waarneembare skin.

Tabel 6-1. Overzicht van volledig anoxische onttrekkingsbronnen met boorgatwandverstopping waarbij in-situ steekmonsters zijn genomen van de boorgatwand en omliggende formatie.

Locatie	Bron	boormethode	Type verstopping	Samenstelling deeltjes	Dikte skin (mm)
Grossen-kneten (GER)	Well 31		FeOOH neerslagen	n.v.t.	0
Garzweiler (GER)	WS5015	Spoelboring, zonder additieven	Cake	Klei/ Silicaten,	1
	WS5315	idem	Cake + Fe-neerslag bij boorgatwand	Klei/ Silicaten, Gips **, bruinkool	2
	WS3120	Idem	Cake + deep bed filtratie		25
	WS3151	Idem	Cake		2-4
	HS41	Idem	Cake + deep bed filtratie		8
Hambach (GER)	HS1133	Idem	Cake		0-2
	HS1059	Idem	Cake in formatie		1-2
	RH02	pulsboring	deep bed filtratie	Silicaten/ klei, ijzeroxides, sulfides, veen	50 – 100
	RH03	pulsboring	deep bed filtratie	Idem	50 – 100
	RH04	pulsboring	deep bed filtratie	Idem	Circa 100
Rodenhuis (NL)	RH05	pulsboring	deep bed filtratie	Idem	Circa 100
	50A	Spoelboring	Cake + deep bed filtratie + <i>secundaire</i> CaCO ₃ en Fe neerslagen	Silicaten/ klei	30 - 100
			Biofilm + chemische neerslag		
Noord Bergum (NL)					
Saskatchewan (CAN) *	RW1				500 - 1000

(*) geen in-situ steekmonster maar verzameling van verstoppingsmateriaal met glasplaatjes in peilbuizen rondom

(**) betreft mogelijk een meetartefact. Het gemeten gips is waarschijnlijk kalk.

6.2. Chemische/biologische bronverstopping

Chemische/biologische bronverstopping treedt meestal op door menging van water met verschillende samenstellingen. De meest voorkomende chemische/biologische verstopping bij OBES is verstopping van bronnen door ijzer(hydr)oxiden.

Chemische bronverstopping wordt veroorzaakt door chemische reacties/processen, waarbij vaste stoffen worden gevormd. Bij OBES kan chemische bronverstopping optreden door menging van grondwater met verschillende samenstellingen of door een afname van de oplosbaarheid door een druk- en temperatuurverandering. Het voorkomen van de menging van verschillende watertypen is de meest voor de hand liggende oplossing. Dit betekent dat in het vooronderzoek aandacht nodig is voor de grondwaterkwaliteit.

Biologische bronverstopping treedt vaak op in combinatie met chemische bronverstopping. De reacties die optreden worden daarbij biologisch bevorderd. Micro-organismen kunnen de chemische reacties die tot neerslagvorming leiden vele malen versnellen (zie onder andere Stuyfzand, 2007 en van Beek et al, 1998). Naast het reactieproduct wordt in dat geval slijm gevormd, wat een

verstoppende werking heeft. Vaak bestaat een gedeelte van de verstopping dan ook uit organisch materiaal/biomassa (Oasen, 2006). Om biomassa te kunnen vormen is de aanwezigheid van biologisch afbreekbare organische stoffen een belangrijke voorwaarde. Uit onderzoek door KIWA is afgeleid, dat biologische verstopping bij infiltratiebronnen mogelijk is bij een AOC-belasting (belasting met Assimileerbaar Organisch Koolstof) van meer dan 10 mg per uur per m² oppervlakte van de boorgatwand (KIWA, 1989). Door de hogere stroomsnelheid neemt het voedselaanbod toe, wat tot extra bacteriegroei kan leiden, waarbij de biomassa aan bacteriën voor verstopping zorgen. Met name bij sulfaatreductie (door sulfaat reducerende bacteriën) is dit proces van belang (van Beek et al., 1998). Ook een toename van de stroomsnelheid van het grondwater door OBES kan zodoende leiden tot een verhoogde microbiologische activiteit.

In welke mate verhoogde temperatuur hier invloed op heeft is nog onbekend. Aan de ene kant zal bacterie groei sneller gaan bij hogere temperaturen, maar kan ook leiden tot bacterie sterfte. Het effect van de hogere temperaturen is dus conditie afhankelijk

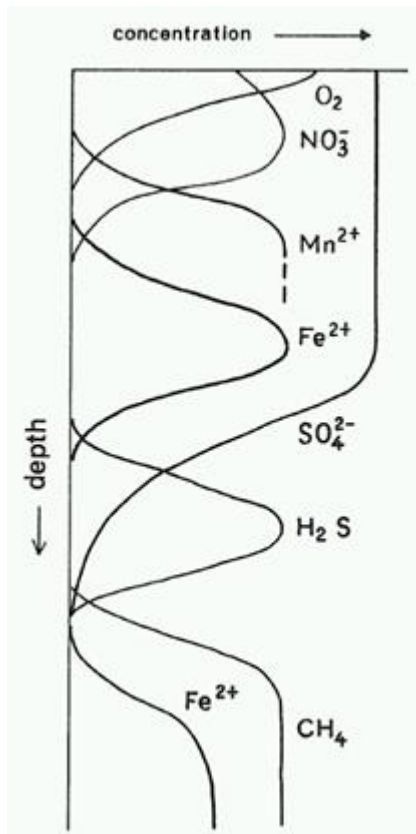
Bronverstopping door menging

Water dat in de bodem infiltreert heeft in contact gestaan met de atmosfeer en bevat opgelost zuurstof. Stikstof dat aan de bodem wordt toegevoegd via atmosferische depositie en bemesting, wordt onder invloed van atmosferische zuurstof omgezet in nitraat (Van Beek, C., van den Berg, G. en Heslen, P., 2005). Het water dat na infiltratie de grondwaterspiegel bereikt bevat daardoor zowel zuurstof als nitraat, beide oxiderende stoffen. Ook sulfaat kan optreden als oxiderende stof. In de ondergrond worden deze oxiderende stoffen verbruikt door reacties met reducerende stoffen (zoals organisch materiaal en pyriet) en verandert de watersamenstelling. Zuurstof is de sterkste oxidator en wordt als eerste verbruikt, gevolg door nitraat en sulfaat.

Figuur 6-3 toont de typische ontwikkeling van de samenstelling van water dat met toenemende diepte steeds verder gereduceerd raakt. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de gesuggereerde relatie met de diepte enigszins misleidend kan zijn. In feite gaat hem om de ontwikkeling van de watersamenstelling langs een stroombaan. Als het water infiltreert is het zuurstofhoudend en gedurende het transport door de ondergrond raakt het steeds verder gereduceerd. Als het infiltratiewater geen reducerende stoffen tegen komt (bijvoorbeeld, omdat de ondergrond al (honderd)duizenden jaren met zuurstofhoudend grondwater is doorspoeld en daardoor alle oxideerbare stoffen al eerder zijn verbruikt), dan blijft het zuurstof in het grondwater aanwezig. In zo'n situatie kan zeer oud grondwater op grote dieptes toch nog zuurstof bevatten. In Nederland heeft dit er op de Stuwwallen toe geleid dat tot vrij grote dieptes nog zuurstofhoudend grondwater kan worden gevonden. Het omgekeerd komt ook voor, namelijk dat het ondiepe grondwater al sterk gereduceerd is. Dat is het geval als in de ondiepe ondergrond hoge gehalten aan organische stof aanwezig zijn, waardoor de oxiderende stoffen als snel volledig zijn verbruikt. Dit komt bijvoorbeeld voor in het westen van Nederland, waar vaak methaan wordt aangetroffen in het ondiepe grondwater (wat duidt op sterk gereduceerde omstandigheden).

Als het ondiepe grondwater een andere herkomst/historie heeft dan het diepe grondwater kan het ondiepere grondwater juist sterker gereduceerd zijn dan het diepere grondwater (of omgekeerd) en kan menging van grondwater van verschillende dieptes dus aanleiding geven tot (bio)chemische (redox)processen. Hierbij is ook de grondwaterstroming van belang. Door horizontale grondwaterstroming kan water dat op grote afstand is geïnfiltreerd terecht komen onder het ondiepere grondwater met een heel andere herkomst. Een duidelijk voorbeeld hiervan is de overgang van zoet water in een duingebied (zoetwaterbel met regenwater dat is geïnfiltreerd in het duingebied) naar zout grondwater op grotere diepte (zeewater dat via de zeebodem geïnfiltreerd is en onder de

zoetwaterbel door in de richting van de diepe polders achter de duinen stroomt). Een ander voorbeeld is het voorkomen van zuurstofhoudend grondwater in een afgesloten watervoerend pakket aan de rand van een groot infiltratiegebied (het water is geïnfiltreerd in een gebied waar de scheidende lagen en de reducerende stoffen in de ondergrond ontbreken - bijvoorbeeld een stuwwal - en is vervolgens in horizontale richting afgestroomd en onder de scheidende laag terecht gekomen).



Figuur 6-2. Schematische weergave van de ontwikkeling van de watersamenstelling in de diepte als het water steeds verder gereduceerd wordt (Bron: Appelo en Postma, 1998).

Uit de figuur komt duidelijk naar voren dat bepaalde stoffen niet naast elkaar voorkomen in hetzelfde grondwater. Als deze stoffen door menging alsnog bij elkaar worden gebracht, kan dat leiden tot verstoppende (bio)chemische processen:

- Zuurstof en ijzer(II)

Beide stoffen komen (normaalgesproken) niet naast elkaar voor, omdat ze met elkaar reageren totdat één van beiden is uitgeput. Bij deze reactie wordt ijzer(hydr)oxide gevormd, een vaste stof die tot verstopping van de bronnen leidt (zie Figuur 6-3). Menging van ijzer(II)-houdend grondwater en zuurstofhoudend grondwater dient daarom te worden voorkomen. Opgemerkt wordt, dat bij lage pH-waarden deze reactie zeer langzaam verloopt en daardoor minder snel tot problemen leidt.

Ook nitraat en ijzer(II) komen niet/nauwelijks naast elkaar voor. Waarschijnlijk kunnen beide stoffen met elkaar reageren, met ijzer(hydr)oxide als reactieproduct. Ook menging van ijzer(II)-houdend grondwater en nitraathoudend grondwater dient daarom te worden voorkomen.

- H_2S en ijzer(II)

Daar waar H_2S voorkomt in het grondwater, bevat het grondwater geen ijzer(II). Als deze stoffen met elkaar in aanraking komen ontstaat ijzersulfide, eveneens een vaste stof. Menging van ijzer(II)-houdend grondwater met H_2S -houdend grondwater kan daardoor ook verstopping veroorzaken.

- Methaan en sulfaat

De vorming van methaan kan alleen optreden als het grondwater geen zuurstof, nitraat of sulfaat meer bevat. Sulfaat en methaan reageren niet rechtstreeks met elkaar. Als sulfaathoudend water wordt geïnfiltreerd in een laag waar methaanvorming optreedt, dan zal de methaanvorming daarom stoppen. In plaats daarvan zal sulfaatreductie optreden, waarbij vorming van H_2S optreedt. Als het gevormde H_2S in aanraking komt met ijzer(II), ontstaat ijzersulfideneerslag.

- Methaan en zuurstof

Bij de oxidatie van methaan door zuurstof ontstaan, naast water en CO_2 , grote hoeveelheden slijm/biomassa (van Beek et al., 1998). In dit geval is de verstopping puur biologisch van aard. Dit type verstopping is bij OBES, voor zover bekend, nooit opgetreden.

- Nitraat en ijzer(II)

6.3. Preventie en aanpak

De meest voorkomende chemische/biologische verstopping bij OBES is verstopping van bronnen door ijzer(hydr)oxiden. Algemeen kan worden gesteld dat door het voorkomen van menging van de genoemde verschillende watertypen, ook de bijbehorende verstopping goed kan worden voorkomen. Bij OBES in ijzer(II)houdend grondwater dient daarnaast voorkomen te worden dat toetreding van (lucht)zuurstof optreedt: het systeem moet volledig luchtdicht worden uitgevoerd.

Een ander type chemische/biologische verstopping die van belang is om te noemen, met name in relatie tot ondergrondse warmteopslag, is verstopping als gevolg van sulfaatreductie. De laatste jaren zijn er steeds meer aanwijzingen dat er in het westen van Nederland meerdere projecten zijn waar dit proces optreedt (Installect Advies en IF Technology, 2020). In de meeste gevallen kan het optreden van de verstopping worden gerelateerd aan het mengen van sterk gereduceerd ondiep grondwater (aanwijzing voor de aanwezigheid van verhoogde concentraties reactieve organische stof in het grondwater en/of het sediment) met minder sterk gereduceerd diep grondwater (met relatief hoge concentraties sulfaat). Door de menging worden de oxiderende stof (sulfaat) en de reducerende stof (organisch koolstof) bij elkaar gebracht en wordt sulfaatreductie gestimuleerd. Hierbij is zowel sprake van biologische groei (waarschijnlijk vooral sulfaatreducerende bacteriën) als van de vorming van reactieproducten (sulfiden), die beide tot bronverstopping leiden.

6.4. Bronverstopping door gasbellen

Gassen zijn tot op zekere hoogte oplosbaar in water. Deze oplosbaarheid is in hoofdzaak afhankelijk van de druk en in mindere mate van de temperatuur. Doordat de oplosbaarheid afneemt af bij een afname van de druk (en bij een toename van de temperatuur), kunnen door een drukafname opgeloste gassen vrijkomen. Dit is eenvoudig uit te leggen aan de hand van een fles koolzuurhoudende frisdrank (bevat opgelost CO_2), bijvoorbeeld cola. De fles staat onder druk zolang de dop op de fles gedraaid is en daardoor kan relatief veel CO_2 in oplossing blijven. Als de dop van de fles af gedraaid wordt, dan neemt de druk plotseling af en ontstaan gasbellen (er treedt ontgassing op). De cola kan daarbij zelfs spontaan uit de fles gaan stromen.

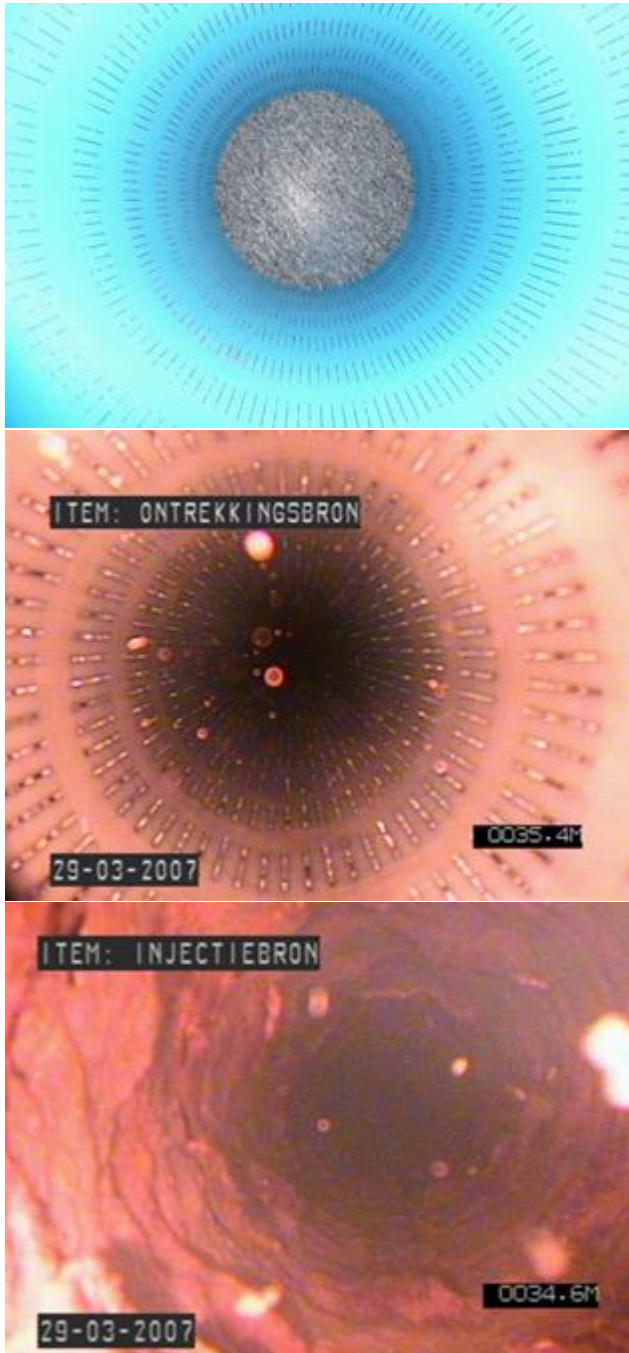
Ditzelfde fenomeen is van toepassing op grondwater. Bij een open OBES wordt grondwater onttrokken. Bij de onttrekking neemt de waterdruk (stijghoogte) in het watervoerend pakket en in de onttrekkingsbron af. Het water stroomt vervolgens via de stijgbuis van de bron naar boven richting de bronpomp, waarbij de hydrostatische druk snel afneemt. De bronpomp brengt het water weer op druk om het door het systeem te kunnen pompen en te kunnen infiltreren in de infiltratiebron. Ook na de bronpomp, in het leidingwerk van het systeem, neemt de hydrostatische druk af door transport naar boven en gaat druk verloren door stromingsweerstand in het leidingwerk. In de infiltratiebron wordt het water weer naar de diepte getransporteerd en neemt de druk weer toe. De druk op de uiteindelijke diepte komt uiteindelijk wat hoger uit dan de oorspronkelijke druk in het watervoerend pakket, doordat voor de infiltratie van het water een zekere injectiedruk nodig is.

Het water dat door een OBES-systeem wordt verpompt ondervindt dus achtereenvolgens:

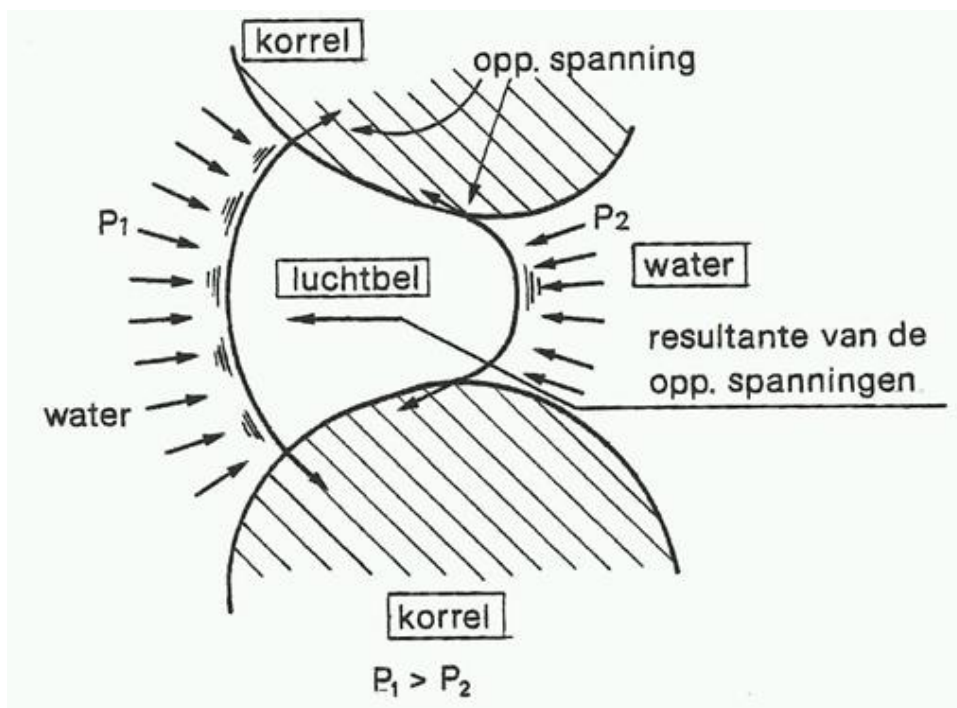
- een drukverlaging in het watervoerend pakket en de onttrekkingsbron;
- een drukverhoging door de bronpomp;
- een drukafname in het leidingwerk;
- een druktoename tot boven de oorspronkelijke druk in de infiltratiebron.

Omdat het ontstaan van gasbellen veel sneller gaat dan het weer oplossen van gasbellen, zullen de eventuele gasbellen die ontstaan aan de onttrekkingszijde of in het leidingwerk van een OBES-systeem niet volledig zijn opgelost op einddiepte in de infiltratiebron. Gasbellen in het te infiltreren water kunnen in de infiltratiebron voor verstopping zorgen doordat ze de poriën blokkeren (zie Figuur 6-4). Van gasbellen is bekend dat ze voor een bijzonder snelle en drastische verstopping van infiltratiebronnen kunnen zorgen (Kiwa, 1982; Fortuin en Willemsen, 2005). Opvallend aan dit type verstopping is dat onttrekking uit een met gas verstopte bron goed mogelijk blijft (Bakema, 2001).

Om te voorkomen dat bronverstopping optreedt door ontgassing van het verpompte grondwater, moet ervoor worden gezorgd dat de druk in het grondwatersysteem overal boven de gasdruk van het grondwater blijft. Daarom worden metingen uitgevoerd om het gasgehalte van het grondwater vast te stellen of wordt uitgegaan van reeds uitgevoerde metingen in de omgeving. Bij het ontwerp van het grondwatersysteem dient rekening te worden gehouden met de gasdruk bij de maximale temperatuur die in het systeem optreedt (een hogere temperatuur resulteert bij dezelfde concentraties aan opgeloste gassen in een hogere gasdruk). Aanname daarbij is wel dat de gasdruk niet verandert in de loop van de tijd. Als gevolg van de mobilisatie van organische stof kan het echter zijn dat het grondwater sterker gereduceerd raakt. In bepaalde gevallen kan dat wellicht leiden tot condities waarbij methaanvorming gaat optreden of reeds optredende methaanvorming versneld wordt en dat leidt dan tot een toename van de gasdruk. Daarnaast kan de gasdruk toenemen onder invloed van eventuele zuurdosering in het kader van de waterbehandeling (toename CO₂-spanning). Daarom is het van belang om de ontwikkeling van de concentraties aan opgeloste gassen in de loop van de tijd te volgen en het systeem zodanig te ontwerpen dat het ook bij een zekere toename van de gasdruk nog goed functioneert.



Figuur 6-3. Filterbuis voor installatie (boven), met enige ijzeraanslag (midden) en met een zeer sterke ijzerverstopping (onder)



Figuur 6-4. De oppervlaktespanning van een vastgelopen gasbel zorgt voor een weer-standbiedende kracht, waardoor de porie verstopt raakt (Bron: Kiwa, 1982).

6.5. Aandachtspunten bij HTO

Bij ondergrondse warmteopslag is er een aantal aanvullende aandachtspunten met betrekking tot bronverstopping ten opzichte van lage temperatuur OBES.

- versnelling biochemische processen.

Bij hogere temperaturen verlopen (bio)chemische processen over het algemeen sneller dan bij lagere temperaturen. En dat geldt ook voor de processen die leiden tot bronverstopping. Bij microbiologische processen is ook het temperatuurbereik van belang waarbinnen de betreffende micro-organismen kunnen functioneren/overleven. Binnen een zeker temperatuurbereik is dan sprake van een versnelling bij opwarming, maar als de temperatuur te hoog wordt voor de aanwezige microbiologie, dan kan daardoor de reactiesnelheid juist sterk afnemen (zie b.v. Robador et al., 2009 en Hubert et al., 2009). De meest relevante processen die versneld kunnen worden zijn de mineralisatie van organische stof (zie hieronder), sulfaatreductie (mede door het versneld beschikbaar komen van organische stof) en methaanvorming (zie gasverstopping).

- mobilisatie organische stof (mogelijke voedselbron bacteriën en/of aanjager redox-processen)

Een versnelde groei van de microbiologische populatie door de verhoogde temperatuur, wordt in de praktijk beperkt door de beschikbaarheid van organisch koolstof dat voor de micro-organismen bruikbaar is. Mogelijke mobilisatie van organische stof (hogere concentraties opgelost organisch koolstof) bij hoge temperaturen zou daarom aanleiding kunnen geven tot extra microbiologische groei. De vraag is echter in hoeverre het organisch koolstof voor de microbiologie

bruikbaar/afbreekbaar is. In het onderzoeksproject Meer Met Bodemenergie volgt uit de beschikbare praktijkgegevens (temperaturen tot 30 °C, daarboven te weinig informatie) geen correlatie tussen de temperatuur en het aantal micro-organismen. Blijkbaar blijft het aantal bacteriën vanwege de beperkte beschikbaarheid van bruikbaar organisch koolstof min of meer constant. Bij hogere temperaturen is dit mogelijk anders.

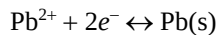
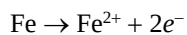
- kalkneerslag en waterbehandeling

Bij hoge temperatuur warmteopslag kan verstopping optreden door de neerslag van carbonaten en kan waterbehandeling nodig zijn om dit te voorkomen. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar hoofdstuk 8.

6.6. Geothermie

Bij geothermie wordt warm water uit een diep liggend waterhoudende laag omhoog gepompt en afgekoeld water weer terug geïnjecteerd. Verstopping van het systeem is een veel voorkomend probleem in de geothermie. De verstopping kan chemisch, fysisch, mechanisch of biologisch van aard zijn. Met name chemische scale vorming, bestaande uit kalk, zware metalen of sulfaten, is geïdentificeerd als risico voor verstopping. De druk- en temperatuur ontwikkeling in het geothermische systeem, en potentiële corrosie van de verbuizing of de pompen is verantwoordelijk voor de vorming van scale. De drukontwikkeling van het water is hetzelfde als bij OBES, zoals beschreven in sectie 6.4. Tijdens het omhoog pompen van het warme water gaat de druk omlaag waardoor de oplosbaarheid van kalk omlaag gaat. Indien de druk dusdanig laag wordt dat opgelost CO₂ kan ontgassen zal de pH van het water omhoog gaan en gaat de oplosbaarheid van kalk nog verder omlaag. De temperatuur gaat tijdens het omhoog pompen een beetje omlaag wat de oplosbaarheid van kalk juist iets verhoogd. Het netto effect is vaak dat de oplosbaarheid omlaag gaat en kalk neerslaat. Als het water op druk gehouden wordt zodat ontgassing tegen gegaan wordt zal het risico op kalkneerslag in de productiebron laag zijn. Zodra het water de warmtewisselaar passeert en het water sterk afkoelt zal de kalk oplosbaarheid weer omhoog gaan en is er geen risico meer van kalkneerslag.

De neerslag van zware metalen is ook een bekend probleem in geothermische systemen. Het gaat hier om de neerslag van loodhoudende kalk (PbCO₃), elementaire lood, bariet, ijzer precipitaten als pyriet of magnetiet of ijzer (hydr)oxiden. De oplosbaarheid van loodhoudende kalk gaat, in tegenstelling tot andere vormen van kalk, omlaag als de temperatuur omlaag gaat, en vormt hierdoor een groter risico voor het systeem in of voorbij de warmtewisselaar. De precipitatie van elementaire lood is gerelateerd aan staal corrosie, en wordt veroorzaakt door de reductie van opgelost lood tijdens oxidatie van ijzer (Bressers en Wilschut, 2015):



Lood neerslag is vooral een probleem in geothermische systemen in de Rotliegend Formatie, vanwege de hoge lood concentraties in deze formatie.

Neerslag van Fe(III) oxides of hydroxides is vaak gerelateerd aan een toename van opgelost zuurstof in het water.

De oplosbaarheid van bariet en andere sulfaat mineralen gaat omlaag als de druk en/of temperatuur naar beneden gaat. Het risico van sulfaat neerslag is dus van toepassing op het hele systeem, van

productiebron tot injectiebron. Bariet scale komt voor in systemen met hoge sulfaat concentraties in het water.

Naast chemische neerslag van scale is ook verstopping van het geothermische reservoir door de migratie van deeltjes (fines migration) een bekend probleem. Het gaat hier met name om kleideeltjes die gehecht zijn aan de oppervlakten van grotere mineralen en los kunnen komen door de productie en injectie van geothermisch water. Vervolgens kunnen ze tijdens de migratie vast komen te zitten in de nauwe gangen van het porie-netwerk, waardoor de permeabiliteit van het gesteente sterk achteruit gaat. Het los komen (onthechten) en de migratie van de deeltjes kan mechanisch en (elektro)chemisch van aard zijn. De electrochemische onthechting hangt sterk samen met veranderingen in saliniteit, die de sterkte van de hechting van kleideeltjes aan de oppervlakte van mineralen bepaalt. Gezien de saliniteit van het geothermische water tussen productie en injectie niet veranderd zou dit geen problemen moeten opleveren. De mechanische onthechting hangt samen met de stroomsnelheid. Als de stroomsnelheid een zekere kritische waarde overschrijdt kunnen de deeltjes 'los getrokken' worden. De kritische waarde is in wetenschappelijke studies onderzocht en is ook afhankelijk van onder meer de saliniteit. Bij lagere saliniteit is de kritische waarde ook lager. De range aan gevonden waarden valt binnen de snelheden die in operationele systemen bereikt kunnen worden, en dus kan mechanische onthechting en migratie van fijne deeltjes een risico vormen in geothermische productie. Kleine schommelingen in de injectie/productie snelheid zou problemen met verstopping door fijne deeltjes kunnen oplossen (Candela, 2014, 2015).

Verstopping van geothermische bronnen of het reservoir rondom de bronnen door microbiële groei is geobserveerd in meerdere geothermische systemen in Nederland. Bepaalde thermofiele, zwavel metaboliserende bacteriën die optimaal kunnen groeien bij temperaturen tussen 40 en 60 °C worden gestimuleerd door het gebruik van corrosie inhibitoren als natrium bisulfiet. Ook andere soorten bacteriën kunnen verstoppingsproblemen veroorzaken.

6.7. Olie- en gaswinning

As the reservoir fluids are produced to the surface, the change in pressure and temperature can cause certain dissolved salts to precipitate., such as calcite, barite, celestite, anhydrite, gypsum, iron sulfide, and halite. Scales can also present due to the poor cleaning of fluids from drilling, completion, and workover fluids. It can coat the perforations, casing, production tubulars, valves, pumps, and downhole completion equipment, and limit the production. If not treated, then well abandonment can be required (Guo, Liu, & Tan, 2017).

When geothermal fluids are produced and follow a path from a geothermal reservoir through a production well and surface facilities, down an injection well and back into the reservoir, the fluid experiences physical changes in pressure and temperature. Those changes in pressure and temperature result in secondary physical and chemical changes like the evolution of gas, change in pH and the deposition of solids that have become supersaturated under the prevailing physical conditions. Additionally, the produced fluids can interact with materials it encounters in this process leading to e.g. corrosion or cation exchange. Deposition of solids in the near wellbore, wells or surface facilities can lead to flow restrictions, reduced thermal conductivity, increased operational costs and loss of revenue. Moreover, deposition or exchange with radioactive ions from geothermal fluids can lead wells and facilities to become LSA contaminated.

Scale problems can be avoided by chelating the scaling cation or using chemicals that poison the growth of scale (e.g. phosphorous compounds for inhibiting inorganic scales). The most common method to deliver the inhibiting solution for the scaling brine problem has been the inhibitor-squeeze.

In this method, an inhibitor-containing solution is forced and squeezed into the formation so the inhibitor resides on the rock surface, and then slowly leaching back into the produced-water phase.

Scale remediation:

- Milling
- Jetting
- Chemical dissolution
- Inhibition
- Barite scale is notoriously hard to remove, especially in the near-wellbore where mechanical action is not feasible. Consequently, preventing formation of barite scale is often more cost effective than remediation. Deposition of barite scale can be prevented by using chemical sulphate scale inhibitors. Positive experiences exist with their efficacy in the O&G industry
- Scale remediation: Material selection

6.8. Discussie en samenvatting

6.8.1. Verstopping op de boorgatwand door deeltjes

Er is al veel onderzoek gedaan naar deeltjesverstopping rond de boorgatwand. Deeltjesverstopping ontstaat nabij de boorgatwand, hiermee bedoelen we de plaats waar het watervoerend pakket overgaat in de aangebrachte omstorting. Tijdens het boren van een bron moet het boorgat open gehouden worden, hiervoor wordt boorspoeling gebruikt. Na het inbouwen van de bron moet een bron ontwikkeld worden om de boorspoeling weer zoveel mogelijk te verwijderen. Als de boorspoeling niet of slecht verwijderd is, ontstaat er een zone waarin een deel van de poriën al slecht toegankelijk is en waarin deeltjes snelle zullen worden afgevangen. Hiermee wordt bronverstopping al geïnitieerd tijdens de aanleg van de bron.

Naast de filterende werking van achtergebleven spoeling, blijven deeltjes ook 'hangen' doordat er bruggen worden gevormd in nauwe poriën. Deze brugvorming zal toenemen naarmate deeltjes dichter bij de boorgatwand komen. Er is al veel onderzoek gedaan naar bronverstopping rond de boorgatwand door deeltjes. De volgende factoren spelen een rol bij het vormen van bruggen:

- hoeveelheid deeltjes (concentratie)
- stroomsnelheid (aanvoer)
- aspect ratio (grootte van de deeltjes in relatie tot de poriegrootte, bepaald door het watervoerende pakket)
- het soort deeltje (vorm, lading, vervormbaarheid)
- stroom geometrie (radiale stroming of lineaire stroming, waarbij bij stroming naar bronnen altijd radiale stroming is).

Echter, is er geen duidelijk beeld wat de invloed van diep-bed filtratie is (mobilisatie van fijnste deeltjes in het bodempakket) op boorgatwand verstopping. Onttrekkingsnormen gebaseerd op de maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand (zie Eq. 2.1-2.3 en 2.5) geven aan dat de gegeven limiet op het ontwerpdebiet aan de hand van deze empirische vergelijkingen boorgatwandverstopping tegen gaat. De mobilisatie van kleinste deeltjes in fijnzandige grondwaterpakketten is dus van groot belang om te zien in welke mate verstopping door deeltjes een risico vormt voor een HTO-systeem. Hierbij dient men rekening te houden met ondermeer gereduceerde sleepkrachten, doordat de viscositeit van water significant lager is bij hogere water temperaturen.

Doordat OBES-bronnen zowel water infiltreren, als onttrekken is er geen constante volumestroom door de boorgatwand. Bij onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater accumuleren deeltjes op de boorgatwand. Onderzoek heeft uitgewezen dat deeltjesverstopping voorkomen kan worden door voldoende schakelen van de onttrekkingsbron. Onder invloed van de kracht van het aanschakelen van een bron worden deeltjes weer in beweging gebracht. De verandering in stroomrichting op de boorgatwand tijdens, injectie, opslag en onttrekking heeft dus een positief effect op het mobiliseren van deeltjes. Het schakelschema voor infiltratie en onttrekking zou hiervoor kunnen worden aangepast.

Vanuit de geothermie is bekend dat deeltjesverstopping (in de geothermie wereld beter bekend als 'fines migration') ook kan plaatsvinden bij de infiltratiebron in het omliggende gesteente. Bij stroomsnelheden boven een bepaalde kritische waarde kunnen fijne (klei)deeltjes los raken (onthechten) van de poriewanden, waarna ze neerslaan in de nauwe gangen van het porienetwerk. Net als bij de verstopping van de boorgatwand van onttrekkingsbronnen zal de verandering van stroomrichting als ook het schakelen in debiet een positief effect hebben op het tegengaan van de verstopping rondom de infiltratiebron.

6.8.2. Chemische verstopping

De verstopping van de bron en/of de boorgatwand en het reservoir rondom het boorgat door neerslag van anorganische componenten als ijzer hydroxides wordt in HTO systemen voorkomen doordat het systeem luchtdicht wordt gehouden. De grootste risico's van chemische verstopping zijn gerelateerd aan veranderingen van het chemisch evenwicht door druk en temperatuur veranderingen in het systeem, en onder invloed van corrosie. Met name kalk neerslag vormt een risico, omdat de oplosbaarheid van kalk afneemt bij een hogere temperatuur. Omdat het grondwater meestal (over)verzadigd is met kalk zal de opwarming van het water in de warmtewisselaar zorgen voor oververzadiging van het water. Kalkneerslag kan dus voorkomen in het systeem in of voorbij de warmtewisselaar of door de drukverlaging rond de bron bij onttrekking. Scale vorming gerelateerd aan corrosie kan een probleem vormen in de bronnen, bij de pompen of in de warmtewisselaar. Het gebruik van hoogwaardig staal en/of corrosie inhibitoren kan deze vorm van verstopping voorkomen.

6.8.3. Biologische/microbiële verstopping

De microbiologische populatie kan groeien of veranderen onder de hogere temperaturen en door de mobilisatie van organisch materiaal. De toegenomen populatie kan direct voor verstopping van de bron en/of boorgatwand zorgen. Ook kan het zorgen voor een toename van inorganische scale of de productie van methaan waardoor het indirect bijdraagt aan verstopping.

7. Beheer en waterbehandeling

7.1. Regeneratie van onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater

Om een regeneratiemethode te kiezen worden voor onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater doorgaans de volgende stappen doorlopen:

1. de mate van verstopping vaststellen; criterium is een actuele specifieke volumestroom die lager is dan 70% van de referentiewaarde
2. de oorzaak van de verstopping vaststellen
3. de resultaten en het aanhoudende effect van eerder uitgevoerde regeneraties in samenhang met de toegepaste regeneratiemethode(n) evalueren.
4. de beschikbare methoden (met varianten) en hulpmiddelen kort inventariseren
5. bepalen welke regeneratiemethode(n) en/of regeneratiemiddel(en) kan (kunnen) worden toegepast voor de betreffende situatie
6. de voorwaarden voor de uitvoering van de regeneratie inventariseren, zoals bedrijfsvoering op het bronnenveld, onderlinge afstand (beïnvloeding) van de onttrekkingsbronnen, toegankelijkheid van het terrein, noodzaak van speciale (brankop)constructies, mogelijkheden om gebruikte chemicaliën te lozen enzovoort
7. belasting voor het milieu en kosten van de regeneratiemethoden met elkaar vergelijken
8. regeneratiemethode definitief kiezen.

In de praktijk kunnen de regeneratiemethoden jetten, jutteren, hogedrukreinigen en sectiegewijs rondpompen worden toegepast met toevoeging van chemicaliën (zie ook §4). Veelgebruikte chemicaliën bij bronontwikkeling en –regeneratie zijn:

- zuren, zoals zoutzuur, citroenzuur, mierenzuur of koolzuur om de verschillende soorten neerslag, zoals ijzerhydroxide, aluminiumhydroxide en mangaanoxide, op te lossen.
- reductoren om geoxideerde verbindingen, zoals ijzerhydroxiden en mangaanoxiden, te reduceren (op te lossen) (bijvoorbeeld sodiumdithioniet) (Houben et al., 2000). Dit wordt in Nederland niet veel toegepast
- complexvormers (o.a. polyfosfaten) om de opgeloste metalen in oplossing te houden. Polyfosfaten passen we ook toe om kleideeltjes te dispergeren (uiteen te laten vallen). Dit wordt in Nederland niet veel toegepast
- oxidatoren (o.a. chloorbleekloog en waterstofperoxide) voor het verwijderen van organisch materiaal, zoals biomassa. Chloorbleekloog heeft bovendien een dispergerende werking op kleideeltjes.
- dispergeermiddelen. Bentoniet kan worden verwijderd met behulp van een dispergeermiddel. Hierbij wordt de verbinding tussen de kleiplaatjes verbroken, waardoor de bentoniet boorspoeling minder viskeus en deze zijn gelvormende eigenschappen verliest. Als dispergeermiddel kan gebruik worden gemaakt van Aquaclear (werkende stof: polyacrylamide). Dit is een flocculatiemiddel dat vooral veel in waterzuiveringsprocessen wordt gebruikt, en biologisch afbreekbaar is.

Er zijn veel regeneratiemiddelen onder allerlei handelsnamen op de markt. Ze bestaan uit een mengsel van bovengenoemde chemicaliën. Naast de direct werkzame stoffen, kunnen de mengsels nog allerlei andere stoffen bevatten, zoals:

- oppervlaktespanningverlagende stoffen

- corrosie-inhibitoren. Dat zijn stoffen die corrosie tegengaan.

In de praktijk worden vaak combinaties van de verschillende regeneratiemethoden toegepast op win- en infiltratiebronnen. Allereerst wordt er begonnen met de eenvoudige mechanische technieken (zie §4.1). Als deze techniek niet voldoende effect heeft, zetten we een intensiever werkende mechanische methode in of we combineren een mechanische methode met een chemische methode.

7.1.1. Regenereren van verstopte onttrekkingsbronnen

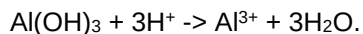
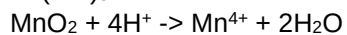
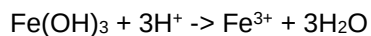
7.1.1.1. Regeneratie van chemisch verstopte onttrekkingsbronnen

Een verstopping van het bronfilter is gemakkelijk toegankelijk en daardoor goed te regenereren.

Gewoonlijk beginnen we met een mechanische behandeling. Deze bestaat uit borstelen of hoge drukreiniging (waterjetting), al dan niet gecombineerd. Tijdens deze handelingen pompen we de onttrekkingsbron af om het losgemaakte vuil uit de bron te verwijderen. Op deze wijze worden de chemische neerslag (ijzer, mangaan, aluminium) en biomassa aan de binnenzijde van de stijgbuis en het filter effectief verwijderd. Borstelen heeft echter geen effect op verstoppingen die zich buiten het bronfilter in de omstorting of bij de boorgatwand bevinden. Hogedrukreiniging heeft enig effect op verstopping in de omstorting, maar hiermee kunnen we de verstopping niet effectief verwijderen. Een borstel raakt alleen de binnenkant van een filter en de mechanische actie van een waterstraal is vrijwel direct uitgewerkt buiten het filter door afbuiging van de stralen op de randen van de filterspleten en op de grindkorrels van de omstorting. Door het aantal omwentelingen per minuut te verkleinen, kan een betere verwijdering van de verstopping worden verkregen.

Om het laatste vuil, ook in de onttrekkingsbron, en de afzettingen aan de buitenzijde van het bronfilter te verwijderen zetten we de onttrekkingsbron in het zuur, waardoor de aanwezige neerslag (grotendeels) zal oplossen. Bij de keuze van de chemicaliën moeten we onder meer op het materiaal van het bronfilter letten. Moderne onttrekkingsbronnen bestaan uit pvc, dat nagenoeg inert is voor chemicaliën, wat echter niet het geval is voor (oude) onttrekkingsbronnen met koperen of houten filters.

Onder invloed van het zuur vinden de volgende reacties plaats:

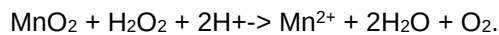


Let wel, dat we voor het verwijderen van ijzerhydroxiden geen waterstofperoxide maar een zuur gebruiken. Gebruik van waterstofperoxide kan wel effectief zijn als ook biomassa een belangrijke oorzaak is van de verstopping (biologische verstopping), of wanneer mangaanoxide een rol speelt.

De verspreiding van het zuur moeten we beperken tot de filterspleten zelf (en de eerste centimeters van de omstorting); het zuur mag het watervoerende pakket niet bereiken.

Dit mag helemaal niet gebeuren als het watervoerende pakket kalk bevat. Het zuur zal namelijk de kalk oplossen, waarbij koolzuur vrijkomt. Het gevormde koolzuur zal voor een deel als gas via de onttrekkingsbron ontwijken. Een ander deel zal in de poriën van de formatie achterblijven, waardoor de toestroming van het water naar de onttrekkingsbron zal worden belemmerd. De gevormde gasbellen zullen echter (langzaam) in het water oplossen en zo geleidelijk aan verdwijnen. Als het zuur verder de formatie binnendringt, zal de pH-waarde toenemen, waardoor de opgeloste kalk weer kan neerslaan (Treskatis en Leda, 1998).

De gevormde soorten neerslag zijn in chemisch opzicht niet zuiver, omdat ze doorgaans allerlei bijmengingen bevatten. Als we er niet in slagen na de eerste chemische behandeling de specifieke volumestroom terug te brengen tot de referentiewaarde, dan moeten we de verstopte onttrekkingsbron met een ander chemisch middel behandelen. Zo lost mangaanoxide niet goed op in zuur, maar wel in waterstofperoxide (H_2O_2). Als we een behoorlijke bijdrage van mangaanoxide verwachten verdient het aanbeveling de onttrekkingsbron nog een keer met waterstofperoxide te behandelen:



Het gebruik van organische zuren raden we af omdat de kans op bacteriologische nagroei dan groot is.

Als zich chemische neerslagen hebben gevormd in de omstorting, of zelfs in het onttrekkingspakket, zal het moeilijker zijn om een bron te regenereren. Met de huidige regeneratiemethoden zijn dergelijke verstoppingen niet te verwijderen.

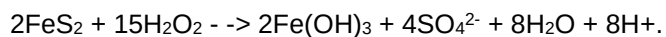
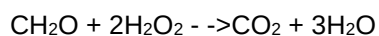
Regeneratie van verstopte onttrekkingsbronnen, waarbij sprake is van verstopping op de boorgatwand, is lastig, omdat de verstopping moeilijker te bereiken is en de oorzaak van de verstopping minder eenvoudig is vast te stellen. Vaak biedt alleen gebruik van chemische hulpmiddelen uitkomst.

7.1.1.2. Regeneratie van verstopte boorgatwand

De beste methode voor een goede verwijdering van bronverstopping op de boorgatwand is een combinatie van jutteren en het gebruik van chemische oxidatiemiddelen. Bij mechanische bronverstopping speelt bij de keuze voor een regeneratiemiddel milieubelasting een belangrijke rol samen met eerdere ervaringen. Vaak wordt daarom eerst geregenereerd met waterstofperoxide, indien dit niet het gewenste effect heeft wordt de regeneratie nogmaals uitgevoerd met chloorbleekloog. Een veel toegepaste methode is om een oxidatiemiddel (waterstofperoxide of chloorbleekloog) aan het water in de onttrekkingsbron toe te voegen en dit met behulp van een hoeveelheid water door de omstorting heen tot op de boorgatwand te brengen.

Om ervoor te zorgen dat het middel goed contact met de verstopping maakt, gaan we de onttrekkingsbron jutteren. Tegelijkertijd voegen we een kleine volumestroom water toe, zodat het middel zeer langzaam de verstopping 'passeert'.

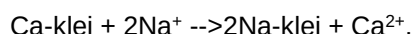
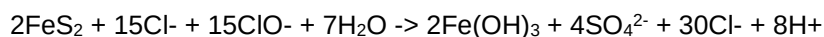
Van beide chemicaliën heeft waterstofperoxide uit milieuhygiënisch oogpunt de voorkeur. Het oplossen van organisch materiaal en sulfiden door waterstofperoxide kunnen we als volgt uitschrijven:



Het is niet nodig dat al het organische materiaal volledig wordt geoxideerd (de oxidatie is volledig als CO_2 en H_2O de eindproducten zijn). Doel van de oxidatie is de geaccumuleerde biomassa uit elkaar te laten vallen, waardoor deze kan worden afgevoerd. Bij deze oxidatie worden uit de grote organische moleculen ook kleine eenvoudige organische moleculen gevormd. Deze kleine moleculen zijn goed metaboliseerbaar (afbreekbaar) voor bacteriën. Waterstofperoxide is een minder krachtig desinfectiemiddel dan chloorbleekloog, waardoor niet alle micro-organismen worden verwijderd. Door de overvloedige aanwezigheid van kleine organische moleculen is het in de praktijk dan ook herhaaldelijk voorgekomen dat na behandeling met waterstofperoxide bacteriologische nagroei optrad.

Daarom behandelen we de onttrekkingsbron in ernstige gevallen van verstopping of als de werking van waterstofperoxide onvoldoende is toch met chloorbleekloog ondanks de milieubelasting die deze stof met zich meebrengt. Chloorbleekloog heeft ten opzichte van waterstofperoxide ook het voordeel dat het dispersie van kleideeltjes bevordert, waardoor deze deeltjes met water een suspensie vormen.

De chemische reacties die optreden kunnen we als volgt uitschrijven (chloorbleekloog bestaat uit een equimolair mengsel van chloride en hypochloriet):



Na regeneratie van een onttrekkingsbron met chloorbleekloog kan het onttrokken grondwater tijdens het schoonpompen van de onttrekkingsbron nog restanten chloor bevatten. Deze vloeistof moeten we eerst neutraliseren voordat we deze lozen.

Wees zorgvuldig bij het aanmaken van een oxidator/zuur. Zorg er altijd voor dat de geconcentreerde oplossing aan het verdunningswater wordt toegevoegd. Voeg dus nooit water bij de geconcentreerde oplossing ('water op zuur komt u duur').

Voor een goede verwijdering van bronverstopping op de boorgatwand dient als uitgangspunt het equivalent van circa 20 liter chloorbleekloog (≡ 20 liter 7% H_2O_2 -oplossing) per meter filter te worden gedoseerd. Afhankelijk van de diepte en de diameter moet dit worden aangepast. Onderstaande tabel (Tabel 15-1) geeft een overzicht van hoeveelheid regeneratiemiddel (per meter filter) dat in de praktijk wordt toegepast.

Tabel 7-1. Doseertabel regeneratiemiddelen (praktijk bij Brabant Water).

Boorgat- diameter (mm)	Hoeveelheid (liter) regeneratiemiddel per meter filter		
	Chloorbleekloog (15%)	H_2O_2 (35%)	H_2O_2 (7%)
500	15-20	15-20	75-100
600	20-25	20-25	100-125
700	25-30	25-30	125-150
800	30-40	30-40	150-200

Opm. 1 Om 'spuiters' te voorkomen dienen bij een stijgbuisdiameter kleiner dan 250 mm en bij gebruik van waterstofperoxide de hoeveelheden met een derde verminderd te worden.

Opm. 2 Om waterstofperoxide stabiel te maken wordt er soms een kleine hoeveelheid zoutzuur toegevoegd, per meter filter: 0,5 à 1,5 liter bij ondiepe onttrekkingsbronnen en 0,25 à 0,75 liter bij diepe onttrekkingsbronnen.

Na het inbrengen dienen de chemicaliën met een berekende hoeveelheid water per meter filter tot op de boorgatwand verdrongen te worden. Daarbij wordt bij voorkeur direct enkele slagen gejutterd. De hoeveelheid water dient berekend te worden op basis van filterlengte, boorgatdiameter en gewenste

verdringingsafstand tot op de boorgatwand. Aansluitend moeten de chemicaliën inwerken en wordt er gejutterd. De inwerktijd en juttertijd verschillen per bedrijf. Zie voor verschillende voorbeelden van wijze van uitvoeren van regeneraties het rapport Regeneratie van mechanisch verstopte bronnen – huidige praktijk en mogelijkheden voor verbetering, BTO 2008.035(s).

7.2. Open bodemenergie

7.2.1. Beheer van OBES-bronnen

7.2.1.1. Periodiek onderhoud

Tijdens periodiek onderhoud van het systeem, dat twee keer per jaar dient plaats te vinden, zal een relatief kleine hoeveelheid grondwater geloosd moeten worden. Gedurende bijvoorbeeld het zomerseizoen zal er veel water van de koude bronnen naar de warme bronnen gepompt worden. Aan het einde van het seizoen zal de stromingsrichting van het energieopslagsysteem omgekeerd worden omdat er op dat moment een warmtevraag in het gebouw ontstaat. Alvorens de stromingsrichting omgekeerd wordt dient het eventueel opgehoopte zand of slib in de (warme) bron waarop het gehele seizoen geïnfiltreerd is, gespuid te worden. Het water zal gedurende een half uur tot een uur op ontwerpdebiet uit de desbetreffende bron onttrokken worden en geloosd moeten worden. Hierdoor worden de eventueel opgehoopte deeltjes uit het systeem verwijderd. Deze actie betreft een preventieve handeling wat de levensduur van het systeem ten goede komt.

Per jaar zal er ten behoeve van periodiek onderhoud een hoeveelheid van grondwater worden geloosd moeten worden. Deze lozingen worden gedaan door middel van een permanente spuileiding. Deze spuileiding wordt doorgaans vanuit de technische ruimte aangelegd naar het riool. De leiding wordt buiten het gebouw ingegraven en ondergrond aangesloten op het riool (inspectiebron).

Wanneer het vergunningstechnisch niet toegestaan is om deze lozingen op het riool te doen wordt er gebruik gemaakt van kaarsenfilters om de vuildeeltjes op te vangen. Hierbij wordt het water een specifieke tijd op het ontwerp debiet van warm naar koud of omgekeerd verpompt.

7.2.1.2. Monitoring

Monitoring is van belang voor het bepalen van een juiste bedrijfsvoering. Op basis van de monitoringgegevens kan een analyse worden gemaakt van de oorzaak van verstopping en daarmee kunnen beslissingen gemaakt worden voor aanpassingen in de bedrijfsvoering. Naast de monitoringgegevens tijdens bedrijfsvoering dienen ook gegevens bekend te zijn van het voorgaande traject, denk aan bronaanleg, bronontwikkeling, eerdere regeneraties etc. Voor een goede bedrijfsvoering dienen bronnen goed gemonitord te worden en moeten ontwerpgegevens van de bron en gegevens van voorgaande metingen of regeneraties in de bron op uniforme wijze worden vastgelegd volgens een meetprotocol. Tijdens de bedrijfsvoering zal de monitoring zich vooral richten op het vastleggen van eventuele verslechtering van de bron:

- verlaging van het specifiek debiet (ofwel specifieke volumestroom); en de bedrijfsvoeringparameters;
- pompcapaciteit;
- aantal draaiuren en;
- schakelregime.

Als er aanwijzingen zijn voor veranderingen van de waterkwaliteit wordt geadviseerd regelmatig onderzoek te doen naar de grondwaterkwaliteit.

Door bepalen van het specifiek debiet in alle bronnen, wordt een beter inzicht in de snelheid van bronverstopping gekregen. Eveneens kan nagegaan worden of het een verstopping van de boorgatwand of de filterspleten betreft.

Voer minimaal 1 keer per jaar op alle onttrekkingsbronnen een specifiek debietmeting uit. Bepaal dit specifieke debiet op eenzelfde manier en onder gelijke omstandigheden. De parameters debiet en aantal draaiuren bepalen samen de belasting van de bron. Het debiet wordt uitgedrukt in het m³/h. Het debiet maal het aantal draaiuren bepaalt de hoeveelheid onttrokken grondwater per jaar (m³/a). Het debiet van een pomp kan wijzigen als gevolg van slijtage van de waaiers of een andere opvoerhoogte. Oorzaken hiervan kunnen zijn: grotere tegendruk in de terreinleiding of een grotere opvoerhoogte in de bron als gevolg van een lagere grondwaterstijghoogte (a.g.v. wijzigingen bronnenveld) of uiteraard verstopping van een bron. Om die reden kunnen eerder gemeten debieten afwijken van de op dat moment geldende debieten. Er dient daarom niet uitgegaan te worden van (in)schattingen op basis van metingen uit het verleden. Het debiet dient tijdens de specifiek debietmeting exact gemeten te worden. Voor het bepalen van het specifieke debiet verdient het de voorkeur het werkelijk onttrokken debiet van de pomp exact te meten.

Bij de modernere pompstations worden het aantal draaiuren en het aantal schakelingen per dag (pomp uit- en weer aanzetten is één schakeling) en de tijd tussen die schakelingen door het besturingssysteem geregistreerd. Indien deze gegevens niet eenvoudig beschikbaar zijn, kan deze informatie ook worden geregistreerd door in de bronnen drukopnemers te hangen. Het aantal noodzakelijke metingen per dag hangt samen met het aantal mogelijke schakelmomenten van het pompstation en van de pompgroep waar de bron op draait. Om na verstoppingsproblemen de bedrijfsvoering op een juiste wijze te kunnen aanpassen is het van belang het aantal draaiuren en de schakelmomenten vast te leggen.

Naast de bovenstaande monitoring gegevens dienen ook alle parameters die benodigd zijn om aan de voorschriften van de vergunning te voldoen te worden gemonitord tijdens warmte- koude levering:

- Waterverplaatsing
- Maximaal onttrekkingsdebiet
- Gemiddelde onttrekking en infiltratie temperaturen
- Maximale en minimale onttrekking en infiltratie temperaturen
- Geladen koude en warmte-energie
- Verbruikte elektrische energie, (indien nodig voor de vergunning SPF_{BES} berekening)

7.3. Waterbehandeling voor open bodemenergiesystemen

De oplosbaarheid van kalk neemt af bij toenemende temperatuur. Een verhoging van de temperatuur kan daardoor leiden tot kalkneerslag. Dit probleem is bekend vanuit de dagelijkse praktijk: ketelsteen in de fluitketel en kalkaanslag bij het verwarmingselement van de wasmachine. In de praktijk blijkt een oververzadiging van kalk niet direct tot neerslag te leiden: Snijders (1991) geeft aan dat een verzadigingsindex tot 1 kan voorkomen zonder dat kalkneerslag optreedt. Dit kan worden verklaard uit hoge concentraties opgeloste organische stof, die calcium complexen, en fosfaat en magnesium, die de kristallisatie van calciet tegenwerken: inhibitie (Stuyfzand en Raat, 2010). Bij de meeste OBES-systemen zijn de temperatuurverschillen relatief klein en is kalkneerslag niet aan de orde. Bij hoge temperatuur warmteopslag is kalkneerslag echter een belangrijk aandachtspunt.

In de literatuur worden verschillende temperaturen genoemd, waarbij de neerslag van carbonaten begint op te treden:

- Heidemij (1987) concludeert dat waterbehandeling om kalkneerslag te voorkomen bij warmteopslag op lage temperatuur ($< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) in veel gevallen niet nodig is;
- Snijders (1991, 1994) geeft aan dat bij warmteopslag bij lagere temperaturen (afhankelijk van de watersamenstelling tot $40\text{ à }60\text{ }^{\circ}\text{C}$) vaak geen waterbehandeling nodig is door de aanwezigheid van inhibitoren;
- Knoche et. al (2003) hebben experimenten uitgevoerd met verschillende watertypen en geven aan dat zoet water kan worden verwarmd tot $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en zout water tot $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, zonder dat kalkneerslag optreedt. Bij opwarming tot boven $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ wordt beproeving aanbevolen.

Het risico op carbonaatneerslag is dus afhankelijk van de kalkverzadigingsgraad van het oorspronkelijke grondwater, de mate waarin de temperatuur wordt verhoogd en de aanwezigheid en concentraties van stoffen die de neerslagreacties hinderen/vertragen. Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de meeste watervoerende pakketten in Nederland aannemelijk is, dient bij opslag van warmte op hoge temperaturen rekening te worden gehouden met kalkneerslag. Om carbonaatneerslag te voorkomen kan waterbehandeling worden toegepast. Hierbij kan worden gedacht aan ionenwisseling, zuurdosering of toevoeging van inhibitors.

7.3.1. Praktijkervaring met waterbehandeling bij HTO

In Nederland zijn twee hoge temperatuur warmteopslagsystemen gerealiseerd, namelijk bij de Universiteit Utrecht en in Zwammerdam. De ervaringen bij deze systemen zijn samengevat in het rapport over Hoge Temperatuur Opslag van het onderzoeksproject Meer Met Bodemenergie (Drijver, 2012).

7.3.1.1. Universiteit Utrecht

Bij het systeem van de UU is gebruik gemaakt van ionenwisseling. Bij deze techniek wordt het grondwater door een vat geleid dat is gevuld met negatief geladen korrels (hars). De negatief geladen korrels kunnen positief geladen deeltjes uit de oplossing aan zich hechten en functioneren zodoende als kationuitwisselaar. Bij de Universiteit Utrecht is deze techniek in de praktijk gebracht en is gebruik gemaakt van zout (NaCl) om natrium aan de hars te hechten. Vervolgens wordt het grondwater door de ionenwisselaar geleid en wordt (onder andere) calcium uit het grondwater opgenomen door de hars en natrium afgestaan. Hierbij daalt (onder andere) de calciumconcentratie in het grondwater en neemt de kalkverzadigingsgraad af. Op deze manier kan de neerslag van kalk worden voorkomen. Na verloop van tijd raakt de hars verzadigd en moet de hars opnieuw worden geladen met natrium (geregenereerd) zodat deze opnieuw kan worden gebruikt.

De ervaring bij de Universiteit Utrecht is dat de waterbehandeling van de warmteopslag veel aandacht vergde, omdat de intensiteit van de behandeling voortdurend moest worden bijgesteld op basis van handmatige metingen. Vanwege de mogelijke problemen is de waterbehandeling voortdurend bewaakt zodat niet te veel behandeld zou worden (risico op kleizwelling) en niet te weinig (risico op kalkneerslag). Zowel kleizwelling als kalkneerslag kunnen leiden tot verstopping van de bronnen. Dit betekende wel dat de hardheid van het water wekelijks gemeten zou moeten worden (in de praktijk was deze meetfrequentie meestal lager), op basis waarvan de behandeling dan bijgesteld kon worden.

Verder vraagt ionenwisseling om de aanvoer van veel zout (NaCl) voor de regeneratie van de ionenwisselaar, wordt veel zout (chloride) geloosd en bestaat het risico dat klei in het watervoerende pakket gaat zwellen door de vervanging van calcium door natrium. Kleizwelling is nadelig, omdat het een verstoppende werking heeft op de bronnen.

Bij de Universiteit Utrecht is de warme bron in de loop der jaren ernstig verstopt geraakt. De oorzaak van de verstopping is niet bekend. De kans is groot dat de kritische waterbehandeling de oorzaak is van de verstopping, maar bewijzen daarvoor ontbreken. Daarnaast is de warme bron in de zomer van 1999 gaan lekken. Belangrijkste oorzaak hiervan was het niet functioneren van de drukbeveiliging op de bronkop en het gebrek aan kennis bij de beheerder.

7.3.1.2. Zwammerdam

De oplosbaarheid van carbonaten is niet alleen afhankelijk van de temperatuur, maar ook van de pH. Toevoeging van zuur verlaagt de pH en zorgt voor een hogere oplosbaarheid van carbonaten. Door de pH van het grondwater te verlagen voordat de temperatuur wordt verhoogd kan carbonaatneerslag worden voorkomen. Hiervoor kunnen verschillende zuren worden gebruikt. Bij de hoge temperatuur warmteopslag De Bruggen in Zwammerdam, is gebruik gemaakt van zoutzuur (HCl). Bij het beoogde HTO project van ECW wordt uitgegaan van het gebruik van CO₂.

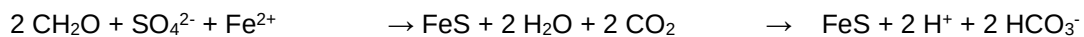
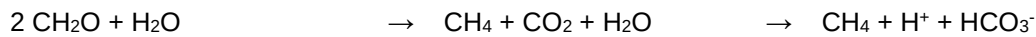
Uit de monitoring van de installatie in Zwammerdam over 5 jaar, is gebleken dat het systeem technisch goed heeft gefunctioneerd. De kwaliteit van de bronnen is goed. Lessen zijn geleerd uit de bronverstopping (vermoedelijk door kalkneerslag of kleizwelling) bij de Universiteit Utrecht. Voor de warmteopslag Zwammerdam is daarom de benodigde waterbehandeling onderzocht en geïmplementeerd binnen de installatie. Tijdens de bedrijfsvoering hebben zich geen problemen voorgedaan in de vorm van bronverstopping (IF Technology, 2002b). Zoutzuurdosering werkt goed en de methode is goed beheersbaar.

Zoutzuurdosering heeft echter ook een aantal nadelen: zoutzuur is een agressieve stof waarmee met zorg moet worden omgegaan. Voor opslag van zoutzuur moeten daarom maatregelen genomen worden, bijvoorbeeld vloestofdichte vloeren. De sturing/beveiliging middels pH meting is kwetsbaar. Daarnaast is een aanzienlijke hoeveelheid zoutzuur nodig, vooral bij grootschalige projecten. Bij het project De Bruggen werd voor de aanvoer gebruik gemaakt van tankwagens. Wel moet worden opgemerkt dat na dosering het zoutzuur zeer sterk verdund is: in Zwammerdam was per m³ grondwater ongeveer 200 ml van een 30% zoutzuuroplossing nodig, wat overeen komt met een verdunning met een factor 5000.

Een aandachtspunt bij zuurdosering is de ontwikkeling van de benodigde dosering in de loop van de tijd. Als steeds dezelfde hoeveelheid water heen en weer wordt gepompt, dan zou de benodigde zuurdosering in de opeenvolgende cycli volgens geochemische berekeningen steeds hoger worden. Dat komt doordat er elke cyclus kalk oplost in de omgeving van de koude bron. Daardoor is het kalkgehalte in het onttrokken grondwater elke volgende cyclus hoger dan de voorgaande en is telkens een hogere zuurdosering nodig. In de praktijk in Zwammerdam nam de benodigde dosering echter niet toe in de tijd. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn:

- In de praktijk lost er minder kalk op dan in de modelberekeningen. Dat kan komen doordat niet overal kalk voorkomt en/of het oplossingsproces niet snel genoeg verloopt om de evenwichtssituatie te bereiken.
- Als gevolg van een wateronbalans zal een deel van het onttrokken water ververst worden, waardoor de toename in het kalkgehalte kleiner is dan in de berekeningen.
- Als gevolg van processen aan de rand van de bel (diffusie en dispersie en dichtheidsgedreven grondwaterstroming) en menging van water van verschillende dieptes in de bron wordt de toename in het kalkgehalte geremd.
- De gemobiliseerde organische stoffen, alsook andere stoffen zoals magnesium en fosfaten, hebben een inhibiterende werking (remmen kalkneerslag), waardoor met een lagere dosering kan worden volstaan.

Mogelijk treden reacties op, waarbij zuur wordt gevormd (in de ondergrond wordt dan als het ware ook nog zuur toegevoegd):



Om de toename van het kalkgehalte en de benodigde dosering te remmen kan voorafgaande aan de infiltratie in de koude bron (na afkoeling van het water) een deel van het zuur weer worden verwijderd door gecontroleerde ontgassing (waarbij een deel van het opgeloste CO_2 wordt verwijderd). Daarom is monitoring van de ontwikkeling van het kalkgehalte in het grondwater en de benodigde dosering aan te bevelen. Verder is optimalisatie van de zuurdosering aan te bevelen, zodat onnodige overdosering wordt beperkt.

7.3.2. Inhibitors

Een mogelijk interessante optie om kalkneerslag te verhinderen is de toepassing van inhibitors. Inhibitors zijn stoffen die een remmende werking hebben op chemische processen. Ook de neerslag van carbonaten kan met behulp van inhibitors worden belemmerd. Bekende inhibitors zijn fosfaten en acrylaten. Inhibitors zijn kostentechnisch interessant, maar hebben als nadeel dat hier nog geen praktijkervaring mee is. Daardoor is nog onzeker of deze optie in de praktijk ook werkt en is niet bekend wat de effecten op de grondwaterkwaliteit zijn. Gezien de kostentechnische voordelen is nader onderzoek naar deze optie de moeite waard.

7.4. Olie-, gas- en geothermiewinning

Net als bij geothermiewinning is scaling door sulfide en carbonaat neerslagen een groot risico.

Om kalkneerslag aan de productiezijde van een geothermisch systeem tegen te gaan wordt berekend wat de minimale druk in het systeem moet zijn om de opgeloste CO_2 in het productiewater in oplossing te houden zodat de pH stabiel blijft. Indien deze minimale druk binnen de operationele specificaties van het bovengrondse leidingsysteem blijft is dit een simpele manier om een van de grootste risico's op (bron)verstopping te beheersen,

Inhibitoren worden gebruikt bij Nederlandse geothermiebronnen om corrosie tegen te gaan. De inhibitor bestaat uit meerdere componenten, de concentratie en samenstelling kan afgestemd worden op de locatie specifieke condities om optimaal te beschermen en tegelijkertijd zo min mogelijk onnatuurlijke stoffen in het systeem te brengen (Witteveen en Bos, 2019 (1)). Het wordt toegevoegd aan het water vlak boven de screensectie en bij de pomp van de productiebron, waar het een laagje vormt aan de binnenkant van de bron dat beschermd tegen het corrosieve water (Witteveen en Bos, 2019 (1,2)). Het inhibitor wordt verder in het systeem weer uit het water gefilterd, maar metingen laten zien dat de inhibitor niet volledig wordt verwijderd. Het is onbekend of en hoeveel inhibitor via de injectiebron in het reservoir terecht komt (Witteveen en Bos, 2019(2)).

Inhibitoren om scaling tegen te gaan worden tegenwoordig niet meer gebruikt omdat het risico operationeel gemitigeerd kan worden danwel gereduceerd wordt door het gebruik van corrosie-inhibitor (Witteveen+Bos, 2019 (1))

7.5. Discussie en samenvatting

Tijdens de bedrijfsvoering zal de monitoring zich vooral richten op het vastleggen van eventuele verslechtering van de bron:

- verlaging van het specifiek debiet (ofwel specifieke volumestroom); en de bedrijfsvoeringparameters;

- pompcapaciteit;
- aantal draaiuren en;
- schakelregime.

Op basis van deze monitoring kan er worden bepaald of een OBES-, of HTO-bron al dan niet geregenereerd dient te worden.

7.5.1. Waterbehandeling

Kalk neerslag in en rondom de bron van de warme bron vormt het grootste risico voor verstopping van een HTO systeem. Een goede waterbehandeling door toevoeging van een zuur of een inhibitor kan kalkneerslag voorkomen, danwel vertragen. De dosering, en de aanpassing van de dosering bij elke opvolgende laadfase van het HTO systeem moet met zorg bepaald worden en is afhankelijk van de casus specifieke condities. Een gedegen monitoring systeem om het effect van de zuur of inhibitor op de waterkwaliteit te waarborgen wordt aangeraden.

7.5.2. Regeneratie

Voor de regeneratie van OBES-bronnen worden verschillende methodes toegepast. Hieronder worden de belangrijkste methodes toegelicht:

- Een verstopping van het bronfilter is gemakkelijk toegankelijk en daardoor goed te regenereren. Gewoonlijk beginnen we met een mechanische behandeling. Deze bestaat uit borstelen of hoge drukreiniging (waterjetting), al dan niet gecombineerd. Om de laatste chemische neerslag ook uit de filterspleten van de bron, en uit de afzettingen aan de buitenzijde van het bronfilter te verwijderen wordt deze behandeld met een zuur, waardoor de aanwezige neerslag (grotendeels) zal oplossen. Bij de keuze van de chemicalien moeten we onder meer op het materiaal van het bronfilter letten.
- De beste methode voor een goede verwijdering van bronverstopping op de boorgatwand is een combinatie van jutteren en het gebruik van chemische oxidatiemiddelen.

8. Conclusies

In deze literatuurstudie naar de brontechniek voor HTO-bronnen komen een aantal bruikbare werkwijzen en kennislacunes naar voren.

8.1. Wat is (direct) bruikbaar/toepasbaar voor HTO?

In deze paragraaf is een korte samenvatting gegeven van de belangrijkste bevindingen die toepasbaar zijn voor de brontechniek van HTO-systemen.

8.1.1. Bronontwerp en -afwerking

Het plaatsen van HTO-bronnen in relatief ondiepe, ongeconsolideerde zandlagen circa (200-500 m-mv) worden geplaatst met een zuigboring (met luchtlift). De afwerking van dergelijke bronnen heeft veel overeenkomsten met onttrekkingsbronnen ten behoeve van drinkwater en reguliere OBES-systemen:

- **Korrelgrootte filtergrind:** de korrelgrootte van het omstortingsmateriaal rond het filter wordt bepaald op basis van de korrelgrootte en korrelverdeling van het bodemmateriaal.
- **Filterspleet breedte:** de breedte van de perforaties (vaak verticale sleuven) wordt bepaald op basis van de gebruikte omstorting.
- **Aanvulmateriaal:** Het boorgat dient goed te worden aangevuld, waarbij scheidende lagen moeten worden hersteld conform BRL-2101. Doorgaans wordt er voor OBES-, en ook HTO-, bronnen gekozen om af te dichten zwelklei ter hoogte van scheidende lagen, en aanvulgrind. Het boorgat kan eventueel ook geheel worden aangevuld met speciaal cement (spherelite). Het gebruik van spherelite moet de warmteverliezen tot een minimum beperken. Uit modelanalyses is gebleken dat de toegevoerde waarde van spherelite beperkt is t.o.v. grind en klei. Daarnaast is het gebruik van cement risicovoller, omdat bij eventuele krimp en risico op barsten de bronintegriteit verslechterd.
- **Gebruik PVC:** Het gebruik van PVC-leidingen, -stijgbuizen, en -filters is begrensd tot 45 °C. Daarbij dient bij hogere temperaturen rekening te worden gehouden met verlaagde barst- en breukdrukken voor PVC.
- **RVS en GVK:** Roestvrijstaal (RVS316) en glasvezel versterkt kunststof (GVK) kunnen worden gebruikt bij voor de bronfilters bij hogere temperaturen (> ca. 100 °C) en grotere dieptes.
- **Pomp:** Voor HTO kunnen een *line shaft pump* (LSP) en een *electric submersible pump* (ESP) worden gebruikt. In Nederland wordt er voor OBES altijd een ESP toegepast. ESP's worden voornamelijk gebruikt bij systemen met een temperatuur onder de 120°C. LSP's worden voornamelijk gebruikt in bronnen met onttrekkingstemperatuur van rond de 150 - 200°C.

Diepere geothermie-, olie- en gasbronnen (geboord met straight-flush rotary), hebben te maken met andere grondwaterkwaliteit en formatietemperatuur. Mitigerende maatregelen voor effecten als corrosie, erosie en scaling dienen te worden meegenomen in het bronontwerp voor HTO wanneer de toepassingscondities daarom vragen:

- **Corrosie:** Verhoogd risico op corrosie bij hoge H₂S en CO₂ concentraties.
- **Erosie:** Daarnaast kan het oppompen van fijn formatiemateriaal schade aanbrengen aan de casing en pomp.
- **Scaling:** Het dichtslibben van de verbuizing en filter door (carbonaat-)neerslag, scaling op de ESP.

Belangrijke zaken die worden meegenomen in het bronontwerp en de afwerking van diepere geothermie-, olie- en gasbronnen die relevant kunnen zijn voor eventuele toepassing van HTO in diepe formaties.

- **Onttrekkingsnormen:** Er gelden andere onttrekkingsnormen bij het bronontwerp voor olie- en gaswinning. Een olie- en gas bron wordt ontworpen op basis van de benodigde bronafwerking. In eerst instantie wordt er begonnen met een field development plan, welke bepaalt hoeveel bronnen er nodig zijn om een bepaalde recovery te halen. In de geothermie worden doorgaans de volgende volgende zaken gehanteerd:
 - De stroomsnelheid rond de screens en ESP pomp <5.0m/s (API RP14E), voor rond de ESP wordt deze ontwerpcriteria betwist maar dit zal door een Geothermie collectief opgepakt worden.
 - Gebruik maken van een effectieve zand preventie methode (voorkomen van zandlevering om corrosie te minimaliseren): passieve controle (perforations) en actieve controle (downhole sand). Doorgaans wordt er gebruik gemaakt van kernmonster om het risico op zandlevering te bepalen. In dat geval wordt er gebruik van zandretentie testen en de korreldistributie.
- **Casing:** Tot op heden worden de meeste geothermie-, olie- en gasbronnen afgewerkt met casings van carbonstaal. Dit materiaal is relatief gevoelig voor corrosie en scaling. Andere opties, zoals composiet (met evt glasvezel) casing staan erom bekend dat het zeer resistent is tegen chemicaliën.
- **Afwerking en cementering:** Voor het aanvullen van het boorgat wordt cement gebruikt. Het cement-type Class-G is de meest gebruikte in de olie- en gaswereld. In Nederland heeft een bron voor:
 - Geothermie veelal een enkele barrière (één enkele casing en cementering t.o.v. het formatiemateriaal) en telescopisch geboord.
 - Gaswinning meerdere barrières door de hele bron heen (meerdere casings met annulaire ruimtes om elkaar heen). Enkele bronnen voor de injectie van restproductiewater, injectie van stoom voor oliewinning en voor observatiedoeleinden zijn gelijk aan de configuratie van een gasbron.
 - Oliewinning een enkele barrière (enkele casing t.o.v. het gesteente) diep in de bron, meerdere barrières ondieper in de bron (meerdere casings en annulaire (gecementeerde) ruimtes om elkaar heen).

Aanleg met een goede cementering en meerdere barrières resulteert in een verbeterde bronintegriteit.

8.1.2. Aanleg en ontwikkeling

- **Boormethode:** Voor HTO-bronnen wordt een zuigboring met luchtlift als standaard boortechniek gezien met een gewenste boorgatdiameter tot diepte van circa 200-500 m-mv. Wanneer men diepere pakketten wil aanboren voor HTO, zal de zuigboortechniek niet toereikend zijn zal men gebruik moeten maken van alternatieve boormethodes die gangbaar zijn bij het plaatsen van olie-, gas en geothermiebronnen (bijvoorbeeld straight-flush rotary).
- **Boorsnelheid:** Bij voorkeur wordt er gewerkt met boorsnelheid van circa 10 m/u tijdens een zuigboring. Wanneer er wordt geboord met een lagere snelheid zal de kwaliteit van de bemonstering van de aangeboorde lagen lager zijn en worden scheidende lagen minder nauwkeurig gedetecteerd. Daarnaast kan de afpleistering en afsmering van de boorgatwand onvoldoende zijn, waardoor er onnodig veel boorspoelingsverlies plaats vindt en er sprake is

van verdere indringing van de boorspoeling in de formatie. Wanneer de afpleistering niet voldoende is kan het risico op instorten van het boorgat bestaan.

- **Boorgatstabiliteit en boorspoeling:** In de praktijk wordt in Nederland tijdens het zuigboren in de meeste gevallen met een overdruk van 0,2 bar gewerkt om het boorgat open te houden tijdens het boorproces, inbouw van het filter en de bronafwerking. Afpleistering van de boorgatwand is daarbij aan de ene kant nodig om werkwaterverlies naar doorboorde pakketten te beperken, terwijl het aan de andere kant moet worden beperkt omdat het de toestroom van grondwater naar de bron beperkt. Bij voorkeur wordt er daarom met zo schoon mogelijk werkwater gewerkt om de afpleistering op de boorgatwand te minimaliseren, maar boorgat instabiliteit te voorkomen. Indien het niet anders kan (bijvoorbeeld bij hele grove doorboorde pakketten), moet men gebruik maken van boorspoelingsadditieven. In alle gevallen moet er worden voorkomen dat er naval vanaf de boorgatwand, of in het ergste geval, instorting van het boorgat plaatsvindt. Hierbij moet rekening worden gehouden met naval van formatiemateriaal, doordat het boorgat te lang openstaat en kleizwelling doordat doorboorde kleilagen water opnemen en gaan uitzetten.
- **Boorspoelingsadditieven:** Voor diepere boringen zal men genoodzaakt zijn om gebruik te maken van boorspoelingsadditieven om de boorgatstabiliteit te waarborgen. Over het algemeen wordt het gebruik van organische spoelingsadditieven, zoals polyanionische cellulose en carboxymethylcellulose aanbevolen. Antisol (in de praktijk worden concentraties tot 0,3 kg/m³ als richtlijn aangehouden) is de meest gebruikte boorspoelingsadditief tijdens het plaatsen van onttrekkings- en OBES-bronnen met een zuigboring. Vaak wordt er gebruik gemaakt van pH-waarde verlagende, zoals natronloog of soda, om de boorspoeling basisch te houden. Tegenwoordig wordt het gebruikt van bentoniet voor ondiepe zuigboringen afgeraden. Voor diepere boringen met de spoelboortechniek (>500 m-mv) worden zwaardere spoelingsadditieven gebruikt. Veelal wordt er gebruik gemaakt van een zogenoemde water-based mud, bestaand uit een boorvloeistof mix van werkwater, bentoniet en andere chemicaliën om betere versmering op de boorgatwand te garanderen.
- **Bronontwikkeling:** In de praktijk worden de ontwikkelingsmethoden als jetten, jutteren, hogedrukreinigen toegepast met toevoeging van chemicaliën voor onttrekkings- en OBES-bronnen. Op basis van de gewenste specifieke volumestroom (conform ontwerpdebiet) en de mate van zand- en slibhoudendheid kan worden beoordeeld of een bron voldoende is ontwikkeld.

8.1.3. Bronverstopping

- **Bronverstopping door deeltjes:** de migratie en ophoping van deeltjes kan voorkomen bij zowel de onttrekking als infiltratiebron. Dit is vooral een probleem in de drinkwater wereld. Bij geothermie kunnen deeltjes het reservoir rondom de infiltratiebron verstoppem. Bij HTO zal de omkering van stroomrichting in zomer en winter, en het feit dat de netto onttrekking nul is, het risico van ophoping van deeltjes beperken.
- **Chemische bronverstopping:** het neerslaan van vaste stoffen uit het water kan zowel in de bron als in het omliggende reservoir zorgen voor onttrekking of infiltratieproblemen. Met name kalkneerslag in en rondom de hete bron vormt een risico omdat kalk een lagere oplosbaarheid heeft bij hogere temperaturen. Ook corrosie-gerelateerde neerslag kan verstopping opleveren. Het gaat dan bijvoorbeeld om ijzer(hydr)oxiden of lood. Corrosie kan worden tegengegaan door het systeem luchtdicht te houden en geschikt materiaal te gebruiken.
- **Biologische bronverstopping:** de stroming en temperatuurverhoging kunnen leiden tot een toename van bacteriële groei. Daarnaast kan de verhoogde microbiële activiteit chemische

reacties versnellen. Zowel bij OBES als bij geothermie komt biologische bronverstopping al dan niet in combinatie met chemische bronverstopping voor. Afhankelijk van de condities kunnen verschillende bacteriën zich ontwikkelen met verschillende risico's voor verstopping.

8.1.4. Beheer en waterbehandeling

- **Kalkneerslag en scaling:** Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de meeste watervoerende pakketten in Nederland aannemelijk is, dient bij opslag van warmte op hoge temperaturen rekening te worden gehouden met kalkneerslag. Bij opwarming tot boven 60 °C wordt waterbehandeling aanbevolen, daaronder is het afhankelijk van de geochemische condities. In het geval dat kalkneerslag een risico vormt kan het toevoegen van zuur of een inhibitor gebruikt worden om kalkneerslag tegen te gaan of te vertragen. De dosering hiervan moet per systeem nauwkeurig bepaald en gemonitord worden om negatieve bij-effecten te minimaliseren.
- **Bronschakelen:** Een OBES- en HTO-bron zal tijdens bedrijfsvoering vaak schakelen in brondebiet. Tijdens HTO zal de netto verhouding tussen onttrekkings- en infiltratedebiet op jaarbasis ongeveer nul zijn, en doordat er geen continue debiet wordt onttrokken/geïnfilteerd over een langere tijd zal het risico op bronverstopping lager zijn dan voor winbronnen.

8.2. Welke onderwerpen vragen om nader onderzoek?

8.2.1. Bronontwerp en -afwerking

Om tot een zo goed mogelijk bronontwerp te komen zijn er een aantal zaken die verder moeten worden uitgezocht:

- **Verbreden toepassingscondities HTO:** Om de potentie van HTO te vergroten is het goed om de mogelijke grondwaterpakketten, opslagvolumes en temperatuurcontrasten waaronder HTO kan efficiënt kan worden toegepast zo breed mogelijk te kunnen maken: Door gebruik te maken van alternatieve winconcepten kan HTO beter mogelijk gemaakt kunnen worden:
 - In dunne grondwaterpakketten, met nieuwe puttechnieken die de hogere putcapaciteiten mogelijk maken, bijvoorbeeld radiaal bron of HDDW.
 - Onder opslagcondities waar dichtheidsstromingseffecten overheersen, bv. bij kleine opslagvolumes, dikke lagen, hoge temperatuurverschillen en/of zeer doorlatende grondwaterpakketten. Bijvoorbeeld door Multiple partially penetrating wells (MPPW) of instroom regelaars zoals packers, kleppen en Passief duale weerstand (PDW)
- **Infiltratie- en onttrekkingsnorm:** Welke infiltratie- en onttrekkingsnormen kunnen worden gehanteerd bij hogere temperaturen van het infiltratie- en opslagwater tijdens HTO? Tot op heden is er weinig wetenschappelijke onderbouwing voor de bestaande ontwerpnormen om het maximale debiet tijdens onttrekking en infiltratie vast te stellen. Ook is er geen directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering. Nader onderzoek naar het effect van zandlevering, en verstopping op de boorgatwand door deeltjes bij infiltratie en onttrekking bij hogere temperaturen tijdens HTO kunnen zorgen voor beter onderbouwde randvoorwaarden.
- **Filterdimensionering en broncapaciteit:** De keuze van het bronontwerp in verhouding tot de heterogeniteit van de bodem. Wat is de beste filterlengte, boorgatdiameter, en korrelgrootte diameter van het filtergrind. Een langere filterstelling door eventueel fijnzandigere tussenlaagjes kan resulteren in andere keuzes in omstortingsmateriaal en infiltratie- en onttrekkingsnormen.

8.2.2. Aanleg en ontwikkeling

Onderzoek naar de efficiëntste methodes tijdens de aanleg en ontwikkeling van HTO-bronnen kan de kosten tijdens het boren en de aanleg drastisch verlagen, het circulatie-verlies en gebruik van werkwater beperken, en de lozing van spoelwater beperken. Hierbij kan men rekening houden met:

- **Gebruik boorvloeistof:** Het toepassen van andere type boorvloeistoffen (gebruik van alternatieve additieven) tijdens het boren, in combinatie met hulpvloeistoffen bij ontwikkelen van de bron. Hierbij kan men rekening houden met het effect van de afpleisterende werking (de vorming van skin) ter hoogte van verschillende zandpakketten. Ook dient men rekening te houden met de pH, temperatuur, en water kwaliteit van de te doorboren pakketten. Een van de achterliggende redenen om polyanionische cellulose (bijvoorbeeld Antisol) te gebruiken is dat deze na gebruik afgebroken kunnen worden in het grondwater. Het is echter de vraag of dit ook gebeurt onder anaerobe omstandigheden. Voor OBES- en winbronnen worden in de praktijk concentraties tot $0,3 \text{ kg/m}^3$ als richtlijn aangehouden. In sommige gevallen wordt er gewerkt met nog hogere concentratie tot $1,0 \text{ kg/m}^3$.
- **Bronontwikkeling:** Het verbeteren van bestaande en het ontwikkelen van nieuwe ontwikkelmethoden voor HTO-bronnen. Welke stroomsnelheid op de boorgatwand is er nodig om deeltjes op de boorgatwand, en boorspoelingsresten te verwijderen? Hierbij kan men ook kijken naar mechanische belastbaarheid van filtergrind bij toepassing van mechanische regeneratie en ontwikkelen. Wat zijn de maximale drukgradiënten die kunnen worden gehanteerd voor diepere HTO-bronnen met omstorting.
- **Stopcriteria bronontwikkeling:** Het verbeteren van de ontwikkelmethodes door inzicht te krijgen in de juiste stopcriteria. Wanneer dient men te stoppen met het ontwikkelen van de bron, of wanneer dient men over te gaan op een andere ontwikkel, of chemische bronbehandelingsmethode. Hierbij kan men rekening houden met:
 - Het beoordelen van de specifieke volumestroom bij oplevering van een HTO-bron.
 - Het bepalen van slibhoudendheid en zandlevering.

8.2.3. Beheer en waterbehandeling

- **Bronverstoppingsprocessen nagaan:** De wijze waarop met behulp van HCl of CO_2 -dosering, of het gebruik van inhibitoren bronverstopping door kalkneerslag kan worden voorkomen wordt uitgewerkt op basis van een voor Nederland representatieve range van grondwatersamenstellingen met behulp van hydrogeochemische simulaties en analyse van praktische randvoorwaarden voor een robuuste toepassing in de praktijk. Deze zullen op basis van de aanwezige grondwatersamenstellingsgegevens voor de verkenningslocaties worden uitgewerkt
- **Scaling door kalkneerslag tegengaan:** Voor de waterbehandeling met zuur of inhibitoren om verstopping van het systeem met kalk tegen te gaan zijn nog een aantal kennislacunes. De volgende vragen dienen te worden beantwoord:
 - Wat is de beste methode om HCl of CO_2 te doseren in opvolgende laadcycli?
 - Welke inhibitoren (bijvoorbeeld fosfaten en acrylaten) kunnen ingezet worden om kalkneerslag tegen te gaan? En wat zijn de mogelijke risico's van deze inhibitoren?
 - Welke waterbehandeling is het meest effectief onder welke condities?
 - Wat is een effectieve monitoring methode om de waterbehandeling in de tijd te controleren en beheersen?

Referenties

- Appelo, C.A.J. en Postma, D. (1999). Geochemistry, groundwater and pollution. Editie: Fourth corrected print. ISBN-nummer: 90 5410 106 7. Uitgever: A.A. Balkema. Rotterdam/Brookfield.
- M. Armenta, A. Alghamdi and A. Haji, "Applications of Mechanical External Casing Packer.," Society of Petroleum Engineers, 01 Januari 2007.
- Eduardo G.D. Barros, Alin Chitu, Olwijn Leeuwenburgh (2020). Ensemble-based well trajectory and drilling schedule optimization—application to the Olympus benchmark model. Computational Geosciences, <https://doi.org/10.1007/s10596-020-09952-7>
- Bloemendal, M. (2018). The hidden side of cities. Phd-thesis, Delft University of Technology.
- Breedveld, R., Van Beek, K. en Doedens, G.J. (2007). Naar een verstoppingsvrij puttenveld Tull en 't Waal (1): Pompputten van de toekomst?
- Buik, N. (2001) Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmte opslag, IFTechnology, 9805NB, Arnhem
- Buik, N. en Willemsen, A. (2002). Clogging rate of recharge wells in porous media. Proceedings ISAR-4, Adelaide, South-Australia.
- G. Carvajal, M. Maucec and S. Cullick, "Smart Wells and Techniques for Reservoir Monitoring," pp. 249-289, 01 2018.
- Ciaurri, David Echeverria, SPE, IBM Research, Andrew R. Conn, IBM Research, Ulisses T. Mello, SPE, and Jerome
- De Zwart, A. (2007). Investigation of Clogging Processes in Unconsolidated Aquifers near Water Supply Wells. Proefschrift, TU-Delft.
- Den Blanken, M.G.M., 1977. Het maximale putdebiet. H2O, 10(22).<https://edepot.wur.nl/403180>
- drillingformulas.com, "multiple-zone-completion," 8 05 2016. [Online]. Available: (<http://www.drillingformulas.com/multiple-zone-completion/>).
- Driscoll, F.G. (1986). Groundwater and Wells. Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul, Minnesota.
- Drijver, B. (2012). Hogetemperatuuropslag - kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuuropslagssystemen - Eindrapport. Deelrapport 6 onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie.
- Fortuin, N.P.M. en Willemsen, A., 2005. Exsolution of nitrogen and argon by methanogenesis in Dutch ground water. Journal of Hydrology 301 (2005) 1-13.
- D. Haeberle, A. Nwankwo, J. McDermott, S. Gosavi, B. Duffy and M. Grubert, "Application of Flow-Control Devices for Water Injection in the Erha Field.," in Society of Petroleum Engineers, 2008.
- Hanea et al. Robust Multi-Objective Field Development Optimization for the Mariner Asset, SPE-193883-MS, SPE Reservoir Simulation Conference
- Hartog, N., M. Bloemendal, E. Slingerland and W. A. van (2017). "Duurzame warmte gaat ondergronds." VV+ sept-okt 17.
- HEATSTORE (2019). Design considerations for high temperature storage in Dutch aquifers. From: https://www.heatstore.eu/documents/HEATSTORE_D1.1_Appendix%20II_final_05-04-2019.pdf
- Heidemij (1987). Putverstopping bij warmte-opslag in ondiepe aquifers. Beop samenwerkingsovereenkomst no. 54202-20.13-I.4.18.
- Houben (2015). Review: Hydraulics of water wells - head losses of individual components. Hydrogeology Journal (2015) 23: 1659–1675.

- Hubert et al. (2009). A Constant Flux of Diverse Thermophilic Bacteria into the Cold Arctic Seabed. Science 325, 1541 (2009).
- IF Technology (2001). Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmte opslag. Onderzoek in opdracht van NOVEM, rapportnr. 1/9805/GW.
- IF Technology (2002) - De Bruggen Zwammerdam, 2e meetrapportage + evaluatie grondwatercircuit warmteopslag - Waterbehandeling. Rapportnr. 2c/M9743/JW.
- IF Technology (2020a). Hoge Temperatuur Opslag - ECW Agriport A7, Middenmeer - Base Of Design. Referentie 67196/BP/20200116.
- IF Technology (2020b). HTO ECW Middenmeer - Afweging bronpomp ESP of LSP HTO Middenmeer. Referentie 67196/BP/20200323.
- IF Technology en Universiteit Utrecht (2012) Ontwerpnormen fijnzandige aquifers. Deelrapport Werkpakket I - SKB onderzoek Hogetemperatuur opslag in de bodem. Rapportnr. 26.723/61335/RW.
- IF Technology (2019). Geothermie putten in ondiepe fijnzandige formaties - Literatuuronderzoek en ervaringen uit de olie/gas-, drinkwater- en WKO-sector. Referentie 65163/RDx/20191218.
- IF Technology (2020). Hoge Temperatuur Opslag - ECW Agriport A7, Middenmeer - Base Of Design. Referentie 67196/BP/20200116.
- Installeer Advies en IF Technology (2020). Onderzoek putverstopping als gevolg van sulfaatreductie bij open bodemenergiesystemen - Fase 1: Inventarisatie problematiek. Onderzoek in opdracht van BodemenergieNL, referentie: 69232/LL/20200506.
- Kahrobaei et al. (2019). Regional Scale Geothermal Field Development Optimization under Geological Uncertainties. European Geothermal Congress 2019. Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019
- Kas als energiebron (2014) Handboek Geothermie, Zoetermeer, 2014
- KIWA (1982). Verstopping van persputten. Rapport samengesteld binnen het programma spoorwerk van de VEWIN.
- KIWA (1989). Diepinfiltratie, de praktijk - Een bundeling van Nederlandse ervaringen met diepinfiltratie. KIWA mededeling nr. 105.
- Knoche, G., et al, (2003). Scaling-tests on Groundwater for Use in High-Temperature-ATES in Respect to Calcite Precipitates in Heat Exchangers. Proceedings Futurestock 2003, Warsaw, Poland.
- Kobus, E.J.M., Olsthoorn, T.N., Tuinzaad, H., de Vogel, A.N.G., 1976. Omstorting van waterwinningsputten en het maximaal toelaatbare putdebiet. KIWA mededeling 45. <https://library.kwrwater.nl/publication/51465709/>
- KIWA (2010). Kennisdocument putten(velden) - Ontwerp, aanleg en exploitatie van pompputten. Rapportnr. BTO 2000-110 (c), september 2010.
- KWR (2019a). Kennisdocument putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater – Deel 1. Algemeen. Praktijkcode 13-1
- KWR (2019b). Kennisdocument putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater – Deel 2. Ontwerp. Praktijkcode 13-2
- Leunk, I., 2012. Analyse Putverstopping Espelosebroek. KWR 2012.079, KWR, Nieuwegein.
- Leunk, I., R. Lafor, and K.J. Raat, 2013. Een nieuw putschakelschema voor de grondwaterwinning van Baanhoek. H2O online, 1. <https://library.kwrwater.nl/publication/51465517/>
- Lieten, S., de Vries, E., van Baaren, E., Bakr, M., Oude Essink, G., Hartog, N., Meinderstma, W., van Nieuwkerk, E., van Oostrom, N., Woning, M., Drijver, B., Krajenbrink, H., Mathijssen,

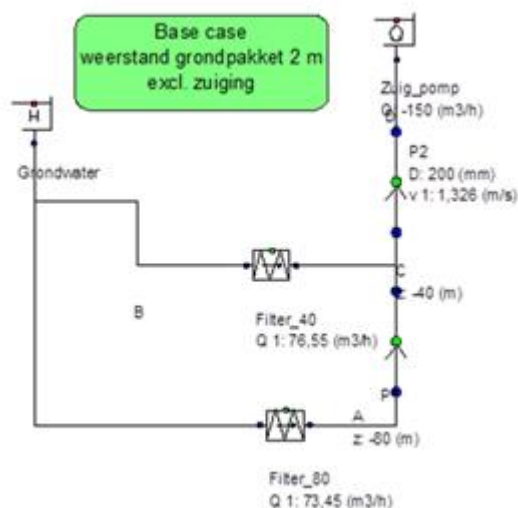
H. en Wennekes, R. (2012) Literatuuronderzoek - Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie. Deelrapport 2 onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie.

- Lopik, J.H. van (2020), PhD-thesis, University of Utrecht
- Mwawasi, Hilary Mwangeka. (2014) FEASIBILITY STUDY OF USING A DOWNHOLE PUMPING SYSTEM IN MENENGAI WELL MW-17 FOR GEOTHERMAL UTILIZATION
- NVOE (2006). NVOE-richtlijnen Ondergrondse Energieopslag. In opdracht van NOVEM.
- Oasen (2006). Voorkomen en verwijderen van putverstopping door deeltjes op de boorgatwand - Richtlijnen voor ontwerp, realisatie, bedrijfsvoering en regeneratie van pompputten. Onderzoek in opdracht van Senter Novem, projectnaam: BTS Project Putverstopping.
- OGP (2010). Regulators' use of standards, International Association of Oil & Gas Producers Report No. 426, March 2010
- Olsthoorn, T.N., 1976. De Sichardt-snelheid en het maximaal toelaatbare debiet van waterwinningsputten. H2O, 9(11): 212-214. <https://edepot.wur.nl/403280>
- Olsthoorn T.N. (1982) The Clogging of Recharge Wells, Main Subjects (In English). Kiwa research communication 72, Rijswijk, The Netherlands 136pp.
- Rambags, F., et al., 2010. HDDW: van concept tot realisatie. BTO 2010.029.
- Robador, A. (2009). Temperature control of bacterial carbon mineralization processes in marine sediments. PhD thesis. Universität Bremen.
- Stichting Beroepsopleidingen Weg- en waterbouw (1997): Boormeester I (diepboringen), theorie. SBW rapport 658, Gouda.
- Snijders, A. (1991). IEA energy storage programme - Annex VI: "Environmental and chemical aspects of ATES and research and development of water treatment methods". Proceedings Thermastock '91, Scheveningen, The Netherlands.
- Snijders, A. (1994). ATES: water treatment and environmental impacts. Proceedings Calorstock '94. Espoo, Finland.
- SodM (2017). Staat van de Sector Geothermie. Staatstoezicht op de Mijnen – Ministerie van Economische Zaken, 12 juli 2017.
- SodM (2019). Kwaliteit put én locatie van belang voor volgende stap in geothermie. Nieuwsbericht 21-01-2019 08:00. <https://www.sodm.nl/actueel/nieuws/2019/01/18/kwaliteit-put-en-locatie-van-belang-voor-volgende-stap-in-geothermie>
- Stuyfzand, P. (2007). Naar een effectievere diagnose, therapie en preventie van chemische put- en drainverstopping. H2O 2007, nr. 8.
- Stuyfzand, P.J. en Raat, K.J., 2010. Benefits and hurdles of using brackish groundwater as a drinking water source in the Netherlands. Hydrogeology Journal (2010) 18: 117-130.
- Stuyfzand, P.J., et al., 2012. Haalbaarheid van ondergrondse berging via A(S/T)R in Holland's kustduinen. KWR 2012.082, KWR, Nieuwegein.
- Spijker, H en P Ungemach (2016), Definition of electrosubmersible pump (ESP) design and selection workflow 29 June
- Taha and M. Amani, "Introduction to Smart Oil and Gas Wells: Drilling, Completion and Monitoring Solutions," International Journal of Petrochemistry and Research, vol. 3, pp. 249-254, 11 02 2019a.
- Timmer, H., Verdel, J. en Jongmans, A. (2000). Verstopping putten door van nature aanwezig materiaal. H2O nr. 20, pag. 24-26.
- Timmer, H., Verdel, J.D. en Jongmans, A.G. (2003). Well clogging by particles in Dutch well fields. J Am Water Works Assoc 95 (8):112–118.

- Van Beek, C. et. Al. (1998). Ontwerp en onderhoud van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen. NOBIS-project 96-3-06.
- Van Beek, K. et al. (2004). Frequent schakelen voorkomt mechanische putverstopping. H2O 37 (2004), nr. 18.
- Van Beek, C., van den Berg, G. en Heslen, P. (2005). Geohydrochemische typologie als hulpmiddel bij grondwaterkwaliteitsbeheer. Bodem nr 5, oktober 2005.
- Van Beek C., R. Breedveld, M. Balemans en G. Doedens (2007). Naar een verstoppingvrij puttenveld Tull en 't Waal (3). Putverstopping en putschakelen. H2O nr. 3, pag. 29-31.
- van Doorn, A., K. Zuurbier, and A. Kronemeijer, 2014. Optimalisatie van putten(velden) met 'MPPWs'. BTO 2014.030, KWR, Nieuwegein.
- Van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A. en P.J. Stuyfzand (2009). Cause and prevention of well bore clogging by particles. Hydrogeology Journal (2009) 17: 1877–1886.
- Van Lopik, J.H., Snoeijers, R., van Dooren, T.C.G.W., Raoof, A., & Schotting, R.J. (2017). The effect of grain size distribution on nonlinear flow behavior in sandy porous media. Transport in Porous Media, 120(1), 37–66.
- Van Lopik, J.H. Design of recharge and abstraction well systems in heterogeneous aquifers. Doctoral thesis, Utrecht University (2020)
- Veldkamp, J.G., Goldberg, T.V., Bressers, P.M.M.C., Wilschut (2015). Corrosion in Dutch geothermal systems. TNO 2015 R10160
- Vermaas, D. (2008). Inventarisatie van mogelijke knelpunten in koude-/warmteopslag. Stageverslag, Witteveen+Bos - Wageningen Universiteit.
- Vonk, E. and M.L. van der Schans, 2019. Well Clogging Analyzer: Beslissingsondersteunende tool voor kwantitatieve analyse van mechanische boorgatwand-putverstopping. BTO 2019.007, KWR, Nieuwegein.
- Witteveen+Bos (2019)(2). Onderzoek (milieu)impact inhibitoren geothermie. Referentie 104867/18-019.751
- Witteveen+Bos (2019)(1). Risico-inventarisatie geothermie – Rapportage. Referentie 113604/19-015.284
- H. Spijker, P Ungemach 29 June 2016, Definition of electrosubmersible pump (ESP) design and selection workflow
- <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/gestaengepumpe.html>
- <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2014-22.pdf>
- <http://geothermal.ro/en/cooperare.html>

Bijlage A. Bronontwerp, olie/gas

Berekening van debietverdeling in ongecontroleerde productie/injectiezones van OBES's



Een eenvoudige situatie met twee identieke filters van 10 m hoog op 80 en 40 m diepte en 1 of 2 m weerstand over het grondpakket geeft de volgende resultaten: verlies in stijgbuis zorgt voor groter drukverschil op bovenste filter.

Tabel 1 – Verschil in debietverdeling voor twee zones van dezelfde hoogte (10 m)

	Filter_40:		Filter_80:
	Debiet	Afwijking gem.	Debiet
2 m peildaling (i.e. weerstand grondpakket)	75,8 m3/h	+1.1%	74,2 m3/h
1 m afpompig	76,6 m3/h	+2.1%	73,4 m3/h
1 m afpompig met zuiging (T-stukken)	77,1 m3/h	+2.8%	72,9 m3/h

Tabel 2 - invloed van weerstand van grondpakket en hoogtes van zones op debietverdeling

		Filter_40:		Filter_80:
		Debiet	Afwijking gem.	Debiet
2 m weerstand van grondpakket	Filter_40 1.5 keer groter:	91,1 m3/h	+1,2%	58,9 m3/h
	Filter_80 1.5 keer groter:	62,3 m3/h	+3,8%	87,7 m3/h
1 m weerstand van grondpakket	Filter_40 1.5 keer groter:	92,2 m3/h	+2,4%	57,8 m3/h

	Filter_80 1.5 keer groter:	64,3 m3/h	+7,2%	85,7 m3/h
--	----------------------------	-----------	-------	-----------

Bijlage B. Algorithms of well optimization in oil & gas wells

The application of computational optimization for reservoir management is gaining a growing interest in recent years. The computational optimization formulation may include variables such as the number and type of wells, well location, well configuration (path and design), production variables, such as well rates, bottom-hole pressure (BHP) and valve settings, and/or economic variables, such as fluid prices and drilling costs. In general, the computational cost of optimization is expensive due to a large amount of flow simulations (Wang, Echeverría-Ciaurri, Durlofsky, & Cominelli, 2012). Moreover, there are several challenges in well optimization problems, such as geological uncertainty.

The optimization problem to formulate the well placement decision includes the objective function, which is evaluated using a reservoir simulator, and evaluates the economics of the project and the parameters to be optimized encoding the positions and trajectories of the well configuration (Bouzarkouna, 2012). If the number of wells to be placed is fixed, the parameters encoding the well positions are real numbers, and the objective function f maps a subset of $\mathbb{R}^n$, where n is the number of parameters that is equal to the sum of the number of parameters needed to encode each well position that needs to be placed. With $\mathbf{p}$ the vector of parameters to be optimized encoding the positions and trajectories of the well configuration, we want to find a vector of parameter $\mathbf{p}_{\max} \in \mathbb{R}^n$ such that:

$$f(\mathbf{p}_{\max}) = \max\{f(\mathbf{p})\} \quad (1)$$

There are several existing optimization algorithms to address the optimization problem formulated in Eq. (1), and they can be divided into four categories:

1. deterministic algorithms,
2. stochastic algorithms,
3. search algorithms using surrogates, and
4. hybrid algorithms

Derivate-based or gradient-based method

The deterministic algorithm includes descent method and trust region method. The deterministic method can converge very fast with high precision when a good initial guess was given. One of the drawbacks of the deterministic method is that it can easily get stuck in the local optimum.

Descent method

The descent method is an iterative method that uses the gradient of the objective function to search for a minimum of a given objective function f . Several approaches of descent method include the steepest descent method, Newton methods – i.e. a second-order approach using a quadratic approximation –, and quasi-Newton method. If the objective function has no explicit formula, the derivatives can be approximated using methods, such as finite difference methods (Bangerth, W., Klie, Wheeler, Stoffa, & Sen, 2006) and adjoint gradient methods (Forouzanfar, Li, & Reynolds, 2010; Sarma & Chen, 2008; Zandvliet, Handels, van Essen, Brouwer, & Jansen, 2008). Several limitations of the adjoint method are the difficulties in implementation and the need to access simulator source code.

Trust region method

The trust region method implements approximation of the objective function f with a quadratic function, which is a reasonable approximation of f in a neighborhood of the current estimate. This neighborhood is called the trust region. One of the most widely used trust-region algorithm based on the interpolation model is the New Unconstrained Optimization Algorithm (NEUWUOA), which is suitable for complex objective function in many nonlinear problems by avoiding the calculation of the first and second derivative (Zhang et al., 2015).

Simultaneous perturbation stochastic algorithm (SPSA)

SPSA is an approximate gradient method. It will therefore typically be used in combination with a steepest decent or trust region method. The SPSA method is a stochastic version of the steepest descent method, where a stochastic vector replaces the vector gradient. To estimate the gradient, the parameters at each iteration are randomly perturbed, and the objective function is evaluated at the perturbed points. This method is highly efficient because the number of function evaluations in each step is independent of the dimension of the search space (Bangerth, W. et al., 2006; Bangerth, Wolfgang, Klie, Matossian, Parashar, & Wheeler, 2005). An alternative to SPSA StoSAG (a modification of an earlier version known as EnOpt). The advantage of StoSAG over SPSA is that it is more easily and efficiently extended to cases with uncertainty, which is always present in subsurface problems. StoSAG has also been applied to well placement and trajectory optimization under uncertainty. Example references include Leeuwenburgh et al. (2010) and Barros et al. (2020).

Derivative-free or gradient-free method

The stochastic method is applied to tackle the limitation of deterministic methods for difficult functions to solve, such as non-smooth and multi-modal objective functions. It requires minimal assumptions on the problem, and this more robust than deterministic methods when dealing with rugged problems (Bouzarkouna, 2012). Several stochastic methods are discussed below.

Evolutionary algorithms (EA)

EA is an optimization technique based on analogies to natural selection and genetics based on a process of survival to the fittest. The modeling involves codifying each possible solution of a problem on a structure denominated chromosome, which is composed of a chain variable denominated genes and represent individuals. The search process starts on an initial population consisting of a collection of individuals to an evolutionary process that occurs in a cycle. The candidate solutions evolve through stages of evaluation, selection, crossover, and mutation until reaching the stopping criteria with a satisfactory solution (Bouzarkouna, 2012; Emerick et al., 2009) EA method has mainly three origins: genetic algorithms (GA), evolutionary programming (RP), and evolution strategies (ES).

- A genetic algorithm is a search algorithm that initially designed to deal with binary-encoded individuals. Several studies discussed the algorithm application for well optimization and handle the uncertainty (Bukhamsin, Farshi, & Aziz, 2010; Emerick et al., 2009; Montes, Bartolome, & Udias, 2001)
- Evolution strategies have the principle of EA, although the method sample new individuals according to a multivariate normal distribution, and use adaptive search. The Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) is one of the ES algorithms where the multivariate normal distribution has a mean by sampling the distribution and continually updated covariance matrix. Several applications and optimization of CMA-ES for well placement are shown in several studies (Bouzarkouna, Ding, & Auger, 2012; Forouzanfar, Poquioma, & Reynolds, 2015).

Simulated annealing (SA)

The SA algorithm models the physical process annealing in metallurgy, a technique of material heating followed by controlled cooling of the material to increase the size of the crystal and reduce defects. The algorithm can avoid being trapped in local minima, thus able to explore globally for more possible solutions at each iteration (Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi, 1983). The application of the SA method was discussed in several studies (Beckner & Song, 1995; Norrena & Deutsch, 2002).

Particle swarm optimization (PSO)

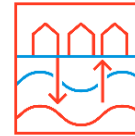
The PSO method is a continuous non-linear function optimizer, with a wide range of developments and applications. It is an iterative population-based algorithm, which was inspired by the movement of swarms of birds or schools of fish searching for food or protection. In PSO, particles can move and update their positions and velocities, influenced by its own experience (its best found locality) and by the experience of others (the best-found locality of all the particles). In contrast to GA, PSO has memory and knowledge of good solutions retained during generations. It has been applied to the well placement problem (Ciaurri, Mukerji, & Durlafsky, 2011; Onwunalu & Durlafsky, 2010), and it has also been combined with search algorithm using algorithms (see hybrid methods).

Search algorithms using surrogates

This method is also known as proxy-modeling or meta-modeling, and it is used to approximate the objective function by an approximate model, also called as surrogate, proxy-model, or meta-model. During the optimization process, the surrogate is constructed and the objective function evaluations are replaced by evaluations on the surrogate (Bouzarkouna et al., 2012). Well-known surrogate models include polynomial response surfaces, kriging (Pan & Horne, 1998), radial basis functions (Farmer, Fowkes, & Gould, 2010), quality maps (Nakajima & Schiozer, 2003), and multiple regression techniques (Aanonsen, Eide, Holden, & Aasen, 1995). The application of proxy-modeling is an efficient approach with a reduced number of reservoir simulation but can become complex with increasing solution space.

Hybrid methods

The hybrid methods refer to a combination of several algorithms (two or more) to take advantage of each algorithm. Several existing studies proposed the hybrid algorithms for well optimization problems by combining stochastic algorithms with search algorithm using surrogates and deterministic approaches, such as GA with polytope algorithm and kriging (Guyaguler & Horne, 2000), GA with neural networks, a hill climber a near-well upscaling (Yeten, Durlafsky, & Aziz, 2003), PSO with Mesh Adaptive Direct Search, or MADS (Isebor, Durlafsky, & Ciaurri, 2014), PSO with quality maps (Ding, Jiang, Li, & Tang, 2014), and PSO with a local generalized pattern search (Humphries, Haynes, & James, 2014).



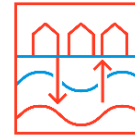
Bijlage C. Considerations for ESP Pump for HTO wells

In this appendix an overview is given of considerations when applying ESP pumps in HTO wells. Points of main concern appear sand production, the chemical composition of the brine leading to corrosion and the possible detrimental effect of cyclic operations on the ESP.

No.	Operating variables	Operating value	Pump consideration	ESP design variable	Design value
1	Temperature	T hot well? Flowing & non-flowing T cold well? Flowing & non-flowing Temperature change with time (thermal load)? Correlate with point 6. <i>Remarks:</i> From 25-90° C Flowing temperature of warm wells can be 60 C and non-flowing temperature 80 C	ESP pump has Tmax 150° C (standard) & 218° C (Lobianco & Wardani, 2010) Effect of thermal load on ESP needs investigation (e.g. thermal shock, change in cooling fluid viscosity affects the thrust bearing (Takács, 2013) Options of design: <u>Sensor transmission</u>: standard sensor <150° C, and fiber optic <300° C (Lobianco & Wardani, 2010) <u>Motor</u>: high voltage rating to increase the cable life bcs the operating temperature of cable reduced (Takács, 2013) <u>Motor</u>: max. allowable motor winding temperature < downhole temperature (Droessler, Curkan, & Hamilton, 2016) <u>Seal</u>: bag elastomer but susceptible to high T and H₂S, or metal bellow that more resistant to high T and chemical attack (Lobianco & Wardani, 2010) <u>Power cable materials</u> (Takács, 2013), or see Table 1:	Power cable (e.g. insulator, conductor, jackets, armor, and size) Cooling fluid Seal/protector types Motor design Electrical system of downhole sensor	



			Conductor typically copper Insulator: polypropylene <205 F (but susceptible to CO₂ & H₂S), or EPDM < 400 F Jackets: nitrile (low T), or EPDM < 400 F Aarmor: galvanized steel, stainless steel 314, or Monel		
2	Production rate (correlate with pressure point 3)	Maximum and minimum flow rate in each cold & warm well? Change in flow rate over years? Drawdown? <i>Remarks:</i> Production rate and downhole pressure (point 3) will be used to calculate <u>dynamic head</u> and <u>number of stages</u>. The design has to compromise with efficiency and power	Pumped flow rate consideration: Typical oil ESP flow rate is up to 45,000 bbl/day or 7,152 m³/day (Guo, Liu, & Tan, 2017; Lobianco & Wardani, 2010). Schlumberger geothermal pump portfolio can produce up to 14,000 m³/day (Lobianco & Wardani, 2010) Frequent change the flow rate can use VSD. If the range of flow rate is high use wide-range pump (e.g. FLEXPumpER, MVPER) Dynamic head consideration: Maximum depth of typical oil ESP is up to 12,000 ft or 3,650 m (Guo et al., 2017) The deeper the dynamic head, the higher voltage drop in cable.	Dynamic head Pump and motor selection Variable speed drive (extra cost) Cable design	
3	Downhole pressure	Normal pressure gradient? Overpressure? Pressure variation with time? Hence, change in flow rate			
4	Produced fluid characteristic	Salinity? Salt deposition?	Scale inhibitors requirement? For abrasive fluids:	Maintenance	Cable:



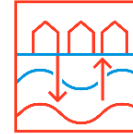
		pH? Sand production? Abrasive-ness? Scaling? Viscosity? Function of P&T Gas production? No gas is produced because pressure is above gas bubble point H₂S? <i>Remarks:</i> Fluid is highly saline, and hence corrosive. But, it depends if O₂ enters the well or high water temperature. O₂ entering the well might be of less concern in production wells. Particles from aquifer or carbonate precipitation, and hence clogging, erosion, and scaling	If fluid is used for cooling well, max. velocity to prevent erosion is required Max. velocity through stages Metallurgy options for corrosive and scaling: <u>Housing:</u> 9Cr-1Mo with head and base made of 316 stainless steel or 22Cr duplex stainless steel for corrosive (Lobianco & Wardani, 2010) <u>Housing:</u> Red-alloy (chrome) material for high salinity (Brahmi, 2016) <u>Pump stages:</u> Standard Ni Resist or 5530 material (Lobianco & Wardani, 2010) <u>Impellers:</u> thermoplastic component, such as Ryton, a polyphenylene sulfide (Shimokata & Yamada, 2010) <u>Cable:</u> Monel as armor for high salinity (Brahmi, 2016) <u>Cable & motor housing coating:</u> glass, polymers (e.g. polytetra fluoroethylene), modified ceramics, or titanium dioxide with EDTMPA, which is incorporated into epoxy resin (Heath, Bin Ruslan, McKay, & Ishkov, 2018) <u>Seal:</u> bag elastomer but susceptible to high T and H₂S, or metal bellow that more resistant to high T and chemical attack (Lobianco & Wardani, 2010) Metallurgy options for abrasive fluid:	Power cable (e.g. insulator, conductor, jackets, armor, and size) Gas separator Sand separator Motor and housing Pump (impeller, diffuser, bearings, cooling fluid) Injection lines	
--	--	--	---	---	--



			<u>Axial & radial bearing</u>: tungsten carbide, ceramics, zirconia, and silicon carbide <u>Radial bearing</u>: rubber in journal bearing (King, Traylor, & Stewart, 1983) Sand separator can be installed if there's high amount dissolved solid (Medina et al., 2017) ESP has no problem with low-viscous fluid.		
5	Fluid treatment	pH treatment? Inhibitors	Submersible pump had issues with the cables: rubber was affected by the HCL-water treatment (GEOTHERMICA, 2019)	Power cable	
6	Cyclic operational	Cold well operational production time? Per 6 months Hot well operational production time? Per 6 months	Leaving pump at downhole during injection operation. Review the injected fluid characteristic based on <u>surface water treatment</u> (e.g. housing coating). Solid particles accumulation at the annulus between tubing & casing when not producing (sand fallback). System startup on sand-accumulated pump should be specially conducted. Use "sacrificial" pump (Takács, 2018b). See remarks. Injection operation may lead water enter tubing and turns the pump & motor in wrong direction. Check valve? See remarks	Coating on housing and cables Pump rating Sand separator?	



			Start-up ESP requires extremely high currents & very detrimental to longevity ESP pumps. VSD can be used for “soft start” (Takács, 2018a) When shut-off the pump experience high load from downhole (maximum head). This defines the type of pump. Remarks: The sand accumulation and reverse flow may not be relevant because HTO well doesn't use tubing.		
7	Well design (differ between warm & cold wells)	Casing design? No tubing. Casing pipe material? Casing size? Gravel pack design? If there's loose sand Deviation?	For sand production from gravel pack, go to point 4. The size of ESP equipment depends on borehole size	ESP unit size	
8	Area size & surface facilities	Surface space availability Power availability & reliability	ESP pump doesn't require large space at the surface ESP pump requires reliable source of electric power of high voltage		
9	Aquifer characteristic	Sedimentary unconsolidated aquifers? Fine or coarse sand	For solid production, go to point 4.		



CONDUCTOR	SOLID	COMPACTED STRAND	STRANDED		
INSULATION	POLYPROPYLENE COPOLYMER	EPDM RUBBER			
BARRIER	TEDLAR TAPE	SOLEF EXTRUSION	FEP EXTRUSION	PROPRIETARY TAPE	LEAD
JACKET	LOW TEMPERATURE NITRILE	NITRILE	HIGH TEMPERATURE NITRILE	EPDM	
ARMOR	.025" GSA	DOUBLE ARMOR	.034" GSA	STAINLESS STEEL	MONEL

Figure 3. Cable material as a function of temperature, i.e. more resistant materials are to the right (Lobianco & Wardani, 2010)