

COASTAR

Cities2Recharge. Monitoringsparameters
diepinfiltratiesystemen



COASTAR Cities2Recharge. Monitoringsparameters voor functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving

KWR 2020.158 | September 2020

Opdrachtnummer

402722

Projectmanager

Ir. J.W. (Jan Willem) Kooiman (KWR)

Opdrachtgever

Gemeente Rotterdam, Gemeente Maassluis, Hoogheemraadschap van Delfland, Evides, MOS Grondwatertechniek, TKI Watertechnologie, TKI Deltatechnologie, en overige partners in kennisprogramma COASTAR

Auteur(s)

T.C.G.W. (Teun) van Dooren MSc, dr. K.G. (Koen) Zuurbier (KWR)

Kwaliteitsborger(s)

dr. N (Niels) Hartog (KWR)

Verzonden naar

Projectpartners TKI COASTAR

Status

Dit document is openbaar en is uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend. Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

JAAR VAN PUBLICATIE
2020

MEER INFORMATIE
E info@coastar.nl
I www.coastar.nl



COASTAR is een initiatief van Allied Waters, Arcadis, Deltares en KWR en wordt ondersteund door en uitgevoerd met bedrijfsleven en overheden in laag Nederland. www.coastar.nl

© Allied Waters, Arcadis, Deltares, KWR

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

Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding en doel	4
1.2	Onderzoeksvragen	5
1.3	Fase 1: Vaststellen relevante parameters	5
1.4	Kennisprogramma COASTAR	6
2	Infiltratie	7
2.1	Doorlatend vermogen (kD-waarde)	7
2.2	Infiltratiedruk	8
2.3	Q- Δh relatie en infiltratieweerstand	10
3	Putverstopping	11
3.1	Fysische verstopping	12
3.2	Biologische verstopping	13
3.3	Chemische verstopping	14
3.4	Mechanische verstopping	15
3.5	Infiltratieweerstand en verstoppingsgraad	15
4	Gewenste metingen vóór infiltratie	17
4.1	Doorlatend vermogen (kD-waarde)	17
4.2	Oorspronkelijke infiltratieweerstand	17
4.3	Samenstelling grondwater en infiltratiewater	17
5	Gewenste monitoring tijdens infiltratie	18
5.1	Infiltratieweerstand	18
5.2	Verklaren van (verstoppings)processen	20
6	Conclusies	23
7	Referenties	24

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Wereldwijd staan zoetwatervoorraden onder druk door een steeds hogere vraag naar zoetwater en afnemende waterbeschikbaarheid. In kustgebieden wordt deze druk vergroot door verzilting, onder andere door zeespiegelstijging. Met het tot stand brengen van grondwateraanvulling kan verzilting worden tegengegaan en zelfs een zoetwatervoorraad worden opgebouwd.

Door klimaatverandering neemt daarnaast de kans op wateroverlast door hevige neerslag, hitte, droogte en overstromingen toe. Dat levert in onze steden risico's op voor onze economie, veiligheid en gezondheid. Er kan schade optreden aan gebouwen en infrastructuur door bijvoorbeeld wateroverlast, maar ook door lage grondwaterstanden als gevolg van langdurige droogte. Ook verzilting van het grondwatersysteem vormt een bedreiging. Het hemelwateroverschot wordt nu zo snel mogelijk de stad uitgevoerd en via rivieren naar zee getransporteerd. Dit overtollige water draagt daardoor niet bij aan het voorkomen van tekorten. Door een toename in verstedelijking en buienintensiteit hebben steden en waterschappen behoefte aan extra, lokale afvoermogelijkheden om zo hoge kosten voor vergroting van de afvoer te voorkomen.

In het kennisprogramma COASTAR (www.coastar.nl) worden duurzame oplossingen ontwikkeld voor de knelpunten in waterbeheer en watervoorziening in kustgebieden. De COASTAR casus Cities2Recharge richt zich op het afvoeren van wateroverschotten in de stad naar de diepere ondergrond met infiltratieputten om zo aanvulling van het grondwater tot stand te brengen en extra afvoermogelijkheden te creëren. Met zo'n infiltratiesysteem kan het geïnfiltreerde water eventueel later omhoog worden gepompt om nuttig te gebruiken. Wel is een filterende voorziening noodzakelijk die het relatief schone hemelwater filtert en ontdoet van vaste stoffen, zodat de infiltratievoorziening niet verstopt kan raken. Voor stedelijke toepassing is al een project gerealiseerd bij het Sparta stadion in Rotterdam (Urban Waterbuffer).

Om de toepassing van meer infiltratiesystemen te faciliteren is zorgvuldig beheer van belang. Het specifieke doel van Cities2Recharge in het TKI-project COASTAR is om dit met meet- en regelapparatuur te faciliteren. Dit is een aspect dat in eerdere onderzoeksprojecten (zoals Urban Waterbuffer) nog niet naar voren is gekomen; voorgaande projecten richtten zich vooral op het ontwerp en de validatie van het stedelijke infiltratieconcepten, niet op het beheer.

De te ontwikkelen meet- en regelapparatuur en de kennis daaromheen zullen zich goed lenen als exportproduct richting de (vele) steden die te maken hebben met wateroverlast door regenval of juist met een overmatig gebruik van grondwater en de daarop volgende problemen zoals verzilting en bodemdaling. Voorbeelden zijn Mexico-Stad en kuststeden zoals Jakarta. Met deze laatste stad heeft Rotterdam ook een samenwerkingsverband op het vlak van stedelijk water.

1.2 Onderzoeksvragen

In de COASTAR case Cities2Recharge wordt onderzocht hoe de infiltratie van overtollig stedelijk hemelwater richting het eerste watervoerende pakket gefaciliteerd kan worden met een slim beheerssysteem. Dit onderzoek sluit nauw aan bij diverse initiatieven voor aanleg van infiltratiesystemen in de gemeenten Rotterdam en Maassluis. Om toepassing van infiltratie in stedelijk gebied ook op grote schaal succesvol te laten zijn en blijven, is inzicht in de prestaties vereist. Dit onderzoek richt zich daarom specifiek op het monitoren en beheren van infiltratiesystemen. Voor de terugwinning van het opgeslagen water kan aanvullende monitoring of beheer gewenst zijn.

1.2.1 Hoofdvragen

- Blijven de voorzieningen het water goed infiltreren zodat
 - o Voldoende zoetwater richting het grondwatersysteem stroomt
 - o De afvoer van water plaatsvindt en overlast/overstort wordt voorkomen?
- Kunnen we dat zo efficiënt mogelijk monitoren en mogelijk zelfs sturen (op afstand) zodat beheerskosten beperkt worden?

1.2.2 Deelvragen

De techniekontwikkeling is gefaseerd opgezet met vijf specifieke deelvragen:

1. Welke parameters moeten minimaal gemeten worden om functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving voldoende te monitoren
2. Welke sensoren zijn hiervoor beschikbaar? Hoe breng je dit samen in 1 systeem?
3. Op welke drempelwaarden moet worden gestuurd?
4. Hoofdactiviteit: hoe goed functioneert het systeem (de betaversie) in de praktijk? Valideren van het te realiseren generieke monitoringssysteem bij verschillende technische varianten voor verzameling en voorzuivering hemelwater
5. Hoe verwerken we de uitkomsten van de validatie naar een definitief systeem?

1.3 Fase 1: Vaststellen relevante parameters

In deze rapportage is deelvraag 1 uitgewerkt. Op basis van literatuur zijn de belangrijkste parameters gekozen om te meten. Hierbij is voornamelijk gekeken naar gewenste parameters om tot analyse van de prestatie van de infiltratiemiddelen te komen. Ook wordt beschreven welke verstoppingsmechanismen te verwachten zijn en wat hun typische verloop is.

De informatie die is verzameld voor dit rapport betreft met name gegevens die zijn verzameld bij infiltratieputten die in gebruik zijn genomen door drinkwaterbedrijven. Dit zijn relatief grote systemen (>250.000 m³/jaar) waaraan veel gemonitord wordt en moet worden, en waar een relatief groot budget voor beschikbaar is. Deze informatie is in dit rapport vertaald naar de relatief kleinschalige infiltratiesystemen (tot ca. 20.000 m³/jaar) die worden beoogd in stedelijk gebied, en welke vaak gemoeid zullen zijn met kleinere budgetten. De afwegingen voor de gewenste monitoring zullen hier sterk van afhankelijk zijn.

1.4 Kennisprogramma COASTAR

Dit onderzoek is onderdeel van het kennisprogramma COASTAR “Zout op afstand, zoet op voorraad. Grootschalige zoetwatervoorziening door slim gebruik van de ondergrond.” Het kennisprogramma wordt uitgevoerd door kennisinstellingen Deltares en KWR en adviesbureau Arcadis, in samenwerking met het bedrijfsleven en overheden in Zuid-Holland.

COASTAR richt zich op grootschalige zoetwatervoorziening door slim gebruik van de ondergrond. Zoetwateropslag in de ondergrond overbruggt het verschil in tijd en ruimte tussen watervraag en wateraanbod. Tegelijkertijd bestrijdt COASTAR de toenemende verzilting door brak grondwater af te vangen en in te zetten voor de productie van zoetwater. Partners in Zuid-Holland ontwikkelen samen COASTAR-oplossingen, van idee naar pilots naar toepassingen. Watergebruikers, waterbeheerders, drinkwaterproducenten, bedrijfsleven, overheid en kennisinstituten hebben hun krachten gebundeld om zoetwaterschaarste, wateroverlast en verzilting aan te pakken.

Het idee voor COASTAR ontstond in 2016. In 2017 en 2018 is de technische haalbaarheid verkend en nu werken we toe naar de start van praktijktesten in 2021. Op vier locaties in Zuid-Holland worden COASTAR-maatregelen verder uitgewerkt – technisch, hydrologisch, beleidsmatig en economisch. Het kennisprogramma ondersteunt het Deltaprogramma Zoetwater door het ontwikkelen van concrete maatregelen voor het veiligstellen van de zoetwatervoorziening in laag-Nederland. Het kennisprogramma COASTAR wordt mede ondersteund door de Topsector Water & Maritiem. Voorliggend onderzoek maakt onderdeel uit van het COASTAR onderzoek ‘Cities2Recharge’.

2 Infiltratie

Binnen COASTAR wordt mede gestuurd op het kunnen voorkomen van wateroverlast in de steden door water via putten naar de ondergrond te infiltreren. Om wateroverlast te voorkomen aan het aardoppervlak, is een bepaald infiltratiedebiet benodigd. Het infiltratiedebiet moet kunnen variëren met de tijd om te kunnen inspelen op verschillende intensiteiten van wateroverlast.

Er zijn verschillende formules om het infiltratiedebiet van een put te berekenen. In dit onderzoek zal enkel het stationaire debiet voor infiltratie naar een watervoerend zandpakket tussen twee afsluitende kleilagen (een gespannen watervoerende pakket) worden toegelicht. In Cities2Recharge zal water namelijk naar een gespannen watervoerend pakket worden geïnfiltreerd. Verruijt (1970) stelt dat voor die situatie het stationaire debiet (Q_0 in m^3/dag) berekend kan worden met vergelijking 1:

$$Q_0 = 2\pi kD \frac{h_{put} - h_{gw}}{\ln\left(\frac{R}{r_{bg}}\right)} \quad (1)$$

kD = doorlaatvermogen van het watervoerend pakket [m^2/dag]

h_{put} = stijghoogte van het water in de infiltratieput [m]

h_{gw} = stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket [m]

R = afstand van de put tot een vaste rand (of tot aan het punt waar de put geen invloed meer heeft) [m]

r_{bg} = straal van de boorgatwand van de put [m]

De belangrijkste factoren die invloed hebben op het infiltratiedebiet zijn het doorlatend vermogen van het watervoerende pakket (kD) en de infiltratiedruk ($h_{put} - h_{gw}$). Het infiltratiedebiet neemt lineair toe als een van deze parameters toeneemt. Hierbij wordt aangenomen dat er geen weerstand bestaat tussen het putfilter en de formatie. Correcties hiervoor kunnen met de zogenaamde skin-factor worden doorgevoerd (Earlougher, 1977; Kroening et al., 1996; Kasenow, 2006).

2.1 Doorlatend vermogen (kD-waarde)

Uit formule 1 blijkt dat de eigenschappen van het watervoerend pakket, zoals de hydraulische doorlatendheid [k in m/dag] en de dikte [D in m], mede bepalend zijn voor het debiet van een infiltratieput. Deze primaire doorlatendheid van het watervoerend pakket wordt onder andere bepaald door de permeabiliteit van het sediment, welke afhankelijk is van de lithologische samenstelling en structuur van het sediment. Daarnaast zijn ook de temperatuur en viscositeit van het infiltratiewater van belang (Van Beek et al., 1996). In Tabel 1 zijn enkele indicatieve waarden voor de doorlatendheid van verschillende ongeconsolideerde sedimenten weergegeven. Hoe hoger het doorlatend vermogen kD , des te groter de infiltratiecapaciteit (vergelijking 1). Daarom wordt een infiltratieput vrijwel altijd in grover sediment geplaatst (Tabel 1). Het doorlatend vermogen neemt af zodra er een vorm van verstopping optreedt in het poreuze medium (hoofdstuk 3).

Tabel 1: Indicatieve doorlatendheden van ongeconsolideerde sedimenten (Van Beek et al., 1996).

Ongeconsolideerd sediment	k (m/dag)
klei	< 0,01
fijn zand	1 – 10
middelgrof zand	10 – 50
grof zand	50 – 100
Grind	> 100

2.2 Infiltratiedruk

Naast de hydraulische weerstand van de ondergrond heeft de infiltratiedruk invloed op het infiltratiedebiet. De infiltratiedruk (Δh in m) wordt in deze studie gedefinieerd als het stijghoogteverschil tussen de put en het lokale grondwater (vergelijking 2):

$$\Delta h = h_{put} - h_{gw} \quad (2)$$

De stijghoogte in een infiltratieput wordt bijvoorbeeld geregeld met een voordrukbus, een verticale kolom met water die via leidingwerk is verbonden met de infiltratieput (Figuur 1, boven). Maar wanneer de stijghoogte van het grondwater laag genoeg is, bijvoorbeeld op hoge zandgronden, kan ook zonder een voordrukbus worden geïnfiltreerd (Figuur 1, onder). Het waterniveau in de voordrukbus kan men sturen zodat het stijghoogteverschil tussen de put en het lokale grondwater, en dus de infiltratiedruk, voldoende is om een benodigd of gewenst infiltratiedebiet te hanteren. Let wel, de stijghoogte in een voordrukbus is door drukverliezen in het leidingwerk niet altijd gelijk aan de stijghoogte in de aangesloten infiltratieput. Wel geldt: hoe hoger de voordruk, hoe hoger het infiltratiedebiet (Q_0 in m³/dag) (vergelijking 1). Directe infiltratie van water vanaf een pomp is mogelijk, maar vereist technische aanpassingen om te voorkomen dat luchtballen meekomen het infiltratiewater en tot blokkade van poriën rond de bron leiden. Ook dient hierbij de voordruk strak gereguleerd te worden, zodat er niet meer druk op de bron wordt gezet dan veilig wordt geacht m.b.t. het risico voor optreden van opbarsting.

2.2.1 Minimale en maximale infiltratiedruk

Bretveld en Willemsen (2004) stellen dat het handhaven van een minimale druk in het leidingsysteem essentieel is voor het langdurig goed functioneren van een infiltratiesysteem. De infiltratiedruk heeft bijvoorbeeld invloed op het ontstaan van gasbellen, welke tot verstopping kunnen leiden (zie sectie 3.4). Voor infiltratiesystemen die gebruik maken van hemelwater is dit echter van minder belang, aangezien het water van atmosferische druk komt en onder hogere druk zal worden geïnfiltreerd.

Een maximale infiltratiedruk moet worden vastgesteld bij het realiseren van een infiltratiesysteem om te voorkomen dat opbarsting optreedt en het infiltratiewater naar het maaiveld doorslaat (Van Beek et al., 1996). De kritische parameters voor de infiltratiedruk in ongeconsolideerde zanden en kleien zijn de grondspanning en de waterspanning (Olsthoorn, 1982). Op basis hiervan kan de niet te overschrijden infiltratiedruk als volgt uitgedrukt worden (vergelijking 3):

$$\Delta h \leq \lambda \frac{\sigma_{kv}}{\rho g} \quad (3)$$

λ = constante afhankelijk van minimale en maximale korrelspanning (zand: 0,22 en klei: 0,33) [-].

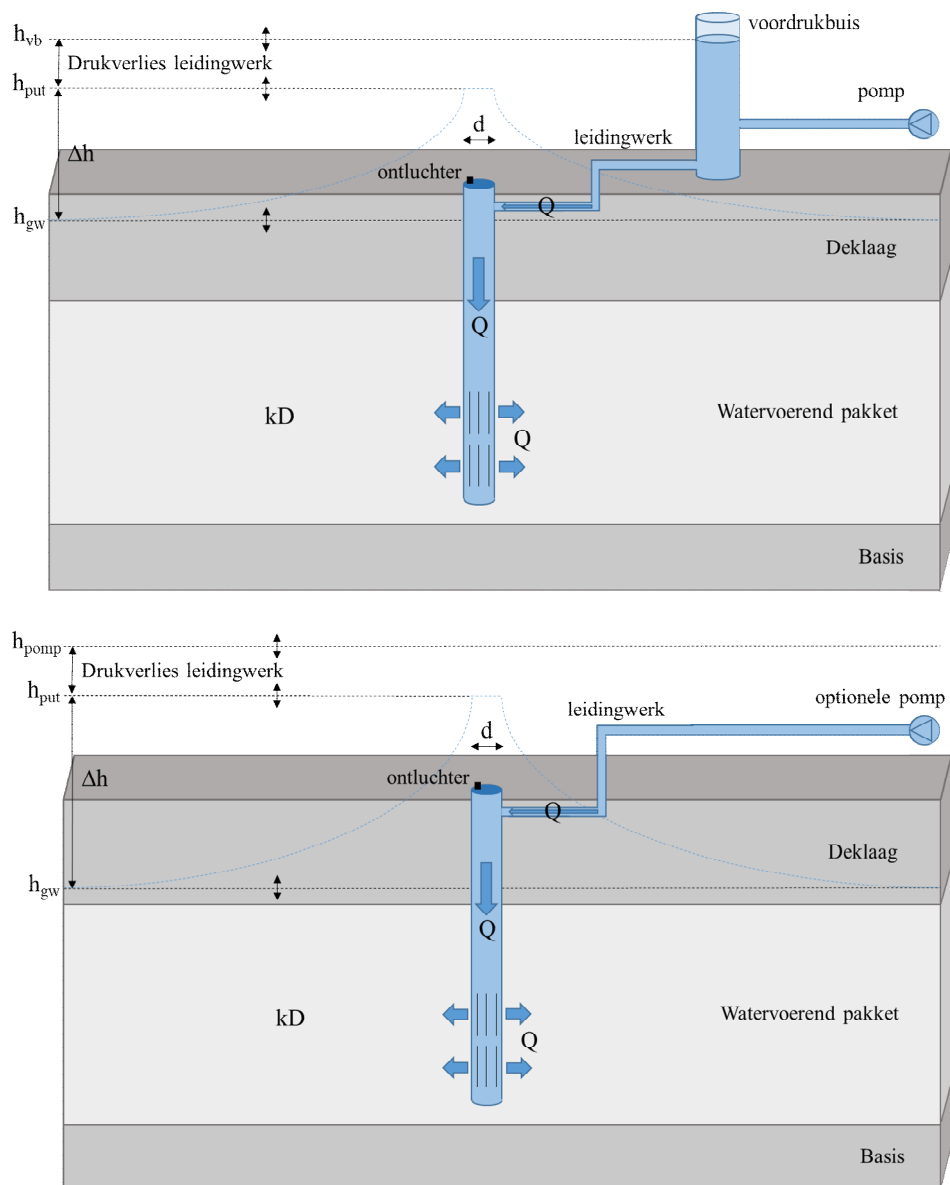
σ_{kv} = verticale korrelspanning [kg/m/s^2]
 ρ = dichtheid van infiltratiewater [kg/m^3]
 g = zwaartekrachtversnelling [m/s^2]

De maximale infiltratiestijgheight t.o.v. het maaiveld voor ongeconsolideerd zand (met een dichtheid van circa 2.000 kg/m^3) kan met de volgende vuistregel (vergelijking 4) bepaald worden (Olsthoorn, 1982):

$$h_{put} - z_{mv} = 0,22 * z_{krit} \quad (4)$$

z_{mv} = hoogte van het maaiveld [m]

z_{krit} = diepte van het meest kritische punt onder maaiveld (zoals de bovenzijde van de putomstorting of de onderzijde van een afdekkende slecht doorlatende laag) [m].



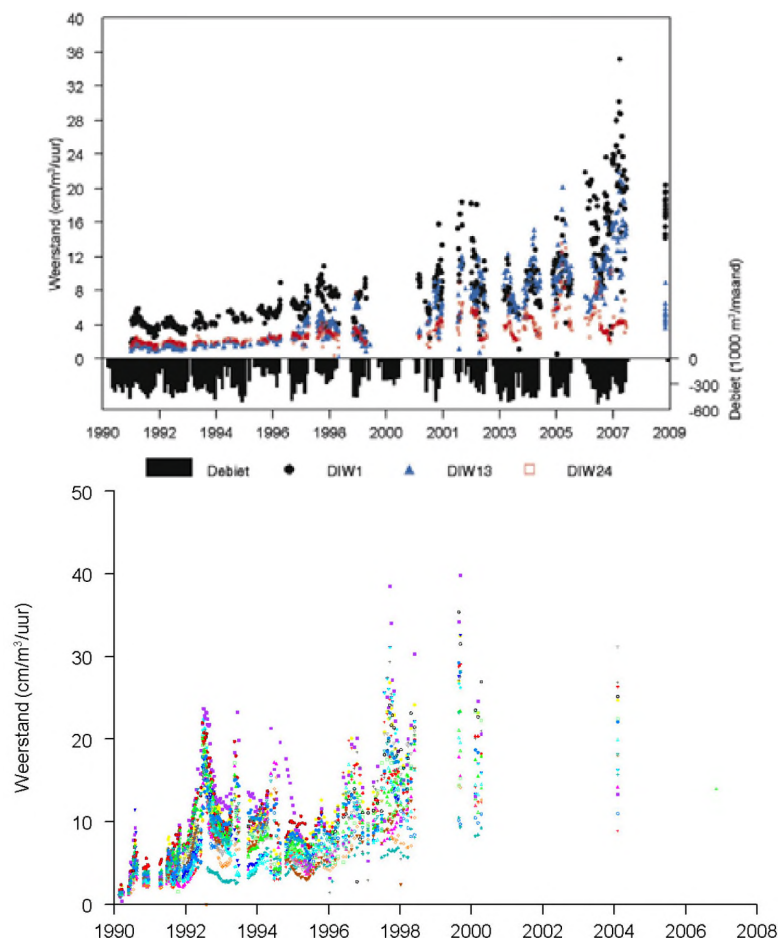
Figuur 1: Illustratie van een typische opstelling van een infiltratieput met voordrukbuis (boven) en zonder voordrukbuis (en met optionele pomp) (onder).

2.3 Q-Δh relatie en infiltratieweerstand

De relatie tussen het infiltratiedebiet (Q in m^3/uur) en de infiltratiedruk (Δh in cm) is wat gebruikt kan worden om de prestatie van een infiltratieput te bepalen. Deze relatie wordt vanaf nu de Q - Δh relatie genoemd, en kan voor verschillende putten of verschillende tijdstippen worden bepaald. Om ook rekening te houden met viscositeitseffecten, moet gecorrigeerd worden voor temperatuur. Water heeft bij lagere temperaturen namelijk een hogere viscositeit, wat resulteert in een lagere Q - Δh ratio t.o.v. water met hogere temperaturen. Het is om die reden ook verstandig een infiltratiesysteem te berekenen en dimensioneren op de winterse capaciteit (Martin, 2013).

De infiltratieweerstand ($\text{cm}/\text{m}^3/\text{uur}$) drukt de Q - Δh relatie uit met de temperatuur als extra variabele (T in $^{\circ}\text{C}$) (vergelijking 5; naar Olsthoorn (1982), Peters et al. (1989) en Bonte (2009)). Omdat de doorlatendheid van het watervoerend pakket zonder interferentie als constant kan worden beschouwd, is de (verandering van de) infiltratieweerstand een maat voor de verstopping van de put of de boorgatwand (zie hoofdstuk 3) en dus van de prestatie van de put.. Door de infiltratieweerstand met de tijd te meten, kan men dus de prestatie van de infiltratieput monitoren (Figuur 2).

$$\text{Infiltratieweerstand} = \frac{(\Delta h)}{Q} * \frac{T+20}{30} \quad (5)$$



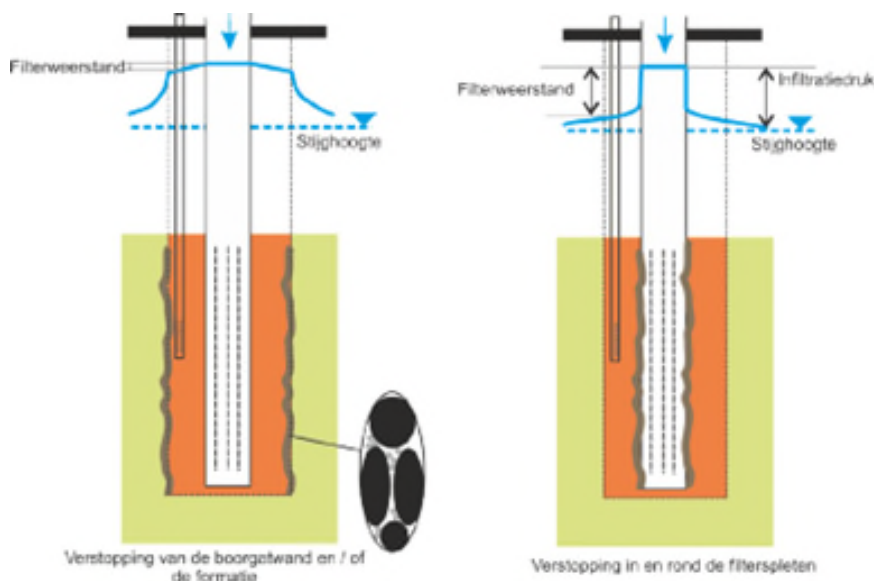
Figuur 2: Voorbeeld: ontwikkeling van de infiltratieweerstand voor verschillende infiltratieputten van Dunea (Boven: DIW1, DIW3, en DIW24) en van PWN (Onder) (Bonte, 2009).

3 Putverstopping

Het optreden van verstopping, gedefinieerd als de nadelige afname van permeabiliteit in poreuze media, is een belangrijke technische uitdaging bij het realiseren van een ondergronds waterbergingssysteem, ook wel een 'managed aquifer recharge' systeem of kortweg MAR-systeem genoemd (Mays, 2013). Voor ieder soort MAR-systeem wordt de infiltratiecapaciteit, en dus de prestatie, namelijk grotendeels beperkt door verstopping, wat door de individuele of gezamenlijke bijdrage van verscheidende fysische, chemische, en biologische processen kan worden veroorzaakt (Hutchinson et al., 2013).

Bij infiltratiesystemen worden grote volumes (doorgaans 10-100 m³/uur) via het filter van een infiltratieput naar een watervoerend pakket geleid. Achtereenvolgens worden filterspleten, een omstorting, en een boorgatwand gepasseerd. Zowel rond het putfilter als de boorgatwand kan verstopping van het poreuze medium plaatsvinden (Figuur 3).

Wanneer een infiltratieput verstopt, neemt de infiltratieweerstand toe, en zal de capaciteit van de bron afnemen. Daardoor kan een kleiner volume per tijdseenheid de bodem in worden gebracht bij eenzelfde infiltratiedruk, of is juist een hogere infiltratiedruk benodigd om hetzelfde volume te kunnen blijven verpompen. Verstopping zorgt dus voor een afname in de prestatie en efficiëntie van diepinfiltratiesystemen, een hoger energieverbruik, meer onderhoud, en hogere kosten (De La Loma Gonzalez, 2013). Het kan tevens zorgen voor opbarsting van de bodem als door verstopping de maximaal toelaatbare infiltratiedruk wordt overschreden als een continu debiet moet worden gehanteerd (Vries et al., 2017). Verstopping is daardoor de belangrijkste factor voor het verlaten en vervangen van infiltratieputten (Houben en Treskatis, 2007).



Figuur 3: Verstopping van de boorgatwand (links) en van het filter van een infiltratieput (rechts) (Vries et al., 2017).

3.1 Fysische verstopping

Fysische putverstopping kan opgedeeld worden in twee processen:

- Colloïdale verstopping: ophoping van (an)organisch zwevend stof, met name op de boorgatwand;
- Opzwellen van kleien tijdens infiltratie van zoet water in brakke of zoute grondwaterpakketten, gevolgd door dispersie van de kleien en de invang in kleine poriën;

Beide processen leiden tot een reductie of verkleining van de beschikbare poriën voor infiltratie, waardoor de infiltratieweerstand toeneemt.

3.1.1 Colloïdale verstopping

Anorganische of organische deeltjes die aanwezig zijn in infiltratiewater kunnen colloïdale verstopping veroorzaken doordat ze niet (volledig) de poriën van een poreus medium kunnen passeren, en daardoor een ophoping vormen. Als gevolg daarvan reduceert de hoeveelheid beschikbare poriën en dus de doorlatendheid van het poreuze medium.

Om de fysische verstoppingspotentie van infiltratiewater als gevolg van colloïdale verstopping te bepalen en de verstoppingssnelheid te voorspellen, wordt doorgaans de 'membrane filtration index' (MFI) van infiltratiewater gemonitord (Olsthoorn, 1982). Aangenomen wordt dat bij een **MFI** waarde beneden de **3 s/L²** onopgeloste deeltjes niet voor verstopping zorgen (Hijnen et al., 1998). De fysische verstoppingspotentie kan ook uitgedrukt worden met de maximaal toegestane concentratie zwevend stof (**TSS** < **0,1 mg/L**) of de maximale troebelingsgraad (< **1 NTU**) van infiltratiewater. De snelheid van colloïdale verstopping neemt kwadratisch toe met het debiet (Van Beek et al., 1996). Om het risico van verstopping dus nog verder te beperken, dient een maximale stroomsnelheid van **1,0 m/uur** van infiltratiewater op de overgang tussen omstorting en boorgatwand te worden gehanteerd (Haak, 1990).

3.1.2 Verstopping door kleizwelling en kleidispersie

De overige twee processen (kleizwelling en kleidispersie) kunnen plaatsvinden wanneer de chemische samenstelling van het infiltratiewater verschilt van het in-situ grondwater. Het evenwicht in de ondergrond kan daardoor worden verstoord. Vooral kleimineralen zijn gevoelig voor de uitwisseling van kationen (Van Beek et al., 1996):



Eenwaardige kationen (zoals natrium) worden minder sterk geadsorbeerd aan kleien dan meerwaardige kationen (zoals calcium). Wanneer er een hoge verhouding tussen geadsorbeerde eenwaardige kationen en geadsorbeerde meerwaardige kationen heerst, ontstaat een uitgestrekte dubbellaag van kationen op de kleimineralen. Als gevolg daarvan neemt de samenhang tussen verschillende kleimineralen af, zwellen de kleien op (kleizwelling), en kunnen deze los van elkaar raken (kleidispersie). Kleizwelling reduceert de poriëngrootte van het poreuze medium en kleidispersie zorgt voor verstopping van die poriën (Brown & Silvey, 1973; Van Beek et al., 1996; Konikow et al., 2001). Beide processen treden met name op bij lage ionsterkte van grondwater, zoals wanneer zoet water in een brak of zout watervoerend pakket wordt geïnfiltreerd, of wanneer onthard water in een watervoerend pakket met hoge concentraties Ca en Mg wordt geïnfiltreerd (Van Beek et al., 1996).

De verstoppingsrisico's door kleizwelling en -dispersie kunnen met de 'exchangeable sodium percentage' (ESP) worden voorspeld als grondmonsters beschikbaar zijn (Van Beek et al., 1996):

$$ESP = \frac{Na^+}{Na^+ + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}} * 100 \quad (7)$$

De gehalten van de kationen zijn uitgedrukt in mmol/kg droge stof, en ESP in %.

Indien enkel analyses van het oorspronkelijke grondwater bekend zijn, kan ESP worden geschat met SAR, de 'sodium adsorption ratio', welke wordt uitgedrukt als (Bolt en Bruggenwert, 1978):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}/2} \quad (8)$$

$$ESP = \frac{1.5SAR}{1 + 0.015SAR} \quad (9)$$

De gehalten van de kationen zijn hierbij uitgedrukt in meq/L.

Frenkel et al. (1978) en Pupisky en Shainberg (1979) stellen dat kleizwelling en kleidispersie op kunnen treden wanneer **ESP** hoger is dan respectievelijk 25% en **10%**, en het totaalgehalte aan ionen in het infiltratiewaer lager is dan **10 meq/L** (Van Beek et al., 1996). Volgens Vries et al. (2017) mag het infiltratiewater bij een elektrische geleidbaarheid (EGV) van **40-100 mS/m** een **SAR**-waarde hebben van maximaal **6** om putverstopping te voorkomen.

3.2 Biologische verstopping

Onder biologische putverstopping wordt de groei en accumulatie van biomassa op het putfilter of op de boorgatwand verstaan. Microbiële groei wordt gezien als een belangrijke oorzaak van verstopping voor infiltratieputten (Hijnen & Van der Kooij, 1982). Verstoppingsproblemen met een biologische oorzaak zijn vooral te verwachten bij infiltratie met oxisch ('zuurstofhoudend') water in de aanwezigheid van biologisch afbreekbare componenten (Van Beek et al., 1996). Als infiltratiewater biologisch afbreekbaar materiaal en zuurstof bevat, moet dus met de vorming van biomassa rekening worden gehouden (Van Beek et al., 1996).

Andere kritische parameters zijn de aanwezigheid van nutriënten en elektron acceptoren, temperatuur, pH, redoxpotentiaal, en eventuele verontreinigingen. Biologische processen gaan daarom ook vaak samen met geochemische processen. Neerslagreacties die worden bevorderd door microbiologie, zoals oxidatie van ijzer(II) en mangaan(II), zijn bijvoorbeeld processen die tevens tot verstopping kunnen leiden, en zullen nader toegelicht worden in sectie 3.3. Voor meer informatie omtrent biologische verstoppingsrisico's wordt verwezen naar Van Beek et al. (1996).

De biologische verstoppingspotentie hangt mede af van het groeipotentiaal voor micro-organismen in infiltratiewater. Een indicator voor deze potentiaal is het gehalte (gemakkelijk) afbreekbaar organisch substraat dat leidt tot microbiële groei op selectieve voedingsbodems, en kan worden uitgedrukt met de concentratie 'assimilable organic carbon' (AOC) in infiltratiewater (Van Beek et al., 1996). Volgens Van der Kooij et al. (1982) moet de concentratie **AOC** lager zijn dan **10 µg acetate-C/L** zodat de kans op verstopping van de infiltratieput door bacteriegroei sterk wordt gereduceerd.

Van Beek et al. (1996) stelt verder dat de concentratie zuurstof (O_2) zoveel mogelijk moet worden uitgesloten. Ook wordt de maximale concentratie opgelost organisch stof (DOC) van $< 2 \text{ mg/L}$ gebruikt als maximale concentratie om putverstopping te reduceren (Vries et al., 2017). AOC heeft echter de voorkeur, omdat bij DOC niet inzichtelijk is welk deel werkelijk gemakkelijk kan worden benut voor biologische groei.

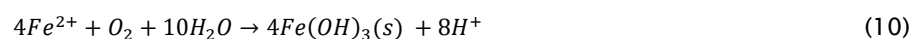
De concentraties Fe(II) en Mn(II) geven tevens belangrijke informatie over het chemisch-biologisch verstoppingsrisico. Kritische grenzen voor deze processen zijn echter lastig aan te geven en worden nader besproken in sectie 3.3 (Van Beek et al., 1996).

3.3 Chemische verstopping

Belemmering van de grondwaterstroming in of rond de put kan door colloïden, gasbellen, of biomassa worden veroorzaakt, maar ook door de vorming van een chemische neerslag. Met name bij menging van verschillende watertypen kunnen neerslagen ontstaan die tot verstopping van het putfilter of de boorgatwand kunnen leiden (Van Beek et al., 1996). Het neerslaan van ijzer(hydr)oxiden en kalk zijn de meest voorkomende vormen van chemische verstopping.

3.3.1 Neerslagen door redoxreacties

Bij menging van zuurstofrijk water met ijzerrijk of mangaanrijk grondwater kunnen neerslagen ontstaan van respectievelijk ijzerhydroxiden en mangaanoxiden.



Beide processen worden gewoonlijk microbiologisch versneld, door bijvoorbeeld *Gallionella* en *Leptothrix* spp, waarbij ook grote hoeveelheden slijmige biomassa wordt gevormd. Een proces dat alleen microbiologisch verloopt, is oxidatie van opgelost methaan door zuurstof, waarbij tevens veel slijm wordt geproduceerd:



Deze processen kunnen al optreden bij concentraties van circa **0,1 mg/L** ijzer (Fe), mangaan (Mn), en methaan (CH_4), en **0,01 mg/L** zuurstof (O_2). Bij hogere concentraties zal de neerslag en/of biomassavorming sneller plaatsvinden. Door Vries et al. (2017) wordt voor ijzer (Fe) een maximale concentratie van **10 µg/L** gehanteerd om putverstopping te voorkomen.

3.3.2 Neerslag van aluminiumhydroxide

Wanneer water met een lage pH en een hoge concentratie aluminium in aanraking komt met alkalisch water, zal bij menging een neerslag van aluminiumhydroxide ontstaan:



Deze reactie wordt niet microbiologisch bevorderd en er ontstaat dus ook geen slijmige biomassa. Met de vorming van aluminiumhydroxide moet enkel rekening worden gehouden wanneer de concentratie van aluminium (Al) groter is dan **0,3 mg/L** en de pH groter dan **6,5** (Baudisch, 1989).

3.3.3 Neerslag van kalk

Als kalkverzadigd water in aanraking komt met water met een hoge pH of lage concentratie opgeloste CO₂, moet met de neerslag van kalk rekening worden gehouden:



Om neerslag van kalk te voorkomen mag het water niet kalkverzadigd zijn of worden. Een maat om kalkverzadiging uit te drukken is de verzadigingsindex (SI_{kalk}). Wanneer water onderverzadigd is voor kalk geldt SI_{kalk} < 0. Wanneer water juist oververzadigd is voor kalk geldt SI_{kalk} > 0, en kan de neerslag van kalk tot verstopping leiden. In de praktijk is SI_{kalk} niet erg gevoelig voor kalkverstopping. Vaak is grondwater niet kalkoververzadigd, maar wordt grondwater dat pas na ontgassing, een temperatuurverandering of menging van verschillende watertypen. Daarom kan de meting van de concentratie Ca (en Mg) en van de alkaliniteit een geschiktere strategie zijn voor de bepaling van de kalkneerslagpotentie.

3.4 Mechanische verstopping

Mechanische putverstopping omvat bijvoorbeeld het meevoeren van lucht of gas in infiltratiewater naar de omstorting. Olsthoorn (1982) noemt drie factoren voor het ontstaan van gasbellen in het water:

- Vrije val van infiltratiewater in de put ('entrainment');
- Leckage van een leiding waar een onderdruk heerst;
- Oververzadiging van een bepaald gas als gevolg van drukdaling of temperatuurverandering. Grondwater bevat van nature opgeloste gassen. Door de hoge druk in het watervoerend pakket blijven deze normaliter in oplossing, maar bij een drukverlaging (dus met name bij onttrekking) of verhoogde temperatuur kan het water gaan ontgassen.

De gasbellen die ontstaan, kunnen turbulente stroming in het leidingsysteem veroorzaken en daardoor het leidingwerk beschadigen. Worden gasbellen geïnfiltreerd via de put, dan kan het bronfilter verstopt raken. Op dezelfde manier als zwevend stof kunnen gasbellen namelijk de openingen in een poreus medium blokkeren, resulterend in een afname van de doorlatendheid van het medium, een toename van de infiltratieweerstand, en een afname van de infiltratiecapaciteit.

3.5 Infiltratieweerstand en verstoppingsgraad

Het is onwaarschijnlijk dat verstopping van een infiltratieput bij een langdurige gebruik compleet voorkomen kan worden door kwaliteitseisen te stellen aan het infiltratiewater. Tijdens de dagelijkse bedrijfsvoering moeten infiltratiefilters periodiek worden teruggespoeld ('gebackflusht') om verstopping zoveel mogelijk te reduceren. Maar zelfs dan zal aanvullend periodiek putonderhoud (regeneratie) nodig zijn. Door de infiltratieweerstand over de tijd te meten, kan de verstoppingsgraad worden bepaald (vergelijking 5). Putverstopping zorgt namelijk voor een toename van de weerstand van een infiltratieput (Figuur 2). Er is door putverstopping een grotere infiltratiedruk benodigd om eenzelfde infiltratiedebiet te hanteren.

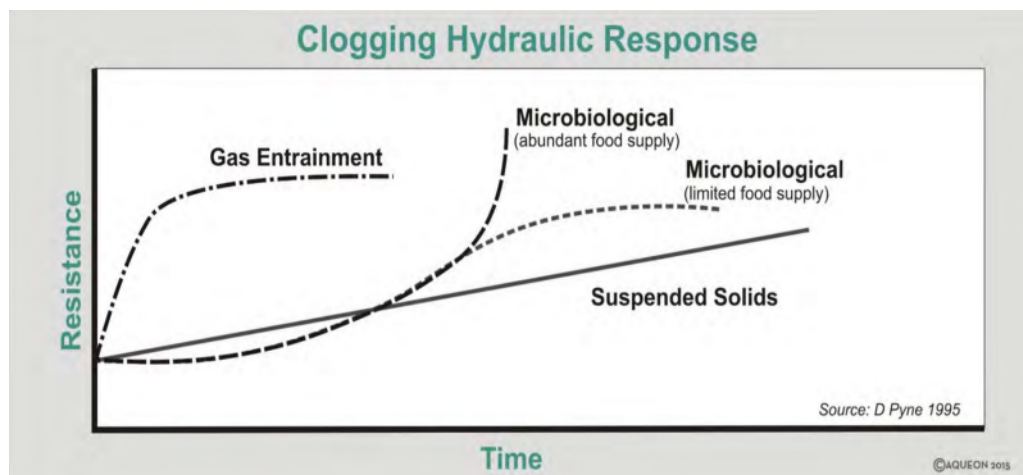
De infiltratiedruk en infiltratiecapaciteit zijn sterk afhankelijk van de mate van verstopping die optreedt. Wanneer de verhouding tussen infiltratiedruk en infiltratiedebiet niet verandert met de tijd, kan aangenomen worden dat verstopping niet optreedt of in ieder geval niet tot een gereduceerde infiltratiecapaciteit heeft geleid. Wanneer dit wel het geval is, kan uit het verloop van de infiltratieweerstand met de tijd worden herleid wat de oorzaak van putverstopping is (Figuur 4). Omdat

verschillende verstoppingsprocessen vaak samen optreden, is het doorgaans echter lastig om alleen op basis hiervan conclusies te trekken over de oorzaak/oorzaken.

Colloïdale verstopping wordt gekenmerkt door een trage, geleidelijke, en nagenoeg constante toename van de infiltratieweerstand (Martin, 2013). Wanneer de dikte van geaccumuleerd sediment op het putfilter of op de boorgatwand toeneemt, zal de doorlatendheid afnemen en de toename van de infiltratieweerstand steeds signifikanter worden. Wanneer vervolgens een grotere infiltratiedruk wordt toegepast om een bepaald debiet te behouden, kan de ophoping van zwevend stof worden samengedrukt, waardoor de infiltratieweerstand exponentieel kan toenemen (Martin, 2013). Wanneer het infiltratiedebiet constant wordt gehouden en de druk in de injectiebron oploopt, zullen in peilbuizen in de omgeving geen veranderingen zichtbaar zijn. Wanneer de infiltratiedruk constant wordt gehouden en het infiltratiedebiet afneemt door colloïdale verstopping (Martin, 2013) zullen stijghoogtes in monitoringsputten nabij infiltratieputten na verloop van tijd afnemen. Bij chemische verstopping geldt hetzelfde.

Biologische putverstopping wordt gekenmerkt door een initieel trage toename van de infiltratieweerstand, gevolgd door een plotselinge exponentiele toename. In omliggende monitoringsputten moet dan tevens een vergelijkbare toename zichtbaar zijn (Martin, 2013). De groei van microbiologie, en dus de toename van biologische putverstopping, wordt beperkt door de beschikbaarheid van nutriënten in het water.

Mechanische putverstopping door gasbellen wordt gekenmerkt door een plotselinge toename van de infiltratieweerstand en van het waterniveau in de put direct nadat is gestart met infiltreren (Martin, 2013). Eenmaal gevormde bellen kunnen langzaam oplossen, afhankelijk van de samenstelling. CO₂ lost bijvoorbeeld beter op dan zuurstof. Door ontgassing of oplossing van de gasbellen in het water bestaat de mogelijkheid dat de infiltratiecapaciteit geleidelijk aan weer verbetert.



Figuur 4: Illustratie van het effect van verschillende verstoppingsmechanismen op de toename van de infiltratieweerstand, en dus de afname van de infiltratiecapaciteit, versus tijd (Pyne, 1995).

4 Gewenste metingen vóór infiltratie

4.1 Doorlatend vermogen (kD-waarde)

Om op voorhand wat te kunnen zeggen over de infiltratiecapaciteit van een put, kan men de opbouw en het primaire doorlatend vermogen van de ondergrond in kaart brengen, evenals de maximale infiltratiedruk die volgt uit vergelijking 4 (Olsthoorn, 1982). Om deze druk te berekenen, moet de dikte van het pakket boven het meest kritische punt bekend zijn. De bepaling van de maximale druk is enkel van belang als de druk tot boven maaiveld wordt opgevoerd met een voordrukbuys of pomp.

4.2 Oorspronkelijke infiltratieweerstand

Wanneer een infiltratieput eenmaal is geïnstalleerd, is het zaak om een initiële capaciteitsmeting uit te voeren. Hiermee kan bepaald worden of de verwachte capaciteit wordt behaald, en wat de oorspronkelijke infiltratieweerstand is. Hierbij wordt aanbevolen om bij 3 debieten telkens minimaal een kwartier lang te onttrekken en elke 5 minuten de verlaging te noteren.

4.3 Samenstelling grondwater en infiltratiewater

Als daarnaast de samenstelling van het grondwater en het infiltratiewater vooraf wordt bepaald, kan men ook uitspraken doen over de verstoppingspotentie van een put. Met verstopping moet in ieder geval rekening worden gehouden als de indicatieve grenswaarden worden overschreden die in hoofdstuk 3 zijn genoemd en in Tabel 2 zijn samengevat. Let op: onderschrijding van deze waarden garandeert niet dat er géén verstopping zal optreden, de kans daarop zal echter wel aanzienlijk kleiner zijn.

Tabel 2: Indicatieve grenswaarden voor het optreden van putverstopping.

Verstopping door	Grenswaarde (Van Beek et al., 1996; Vries et al., 2017)
Neerslag van mangaan, ijzer en/of biomassa	Mn > 0,1 mg/L; Fe > 0,1 mg/L; CH ₄ > 0,1 mg/L O ₂ > 0,01 mg/L
Neerslag van aluminiumhydroxiden	Al > 0,3 mg/L, pH > 6,5
Neerslag van kalk	SI _{kalk} > 0*
Biomassa	AOC > 10 µg acetaat-C / L DOC > 2 mg/L
Colloïden	MFI > 3 s/L ² TSS > 0,1 mg/L Troebelingsgraad > 1 NTU v > 1,0 m/uur
Kleizwelling en kleidispersie	ESP (bodem) > 10% & TDS (infiltratiewater) > 10 meq/L SAR (grondwater) > 6 & EGV (infiltratiewater) > 40-100 mS/m

* In de praktijk is SI_{kalk} niet erg gevoelig voor kalkverstopping. Vaak is grondwater niet kalkoververzadigd, maar wordt grondwater dat pas na ontgassing, een temperatuurverandering of menging van verschillende watertypen. Daarom kan de meting van de concentratie Ca (en Mg) en van de alkaliniteit een geschiktere strategie zijn voor de bepaling van de kalkneerslagpotentie.

5 Gewenste monitoring tijdens infiltratie

Er zijn verschillende strategieën en methoden om de prestatie van een infiltratieput te monitoren. In deze studie is getracht een overzicht te maken van de beschikbare methoden, welke in de volgende secties nader worden toegelicht.

5.1 Infiltratieweerstand

De belangrijkste parameter die gedurende infiltratie continue moet worden gemonitord is de infiltratieweerstand, welke kan worden bepaald met de volgende parameters:

- Infiltratiedebiet (Q), m.a.w. het volume dat per tijdseenheid de bodem in wordt gebracht via de infiltratieput;
- Infiltratiedruk (Δh), m.a.w. de stijghoogte in de put (h_{put}) t.o.v. de grondwaterstijghoogte (h_{gw});
- Temperatuur (T) van het infiltratiewater.

Deze kunnen gedurende infiltratie met de tijd worden gemonitord (Figuur 4). Uit het verloop van de resulterende infiltratieweerstand kan men controleren of de vooraf vastgestelde infiltratiecapaciteit wordt behaald, en of en wanneer putverstopping optreedt. Het verloop van de infiltratieweerstand geeft dus een goed beeld van de prestatie van de infiltratieput. Er zijn verschillende strategieën en methoden om de infiltratieweerstand te bepalen, welke in de volgende paragrafen nader worden besproken. Een marktinventarisatie voor de monitoringsapparatuur is uitgevoerd en beschreven in deelrapport 2.

5.1.1 Monitoring h_{put} en Temperatuur

Het monitoren van h_{put} kan met een druksensor of akoestische sensor in de put worden uitgevoerd. Vaak zijn druksensoren ook uitgerust met een ingebouwde temperatuursensor, waardoor al twee parameters worden gemeten t.b.v. de bepaling van de infiltratieweerstand. In theorie is het mogelijk om de infiltratieweerstand te monitoren door uit de tijdreeksen van h_{put} en de temperatuur ook de grondwaterstijghoogte (h_{gw}) en het infiltratiedebiet (Q) te bepalen. Wel gaan hier berekeningen aan vooraf met aannames en onzekerheden.

5.1.1.1 Benadering h_{gw} en Δh op basis van h_{put}

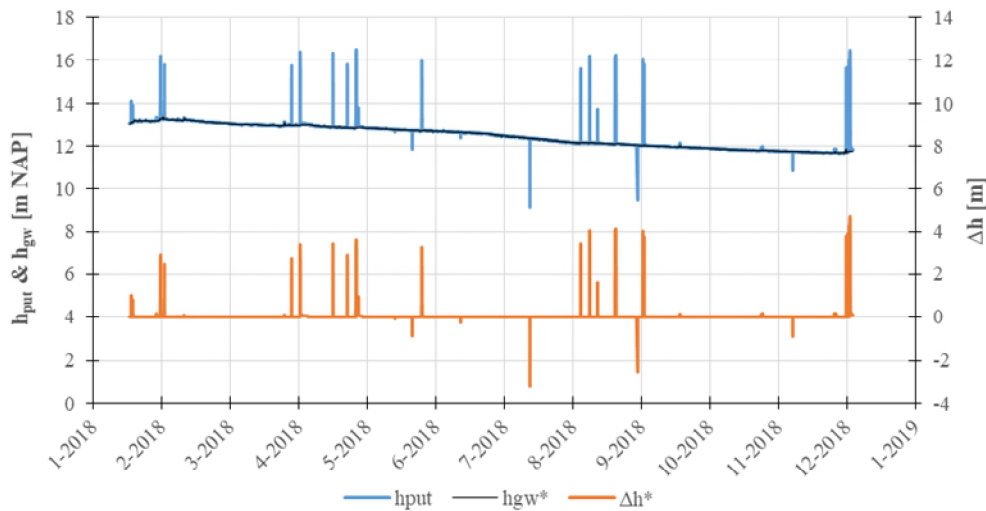
De totale reeks van h_{put} bestaat uit twee componenten: 1) het signaal van h_{gw} en 2) het signaal dat wordt veroorzaakt door infiltratie (Δh). Wanneer een infiltratieput niet aan het infiltreren is, zal de stijghoogtevariatie die wordt waargenomen in de put naar verloop van tijd dus gelijk zijn aan de variatie van h_{gw} . Door de twee componenten van elkaar te scheiden, kan de infiltratiedruk bepaald worden.

Indien een lokale peilbuis beschikbaar is met een filter in het watervoerend pakket, kan de meetreeks daarvan gebruikt worden als tijdreeks voor h_{gw} , mits de peilbuis ver genoeg van de infiltratieput staat zodat effecten van infiltratie beperkt blijven. Monitoringspeilbuizen worden zelden ingesteld met een meetfrequentie kleiner dan een dag of een uur. Infiltratie kan echter plaatsvinden op een kortere tijdsbasis,

waardoor de resolutie vaak niet overeen zal komen met die van de waargenomen grondwaterstijghoogtereeks. Bovendien valt te betwisten of de monitoringspeilbuis ook representatief is voor de stijghoogte in het watervoerend pakket ter plaatse van de infiltratieput.

h_{gw} kan ook uit de data van h_{put} worden geëxtraheerd. Hierbij moet een bepaalde snelheid voor een natuurlijke stijghoogteverandering (x) worden aangenomen. In Figuur 5 is aangenomen dat een verandering van h_{put} van ≤ 5 mm/minuut veroorzaakt kan zijn door de variatie van h_{gw} . Indien de verandering van h_{put} groter is dan 5 mm/minuut, wordt dus verondersteld dat dit het gevolg is van infiltratie, of zoals in Figuur 5 ook door onttrekking. M.a.w. Δh wordt berekend middels vergelijking 15. De geldigheid van deze vergelijking, met name bij putverstopping, is onbekend.

$$\Delta h \begin{cases} h_{put} - h_{gw} & \text{als } \Delta h_{put} > x \text{ mm/minuut} \\ 0 & \text{als } \Delta h_{put} \leq x \text{ mm/minuut} \end{cases} \quad (15)$$



Figuur 5: Voorbeeld: benadering van h_{gw} en Δh uit h_{put} . Aanname: variatie van $h_{put} \leq 5$ mm/minuut (x) wordt veroorzaakt door variatie h_{gw} , en is niet het gevolg van infiltratie (of onttrekking) (Δh).

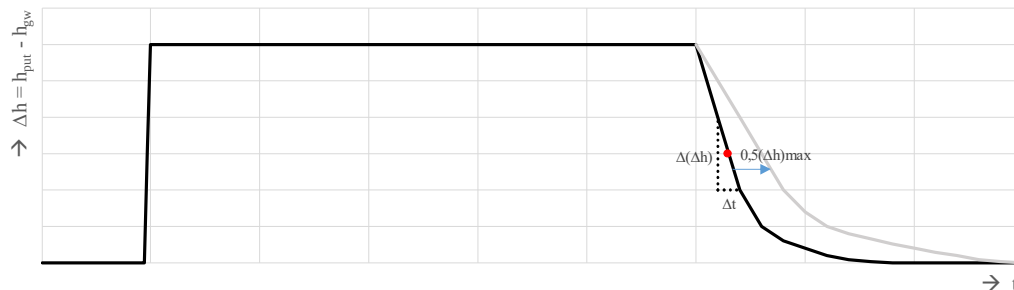
5.1.1.2 Benadering Q op basis van Δh

Wanneer met voorgaande procedure h_{gw} uit de meetreeks van h_{put} is gefilterd, kan ook de minimale Q benaderd worden. Als een infiltratieput plots uitschakelt, zal de infiltratiedruk afnemen omdat het water in de put nog de bodem in zal stromen. De afname van Δh met de tijd staat in verband met Q en de diameter van de infiltratieput (d) (vergelijking 6; Figuur 1). Deze afname kan het beste worden ingeschat bij het tijdstip waarbij $\Delta h = 0,5(\Delta h)_{max}$ (Figuur 6):

$$Q_{0,5(\Delta h)_{max}} = \pi * (0,5d)^2 * \frac{\Delta(\Delta h)_{0,5(\Delta h)_{max}}}{\Delta t_{0,5(\Delta h)_{max}}} \quad (16)$$

$Q_{0,5(\Delta h)_{max}}$ is niet representatief voor de daadwerkelijke Q die optreedt bij continue infiltratie, maar is enkel een maat om de prestatie van de infiltratieput kwalitatief te bepalen. Wanneer $\frac{\Delta(\Delta h)_{0,5(\Delta h)_{max}}}{\Delta t_{0,5(\Delta h)_{max}}}$ bij opeenvolgende infiltratieperiodes is afgenomen, en de curve in Figuur 6 dus minder stijl wordt, is $Q_{0,5(\Delta h)_{max}}$ ook afgenomen. Dit kan een aanwijzing zijn voor het optreden van putverstopping en voor de afname van de infiltratiecapaciteit. Omdat Q met deze methode niet continue kan worden gemonitord, wordt wellicht te laat ingegrepen bij het optreden van putverstopping. Ook is het niet

aannemelijk dat de met de beoogde systemen de watertoevoer plots afneemt. Aannemelijker is een geleidelijke afname van de watertoevoer richting de bron. Wanneer het leeglopen van het voorgeschakelde systeem altijd vergelijkbaar verloopt, kan van deze systematiek gebruik worden gemaakt.



Figuur 6: Voorbeeld: verandering van Δh bij een infiltratiepuls. De grijze curve en de blauwe pijl laten zien wat er gebeurt als de infiltratiecapaciteit afneemt, bijvoorbeeld door putverstopping.

5.1.2 Aanvullende monitoring h_{gw}

Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van variatie van h_{gw} kan een extra peilbuis met een druksensor of akoestische sensor worden geplaatst op enige afstand van de infiltratieput, waar de variatie van de stijghoogte niet significant wordt verstoord door infiltratie. Echter valt ook dan te betwisten of de monitoringspeilbuis representatief is voor de stijghoogte in het watervoerend pakket ter plaatse van de infiltratieput. De onzekerheid van deze methode t.o.v. de benadering van h_{gw} op basis van h_{put} is vooralsnog onbekend en zal per situatie verschillen.

5.1.3 Aanvullende monitoring Q

Door Q te benaderen met enkel Δh (sectie 5.1.1.2), loopt men het risico dat niet tijdig wordt ingegrepen op een verminderde prestatie van de infiltratieput. Om Q continue te monitoren, is een debietsensor vereist. Deze kan geplaatst worden in het leidingwerk dat direct is aangesloten op de infiltratieput. Deze methode is in ieder geval nauwkeuriger dan de benadering van Q op basis van Δh (sectie 5.1.1.2).

Een alternatief is het loggen van de draaiuren van de pomp in combinatie met de druk in de persleiding na de pomp en het eventuele optreden van overstort. Deze methode leidt tot een indirecte benadering van het infiltratiedebiet, en vereist een extra druksensor in de persleiding en een eventuele meting van overstort.

5.2 Verklaren van (verstoppings)processen

5.2.1 Monitoring $h_{omstorting}$

Verstopping kan optreden op het filter van de infiltratieput of op de boorgatwand (Figuur 3). Door naast de infiltratiedruk, m.a.w. de stijghoogte in de put en de lokale grondwaterstijghoogte, ook de stijghoogte in de omstorting te monitoren, kan de weerstand tussen het putfilter en de omstorting, en tussen de omstorting en het watervoerend pakket worden vastgesteld (vergelijking 5). Met een extra peilbuis in de omstorting kan dit al worden bereikt, en kan de locatie en oorzaak van de putverstopping worden bepaald (Figuur 3). Daarnaast kan een eventuele extra peilbuis net buiten de boorgatwand de locatie en oorzaak van putverstopping bevestigen.

5.2.2 Waterkwaliteit

Het infiltratiewater moet blijven voldoen aan de operationele richtlijnen die zijn gegeven in Tabel 2 om putverstopping zoveel mogelijk te voorkomen. Monitoring van de chemische, fysische, en biologische parameters in Tabel 2 kan dus een verstandige aanvulling zijn op de monitoring van de infiltratiecapaciteit.

De belangrijkste stuurparameters voor waterkwaliteit bij infiltratieputten zijn MFI en AOC (Bonte, 2009), welke een indicatie geven van respectievelijk colloïdale en biologische putverstopping. In plaats van MFI, kan ook de concentratie zwevend stof of de troebelheid van infiltratiewater worden gemonitord, en DOC is een alternatieve parameter voor het monitoren van de biologische verstoppingspotentie.

Bonte (2009) en Bonte et al. (2009) hebben bij verschillende diep-infiltratieputten waargenomen dat verstopping voornamelijk optreedt door ijzer- of mangaanneerslagen en door biomassa afkomstig van ijzer- of mangaanminnende bacteriën. Door de concentraties DOC en AOC te monitoren, heeft men al vat op de biologische activiteit van het infiltratiewater. Het monitoren van deze parameters en van onopgeloste bestanddelen geeft echter geen of slechts een zeer beperkte indicatie van de input van opgelost of colloïdaal ijzer en mangaan (Bonte et al., 2009). Daarom is de aanvullende monitoring van Fe en/of Mn verstandig. CH₄ speelt geen rol in het infiltratiewater.

Opgelost zuurstof (O₂) heeft invloed op zowel biologische als chemische putverstopping. Wanneer infiltratiewater met een hoge concentratie O₂ wordt geïnfilterd naar zuurstofarm grondwater, zullen microbiologische processen worden versneld, en kunnen ijzerhydroxiden en/of mangaanoxiden versneld neerslaan. Het monitoren van opgelost O₂ geeft daarom extra inzicht over het mogelijk optreden van verstopping door biologische groei en neerslagen. Gezien het beoogde doelwater (hemelwater), de voorzuivering, en de open systemen, zal het infiltratiewater doorgaans zuurstofhoudend zijn.

Mechanische verstopping door gasbellen wordt doorgaans bij de realisatie van een infiltratieput zoveel mogelijk voorkomen door al het leidingwerk van de put met elkaar te laten communiceren, ontluchters toe te passen, en water niet de put in te laten 'storten'. Monitoring van opgeloste gassen heeft vanuit dit oogpunt daardoor geen prioriteit. De aanwezigheid ervan is indirect goed te bepalen uit het verloop van de infiltratieweerstand.

De potentie van verstopping door kleizwelling kan voordat een infiltratieput in gebruik wordt genomen worden vastgesteld door de chemische samenstelling van grond(water)monsters te bepalen. Daarbij is de concentratie van opgeloste stoffen in infiltratiewater wel van belang. Monitoring van de EGV of TDS van het infiltratiewater kan een continu beeld geven van de totale hoeveelheid opgeloste stoffen, en van de verstoppingspotentie door kleizwelling. EGV en/of TDS-sensoren zijn vaak geïntegreerd in druksensoren en zullen dus niet voor extreem hogere kosten zorgen. Aan de andere kant is het gezien de beoogde doelpakket (matig grof zand en doorgaans licht-brak) niet aannemelijk dat ernstige verstopping door kleizwelling zal plaatsvinden.

Om de neerslag van kalk te bepalen, moet de verzadigingsindex (SI_{kalk}) of de concentratie Ca (en Mg) en de alkaliniteit gemonitord worden, hetgeen slechts mogelijk is door bemonstering en analyse. Om de neerslag van aluminiumhydroxiden te bepalen, kan naast het bepalen van de concentratie Al in grondwater de pH gemonitord worden. De pH is doorgaans eenvoudig online te monitoren.

Een volledige monitoring van de waterkwaliteit is het meest gewenst maar tegelijkertijd erg duur. Rekening houdend met bovenstaande informatie, wordt verondersteld dat de prioriteit van te monitoren waterkwaliteitsparameters bij relatief kleinschalige infiltratiesystemen allereerst uit moet gaan naar **zwevend stof/troebelheid/MFI en DOC/AOC**.

De overige parameters die nuttig zijn voor de bepaling van putverstopping (zie ook Tabel 2) kunnen worden beschouwd als aanvullend voor de relatief kleinschalige infiltratiesystemen die worden beoogd in de COASTAR-casus Cities2Recharge. Daarnaast geeft een continue EGV-sensor bijvoorbeeld informatie over de verandering van de algehele waterkwaliteit en is deze eenvoudig en voordelig te installeren door integratie in een druksensor, terwijl een continue sensor voor een specifiek ion al een stuk lastiger te installeren is en bovenal gepaard gaat met veel hogere kosten (zie ook rapport over deelvragen 2 en 3).

5.2.2.1 Periodieke analyse

Water dat naar de ondergrond wordt geïnfiltreerd moet tevens voldoen aan minimaal het infiltratiebesluit bodembescherming of bepaalde streefwaarden (cf. grondwaterbeleid provincie Zuid-Holland). In het infiltratiebesluit bodembescherming zijn waterkwaliteitseisen opgenomen die overlap vertonen met de operationele normen (Tabel 2), en die volgens een vergunning al periodiek moeten worden getoetst. Zo mag de concentratie zwevend stof bijvoorbeeld al niet hoger zijn dan 0,5 mg/L. De gegevens van zo'n periodieke analyse kunnen worden benut om de prestatie van een infiltratiesysteem te beoordelen en verklaren. Hierdoor is het continu monitoren van de waterkwaliteit mogelijk overbodig en kosten-technisch niet interessant. Ook als er geen vergunning is (aangevraagd) voor een bepaald infiltratiesysteem, biedt een periodieke analyse van de waterkwaliteit een zeer goed alternatief voor een continue monitoring om de prestatie van de infiltratieput en optredende processen beter te verklaren.

5.2.2.2 Voorzuivering

Omdat het infiltratiewater doorgaans bestaat uit hemelwater dat wordt verzameld vanaf straten en pleinen, is het infiltratiewater van te slechte kwaliteit om te mogen (volgens vergunning) en kunnen (volgens operationele richtlijnen t.a.v. putverstopping) infiltreren. Daardoor is een voorzuiveringssysteem doorgaans noodzakelijk om de waterkwaliteit te verbeteren vóór infiltratie. De verwijdering van zwevend stof is bijvoorbeeld essentieel en heeft ook een positieve impact op het verlagen van concentraties zware metalen, PO_4 , en PAK's. Wanneer een voorzuiveringssysteem naar behoren functioneert, kan monitoring van (enkele) waterkwaliteitsparameters overbodig zijn. Monitoring van waterkwaliteitsparameters kan daarentegen ook juist een goede aanvulling zijn om de prestatie van het voorzuiveringssysteem te waarborgen.

5.2.3 Weergegevens

Weergegevens kunnen extra informatie bieden over het verwachte infiltratiedebiet en de verwachte kwaliteit van infiltratiewater. Het is doorgaans lastig om met deze gegevens direct de hoeveelheid en kwaliteit van infiltratiewater te kwantificeren. Wel kunnen processen beter worden geplaatst met weergegevens. Zo kan men bijvoorbeeld aan de hand van weergegevens terugzien of het verzamelde hemelwater afkomstig is van een zogenaamde 'first flush' na een lange droge periode, of dat het juist het resultaat is van een langdurige periode van neerslag. De kwaliteit van het verzamelde hemelwater en de proportie van de totale neerslag die uiteindelijk het infiltratiesysteem bereikt, kunnen in beide gevallen sterk verschillen. Ook kan men met weergegevens beoordelen hoeveel hemelwater direct verdampt en hoe dat varieert in de tijd.

6 Conclusies

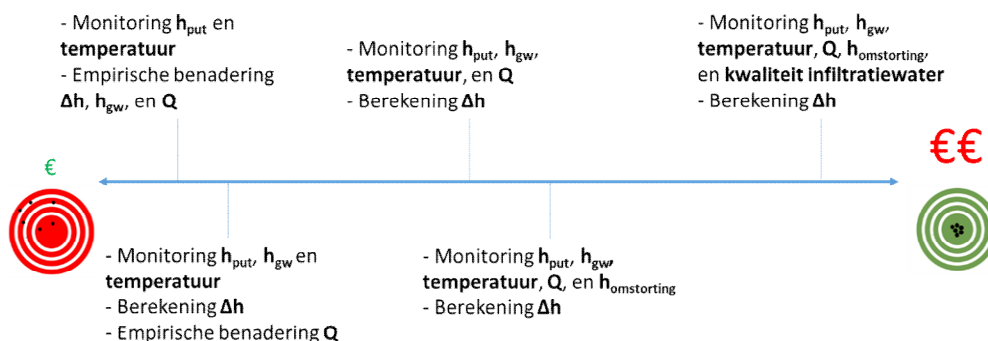
Dit rapport is het eerste deel van de casus Cities2Recharge binnen het TKI-project COASTAR. In dit rapport is de eerste deelvraag behandeld:

‘Welke parameters moeten minimaal gemeten worden om functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving voldoende te monitoren?’

Een samenvatting van de te monitoren parameters tijdens infiltratie is gegeven in Figuur 7. Met behulp van deze figuur kan een eerste afweging worden gemaakt van de meest geschikte monitoring, uitgaande van nauwkeurigheid, complexiteit, en kosten.

De infiltratieweerstand is de belangrijkste parameter voor de prestatie van een infiltratieput. Voor een minimale monitoring van de infiltratieweerstand, dient men de stijghoogte in de infiltratieput (h_{put}), en de temperatuur te monitoren. Deze monitoring, en de daarbij horende benadering van parameters (Δh , h_{gw} , en Q), is qua kosten het meest voordelig, maar zal resulteren in de minste nauwkeurigheid. De achtergrondvariatie van de grondwaterstand (h_{gw}) kan men ook uit de metingen filteren door de stijghoogte in een lokale peilbuis te monitoren. Deze methode heeft vermoedelijk een hogere nauwkeurigheid t.o.v. de benadering van h_{gw} op basis van h_{put} , maar is niet essentieel. Voor een continue monitoring van Q is het in ieder geval vereist een debietsensor te plaatsen in het leidingwerk van de infiltratieput.

Indien men de oorzaak en locatie van putverstopping wil bepalen, kan de stijghoogte in de putomstorting ($h_{\text{omstorting}}$) worden gemonitord. Om putverstopping te minimaliseren en de putcapaciteit te waarborgen, is een voorzuivering en (continue) monitoring van de kwaliteit van infiltratiewater zeer gewenst. Dit zal echter leiden tot aanzienlijk hogere kosten. De monitoringsprioriteit van waterkwaliteitsparameters moet allereerst uitgaan naar **zwevend stof/troebelheid/MFI en DOC/AOC**. Overige waterkwaliteitsparameters vermeld in dit rapport kunnen als nuttig maar aanvullend worden beschouwd voor de bepaling van de prestatie van relatief kleinschalige infiltratiesystemen die worden beoogd in de COASTAR-casus Cities2Recharge. Periodieke analyse van waterkwaliteitsparameters, alsmede het verzamelen van weergegevens, zijn in elk geval interessante opties om optredende (verstoppings)processen te beoordelen en verklaren.



Figuur 7: Overzicht van gewenste monitoringsmethoden en relatieve kosten en nauwkeurigheid.

In deelrapport 2 wordt bepaald welke sensoren beschikbaar zijn voor monitoring, en wat de mogelijkheid is voor de integratie van sensoren in één systeem.

7 Referenties

- Bolt, G.H. & Bruggenwert, M.G.M. (1978). Soil Chemistry, A. Basic Elements, Development in Soil Science 5A, Elsevier, Amsterdam.
- Bonte, M., Raat, K.J., and Dammers, P. (2009). Analyse putverstopping en voorstel voor regeneratie diepinfiltratie Waalsdorp. KWR Rapport, kenmerk KWR 09.001.
- Bonte, M. (2009). Regeneratie en verstopping van infiltratieputten. KWR Rapport, kenmerk KWR 09.028.
- Bretveld, R., Willemsen, A. (2004). Drukhandhaving en debietregeling bij infiltratie van water in de bodem. H2O, 12, 34-36. Beschikbaar op: <http://edepot.wur.nl/356985>.
- Brown, D. L., & Silvey, W. D. (1977). Artificial recharge to a freshwater-sensitive brackish-water sand aquifer, Norfolk, Virginia (No. 939). US Govt. Print. Off.
- De La Loma Gonzalez, B. (2013). Clogging of deep well infiltration recharge systems in the Netherlands. Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia, 163-173.
- Earlougher, R. C. (1977). Advances in well test analysis (pp. 5-17). New York: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME.
- Frenkel, H., Goertzen, J.O., & Rhoades, J.D. (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 24: 32-39.
- Haak, A.M. (1990). Testfaciliteit voor opslag van koude en warmte in aquifers. Aquiferen putgedrag bij periodieke opslag van koude. TNO-rapport OS 90-06.
- Hijnen, W.A.M., Bunnik, J., Schippers, J.C., Straatman, R., and Folmer, H.C. (1998). Determining the clogging potential of water used for artificial recharge on deep sandy aquifers. Paper to be presented at the Third International Symposium on Artificial Recharge, september 21-25, Amsterdam.
- Hijnen W.A.M., Van der Kooij D. (1992) Influence of adsorbable organic carbon on the biological colmation of infiltration wells. GWF Wasser/Abwasser 133: 148-53.
- Houben, G., & Treskatis, C. (2007). Water well rehabilitation and reconstruction. McGraw-Hill.
- Hutchinson, A., Milczarek, M., & Banerjee, M. (2013). Clogging phenomena related to surface water recharge facilities. Clogging Issues Associated with Managed Aquifer Recharge Methods; Martin, R., Ed, 34-49.
- Kasenow, M. (2006). Aquifer test data: analysis and evaluation. Water Resources Publication. ISBN 1-887201-41-6, pp. 264-266.

Konikow, L. F., August, L. L., & Voss, C. I. (2001). Effects of clay dispersion on aquifer storage and recovery in coastal aquifers. *Transport in porous media*, 43(1), 45-64.

Kroening, D. E., Snipes, D. S., Brame, S. E., Hodges, R. A., Price, V., & Temples, T. J. (1996). The rehabilitation of monitoring wells clogged by calcite precipitation and drilling mud. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 16(2), 114-123.

Martin, R. (2013). Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge.

Mays, D. C. (2013). Clogging in managed aquifer recharge: Flow, geochemistry, and clay colloids. *Clogging Issues Associated with Managed Aquifer Recharge Methods*, 14-24.

Olsthoorn, T N. (1982). Verstopping van persputten. KIWA mededeling nr.71.

Peters, J.H., Van der Eem, J.P., Meijer, J.A. (1989). Diepinfiltratie, de theorie. KIWA-mededeling nummer 106. KIWA N.V. Hoofdafdeling Speurwerk, Nieuwegein.

Pupisky, H. and Shainberg, I. (1979). Salt Effects on the Hydraulic Conductivity of a Sandy Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 429-433.

Van Beek, C.G.E.M., Vasak, L., Nieuwaal, A., Stefess, G.C., Bakker, L.M.M. (1996). Ontwerp en onderhoud van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen. Nederlands onderzoeksprogramma biotechnologische in-situ sanering (NOBIS) 96-3-06.

Van der Kooij, D., Visser, D., Hijnen, W.A.M. (1982). Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water. *J. Am. Water Works Assoc.* 74: 540-545.

Verruijt, A. (1970). Theory of Groundwater Flow. *Theory of Groundwater Flow*.

Vries, D., De La Loma Gonzalez, B., Van der Schans, M.L., Zuurbier, K.G. (2017). Concepten voor snelle voorzuivering van ASR-infiltratiewater. KWR Rapport, kenmerk KWR 2016.125.