

COASTAR

Cities2Recharge. Beschikbare sensoren voor monitoren diepinfiltratiesystemen, integratie in één systeem, en sturen op drempelwaarden



COASTAR Cities2Recharge. Beschikbare sensoren voor monitoren diepinfiltratiesystemen, integratie in één systeem, en sturen op drempelwaarden

KWR 2020.159 | September 2020

Opdrachtnummer

402722

Projectmanager

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

Opdrachtgever

Gemeente Rotterdam, Gemeente Maassluis, 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 verveelvoudigd, 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 2 en 3: Beschikbare sensoren, integratie in één systeem, en sturen op drempelwaarden	5
1.4	Kennisprogramma COASTAR	6
2	Beschikbare sensoren	7
2.1	Bandbreedtes parameters	7
2.2	Infiltratiedruk	7
2.3	Infiltratiedebiet	12
2.4	Waterkwaliteit	16
2.5	Weergegevens	18
2.6	Telemetrie	18
3	Sturing op drempelwaarden	20
3.1	Infiltratieweerstand	20
3.2	Waterkwaliteit	21
4	Hemelwaterinfiltratiesystemen	22
4.1	Robert Fruinstraat	22
4.2	Waterplein Bellamyplein	22
4.3	Hoekse Lijn, Hoek van Holland	23
4.4	Hoekse Lijn, Maassluis	23
4.5	Maassluis West	24
5	Monitoringssysteem	25
5.1	Functionele eisen	25
5.2	Voorbeelden	29
6	Conclusies	33
6.1	Infiltratiedruk en temperatuur	33
6.2	Infiltratiedebiet	33
6.3	Waterkwaliteit	33
6.4	Weergegevens	34
6.5	Drempelwaarden	34
6.6	Telemetrie en ICT-koppeling	34
6.7	Hoofdactiviteit	34
7	Referenties	35
	Bijlage I Overige debietmeters	37

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 loopt
 - o De afvoer van water plaatsvindt en overlast/overstort wordt voorkomen?
- Kunnen we dat zo lenig en 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 (de betaversie) het 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 2 en 3: Beschikbare sensoren, integratie in één systeem, en sturen op drempelwaarden

In fase 1 zijn de belangrijkste parameters gekozen om tijdens infiltratie te monitoren (KWR2020.158). Dit is in ieder geval de infiltratieweerstand, welke kan worden bepaald door de infiltratiedruk, het infiltratiedebiet, en de temperatuur te monitoren. Daarnaast kunnen enkele chemische paramaters gemonitord worden om de verstoppingspotentie van infiltratieputten te bepalen. In deze rapportage zijn deelvragen 2 en 3 uitgewerkt. Voor de gewenste parameters is onderzocht welke sensoren/meetinstrumenten en ICT-oplossingen er thans beschikbaar zijn, en op welke drempelwaarden moet worden gestuurd. De sensoren worden in het algemeen beoordeeld op de volgende criteria:

- Betrouwbaarheid
- Nauwkeurigheid
- Robuustheid
- Prijs
- Mogelijkheden voor koppeling met ICT systemen.

Voor elke sensor is het van belang dat deze (near-)real time data verzamelt, en dat deze data (telemetrisch) wordt verstuurd of op afstand kan worden uitgelezen. Zo kan monitoring continu plaatsvinden en kan men tijdig op afstand ingrijpen als bijvoorbeeld putverstopping optreedt. De veldlocatie hoeft in dat geval niet per se direct bezocht te worden. Zo wordt het beheer van de ondergrondse waterberging geoptimaliseerd.

Verskillende ICT oplossingen worden vergeleken voor verzameling, verwerking en weergave (dashboard) van de gegevens. Hierbij worden ook het bestaande monitoringssysteem bij het infiltratiesysteem van Hoekse Lijn en het bestaande systeem bij Rotterdam voor aansturing van rioolgemalen geanalyseerd.

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 kennisinstututen 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 Beschikbare sensoren

Voor het monitoren van de meest relevante parameters gegeven in de rapportage van deelvraag 1 (KWR2020.158) zijn verschillende sensoren beschikbaar. Deze worden in dit hoofdstuk uitgelicht.

2.1 Bandbreedtes parameters

Om allereerst een goed beeld te krijgen van de te verwachten meetwaarden, zijn hieronder de typische bandbreedtes gegeven van de relevante te monitoren parameters die doorgaans worden aangetroffen of gehanteerd bij infiltratiesystemen. Deze gegevens zijn vooral gebaseerd op de Urban Waterbuffer in Spangen, Rotterdam. De stijghoogte in een watervoerend pakket en de druk die moet worden toegepast om te infiltreren kunnen lokaal groter uitpakken, maar de gegeven waarden zijn representatief voor het eerste watervoerend pakket in Zuid-Holland.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| - Stijghoogte watervoerend pakket: | 0 tot 1 meter beneden maaiveld |
| - Druk bij infiltratieput: | 0 tot 3 meter boven maaiveld |
| - Infiltratiedebiet: | 0 tot 40 m ³ /uur |
| - Temperatuur infiltratiewater: | 5 tot 25°C |
| - EGV infiltratiewater: | 100 tot 1500 µS/cm |
| - Troebelingsgraad infiltratiewater: | 0 tot 10 NTU |

2.2 Infiltratiedruk

Zoals in de rapportage van deelvraag 1 is vermeld (KWR2020.158), kan de infiltratiedruk bepaald worden door de stijghoogte in de infiltratieput en eventueel in aanvullende peilbuizen te monitoren. De stijghoogte kan handmatig gemeten worden, maar voor het doeleinde van deze studie is een (semi-)automatische monitoring gewenst. Bij (semi-)automatische grondwaterstandmetingen wordt de put uitgerust met een sensor die de grondwaterstand met een vooraf ingestelde frequentie meet. Bij een semi-automatische monitoring wordt de put tevens uitgerust met een logger die de metingen registreert en opslaat. Deze logger is vaak geïntegreerd in de sensor. De gegevens kunnen vervolgens periodiek handmatig worden uitgelezen voor verdere verwerking. Bij een volledig automatische monitoring worden de meetwaarden met behulp van telemetrie via een datalogger verzonden naar een hoofdpst, waar de gegevens verzameld en verwerkt worden (Ritzema et al., 2012).

2.2.1 Drukopnemer

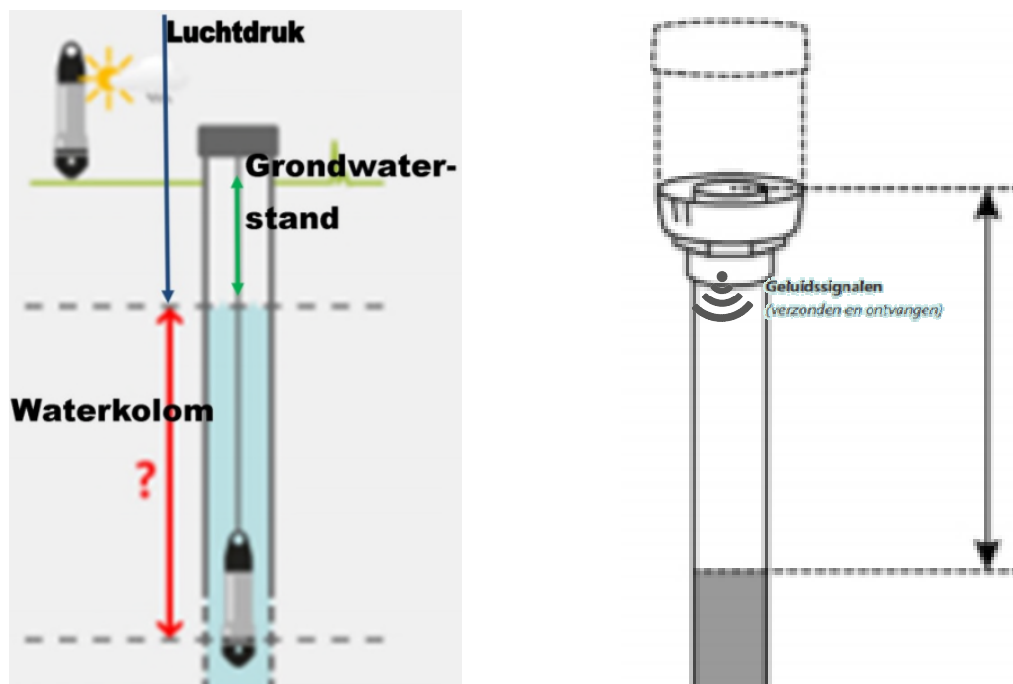
Een drukopnemer is de meest gangbare en meest gebruikte sensor waarmee de waterdruk kan worden bepaald. Allereerst kan een drukopnemer op de infiltratieleiding naar een infiltratieput worden geplaatst om de infiltratiedruk te bepalen. In leidingen treedt drukverlies op, waardoor een drukopnemer bij voorkeur zo dicht mogelijk op de bron wordt geplaatst. Zo wordt ook de daadwerkelijke infiltratiedruk gemeten. Een drukopnemer bij de bron kan zo ingepast worden dat de stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket wordt gemonitord als de bron niet infiltreert. De meest gangbare manier om de stijghoogte van grondwater te bepalen is om een drukopnemer met een kabel in een put of peilbuis te plaatsen onder het minimaal te meten waterniveau. De drukopnemer bestaat uit een membraan die het drukverschil tussen de drukken aan beide kanten van het membraan vertaald naar een signaal, wat

kan worden omgerekend naar een stijghoogte. De voorzijde van het membraan monitort de druk van de bovenliggende kolom water én lucht (Figuur 2-1; links). De druk aan de andere kant van het membraan verschilt per type druksensor:

- *verschildrukopnemer* (of luchtdruk gecompenseerde drukopnemer): de achterzijde van het membraan wordt blootgesteld aan dezelfde barometrische luchtdruk als van de luchtkolom aan het aardoppervlak middels een luchtslang. De verschildrukopnemer corrigeert het signaal daardoor direct op luchtdruk;
- *absolute drukopnemer*: de achterzijde van het membraan wordt blootgesteld aan een vacuüm. Zodoende is het signaal van een absolute drukopnemer een combinatie van de variatie van de stijghoogte en de variatie van de luchtdruk. Om de netto waterdruk te bepalen, moet gecompenseerd worden voor de luchtdruk, bijvoorbeeld middels een lokale of regionale luchtdrukmeting, of met een barometrische sensor in de nabijheid van de peilbuis of put.

2.2.2 Akoestische sensor

Bij ultrasone opnemers wordt gebruik gemaakt van een sensor die zich doorgaans boven het wateroppervlak bevindt en ultrasone geluidspulsen uitzendt (Bouma et al., 2012). Het wateroppervlak weerkaatst de puls, welke weer wordt opgevangen door de sensor (Figuur 2-1; rechts). De sensor bepaalt vervolgens de verstreken tijd tussen zenden en ontvangen en rekent deze om naar een stijghoogte.



Figuur 2-1: Schematische tekening van een drukopnemer in een peilbuis (links; Pleijter et al., 2015), en van een akoestische sensor op een peilbuis (rechts; naar LevelLog, z.d.).

2.2.3 Meetbereik en nauwkeurigheid

Voor geautomatiseerde methoden geldt in Nederland de minst beperkende van de volgende 3 criteria (NPR-ISO/TR 23211, 2009; in Ritzema et al., 2012):

- 3 mm
- 0,1% over de hoogte waarin het waterpeil fluctueert
- 0,01 % van de afstand van het meetpunt tot de waterspiegel.

In de praktijk blijken deze nauwkeurigheden vaak niet haalbaar.

Drukopnemers zijn verkrijgbaar met een uiteenlopend meetbereik. Gezien de toepassing van de infiltratieput, lijkt een meetbereik van 0-5 of 0-10 meter het meest geschikt. Hoe groter het meetbereik, des te kleiner de absolute meetnauwkeurigheid. De absolute meetnauwkeurigheid van een drukopnemer is vaak een percentage van het volledige meetbereik, bijvoorbeeld 0,05%. Om de meetnauwkeurigheid te vergroten kan men kiezen voor een druksensor met een kleiner meetbereik en deze net onder de te verwachten fluctuatietoneel hangen. De meetresolutie is meestal in de orde van grootte van millimeters of tienden van millimeters.

Een akoestisch meetsysteem kan een nauwkeurigheid halen van ongeveer 0,5 – 1 cm, met een resolutie van 1 mm. Het meetbereik hangt af van de diameter van de te monitoren buis (hoe dikker, hoe dieper) en bedraagt maximaal zo'n 45 meter. Akoestische sensoren zijn niet geschikt voor het meten van ondiepe grondwaterstanden (<25 cm).

2.2.4 Robuustheid

Een druksensor kan meestal een maximale druk aan voordat onherstelbare schade optreedt aan het diafragma. Dit is een maat voor de robuustheid van het instrument en wordt meestal uitgedrukt in een overschrijdingsfactor van het opgegeven meetbereik (Bouma et al., 2012). Druksensoren kunnen gevoelig zijn voor corrosie of contaminatie, omdat ze in direct contact staan met het water. Om corrosieproblemen te voorkomen, kan een speciale drukopnemer worden geplaatst die geschikt is voor de toepassing in corrosief milieu, zoals in brak of zout grondwater (Bouma et al., 2012). Drukopnemers kunnen ook gevoelig zijn voor temperatuursveranderingen, die de stijghoogte van het diafragma van de sensor kunnen beïnvloeden. Absolute drukopnemers zijn dubbel zo gevoelig voor dit risico, omdat er een extra barometrische sensor benodigd is. Een luchtslang van een verschildrukopnemer is daarnaast gevoelig voor verstopping en voor het optreden van een knik of condensvorming in de luchtslang (Bouma et al., 2012).

Bij akoestische sensoren is er geen sprake van corrosieproblemen, aangezien deze gebruikelijk niet in contact staan met het water. Wanneer deze wel in contact komen met water, bijvoorbeeld door extreem hoge grondwaterstanden, kunnen ze beschadigen en een fout signaal afgeven. Akoestische sensoren zijn niet gevoelig voor drift, en luchtdrukcompensatie is niet nodig (Bouma et al., 2012; LevelLog, z.d.). Het nadeel van een akoestische sensor voor een infiltratieput is dat de inrichting van de infiltratieput moet worden aangepast op de sensor. In een infiltratieput kan namelijk een druk worden gehanteerd met een stijghoogte die hoger is dan de bovenkant van de put. Daarnaast heeft een infiltratieput vaak een grotere diameter dan een gangbare peilbuis, waardoor het signaal van een akoestische sensor mogelijk wordt verstoord. Een mogelijke inrichting zou daarom zijn om een dunnere buis te plaatsen in de infiltratieput, en een schutkoker te plaatsen waarvan de bovenkant (>25 cm) boven de maximaal toegepaste stijghoogte uitkomt. Een akoestische sensor moet in een dichte meetbuis worden geïnstalleerd of de meetbuis zelf afsluiten omdat naden, vervuiling en insecten de metingen kunnen verstoren. Wel is daarbij een ontluchter vereist om de lucht in de peilbuis te laten communiceren met de buitenlucht.

2.2.5 Betrouwbaarheid

Voordelen van drukopnemers zijn de betrouwbare automatische registratie van gegevens, en de ruime variatie van de meetfrequentie die kan worden gehanteerd (0,5 seconden tot 3 weken) (Bouma et al., 2012). Met name hoogfrequente metingen zijn

geschikt voor het monitoren van de capaciteit van een infiltratieput. Druksensoren hebben echter ook nadelen. Ze kunnen significante afwijkingen vertonen, welke in de grootteorde van centimeters kunnen liggen. Deze afwijkingen zijn groter dan de voorschriften NEN-normen en kunnen worden veroorzaakt door (Von Asmuth, 2010):

- Drift. Het signaal van de druksensor kan in de loop van de tijd drift vertonen, m.a.w. het nulpunt van de sensor kan in de loop van tijd verschuiven. Drift van barometrische sensoren kan men uitsluiten door betrouwbare regionale luchtdrukmetingen van bijvoorbeeld het KNMI te gebruiken voor de luchtdrukcompensatie. Het nadeel is echter dat deze metingen pas na een dag beschikbaar zijn en er lokale luchtdrukvariaties kunnen optreden, met name wanneer het KNMI-station ver verwijderd is van de infiltratieput (Bouma et al., 2012).
- Wanneer men kiest voor de verschildrukopnemer voor de luchtdrukcompensatie, kan verstopping of condensvorming leiden tot onvoldoende compensatie, waardoor de luchtdrukvariatie onbedoeld als waterdrukvariatie wordt geïnterpreteerd. Wanneer men kiest voor een absolute drukopnemer, is een extra barometrische druksensor benodigd voor de luchtdrukcompensatie, waardoor de potentiële meetfout als gevolg van afwijkingen in de sensoren verdubbelt, en de nauwkeurigheid reduceert (Bouma et al., 2012).

Bij druksensoren is de temperatuur benodigd om de dichtheid van het water te berekenen en op basis daarvan de gemeten druk om te rekenen naar een stijghoogte. Bij akoestische sensoren betekent elke graad temperatuurafwijking circa 0,17% afwijking in de geluidssnelheid. Omdat de metingen van beide typen sensoren moeten worden gecorrigeerd voor temperatuurinvloeden, zijn ze tevens uitgerust met een temperatuursensor. Het meetbereik en de meetnauwkeurigheid van temperatuursensoren zijn daarom ook belangrijke aandachtspunten bij de aanschaf van de meetapparatuur. Wanneer de temperatuur zich buiten het meetbereik van de temperatuursensor bevindt, zijn de stijghoogtemetingen onbetrouwbaar.

2.2.6 Kosten

Bouma et al. (2012) hebben een overzicht gemaakt van indicatieve eenheidsprijzen voor de monitoring van de stijghoogte bij uitbesteding (Figuur 2-2). De goedkoopste optie is om enkel de stijghoogte van een infiltratieput semi-automatisch te monitoren. Dit zou neerkomen op grofweg €1.150,- aan investeringskosten (aanschaf en installatie datalogger en barometrische logger) en €210,- per jaar voor dataverzameling en validatie. Absolute drukopnemers zijn doorgaans goedkoper dan verschildrukopnemers, maar vereisen een barometrische logger.

De toepassing van volledig automatische monitoring met telemetrische data-uitwisseling is echter gewenst om de prestatie van de infiltratieput ook op afstand te kunnen monitoren. De investeringskosten zullen daarmee ongeveer verdubbelen tot €2.400,-, en de operationele kosten zullen toenemen tot €300,- per jaar. Omdat een infiltratieput gevoeliger is voor verstopping dan een peilbuis, en omdat de prijzen indicatief zijn voor het prijspeil van 2012, zullen de monitoringskosten en onderhoudskosten per jaar hoger zijn dan is vermeld in Figuur 2-2.

Aanleg peilbuizen

Installeren freatische peilbuis (tot 5 meter)	300	€ per stuk
Installeren peilbuis eerste watervoerend pakket (diepte 25 meter)	1.750	€ per stuk
Aanschaf en installatie datalogger, inclusief vaste uitleeskabel	700	€ per stuk
Aanschaf en installatie barometrische logger	450	€ per stuk
Aanschaf en installatie telemetrie (bovenop kosten sensor)	1.250	€ per stuk

Exploitatie

Handmatig uitlezen (24x/jaar) + uitwerken en externe opslag gegevens met ontsluiting via internet	+/- 600*	€ per peilbuis per jaar
Dataloggers: Dataverzameling en validatie (2x/jaar) + uitwerken en externe opslag gegevens met ontsluiting via internet	210	€ per peilbuis per jaar
Telemetrie: Dataverzending en validatie + uitwerken en externe opslag gegevens met ontsluiting via internet, inclusief batterijwissel elke twee jaar en een jaarlijkse controleronde (twee keer per jaar voor de helft van de peilbuizen voor bijvoorbeeld het verhelpen van storing)	300	€ per peilbuis per jaar

*kosten zijn erg afhankelijk van de dichtheid van het meetnet (reistijd tussen de meetpunten) en kunnen bij inzet eigen (veld)medewerkers fors goedkoper.

Onderhoud

Schoonmaken filter (spoelen/afpompen peilbuis)	kosten sterk afhankelijk van noodzakelijke frequentie en aantallen per keer (schaalvoordelen). Indicatie: voor 160 peilbuizen binnen een stad 10.000 per schoonmaakronde.
Hoogtemeting peilbuis (NAP)	kosten sterk afhankelijk van noodzakelijke frequentie, meetmethode en aantallen per keer (schaalvoordelen). Indicatie: Waterpassing voor 160 peilbuizen in stedelijk gebied circa 15.000

Figuur 2-2: Indicatie voor de aanleg, exploitatie, en onderhoud van een grondwatermeetnet (prijsspeil 2012, bij uitbesteding en exclusief BTW) (Bouma et al., 2012).

2.2.7 Aanvullende monitoring naast stijghoogtebepaling

Integratie van temperatuursensoren is niet alleen waardevol voor het corrigeren van de stijghoogte, maar geeft ook meer inzicht in de infiltratiecapaciteit die varieert met de viscositeit van het water. De temperatuurmeting in een akoestische sensor berust echter op de lucht als medium, waardoor alsnog een extra sensor benodigd is die de temperatuur en dus de viscositeit van het water accuraat kan bepalen.

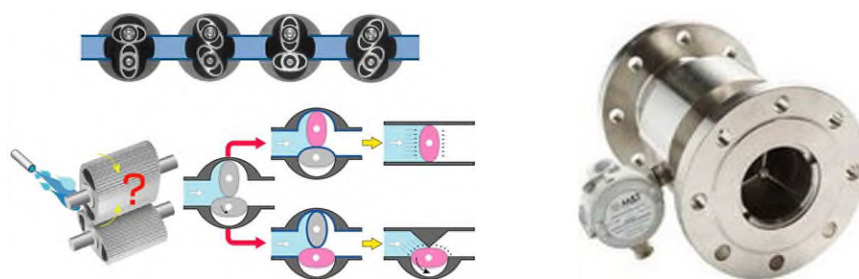
Druksensoren kunnen tevens uitgerust zijn met een geïntegreerde elektrische geleidbaarheidssensor (EGV-sensor of EC-sensor). Daarmee kan men corrigeren voor dichtheidsverschillen die het gevolg zijn van variaties in opgeloste stoffen. Daarnaast geeft het meer inzicht in de algehele kwaliteit van het infiltratiewater en de verstoppingspotentie van de put. Indien niet wordt gekozen voor een druksensor met geïntegreerde EGV-sensor, wordt sterk aanbevolen een losse EGV-sensor te installeren om de geleidbaarheid, en daarmee de algehele waterkwaliteit, van het infiltratiewater te monitoren.

2.3 Infiltratiedebiet

Het infiltratiedebiet kan empirisch benaderd worden vanuit de infiltratiedruk. Deze methode is echter niet nauwkeurig genoeg voor een continue monitoring van het infiltratiedebiet. Ook kunnen de draaiuren van de pomp in combinatie met de druk in de persleiding gebruikt worden om het debiet te bepalen. Na de pomp zit echter vaak een overstort, waardoor niet al het debiet dat de pomp produceert ook resulteert in infiltratie, waardoor deze monitoringsmethode omslachtig is. Voor een betrouwbare en nauwkeurige continue monitoring, is een debietmeter vereist. Er is een breed scala aan debietmeters. Hieronder volgt een overzicht van verschillende soorten debietmeters die doorgaans voor relatief heldere vloeistoffen worden gebruikt en nauwkeurig genoeg zijn voor verrekensmetingen, m.a.w. voor ijkwaardig verkeer waarover nauwkeurig verrekend moet worden, zoals voor drinkwaterdistributie. Een uitleg van overige debietmeters is gegeven in Bijlage I.

2.3.1 PD-meters en turbine debietmeters

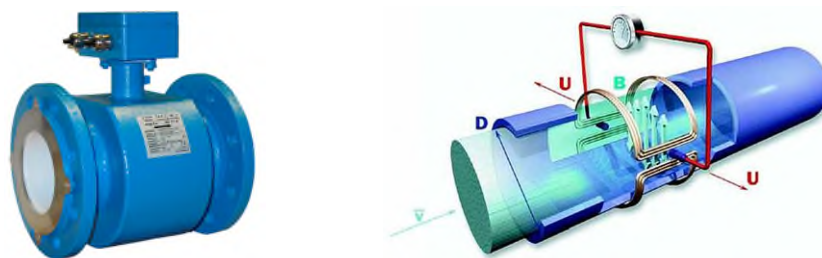
Bij Positive Displacement meters (PD-meters) wordt een onderdeel verdrongen door de te meten vloeistof in de leiding. Een turbine debietmeter heeft een turbine/rotor die axiaal geplaatst is t.o.v. de stroming. De turbine gaat sneller draaien bij hogere stroomsnelheden. Debietmeters met een paddle wheel, welke parallel staan aan de stroomrichting, zijn tevens geschikt voor kleine debieten in laag-visceuze vloeistoffen (Flowmeters, 2019).



Figuur 2-3: Principe van een PD-meter (links; Flowmeters, 2019) en een turbine debietmeter (rechts; A-B-T, z.d.).

2.3.2 Elektromagnetische debietmeter

De methode van een elektromagnetische debietmeter berust op een magnetisch veld dat met elektroden wordt opgezet aan de binnenkant van een elektrisch geïsoleerde leiding. Wanneer water met opgeloste stoffen door de leiding stroomt ontstaat er een reactiespanning op de elektroden die proportioneel is met de stroomsnelheid (Flowmeters, 2019).

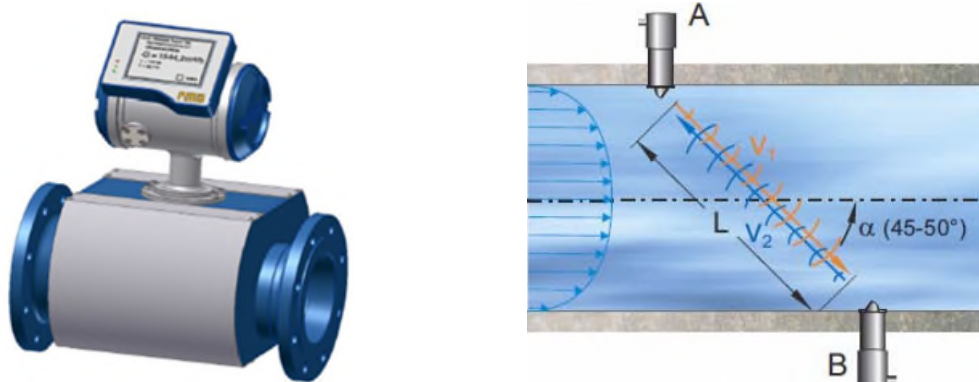


Figuur 2-4: Elektromagnetische debietsensor (links) en het meetprincipe (rechts) (Flowmeters, 2019). $U = v \cdot B \cdot D$, waarbij U = gemeten spanning door elektroden, v = stroomsnelheid, B = magnetische veldsterkte, en D = interne leidingdiameter.

2.3.3 Ultrasonische debietmeter met looptijdverschilmethode

Ultrasonische debietmeters bestaan in verschillende varianten, waarvan de looptijdverschilmethode de meest nauwkeurige methode is. Bij de looptijdverschilmethode wordt geluid onder een hoek door de vloeistof uitgezonden naar bovenstrooms en benedenstrooms. Geluid reist sneller met de stroom mee dan tegen de stroom in. Het looptijdverschil tussen beide signalen wordt zeer nauwkeurig en betrouwbaar gemeten, en is proportioneel met de snelheid van het water (Flowmeters, 2019; Eijkelkamp, 2012).

Een ultrasonische debietmeter kan bestaan uit meerdere kanalen, m.a.w. meerdere geluidspaden tussen transducers. Daardoor kan meer informatie worden verkregen over stroomsnelheden, flowprofielen, laminaire of turbulente stroming, vortexen, en correcties daarvoor, wat resulteert in een grotere nauwkeurigheid. Ultrasonische debietmeters met meerdere (>4) kanalen zijn met name geschikt voor verrekeningsmetingen. Kalibratie van ultrasonische meters vindt plaats met een gelijkwaardige vloeistof vóór de ingebruikname. Als referentiemethode wordt vaak een turbine flowmeter gebruikt, welke op hun beurt weer gekalibreerd worden met compact prover of prover loop (Flowmeters, 2019).



Figuur 2-5: Ultrasonische debietmeter (links; Flowmeters, 2019) en het meetprincipe van de looptijdverschilmethode (rechts; Eijkelkamp, 2012).

2.3.4 Nauwkeurigheid, robuustheid, en betrouwbaarheid

PD-meters zijn de meest nauwkeurige meters voor viskeuze vloeistoffen, en turbinemeters hebben een grote nauwkeurigheid voor laag-viskeuze vloeistoffen. Beide meters worden daarom vaak ingezet voor ijkwaardige metingen. De bewegende delen van turbine debietmeters en PD-meters zijn echter gevoelig voor slijtage en vereisen daardoor meer onderhoud.

Een elektromagnetische debietmeter bevat geen bewegende delen die gevoelig zijn voor slijtage, en er kan geen obstructie plaatsvinden van de vloeistof. De magnetische veldsterkte is echter niet homogeen verdeeld over de leiding, het flowprofiel kan verstoord zijn, en zwevend stof kan voor verschillende soorten ruis zorgen in het signaal. Bovendien moet de vloeistof elektrisch geleidend zijn. Het beoogde infiltratiewater heeft een zeer lage concentratie van opgeloste stoffen om te voldoen aan het infiltratiebesluit en de operationele eisen. De elektromagnetische meetmethode is toepasbaar voor leidingdiameters van 2 mm tot 3 meter, drukken tot 1000 bar, en temperaturen tot 180°C (Flowmeters, 2019). Een geijkte ('fabrieksgekalibreerde') elektromagnetische debietmeter kan een nauwkeurigheid halen van 0,5% van de meetwaarde (De Brauw et al., z.d.). Door deze hoge nauwkeurigheid is een

elektromagnetische debietmeter een van de meest gebruikte en populairste debietsensoren. Voor deels gevulde leidingen is de verwachte nauwkeurigheid van een elektromagnetische debietsensor echter ca. 50%, mits de sensor vrij is van vervuiling (De Man, 2008). Bij infiltratieputten is het niet ongebruikelijk dat een leiding slechts deels gevuld is met water.

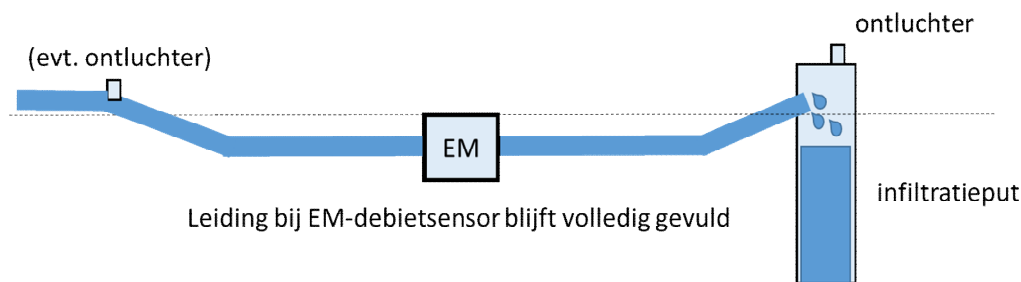
Ultrasonische debietmeters zijn breed toepasbaar en meten ook bij niet volledig gevulde leidingen. Bovendien is de monitoring onafhankelijk van druk, temperatuur, viscositeit, elektrische geleidbaarheid, en stromingsrichting, ongevoelig voor slijm en sedimentatie, en is er een vrije doorlaat voor de vloeistof zonder bewegende delen of obstructies. Een ultrasone sensor is driftvrij, en kan een nulflow (stabiel) meten. Een ultrasone debietmeter kan geïntegreerd worden in de wand van een leiding, maar er bestaan ook opklembare meters die later op een bestaande leiding kunnen worden aangebracht. Het voordeel van opklembare meters is dat een proces niet stilgelegd hoeft te worden en er niet in een bestaande leiding hoeft te worden gezaagd. De nauwkeurigheid van ultrasone debietsensoren met de looptijdverschilmethode wordt beschreven als redelijk tot goed en is sterk verbeterd t.o.v. de eerste versies, met name door de invoering van betere en meer transducers en door DSP (Digital Signal Processing). Hierdoor zijn ze de laatste jaren zeer populair geworden. Een opklembare ultrasone debietsensor die berust op de looptijdverschil methode is doorgaans 1-kanaals. Geïntegreerde varianten kunnen meerdere kanalen hebben (2-32) en zijn daardoor nauwkeuriger en hebben de voorkeur bij nog te realiseren leidingen (Flowmeters, 2019). Bovendien hoeft men bij geïntegreerde sensoren geen rekening te houden met bijvoorbeeld de dikte en het materiaal van de leiding.

De Brauw et al. (z.d.) hebben de prestatie van debietsensoren in deels gevulde leidingen nader onderzocht met als referentie een geijkte elektromagnetische debietsensor met een maximale afwijking van 0.5%. De NIVUS ACCP ultrasone debietsensor presteert voor gedeeltelijk gevulde leidingen beter dan eerder geteste debietsensoren, met een hoge precisie en een maximale afwijking in betrouwbaarheid (nauwkeurigheid) van 2% (De Brauw et al., z.d.). Voor volledig gevulde leidingen is de debietsensor minder nauwkeurig. Deze prestatie is gebaseerd op een debietrange van 200 tot 480 m³/h met troebel grondwater en minimaal 19 cm waterdiepte in de leiding. Het is niet bekend hoe deze prestatie zal veranderen wanneer relatief schoon en helder zoet water met een lager debiet door en een lagere waterdiepte door de leiding zal stromen, wat gebruikelijker is voor infiltratieputten. Bovendien is de NIVUS ACCP een ultrasone debietsensor die meet volgens de cross-correlatiemethode en niet volgens de looptijdverschilmethode.

Op basis van de gebruikte literatuur blijven er twee geschikte mogelijkheden over:

- Deels gevulde leidingen toestaan, en gebruik maken van een ultrasone debietsensor die meet volgens de looptijdverschilmethode;
- Het leidingwerk aanpassen zodat leidingen volledig gevuld blijven, en gebruik maken van een geijkte elektromagnetische debietsensor (Figuur 2-6). In gevallen waarbij het leidingwerk onder de minimale lokale grondwaterspiegel ligt, zal de infiltratieleiding bovendien niet droogvallen.

Een debietsensor wordt bij voorkeur ver genoeg vóór een druksensor geplaatst, daar een debietsensor de drukverdeling in de leiding, en dus de meting van een druksensor, kan beïnvloeden. Daarnaast moet ook rekening worden gehouden met goede in- en uitstroomcondities, waar extra leidingwerk bij kan komen kijken. Deze condities worden doorgaans opgelegd door de producent van een debietsensor.



Figuur 2-6: Mogelijke aanpassing van leidingwerk om te voorkomen dat de leiding bij een elektromagnetische debietsensor (EM) niet volledig gevuld is.

2.3.5 Kosten

PD-meters en turbinemeters zijn gemoeid met hogere onderhoudskosten. Bij grootschalige ijkwaardige metingen kan de hogere nauwkeurigheid echter wel opwegen tegen de hogere onderhoudskosten. Dit is bijvoorbeeld het geval bij turbinemeters die worden toegepast bij de distributie van olie, waar een kleine onnauwkeurigheid van het gemeten debiet kan zorgen voor een groot bedrag aan misgelopen winst. Voor kleinschaligere toepassingen zijn andere meettechnieken zoals elektromagnetische of ultrasone debietsensoren echter te prefereren. In 2017 en 2018 zijn door KWR reeds projecten uitgevoerd waarbij elektromagnetische debietsensoren ('MUT1100J Sensor') en ultrasone debietsensoren ('Arad Octave 6"-310 m³/h') zijn gebruikt met een prijs van circa €1.500,- per stuk, exclusief BTW. In de praktijk zal deze kostenpost hoger uitvallen omdat de sensor ook geïnstalleerd moet worden. Deze kosten zullen met name hoger uitvallen als de sensor achteraf (na realisatie van het infiltratiesysteem en al het leidingwerk) wordt aangebracht. Daarnaast moet bij de installatie rekening worden gehouden met goede in- en uitstroomcondities, waar extra leidingwerk, en dus ook een extra kostenpost, bij kan komen kijken.

2.4 Waterkwaliteit

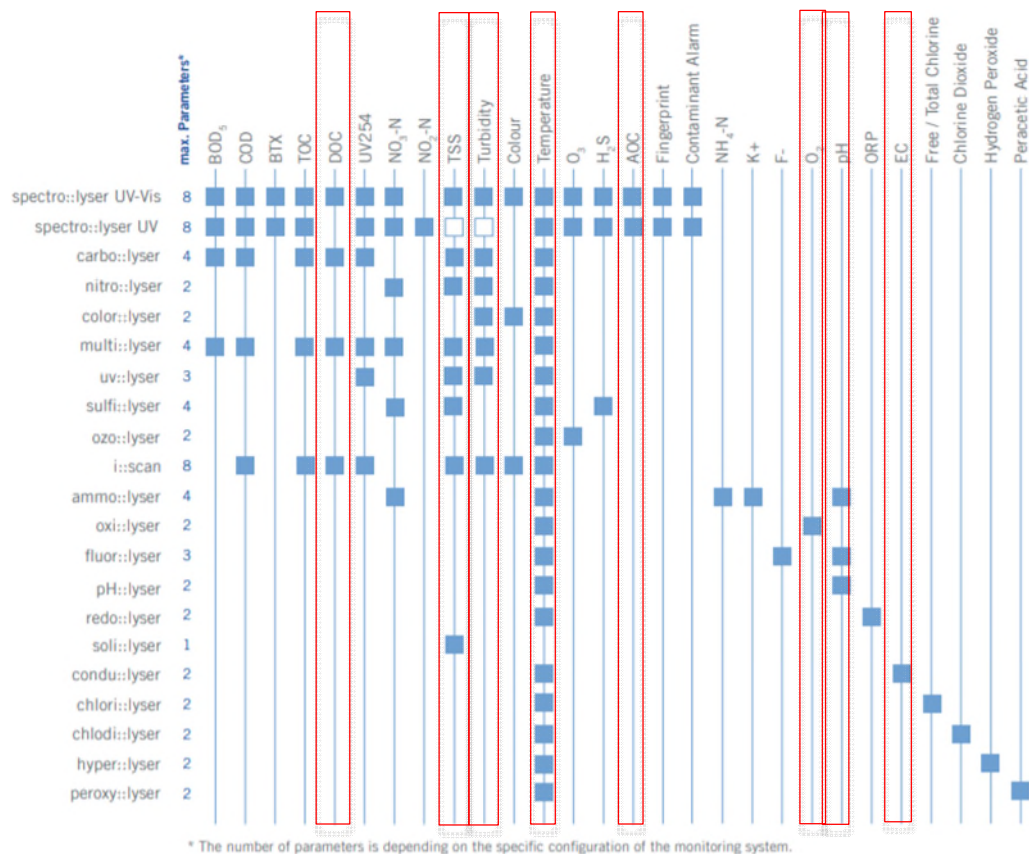
De prioriteit van te monitoren waterkwaliteitsparameters bij relatief kleinschalige infiltratiesystemen moet allereerst uitgaan naar zwevend stof/troebelheid/MFI en DOC/AOC. De overige parameters die nuttig zijn voor de bepaling van putverstopping (Fe, Mn, O₂, pH, SI_{kalk}, Ca, Mg, EGV en TDS; zie ook de rapportage van deelvraag 1: KWR 2020.158) kunnen worden beschouwd als aanvullend voor de relatief kleinschalige infiltratiesystemen die worden beoogd in de COASTAR-casus Cities2Recharge.

Er bestaan verschillende sensoren en technieken om de waterkwaliteit continu te monitoren. De meest elegante manier om meerdere waterkwaliteitsparameters continu te monitoren is om met slechts één sensor of enkele sensoren meerdere parameters te monitoren, zoals bijvoorbeeld de spectro::lyser UV-Vis van s::can (Figuur 2-7). Sensoren die berusten op optische methodes zoals spectrometrie zijn de betrouwbaarste, gangbaarste, voordeligste, en vaak ook de nauwkeurigste methodes om de waterkwaliteit te bepalen (S::can, 2019). Bovendien vereisen spectrometers vrijwel geen onderhoud, en zijn ze robuust en duurzaam.

Een waterkwaliteitssensor kan in situ in de waterleiding worden geplaatst. Dit zorgt echter voor extra weerstand in de leiding en meer ongemak bij onderhoud. Het alternatief is om een modulaire bypass flow cell te installeren waarop verschillende waterkwaliteitssensoren kunnen worden aangesloten. Een vergelijking van een inline-oplossing en een bypass flow cell is gegeven in Tabel 2-1, gebaseerd op informatie die is verkregen van Qsenz, een Nederlandse leverancier van s::can-producten.

De pipe::scan van s::can is een voorbeeld van een modulaire multi-parameter spectrofotometer die geschikt is om de waterkwaliteit te monitoren in (drink)waterleidingen onder druk (tussen de 1 en 10 bar). De pipe::scan kan troebelheid, TOC, EGV, en pH tegelijkertijd monitoren. Deze waterkwaliteitsparameters kunnen echter twee keer zo voordelig worden gemonitord met by-pass flowcellen voor troebelheid, TOC, en pH, aangevuld met een druksensor met geïntegreerde EGV-sensor (Tabel 2-1). De parameters die in deze beide gevallen nog ontbreken zijn Fe & Mn, SI, en O₂. O₂ kan met een aanvullende sensor worden gemonitord, welke in een flowcell eveneens voordeliger uitpakt dan bij de inline-oplossing. Fe & Mn kunnen met zogenaamde analysers worden gemonitord. Deze sensoren zijn echter erg prijzig en voegen reagentia toe aan het water t.b.v. de monitoring. De hogere kosten die zijn gemoeid met de monitoring van Fe en Mn, en het geringe belang van pH- en O₂-metingen t.o.v. de overige parameters, maakt de monitoring van deze parameters minder aantrekkelijk voor relatief kleinschalige infiltratiesystemen. Voor SI_{kalk} is geen inventarisatie gedaan maar vermoedelijk weegt het belang van deze parameter ook niet op tegen de kosten en moeite die met de monitoring gemoeid zijn, aangezien voor SI zowel calcium- en carbonaationen als de pH gemonitord moeten worden.

De EGV en temperatuur kunnen daarentegen eenvoudig worden gemonitord met respectievelijk temperatuur- en EGV-sensoren, die eventueel zijn geïntegreerd in een drukopnemer, wat voor weinig extra kosten zorgt. De monitoring van **troebelheid** en **TOC/DOC** als aanvullende waterkwaliteitsparameters heeft een grote meerwaarde voor het bepalen van de verstoppingspotentie, maar kan vanwege de relatief hoge kosten niet mogelijk zijn bij de relatief kleinschalige infiltratiesystemen die zijn beoogd binnen de casus Cities2Recharge. Een voorbeeld van een sensor die beide parameters (inclusief AOC) meet, is de spectro::lyser van s::can (Figuur 2-7 en Figuur 2-8). Wanneer een dergelijke sensor kan worden gekoppeld aan hetzelfde monitoringssysteem als voor de debiet- en druksensoren, kan deze monitoring mogelijk ook opwegen tegen de kosten die ermee gemoeid zijn.



Figuur 2-7: Parameters die door verschillende sensoren van s::can kunnen worden gemonitord. De met rood omkaderde parameters zijn in ieder geval van belang voor deze studie.



Figuur 2-8: Pipe::scan (links: S::can, 2019) en spectro::lyser (rechts: <https://www.s-can.at/spectrolyserv3>) van s::can.

Tabel 2-1: Indicatieve prijzen voor waterkwaliteitsmetingen gebaseerd op informatie die per mail is verstrekt door de Qsenz, een Nederlandse leverancier van s::can-producten.

	Inline		By-pass flowcells	
	Troebelheid, TOC, EGV, pH (pipe::scan)	16,7 k€	Troebelheid en TOC (i::scan Y05 + flowcell) EGV (druksensor)	7,8 k€ *
	O ₂ (InsitelG 17L incl 1000)	8,9 k€	pH (pH::lyser + flowcell)	1,4 k€
	Fe (ASA Chemscan miniFe)	11,0 k€	O ₂ (oxi::lyser + flowcell)	2,4 k€
	Mn (ASA Chemscan miniMn)	11,0 k€	Fe (ASA Chemscan miniFe)	11,0 k€
	Monitoringssysteem (con::cube)	6,9 k€	Mn (ASA Chemscan miniMn)	11,0 k€
			Monitoringssysteem (con::cube)	6,9 k€
Totaal	54,5 k€		40,4 k€	
TOC, EGV, en troebelheid	16,7 k€		7,8 k€	

* De voorkeur gaat uit naar een EGV-sensor die is geïntegreerd in een druksensor.

2.4.1 Periodieke monitoring

Vanwege de hoge kosten van continue monitoring van de waterkwaliteit, zal dit doorgaans niet worden toegepast bij relatief kleinschalige infiltratiesystemen. Daarom wordt sterk aanbevolen om periodiek, mogelijk in het kader van de vergunning, de volledige waterkwaliteit te analyseren om de prestatie van een infiltratieput beter te kunnen verklaren (zie ook de rapportage van deelvraag 1; KWR2020.158). Daarvoor moet in elk geval een bemonsteringspunt worden opgenomen in het infiltratiesysteem die het mogelijk maakt om het infiltratiewater te bemonsteren. Daarnaast kunnen aanvullende bemonsteringspunten worden opgenomen om het opgevangen hemelwater (vóór een voorzuiveringssysteem) en het eventueel teruggewonnen water te kunnen bemonsteren.

2.5 Weergegevens

Weergegevens kunnen, net als waterkwaliteitsgegevens, de prestatie van een infiltratieput beter verklaren (zie ook de rapportage van deelvraag 1; KWR2020.158). Men kan overwegen om een neerslagmeter te plaatsen bij het infiltratiesysteem om de lokale neerslaggegevens nauwkeurig in kaart te brengen. Maar weergegevens zijn ook online beschikbaar voor verschillende weerstations verspreid over Nederland via bijvoorbeeld het KNMI. Bovendien kunnen de temperatuurgegevens van het KNMI uitkomst bieden als de temperatuur van het infiltratiewater niet met een drukopnemer of aparte temperatuursensor wordt gemonitord.

2.6 Telemetrie

Bij telemetrische gegevensverzameling worden gegevens via een telecommunicatieverbinding verzonden naar een hoofdpst. Dit kan real-time gebeuren of met een vooraf ingesteld tijdsinterval. Telemetrische meettechnieken bieden meer mogelijkheden en flexibiliteit dan autonome dataloggers (Bouma et al., 2012). De werking kan namelijk op afstand worden gecontroleerd, waardoor dataverlies wordt gereduceerd. Daarnaast kunnen de meet- en verzendfrequentie op afstand worden ingesteld. Voor infiltratieputten is het met name interessant om tijdens een periode van infiltratie frequent(er) te meten. Ook kunnen grenswaarden worden ingesteld waarbij automatische meldingen worden verstuurd bij niveauoverschrijdingen. Zo kan tijdig worden ingegrepen om putverstopping te reduceren. Om een goede werking te garanderen moeten sensoren met een telemetrische gegevensverzameling even frequent in het veld worden bezocht als sensoren met autonome dataloggers (Bouma et

al., 2012). Een dergelijk bezoek is echter effectiever bij een telemetrisch systeem, aangezien men op afstand mee kan kijken en doelmatiger kan handelen.

Het benodigde stroomverbruik van telemetrische apparatuur is een aandachtspunt. Verkeerde instellingen of een zwak netwerkbereik kan namelijk resulteren in een korte levensduur van de batterij van een telemetrische systeem. Een nadeel van een telemetrische gegevensverzameling is dat het wordt gekenmerkt door hogere kosten ten opzichte van autonome dataloggers door de benodigde extra apparatuur. Daarnaast moeten bijvoorbeeld stalen schutkokers worden vermeden omdat deze het telemetrische signaal kunnen verstoren.

3 Sturing op drempelwaarden

3.1 Infiltratieweerstand

De infiltratieweerstand is de belangrijkste parameter waar de infiltratiesystemen in ieder geval op moeten worden gestuurd (zie ook de rapportage van deelvraag 1; KWR 2020.158). Tijdens de dagelijkse bedrijfsvoering moeten infiltratiefilters periodiek worden teruggespoeld ('gebackflusht') om verstopping zoveel mogelijk te reduceren. Een infiltratiesysteem wordt doorgaans zo ingeregeld dat de bronfilters steeds worden teruggespoeld na infiltratie van een bepaald volume water.

Met terugspoelen kan doorgaans niet de volledige verstopping worden teruggedraaid, waardoor de capaciteit naar verloop van tijd alsnog zal afnemen. Aanvullend periodiek putonderhoud (regeneratie) is daarom vereist zodra de capaciteit te veel is afgenomen.

In het handboek van Houben & Treskatis (2003) wordt gesteld dat een put niet meer voldoende presteert en moet worden geregenereerd als de capaciteit 70% van de oorspronkelijke capaciteit bedraagt, m.a.w. als de infiltratieweerstand met 43% is toegenomen. Pyne (2005) stelt dat in het verleden zelfs als richtlijn een put moest worden geregenereerd als de capaciteit 75 tot 85% van de oorspronkelijke capaciteit bedroeg, m.a.w. als de infiltratieweerstand slechts met 18 tot 33% is toegenomen.

In Nederland wordt echter vaker 50% van de oorspronkelijke capaciteit gebruikt als drempelwaarde, m.a.w. als de infiltratieweerstand is verdubbeld. Wanneer een infiltratieput te laat wordt geregenereerd, kunnen veel poriën in de putwand, de omstorting, of het watervoerend pakket al zijn verstopt. Preventief handelen heeft als voordeel dat het verstoppingsmateriaal tijdig wordt verwijderd in een vroeg stadium van de verstopping. Preventief onderhoud kan in principe worden uitgevoerd zodra de infiltratieweerstand evident toeneemt tussen twee infiltratiecycli. Maar de capaciteit van de put zal beter behouden blijven als al eerder onderhoud wordt uitgevoerd (Pyne, 2005). Een vast tijdschema voor rehabilitatie is daarom mogelijk een betere strategie om putverstopping te voorkomen. De drempelwaarde van de infiltratieweerstand is daardoor een afweging tussen de toename van de infiltratiedruk, de afname van het infiltratiedebiet, de frequentie van terugspoelen van filters, en de frequentie van regeneratie, die voor iedere casus apart moet worden bepaald op basis van ervaring.

Daarnaast kan de capaciteit van de put bij ingebruikname lager zijn dan de opgeleverde capaciteit die is gemeten bij de pompproef tijdens de realisatie. Dit maakt het lastig te bepalen of de afname t.o.v. de opgeleverde capaciteit volledig is te wijten aan putverstopping.

Doordat het per locatie en per casus zal verschillen wanneer regeneratie uitgevoerd moet worden, en wanneer dus een alarm moet worden uitgezonden naar de gebruiker en/of beheerder, is het lastig een vaste drempelwaarde te kiezen. Wel kan men op basis van de bestaande literatuur een waarschuwing uitzenden zodra de putcapaciteit is afgenomen tot bijvoorbeeld 75% of 50%. Deze drempelwaarden kunnen dan op basis van de praktijkervaring worden bijgesteld naar het gewenste niveau.

3.2 Waterkwaliteit

In de vorige hoofdstukken is toegelicht dat EGV, troebelingsgraad, en DOC, de gewenste waterkwaliteitsparameters zijn die naast de temperatuur kunnen worden gemonitord om nog meer inzicht te krijgen in de verstoppingspotentie. Voor EGV is dit vanwege de relatief voordelige en eenvoudige meetmethode en voor troebelingsgraad en DOC vanwege het feit dat dit de belangrijkste stuurparameters zijn voor waterkwaliteit bij infiltratieputten (Bonte, 2009). Voor deze parameters kunnen daarom ook drempelwaarden worden toegepast.

3.2.1 EGV

De EGV van infiltratiewater geeft informatie over de mogelijkheid voor het optreden van kleizwelling en kleidispersie, maar geeft ook een algeheel beeld van de hoeveelheid opgeloste stoffen in het infiltratiewater, en dus van de gehele waterkwaliteit. Daarmee bestaat de mogelijkheid om de EGV als grove preventieve parameter te gebruiken. De maximaal toegestane EGV is echter arbitrair en variabel per locatie. De drempelwaarde van deze parameter moet dus per locatie ingesteld worden.

3.2.2 Troebelingsgraad en DOC

In de rapportage van deelvraag 1 (KWR 2020.158) werd gesteld dat het infiltratiewater een maximale troebelingsgraad van 1 NTU en een maximale concentratie DOC van 2 mg/L mag hebben om respectievelijk fysische verstopping en biologische verstopping zoveel mogelijk te voorkomen. In de praktijk komt het echter regelmatig voor dat de troebelingsgraad of de concentratie DOC van infiltratiewater deze waarden overschrijden. Een troebelingsgraad vanaf 20 NTU en een concentratie DOC vanaf 10 mg/L worden pas echt zorgwekkend. Om te voorkomen dat bij iedere overschrijding van 1 NTU of 2 mg/L DOC een alarm wordt uitgezonden, zijn 20 NTU en 10 mg/L DOC dus gangbaardere drempelwaarden waarop moet worden gestuurd als een dergelijke sensor wordt ingebouwd.

4 Hemelwaterinfiltratiesystemen

Vier projecten komen in aanmerking voor de veldvalidatie van een monitoringssysteem:

1. Robert Fruinstraat (Rotterdam);
2. Waterplein Bellamyplein (Rotterdam);
3. Hoekse Lijn (Hoek van Holland);
4. Hoekse Lijn (Maassluis).
5. Maassluis West

4.1 Robert Fruinstraat

In de Robert Fruinstraat wordt hemelwater van de daken opgevangen en verzameld in een ondergrondse berging bestaande uit aaneengeschakelde in folie gepakte kratten. Het water wordt via deze kratten afgevoerd richting een zuiverende voorziening, zodat het met een grondwaterput kan worden geïnfiltreerd naar het eerste watervoerend pakket (NAP -16 tot -30 m). Daar zal zich een zoetwaterbel vormen. Uiteindelijk kan het water worden opgepompt om te gebruiken voor verschillende doeleinden.

4.1.1 Resultaten

De aanleg en koppeling aan een gescheiden stelsel levert de volgende resultaten op:

- In totaal kan circa 1400 m² via de regenpijpen aan de voorzijde van een gebouw worden aangesloten op een krattensysteem wat het water opvangt, en na zuivering gescheiden afvoert naar de bron.
- Aangenomen is dat minimaal 600 mm/jaar kan worden geïnfiltreerd, rekening houdend met het feit dat een deel van het water de afvoer niet bereikt (run-off coëfficiënt). Dat zou hier neerkomen op 850 m³ water.
- De kratten moeten binnen 48 uur leeg zijn. Uitgaande van een bui van 70 mm moet het systeem minimaal 100 m³ water kunnen bergen (lengte 260 m).

4.1.2 Planning

De werkzaamheden zijn voorzien in de tweede helft van 2020

4.2 Waterplein Bellamyplein

Het waterplein Bellamyplein is het eerste waterplein in Rotterdam. Uit de monitoring (2013-2017) volgt dat een groot deel van de tijd een laag water in de waterberging (lavakoffer) blijft staan en zodoende niet altijd de volledige berging beschikbaar is. Op 18 juli 2017 is een test uitgevoerd waarbij het hele waterplein is leeggepompt. Hieruit bleek dat periodiek leegpompen een effectief middel kan zijn om de infiltratiecapaciteit van het plein te verhogen en om te garanderen dat het geborgen water beschikbaar is. Met een diepe bron kan het water uit de lavakoffer naar de diepe ondergrond worden geïnfiltreerd en is de berging vaker (of eerder) beschikbaar.

4.2.1 Resultaat

De aanleg van de infiltratiebron zal ervoor zorgen dat de totale waterberging over een groter deel van het jaar beschikbaar is voor het opvangen van hemelwater.

4.2.2 Planning

De realisatie van de infiltratiebron vond plaats in het laatste kwartaal van 2019 en het eerste kwartaal van 2020. De bron is in het tweede kwartaal van 2020 operationeel.

4.3 Hoekse Lijn, Hoek van Holland

Tijdens de aanleg van het Hoekse Lijn metrotracé bij Hoek van Holland is bij neerslag ernstige wateroverlast opgetreden langs het tracé, wat heeft geleid tot onwenselijke storingen aan installaties van het spoorstelsel. Als oplossing is gekozen om het hemelwater af te voeren via diepinfiltratie met een extra overstortvoorziening op oppervlaktewater.

4.3.1 Resultaat

Het systeem bestaat uit:

- Een infiltratie- en transportdrain Ø160 mm BOB NAP +3,3m langs de noordzijde van de metrobaan
- Een infiltrerend en bergend cunet met infiltratieriool Ø600 mm BOB NAP +2,90 m die uitstroomt op de Krimssloot. De stelsels van Hoekse Lijn en aangrenzende H6-weg komen voor de Krimssloot bij elkaar en zijn op enkele punten onderling verbonden. Dit onderdeel vormt tegelijk de voorzuivering van het water richting de infiltratiepunten
- Vier verticale infiltratiepunten; ontwerp uitgangspunt debiet 7m³/uur per bron (filterlengte NAP -22m tot NAP -32 m, filter Ø 250 mm en k =35 m/dag). Stijghoogte ± NAP +0,5 m (onder invloed van getij).
- Continue monitoring van het infiltratiedebiet en de grondwaterstijghoogte op verschillende punten, en periodieke monitoring van de diepe grondwaterkwaliteit.

4.3.2 Fasering

De bronnen zijn in de 2e helft van 2018 geplaatst. In december 2018 zijn de monitoringsvoorzieningen geplaatst; deze zijn sinds januari 2019 operationeel.

4.4 Hoekse Lijn, Maassluis

Ook langs het Hoekse Lijn metrotracé bij Maassluis is tijdens de aanleg van het tracé ernstige wateroverlast opgetreden bij neerslag, wat in de naastliggende infiltratiesloot en in het spoortalud tot te hoge (grond)waterstanden heeft geleid. Daarom is gekozen om het drainagewater uit het spoortalud via een drain (noord) en een sloot (zuid) af te voeren via diepinfiltratie met een extra overstortvoorziening op oppervlaktewater. Overmatig hemelwater wordt via de sloot afgevoerd naar de Steendijkpolder.

4.4.1 Resultaat

Het infiltratiesysteem bestaat uit:

- Een onttrekkings- en transport drain Ø160 mm BOB NAP +2,5m (noordzijde) en afvoersloot BOB NAP +2,90 m (zuidzijde) die uitstroomt op de polder. Bezinkputten vormen de voorzuivering van het water richting de infiltratiepunten.
- Vier verticale infiltratiepunten; ontwerp uitgangspunt debiet 7m³/uur per bron (filterlengte NAP -22m tot NAP -32 m, filter Ø 250 mm en k =35 m/dag). Stijghoogte ± NAP +0,5 m (onder invloed van getij).
- Continue monitoring van het infiltratiedebiet en de grondwaterstijghoogte op verschillende punten, en periodieke monitoring van de diepe grondwaterkwaliteit.

4.4.2 Fasering

De bronnen zijn in de 2e helft van 2018 geplaatst. In december 2018 zijn de monitoringsvoorzieningen geplaatst; deze zijn sinds januari 2019 operationeel. In 2019 worden de drains aan de noordzijde gelegd en wordt de infiltratiesloot aan de zuidzijde aangepast tot afvoersloot.

4.5 Maassluis West

Maassluis West is gelegen tussen twee dijklichamen en is volledig opgehoogd met verontreinigde havenslib (baggerspecie) tot een hoogte van ca. 4 mNAP. Door de bodemverontreiniging is het aanleggen van nieuwe HWA riolen extra kostbaar, elke kuub ontgraving moet gesaneerd worden. Door de ligging zijn de lengtes van HWA riolen naar de haven relatief lang (evenwijdig aan de dijken in plaats van haaks op de dijk en direct naar de Nieuwe Waterweg). Hierdoor worden de diameters van HWA riolen extra groot en nemen de kosten exponentieel toe. Wetend dat de grote HWA riolen de klimaatveranderingen en de steeds vaker voorkomende piekbuien niet kunnen volgen verandert Maassluis van strategie, door de stad in te richten als spons. Een kansrijk alternatief voor de afvoer van het vrijkomende water van deze “stedelijke spons” is diepe infiltratie met grondwaterputten tot een diepte van ca. 25 á 35 meter.

Beoogd wordt om in een periode van 40 jaar geleidelijk 75 tot 150 bronnen te plaatsen en zo de klimaatveranderingen bij te houden. In de eindsituatie zal een afvoer van hemelwater van 1300 m³ per uur (normale omstandigheden: 2 mm/uur) tot 2600 m³ per uur ontstaan (4 mm/uur). Een bui van 96 mm kan hiermee in 24 tot 48 uur worden afgevoerd. In 2019 is besloten een pilot uit te voeren met één bron langs het Hoekse Lijn metrotracé. De komende 5 tot 10 jaar wordt een pilot met één of enkele bronnen uitgevoerd, gevolgd door de realisatie van de eerste 30 bronnen.

4.5.1 Resultaat

De aanleg van een diepte-infiltratie systeem, gekoppeld aan de HWA riolering van Maassluis, heeft een flink aantal voordelen. Een deel daarvan overschrijdt de gemeentegrens en het afvalwatersysteem. De belangrijkste voordelen:

- De afvoercapaciteit van het systeem neemt toe als er veel water aanbod is. Dit maakt het HWA systeem robuuster en kan het beter piekbuien afvangen. (Gemeente Maassluis en Hoogheemraadschap Delfland);
- Minder belasting van de zuivering en het gezamenlijke persleidingensysteem doordat er minder water naar de zuivering gaat. Het aantal overstorten van vuil rioolwater op het oppervlaktewater zal daardoor in het hele gebied van de Groote Lucht afnemen. (De Groote Lucht);
- Gespreide afvoer van hemelwater vlak bij de bron, waardoor vergroting van HWA riolen door de hele stad minder noodzakelijk is. Toekomstige besparing op investeringen. (Gemeente Maassluis);
- Diepe infiltratie kan de verzilting van het achterland reduceren. In de hooggelegen delen van Maassluis kan dit door middel van vrij verval en zijn operationele kosten minimaal. Een uitbreiding van dit systeem langs de Nieuwe Waterweg kan helpen verzilting in het hele achterland te reduceren. (Hoogheemraadschap van Delfland, Niet Waterweg gemeenten, Rijkswaterstaat, en Provincie Zuid-Holland).

4.5.2 Fasering

Fase 1 is een pilot: het slaan van één of enkele infiltratiebronnen inclusief filterende voorzieningen. Hierbij willen we lering trekken voor de volgende fasen op het gebied van realisatie en optimale werking. Fase 2 en 3 zijn twee clusters van c.a. 15 palen met filtervoorziening die gekoppeld worden aan de Hemelwaterleiding Maassluis West die nu in fasen gerealiseerd wordt.

Fase	Realisatie	Bronnen	Locatie
Pilot	2019	1 a 3	Beethovenpark, Kwartelsingel en Drevenbuurt
Fase 2	2020-2023	10 tot 16	Kwartelsingel
Fase 3	2024-2029	10 tot 16	Beethovenpark

5 Monitoringssysteem

5.1 Functionele eisen

Een monitoringsplatform (of dashboard) wordt beoogd voor de visualisatie en interpretatie van meetgegevens, en voor aansturing van beheer van infiltratiesystemen. Het dashboard dient in elk geval voldoende actueel te zijn en overal (online) toegankelijk en altijd overzichtelijk afleesbaar te zijn voor de aangewezen gebruikers. Het dashboard is daarom bij voorkeur web-based, schaalbaar naar verschillende soorten apparaten (proceskamer, laptop en mobiel), en alleen toegankelijk voor gebruikers met rechten (zoals beheerders of onderzoekers). Het dashboard moet goed te begrijpen zijn voor zowel operationeel beheerders en onderzoekers als voor gebruikers met weinig technische achtergrond. In een vervolgrapport worden concrete beoordelingscriteria opgesteld waaraan het uiteindelijke monitoringssysteem zal worden getoetst. Hieronder wordt toegelicht wat voor de visualisatie en de alarmering concreet wordt beoogd.

5.1.1 Visualisatie

Voor de visualisatie van de monitoring van de infiltratiesystemen is in ieder geval een overzichtskaart gewenst waarin de verschillende infiltratiebronnen ruimtelijk worden weergegeven. De opname van stations van KNMI en Rijkswaterstaat met meetreeksen van neerslag, verdamping, en rivierstanden kan helpen bij de interpretatie van de gegevens en bij het verklaren van de prestatie van een infiltratieput. Wanneer in de overzichtskaart op een infiltratiebron wordt geklikt, kunnen verschillende grafieken worden getoond die zijn gewenst voor de monitoring van een infiltratiebron:

- Grafiek 1 = meetreeksen voor het bepalen van de infiltratieweerstand (Figuur 5-1):
 - o Stijghoogte in de put (h_{put}), te meten met een druksensor;
 - o Watertemperatuur in de put, te meten met dezelfde druksensor;
 - o Infiltratiedebiet (Q); te meten met een debietsensor in de toevoerleiding. In Figuur 5-1 is ook het onttrekkingsdebiet van een tweede bronlaag weergegeven.
 - o Stijghoogtevariatie die wordt veroorzaakt door natuurlijke grondwaterstandsvariatie (h_{gw}^*), en dus niet door infiltratie/onttrekking via de put. In Figuur 5-1 is deze berekend met een gevoeligheid van 2 cm/kwartier, volgens de methode die is beschreven in de rapportage van deelvraag 1 (KWR2020.158).
 - o De netto infiltratiedruk (Δh) die op de put wordt uitgevoerd door infiltratie, welke kan worden berekend met $\Delta h = h_{put} - h_{gw}^*$.
- Grafiek 2 = infiltratieweerstand (Figuur 5-2);
 - o automatisch te berekenen uit de meetreeksen die in grafiek 1 zijn gegeven volgens de methode die is beschreven in de rapportage van deelvraag 1 (KWR2020.158). Mogelijk zijn hiervoor manipulaties nodig in de data zoals interpolaties wanneer de meetfrequenties of -momenten van de verschillende meetreeksen niet overeenkomen. De drempelwaarden van de infiltratieweerstand kunnen als horizontale lijnen of achtergrondkleuren worden weergegeven (groene lijn = oorspronkelijke capaciteit, oranje lijn = 70% van de capaciteit, rode lijn = slechts 50% van de capaciteit en in Nederland wordt bij die waarde doorgaans regeneratie verricht).

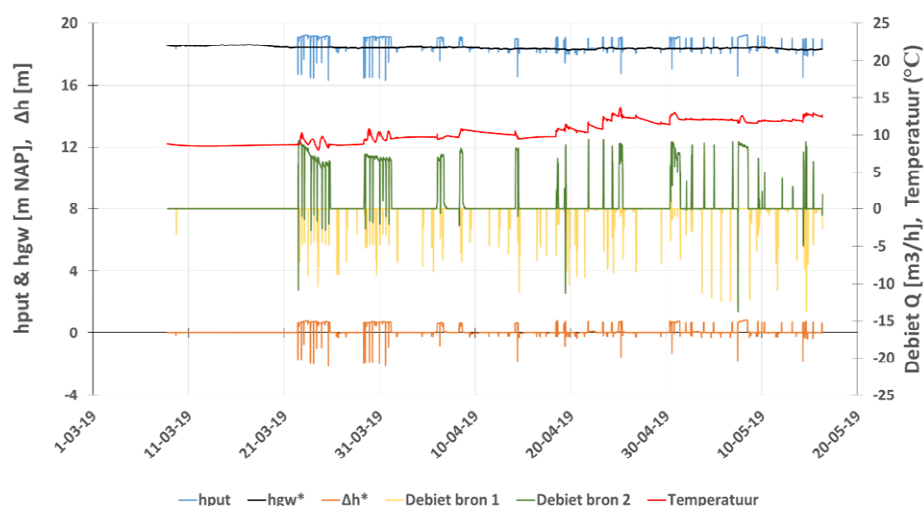
Figuur 5-2 illustreert goed dat deze methode praktisch enkel goed toepasbaar is voor langere perioden van infiltratie. Bij langere perioden van infiltratie (uren-dagen) neemt de infiltratieweerstand langzaam toe, terwijl bij kortere perioden van infiltratie (minuten-uren) de data erg schommelt en niet representatief lijkt te zijn voor de daadwerkelijke infiltratieweerstand.

Aangenomen wordt dat dit wordt veroorzaakt door het op korte termijn aan- en uitschakelen van pompen. Voor kortere perioden van infiltratie zal de data daardoor naar verwachting nog verder gemanipuleerd moeten worden om te voorkomen dat er ongewenst (g)een alarm wordt uitgezonden. Een praktisch alternatief is om enkel alarmen te sturen tijdens langere perioden van infiltratie.

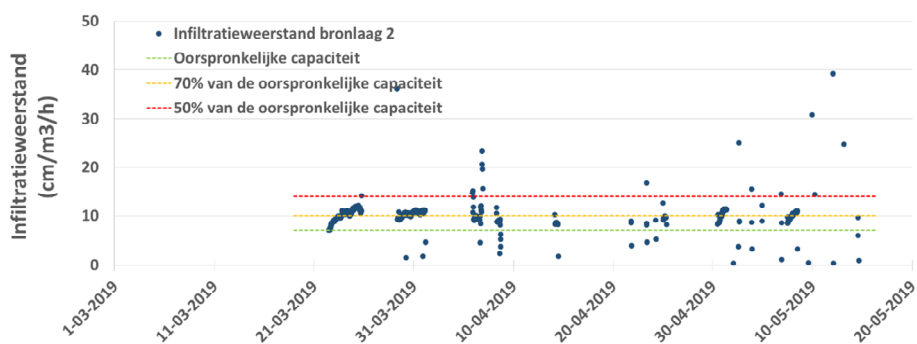
- Grafiek 3 = eventuele meetreeksen van de EGV en/of troebelheid in de put, te meten met respectievelijk een EGV-sensor, die mogelijk is geïntegreerd in de druksensor, en een troebelheidssensor (Figuur 5-3). De drempelwaarden van de troebelheid kunnen als horizontale lijnen of achtergrondkleuren worden weergegeven (boven groene lijn = overschrijding van 1 NTU, interventie is nog niet vereist, boven rode lijn = overschrijding van 20 NTU en interventie is vereist). Voor de EGV is een drempelwaarde van 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ opgenomen in de figuur maar deze is afhankelijk van locatiespecifieke omstandigheden.
- Grafiek 4 = eventuele extra meetreeks van DOC in de put, indien gekozen wordt voor een troebelheidssensor die ook DOC kan monitoren. Deze kan op dezelfde manier worden weergegeven als de troebelheidsdata, maar dan met drempelwaarden van respectievelijk 2 mg/L (groen) en 10 mg/L (rood).
- Grafiek 5 = eventuele meetreeksen van verklarende gegevens, zoals neerslag, verdamping, oppervlaktewater, etc. Dit kan helpen bij de verklaring van de prestatie van een infiltratieput.
- Tabel 1 = overzichtstabel van handmetingen van bijvoorbeeld stijghoogtes en periodieke analyses van de kwaliteit van infiltratiewater (en andere watertypen).

De verschillende grafiekreeksen kunnen bij voorkeur aan- en uit worden gezet om de reeksen naar wens weer te geven. Bij voorkeur is ook een tekst met uitleg beschikbaar bij het aanklikken van een informatiesymbool bij iedere grafiekreeks.

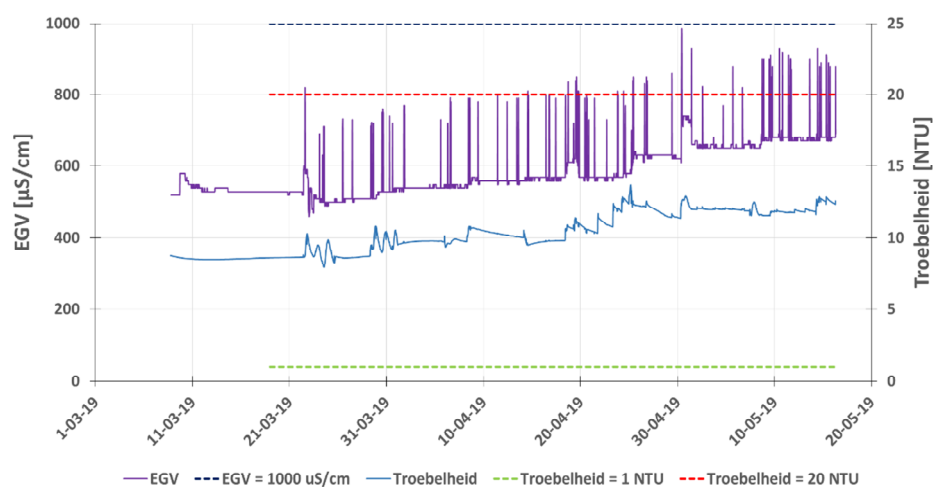
De wachttijd voor het opbouwen van het scherm, de wisseling van grafieken, en het tonen van informatie moet acceptabel zijn.



Figuur 5-1: Voorbeeld van een overzichtsfiguur met daarin de meetreeksen waarmee de infiltratieweerstand kan worden bepaald. De gebruikte data is afkomstig van de Urban Waterbuffer in Spangen, Rotterdam.



Figuur 5-2: Voorbeeldfiguur met daarin de berekende infiltratieweerstand en de bijbehorende drempelwaarden. De gebruikte data is afkomstig van de Urban Waterbuffer in Spangen, Rotterdam.



Figuur 5-3: Voorbeeldfiguur met daarin de gemeten EGV en de troebelheid. De gebruikte EGV-data is afkomstig van de Urban Waterbuffer in Spangen, Rotterdam. De troebelheidsdata zijn in werkelijkheid temperatuurdta voor dezelfde locatie.

5.1.2 Alarmering

Alarmen moeten tijdig afgegeven worden zodat kan worden ingegrepen voordat de functionele werking van een infiltratiesysteem tekort schiet en/of tot overlast/milieuschade kan leiden.

De alarmniveaus van de infiltratieweerstand, EC, pH, en troebelheid zijn beschreven in hoofdstuk 2.6 en arbitrair weergegeven in de figuren. Bij het overschrijden van deze waarden kan het betreffende punt in de overzichtskaart de corresponderende kleur krijgen en kan de gebruiker/beheerder van het infiltratiesysteem een melding ontvangen (groen = geen overschrijding, geen alarm; oranje = overschrijding maar geen actie/interventie/regeneratie vereist, operationeel beheerder krijgt een melding; a, rood = overschrijding en actie vereist, alle belanghebbenden krijgen een melding). De melding kan bijvoorbeeld omvatten:

- Om welke infiltratieput het gaat;
- Welke parameter daar de drempelwaarde overschrijdt;
- Wat er gedaan is met de put als gevolg van deze overschrijding: uitgeschakeld of nog in operatie gehouden;
- Wat de gebruiker moet doen met de put: regenereren of contact opnemen met een geohydrologisch of watertechnologisch expert.

Een alarmniveau kan tevens ingesteld worden voor de stijghoogte in de put of voordrukbus, bijvoorbeeld vlak voordat de maximale stijghoogte is bereikt in de voordrukbus.

Overschrijding van een drempelwaarde kan door een meetfout of een uitschieter voorkomen. Om te voorkomen dat bij dit soort toevallige gebeurtenissen een alarm wordt verstuurd naar de gebruiker, kan men wachten totdat meerdere opeenvolgende datapunten een drempelwaarde overschrijden voordat een alarm wordt verstuurd (zie ook sectie 5.1.1).

5.2 Voorbeelden

Voor de monitoring van bemalingen en grondwatermeetnetten zijn door verschillende bedrijven portals opgezet om metingen via telemetrie te visualiseren en soms zelfs te valideren. Voorbeelden zijn WarecoWaterdata, Mos Geomonitoring en Eijkelkamp Smart Monitoring. Het verzamelen, valideren, visualiseren en verwerken van data naar relevante output is dus gangbaar, maar nog niet volledig ontwikkeld voor infiltratiesystemen. Ook het inpassen van andere data dan waterstandsgegevens is niet gangbaar. In deze worden twee mogelijke monitoringssystemen beschreven die worden beoogd binnen de COASTAR-casus Cities2Recharge.

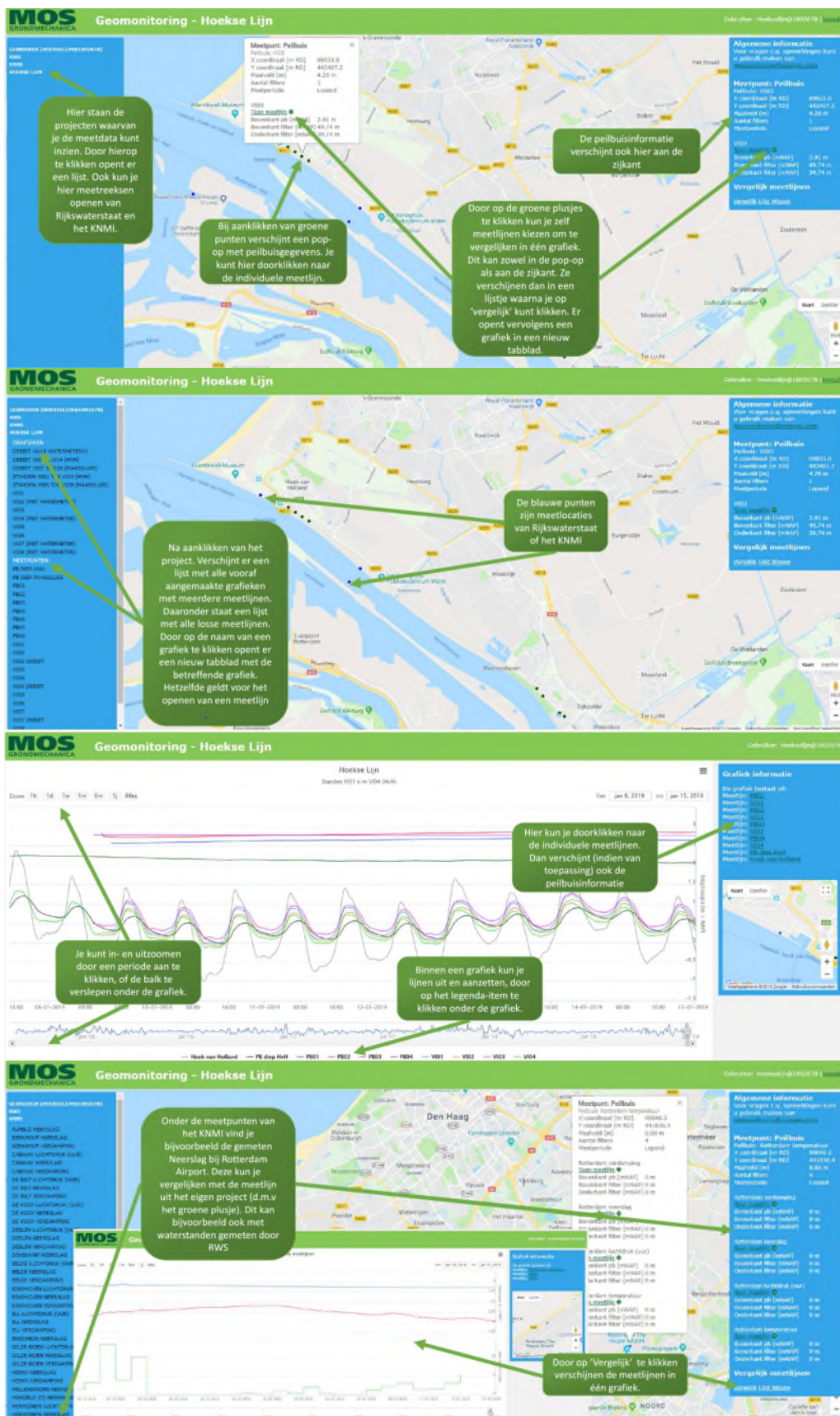
5.2.1 MOS Geomonitoring bij Hoekselijs

MOS Grondmechanica heeft een eigen online-portal ontwikkeld voor het uitlezen van druksensoren via telemetrie, en is bereikbaar vanaf een PC, tablet, of smartphone. Deze online-portal is beschikbaar via: <https://monitoring.mosgeo.com/>. Voor de Hoekse Lijn is reeds een online monitoringsplatform gemaakt voor de acht infiltratiebronnen die in Hoek van Holland en Maassluis zijn gerealiseerd. Deze monitoring wordt uitgevoerd met behulp van batterij gevoede telemetriesystemen, welke zijn geïnstalleerd op 19 en 20 december 2018 en op 9 januari 2019.

Bij elke bron wordt het niveau in de bron, en de grondwaterstand in een freatische peilbuis bij de bron gemonitord met verschildrukopnemers. Daarnaast wordt tevens een diepe peilbuis in zowel Hoek van Holland als in Maassluis gemonitord. De stijghoogtes in de peilbuizen worden iedere 10 minuten geregistreerd en in meter t.o.v. NAP gepresenteerd via het online-paneel. Debieten worden bij de bronnen gemeten in m³ per uur. Op dit moment is ingesteld dat metingen dagelijks in de ochtend vanuit het veld naar de hoofdpst worden gezonden. Indien een andere meetfrequentie of een ander zendinterval gewenst is, kan dit in overleg met MOS nader worden bepaald. Aanpassingen kunnen eenvoudig vanaf afstand worden doorgevoerd. Op basis van de meetdata kan worden vastgesteld of de bronnen goed functioneren. Met een eventuele veldinspectie kan worden vastgesteld of er extra maatregelen benodigd zijn. Indien gewenst kunnen ook diverse alarmniveaus worden ingesteld. Alarmering is bijvoorbeeld mogelijk per mail of per sms. Daarnaast kunnen databestanden van de metingen (separaat) worden aangeleverd (bijvoorbeeld in xlsx-formaat).

Na inloggen via het online-portaal is een overzichtskaart beschikbaar van het projectgebied. Daarin zijn de groene punten de meetlocaties en de blauwe punten zijn weerstations van het KNMI of meetstations van rivierwaterstanden van Rijkswaterstaat. De functionaliteit van het online-portaal is verder toegelicht in Figuur 5-4.

Het online monitoringsplatform kan verder worden uitgebreid met behulp van geautomatiseerde berekeningen en interpretaties, zoals die van de infiltratieweerstand. Ook de visualisatie kan nader vorm krijgen op basis van de wensen bij een specifiek infiltratiesysteem.



Figuur 5-4: Functionaliteit van het online-portaal voor geomonitoring van MOS Grondmechanica.

5.2.2 Voorbeeld 2: Intern monitoringssysteem gemeente Rotterdam

Voor de infiltratiesystemen bij Robert Fruinstraat en Bellamyplein wordt beoogd hetzelfde monitoringssysteem te gebruiken als wordt gebruikt bij gemeente Rotterdam voor de aansturing van rioolgemaal. Hierin is ruimte om modules te programmeren die gewenst zijn voor infiltratiesystemen. Dit systeem zal echter moeten voldoen aan de gebruikers van deze data. De data dient altijd beschikbaar te zijn voor stakeholders die deze meetgegevens verwerken. (div. adviseurs, afd. ondergrond Rotterdam, onderhoudspartij e.d.). Ook dient flexibele verwerking van data mogelijk te zijn. Het moet ook met andere (Rotterdamse) data gekoppeld kunnen worden in de toekomst.

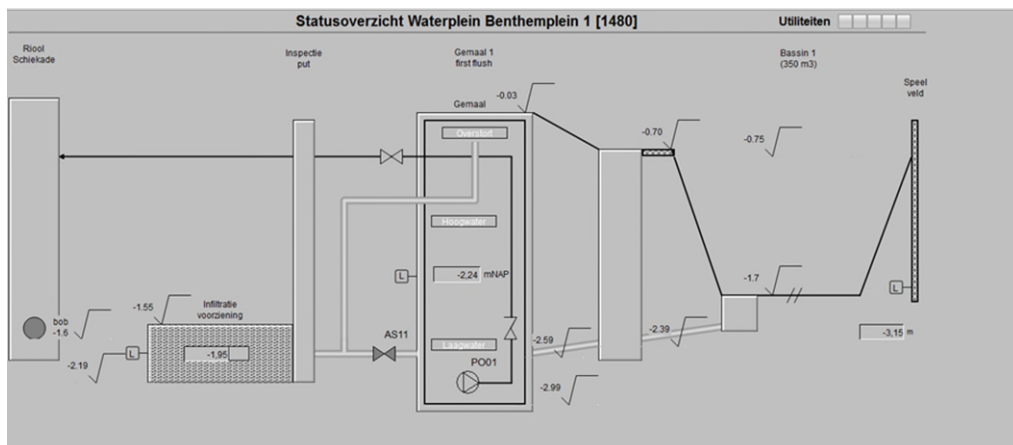
Door het systeembeheer van de afdeling stedelijk beheer Water wordt de bediening en visualisatie verzorgd door de Centrale Proces en Regelkamer Water CPRW). De CPRW is het hart van het stedelijk watersysteem waar de bewaking en bediening van rioolgemaal plaatsvindt. De CPRW is een beveiligd en afgesloten omgeving binnen de gemeente Rotterdam; alleen medewerkers van de CPRW kunnen inloggen en de data visueel maken. De data is niet toegankelijk voor andere medewerkers van de gemeente Rotterdam of derden maar kan via een verzoek worden toegestuurd; daarom is voor UWB's een iets bredere Rotterdamse aanpak gewenst maar vooralsnog niet voorhanden.

Voor het meten van bronkwaliteit is de gemeente Rotterdam bezig om de meetwaarden zichtbaar te maken op het TTN netwerk: <https://www.thethingsnetwork.org/>. De meetwaarden kunnen dan meer toegankelijk worden gemaakt voor andere partijen binnen en ook buiten de Gemeente Rotterdam. Tevens is ook dan het onderhoud van de sensoren geregeld omdat de meetwaarden op onze controlekamer binnenkomen.

De bediening en visualisatie gebeurt met het Siemenspakket PCS7. Hierin worden schermen gedefinieerd welke centrale bediening, alarmering en archivering van de PLC mogelijk maken. Deze visualisatie is echter gericht op de waterloopkundige procesbeheersing. Vooral: Hoe kan het water worden opgeslagen of afgevoerd en hoe de status is van de pompinstallatie.

Een Urban waterbuffer is een nieuw systeem voor de beheerder van de rioolgemaal. Zodoende is er nog geen voorbeeld van een dashboard aanwezig. Wel zijn dashboards gemaakt voor waterpleinen (Figuur 5-5). Bij een waterplein worden ook verschillende type metingen uitgevoerd (niveau meting, draaiuren en flowmeting van een pomp etc.) en kunnen dienen als voorbeeld voor een UWB.

Alle waterpleinen hebben een eigen plaatje in Wincc. De hoeveelheid data op een plaatje is niet gelimiteerd; belangrijk is de leesbaarheid van het plaatje. De data is echter niet direct flexibel te bewerken in andere systemen. Wel is handmatige export van meetgegevens mogelijk.



Figuur 5-5: Dashboard dat binnen gemeente Rotterdam wordt gebruikt voor Waterplein Benthemplein.

6 Conclusies

Dit rapport is het tweede deel van de case ‘cities2recharge’ binnen het TKI-project COASTAR. In dit rapport zijn de tweede en derde deelvraag behandeld:

‘Welke sensoren zijn beschikbaar om het functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving voldoende te monitoren? Hoe breng je dit samen in 1 systeem?’

‘Op welke drempelwaarden moet worden gestuurd?’

6.1 Infiltratiedruk en temperatuur

Voor het monitoren van de infiltratiedruk adviseren wij om de druk in de infiltratieput te monitoren met een drukopnemer. In stedelijke omgeving is de inpassing in de ruimtelijke ordening van belang. Mogelijk ontstaat hier een knelpunt wanneer akoestische sensoren worden toegepast, aangezien deze ruim boven het maximale drukniveau moeten worden geplaatst. Hoewel een akoestische sensor dan het voordeel heeft dat er geen corrosie of contaminatie plaats kan vinden, beschikt een drukopnemer doorgaans over een geïntegreerde sensor die direct de watertemperatuur meet, waardoor een aanvullende temperatuursensor vaak overbodig is. Bovendien wordt aanbevolen een drukopnemer met een geïntegreerde geleidbaarheidssensor te gebruiken, omdat dit voor relatief weinig extra kosten zorgt, en de kwaliteit van het infiltratiewater beter kan worden gewaarborgd.

6.2 Infiltratiedebiet

Verschillende meetmethoden kunnen worden toegepast om het infiltratiedebiet te monitoren. Een ultrasone debietsensor met de looptijdsverschilmethode of een elektromagnetische debietsensor lijken voor infiltratiesystemen de meeste voordelen te hebben voor een continue en accurate monitoring. Wanneer gekozen wordt voor een elektromagnetische debietsensor, moet de leiding waarin gemeten wordt bij voorkeur volledig gevuld blijven tijdens infiltratie. Voor ultrasone debietsensoren is dit niet per se het geval, maar er is weinig ervaring met deze sensoren bij deels gevulde leidingen.

6.3 Waterkwaliteit

De continue monitoring van waterkwaliteitsparameters kan erg duur uitpakken. Daarom wordt aanbevolen om enkel de temperatuur en EGV en eventueel de troebelheid van het infiltratiewater continu te monitoren om de verstoppingspotentie te bepalen en controleren. De temperatuur en EGV kunnen eenvoudig en voordelig worden gemonitord met temperatuur- en EGV-sensoren, die eventueel zijn geïntegreerd in een drukopnemer. De troebelheid is doorgaans de belangrijkste parameter voor putverstopping en kan met een aanvullende (spectrometrische) troebelheidssensor worden gemonitord. Een dergelijke sensor kan mogelijk tevens de DOC en andere parameters monitoren, wat extra informatie geeft over de (biologische) verstoppingspotentie. Indien niet wordt gekozen voor een continue monitoring van de waterkwaliteit, is periodieke analyse van het infiltratiewater een zeer nuttige strategie om de prestatie van de put te kunnen verklaren.

6.4 Weergegevens

Weergegevens kunnen, naast waterkwaliteitsgegevens, helpen bij het verklaren van de prestatie van een infiltratieput, en zijn online beschikbaar via bijvoorbeeld het KNMI.

6.5 Drempelwaarden

Het infiltratiesysteem moet minimaal worden gestuurd op de infiltratieweerstand, m.a.w. op de infiltratiedruk, het infiltratiedebiet en de temperatuur. De infiltratiecapaciteit kan veelal worden behouden door de bronfilters tijdens infiltratie periodiek terug te spoelen. De frequentie waarmee dit in de praktijk doorgaans plaatsvindt, wordt veelal gebaseerd op het volume water dat tot dan toe is geïnfiltreerd. Wanneer de infiltratieweerstand naar verloop van tijd toch toeneemt, is regeneratief onderhoud aan de put vereist. In Nederland wordt regeneratief onderhoud doorgaans verricht bij 50% van de oorspronkelijke infiltratiecapaciteit, hoewel bij eerder (preventief) onderhoud de capaciteit van de put beter kan worden gewaarborgd.

De drempelwaarde voor de gemeten EGV verschilt per locatie, en voor troebelheid en de concentratie DOC kunnen drempelwaarden van respectievelijk 20 NTU en 10 mg/L worden gehanteerd, hoewel een troebelheid van 1 NTU en een concentratie van DOC van 2 mg/L al voor een verhoogde verstoppingspotentie zorgen.

6.6 Telemetrie en ICT-koppeling

Een online monitoringsplatform is vereist waar de meetresultaten van de verschillende sensoren via telemetrie naartoe worden gezonden en worden gevisualiseerd. In deze visualisatie is een overzichtskaart van het projectgebied met daarin de verschillende infiltratiebronnen gewenst. De ontwikkeling van de infiltratieweerstand van deze bronnen moet duidelijk worden weergegeven in een grafiek, evenals de gemeten waterkwaliteitsparameters. Het systeem moet alarmen afgeven wanneer een van de drempelwaarden van de verschillende parameters wordt overschreden. Het geomonitoringsplatform van MOS is een veelbelovend platform voor deze doeleinden en zal in de vervolgfases verder generiek worden uitgebouwd tot een bruikbaar monitoringsplatform binnen de COASTAR-casus Cities2Recharge, conform de functionele eisen gegeven in sectie 5.1. Het interne monitoringsplatform van gemeente Rotterdam zal enigszins moeten worden aangepast om een koppeling met het geomonitoringsplatform van MOS mogelijk te maken.

6.7 Hoofdactiviteit

Op basis van de resultaten van de eerste twee deelvragen zal de hoofdactiviteit worden gestart en de volgende deelvraag in het volgende deelrapport worden beantwoord:

'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'

7 Referenties

A.B.T. (z.d.). Flowmeettechnieken. Geraadpleegd van: <https://a-b-t.nl/flowmeter/>. Geraadpleegd op 3-4-2019.

Bouma, J., Maasbommel, M., Schuurman, I. (2012). Handboek meten van grondwaterstanden in peilbuizen. Stowa-rapport 2012-50. ISBN 978.90.5773.595.0.

Bonte, M. (2009). Regeneratie en verstopping van infiltratieputten. KWR Rapport, kenmerk KWR 09.028.

De Brauw, H.M., De Man, H., Kluck, J., Boogaard, F.C. (z.d.). Onderzoek naar de nauwkeurigheid van debietmetingen op basis van praktijkmetingen in leidingen.

De Man, H. (2008). On the applicability of discharge measuring techniques in partially filled conduits. MSc thesis Sanitary engineering/Water management, Delft University of Technology.

Flowmeters (2019). Flowmeter, debietmeter, doorstromingsmeter, flowapplicatie, alle informatie op [flowmeters.nl](https://www.flowmeters.nl/). Geraadpleegd van: <https://www.flowmeters.nl/>. Geraadpleegd op 3-4-2019.

Houben, G., & Treskatis, C. (2003). Regenerierung und sanierung von Brunnen. Oldenbourg-Industrieverlag.

LevelLog (z.d.). Beknopte handleiding LevelLog. Geraadpleegd van: <https://www.levellog.nl/downloads/>. Geraadpleegd op 3-4-2019.

Eijkelkamp (2012). Innovatieve meetoplossingen voor debietmetingen. Geraadpleegd van: <https://www.eijkelkamp.com/producten/sensors-monitoring/innovatieve-oplossingen-voor-debietmetingen.html>. Geraadpleegd op 3-4-2019.

NPR-ISO/TR 23211, 2009. Hydrometry - Measuring the water level in a well using automated pressure transducer methods. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Pleijter, M., Hamersveld, L. V., & Knotters, M. (2015). Systematische fouten in metingen van grondwaterstanden met drukopnemers: verslag van een data-analyse (No. 2666). Alterra, Wageningen-UR.

Pyne, R. D. G. (2005). Aquifer storage recovery: A guide to groundwater recharge through wells ASR Systems. Gainesville, FL.

Ritzema, H. P., Heuvelink, G. B. M., Heinen, M., Bogaart, P. W., van der Bolt, F. J. E., Hack-ten Broeke, M. J. D., ... & Vroon, H. R. J. (2012). Meten en interpreteren van grondwaterstanden: analyse van methodieken en nauwkeurigheid (No. 2345). Alterra.

S::can (2019, januari). Water Quality OnLine Drinking Water. Geraadpleegd van: <https://www.s->

can.at/images/service/downloads/catalogs/catalog_drinkingwater_EN_web.pdf.

Geraadpleegd op: 10-4-2019.

Van Dooren, T.C.G.W. en K.G. Zuurbier (2020). COASTAR Cities2Recharge. Monitoringsparameters voor functioneren van diepinfiltratiesystemen in stedelijke omgeving. KWR 2020.158. KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Von Asmuth, J. (2010) Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen (t.b.v. een optimale meetfrequentie en verwerkingsprotocol voor verdrogingsmeetnet Overijssel) KWR, november 2010.

Bijlage I Overige debietmeters

Naast de debietmeters die zijn geïnventariseerd in sectie 2.3, zijn er nog meer types debietmeters beschikbaar die minder geschikt zijn voor de beoogde toepassing in een infiltratiesysteem. Deze types worden hieronder ter illustratie toegelicht (Flowmeters, 2019).

Verschildrukmeter

Een verschildrukmeter meet het drukverschil over een obstructie, ook een primair flowelement genoemd, welke proportioneel is met het debiet. Deze meetmethode is eenvoudig qua concept en onderhoud, is relatief goedkoop, en is toepasbaar bij hoge en lage temperaturen, bij hoge drukken, en in grote leidingen. Het nadeel is echter dat het systeem vervuilingsgevoelig is, en de methode een grote onzekerheid heeft aan de onderkant van het meetbereik. Bovendien betekent een drukverval een energieverlies, wat niet gewenst is wanneer een bepaalde infiltratiecapaciteit moet worden behaald.

Coriolis debietmeter

Een coriolis debietmeter wordt ook wel een massaflowmeter genoemd en is zeer nauwkeurig. Een dergelijke debietmeter bestaat uit parallelle buisjes die in-fase trillen wanneer er geen stroming is. Wanneer er wel een stroming is in de vloeistof, trillen de buisjes uit-fase, en de faseverschuiving is proportioneel met de stroomsnelheid. Er zijn verschillende vormen van trilbuisjes beschikbaar, waarvan een triangelvorm of een omegavorm het meest gebruikelijk en technisch gezien superieur zijn. Het voordeel aan coriolis debietmeters is dat de dichtheid en temperatuur tevens worden gemonitord. Het nadeel is echter dat er een obstructie van de stroming plaatsvindt en de sensor uit bewegende delen bestaat die gevoelig zijn voor slijtage.

Thermische debietmeter

Een thermische debietmeter voert warmte toe aan een stromend medium en meet het warmteverlies stroomafwaarts. Deze methode wordt vaak toegepast bij gasen en is minder geschikt voor vloeistoffen door o.a. de hogere thermische capaciteit en viscositeit. Voor vloeistoffen wordt een thermische debietmeter doorgaans enkel toegepast bij zeer lage debieten en is minder geschikt voor monitoring van het debiet van een infiltratieput. Wel kan het als pomp- en droogloopbeveiliging worden gebruikt.

Vortex debietmeter

Bij een vortex debietmeter vindt stroming plaats langs zogenaamde bluff-bodies die vortexen produceren. Daarachter bevindt zich een sensor die de vortex detecteert. De frequentie van vortexvorming staat in verband met de stroomsnelheid, en dus het debiet, van de vloeistof. Het nadeel is dat deze methode enkel geschikt is bij turbulente stroming ($Re = 5000$), waarbij vortexen kunnen vormen. Een voordeel is dat de druk en temperatuurmeters vaak geïntegreerd zijn.

VA-meter / Rotameter / Vadometer

Een variabele doorlaatmeter (VA-, Vado-, of rotameter) is een relatief eenvoudig instrument dat bestaat uit een verticale conische buis met daarin een vlotter die omhoog wordt gedrukt doordat een vloeistof er tegenaan drukt. Bij een bepaald debiet ontstaat er een evenwicht tussen het gewicht van de vlotter en de weerstand van de

vloeistof. De vlotter blijft in dat geval op een bepaalde hoogte hangen. Ze zijn relatief goedkoop maar enkel geschikt voor leidingen tot DN200.

Ultrasonische debietmeters met Doppler methode

Bij de Doppler methode wordt ultrasoon geluid uitgezonden door een transducer, die door een andere transducer wordt opgevangen. Bewegende deeltjes (zwevend stof of gasbellen) in de vloeistof reflecteren het geluid, waardoor de frequentie van het geluid verandert voordat de tweede transducer het ontvangt. Omdat de techniek berust op reflectie van ultrasoon geluid op deeltjes, is het niet geschikt voor heldere vloeistoffen die vrij zijn van deeltjes of gasbellen. Bovendien kan reflectie meerdere malen voorkomen, en wordt verondersteld dat deeltjes met dezelfde snelheid bewegen als het water. Zwevend stof heeft echter de neiging om te sedimenteren en gasbellen om te stijgen. Al met al levert de Doppler methode een geringe nauwkeurigheid op, waarbij een 10% nauwkeurige meting al erg nauwkeurig is.