

# Onderzoek naar een nieuw infiltratiesysteem in de Argonautenstraat, Amsterdam-Zuid



Ivar Abas

Amsterdam, december 2017



# Onderzoek naar een nieuw infiltratiesysteem in de Argonautenstraat, Amsterdam-Zuid

**master**  
civiele techniek  
track water management

aan de Technische Universiteit te Delft

auteur: Ivar Abas  
begeleiders: prof. dr. ir. F.H.M. van de Ven (TU Delft)  
drs. F.J.C. Smits (Waternet & TU Delft)



## Summary

Due to expected climate change heavy rainfall events are more likely to occur. Cities such as Amsterdam become therefore more vulnerable to pluvial flooding. Besides the expected climate change urbanization, which results in an increased area covered by paved impervious surfaces, is one of the important drivers of pluvial flooding. Paved surfaces reduce the infiltration of precipitation to the subsoil and contribute to increased volume and peak stormwater discharges. This can result in sewer surcharges or even flooding of urban areas. In order to deal with this excess stormwater innovative solutions are required to store, to infiltrate or to discharge the excess amount of stormwater. This research evaluates a new infiltration facility (Granudrain) in combination with a Dutch drain.

From literature it can be concluded that porous or pervious pavement systems can be solutions for reducing the risk of pluvial flooding. These facilities seem to be a good alternative for the traditional stormwater drainagesystems. The infiltration capacity of permeable pavements systems appear to decrease with the pavement age, due to gradual clogging of sediment present in stormwater. Despite this reduction in infiltration capacity studies show that often the minimum infiltration capacity of 20,8 mm/h is still reached, even after many years of service. Furthermore studies show that a Dutch drain, in the Netherlands called a "DIT riool", covered in a geotextile is more vulnerable to clogging. Therefore it is recommended to construct such a facility in gravel instead of using a geotextile.

This research shows that the Granudrain is unable to fulfill the design discharge for drainagesystems of 19,8 mm/h set by Waternet. It shows that the facility is not able to cope with the required design discharge without creating puddles on the street. From field research the measured infiltration capacities are 0,17 and 0,20 m<sup>3</sup>/m/u. The calculated theoretical infiltration capacity is equal to 0,16 m<sup>3</sup>/m/u and it can be concluded that this is of the same order of magnitude as the measured ones. Also the Dutch drain is tested. The infiltration capacities varied between 0,10 – 0,20 m<sup>3</sup>/m/u per meter potential difference and the measured drainage capacity appeared to be 0,18 m<sup>3</sup>/m/u per meter potential difference.

The groundwater analysis shows that the groundwater during the summer period can decrease to NAP -0,63 m, roughly 0,20 m below the average surfacewater level. This is remarkable while the Dutch drain in the summer should supply water to the research area. It can be concluded that the influence of the infiltration by the Dutch drain is not or barely visible in the groundwater measurements. Furthermore it becomes clear that the decrease of the groundwater forms a threat to the wooden pile foundations. This is mainly caused by the transpiration of the trees, present in the Argonautenstraat.

This research recommends to make a groundwater model and calibrate the model on the field work measurements. This model makes it possible to run different scenarios. For example the amount of Dutch drains for a certain area can be estimated, to keep the groundwater on the same level as the surfacewater. The transpiration of the trees is an important parameter for the groundwater model. Therefore it is recommended to carry out a transpiration research as described in this research.

## Samenvatting

Door de verwachte klimaatsverandering krijgen steden als Amsterdam steeds vaker te maken met extreme neerslag, wat kan leiden tot wateroverlast. Naast intensieve neerslag is de belangrijkste oorzaak van de wateroverlast de toename van verhard oppervlak. De neerslag kan hierdoor niet meer op een natuurlijke wijze infiltreren in de ondergrond. Bij extreme neerslagomstandigheden kan het rioleringsstelsel de overvloedige neerslag niet aan, met als gevolg dat riooloverstorten in werking treden en mogelijk zelfs stedelijk gebied overstroomt. Naast klassieke oplossingen zijn creatieve en innovatieve oplossingen nodig om de overtollige neerslag te bergen, te infiltreren en alleen waar nodig af te voeren. Dit onderzoek evalueert het functioneren van een nieuwe infiltratiestrook, de Granudrain in combinatie met een drainage-infiltratie-transportriool (DIT riool).

Uit literatuuronderzoek blijkt dat waterdoorlatende en –passerende verhardingen oplossingen zijn die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het verminderen van de wateroverlast. Deze constructies lijken een geschikt alternatief voor het hemelwaterafvoerstelsel wanneer ze worden toegepast in combinatie met kolken. Verder blijkt dat infiltrerende verhardingsconstructies dichtslibben naarmate ze ouder worden, maar vaak wel nog voldoen aan de minimale infiltratiecapaciteit van 20,8 mm/u, zelfs als helemaal geen onderhoudswerkzaamheden zijn uitgevoerd. Verder blijkt uit de literatuur dat een DIT riool omringd met een geotextiel een hogere kans heeft op dichtslibben. Aanbevolen wordt om drainage- en infiltratievoorzieningen, zoals een DIT riool, in een grindkoffer aan te leggen en bij voorkeur zonder scheidingsdoeken.

Uit dit onderzoek komt naar voren dat de Granudrain in combinatie met het DIT riool niet voldoet aan de Waternet ontwerp eis voor hemelwaterafvoer van gemiddeld 19,8 mm/u. De Granudrain is niet of onvoldoende in staat deze RIONED ontwerpbui 08 te verwerken, zonder dat plassen op straat ontstaan. De theoretisch berekende infiltratiecapaciteit van 0,16 m<sup>3</sup>/m/u blijkt goed overeen te komen met de gemeten infiltratiecapaciteiten van 0,17 en 0,20 m<sup>3</sup>/m/u. De infiltratiecapaciteit van het DIT riool, gemeten tijdens de infiltratieproef met het DIT riool varieerde tussen de 0,10 – 0,20 m<sup>3</sup>/m/u per meter potentiaalverschil en de gemeten drainagecapaciteit bleek gelijk aan 0,18 m<sup>3</sup>/m/u per meter potentiaalverschil.

Uit de grondwateranalyse blijkt dat het grondwater in de zomer kan uitzakken tot een hoogte van NAP -0,63 m, ongeveer 0,20 m onder het gemiddeld oppervlaktewaterpeil. Dit ondanks de aanwezigheid van een DIT riool. De infiltrerende werking van het DIT riool blijkt dan ook niet of nauwelijks zichtbaar. De daling van de grondwaterstand lijkt voornamelijk veroorzaakt door de verdamping van de bomen in de Argonautenstraat en vormt een bedreiging voor de houten paalfunderingen.

Dit onderzoek beveelt aan om een grondwatermodel te maken en deze te ijken op de gedane metingen. Hierdoor kan worden bepaald hoeveel DIT riolen nodig zijn om de grondwaterstand op een bepaald niveau te houden. Een belangrijke parameter voor een grondwatermodel is de verdamping van de bomen in de Argonautenstraat. Dit onderzoek biedt een leidraad voor het meten van deze verdamping. De gemeten verdamping kan dan ook worden meegenomen in de modellering van het grondwater.

## Inhoudsopgave

Summary .....	5
Samenvatting .....	6
1 Introductie .....	9
1.1 Inleiding.....	9
1.2 Locatie.....	9
1.3 Het systeem .....	10
1.4 Leeswijzer.....	11
2 Probleemdefinitie en onderzoeksvragen.....	12
2.1 Probleemdefinitie .....	12
2.2 Onderzoeksvragen .....	12
3 Literatuuronderzoek naar klimaatadaptieve regenwatervoorzieningen.....	14
3.1 Waterdoorlatende verharding.....	14
3.1.1 Inleiding.....	14
3.1.2 Verschillende typen waterdoorlatende verharding.....	15
3.1.3 Waterdoorlatendheid infiltrerende verhardingsconstructies .....	18
3.1.5 Het effect van de leeftijd van doorlatende verharding op de infiltratiecapaciteit.....	22
3.1.6 Het effect van onderhoud op de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende verharding.....	26
3.1.7 Aandachtspunten en richtlijnen bij waterdoorlatende verharding.....	27
3.1.8 Aandachtspunten waterdoorlatende verharding voor Amsterdam .....	30
3.2 DIT riool.....	31
4 Werking van het systeem.....	33
4.1 Het systeem in meer detail.....	33
4.2 De Granudrain.....	34
4.2.1 Dimensionering van het Granudrainsysteem .....	34
4.2.2 Theoretische infiltratiecapaciteit.....	35
4.3 Het DIT riool .....	36
5 Beschrijving monitoringsnetwerk en uitgevoerde proeven .....	38
5.1 Ontwerpen en monitoren van een meetnet.....	38
5.2 Infiltratieproeven Granudrain.....	40

5.3 Infiltratie- en drainageproeven DIT riool .....	43
5.3.1 Infiltratieproef DIT riool .....	44
5.3.2 Drainageproef DIT riool.....	45
6 Resultaten en discussie .....	46
6.1 Analyse grondwater .....	46
6.2 Infiltratieproeven Granudrain.....	50
6.2.1 Volumes .....	50
6.2.2 Stijghoogtes tijdens infiltratieproeven .....	54
6.3 Proeven met het DIT riool.....	55
6.3.1 Infiltratieproef DIT riool .....	55
6.3.2 Drainageproef DIT riool.....	58
7 Vervolg onderzoek: verdampingsproeven .....	59
7.1 Vochthuishouding van een boom .....	59
7.2 Afsluiten gedeelte DIT riool .....	62
7.3 Meten van de sapstromen .....	62
7.4 Verdamping op basis van de kroonprojectie .....	64
8 Conclusies en aanbevelingen .....	65
8.1 Conclusies .....	65
8.2 Aanbevelingen .....	66
Referenties.....	67
Bijlage 1: Aanvullende figuren bij hoofdstuk resultaten en discussie .....	72
Analyse grondwater .....	72
Infiltratieproeven Granudrain.....	74
Infiltratieproef DIT riool .....	75



# 1 Introductie

## 1.1 Inleiding

Door verwachte klimaatverandering kan extreme neerslag vaker voorkomen (KNMI, 2014). Dit maakt steden als Amsterdam kwetsbaar. Toenemend verhard oppervlak als bebouwing en bestrating zorgen ervoor dat regenwater sneller wordt afgevoerd en moeilijker kan infiltreren. Naast klassieke oplossingen zijn creatieve en innovatieve oplossingen nodig om de overtollige neerslag te bergen en/of af te voeren. Amsterdam Rainproof is een initiatief waarin Waternet samen met bedrijven, kennisinstellingen, andere overheden en bewoners de stad Amsterdam bestand willen maken tegen de vaker voorkomende extreme neerslag. (Amsterdam Rainproof, 2017). In het kader van Amsterdam Rainproof is een test gedaan naar een nieuwe infiltratiestrook, de Granudrain in combinatie met een drainage-infiltratie-transportriool (DIT riool). Dit onderzoek evalueert het functioneren van de Granudrain en het DIT riool.

## 1.2 Locatie

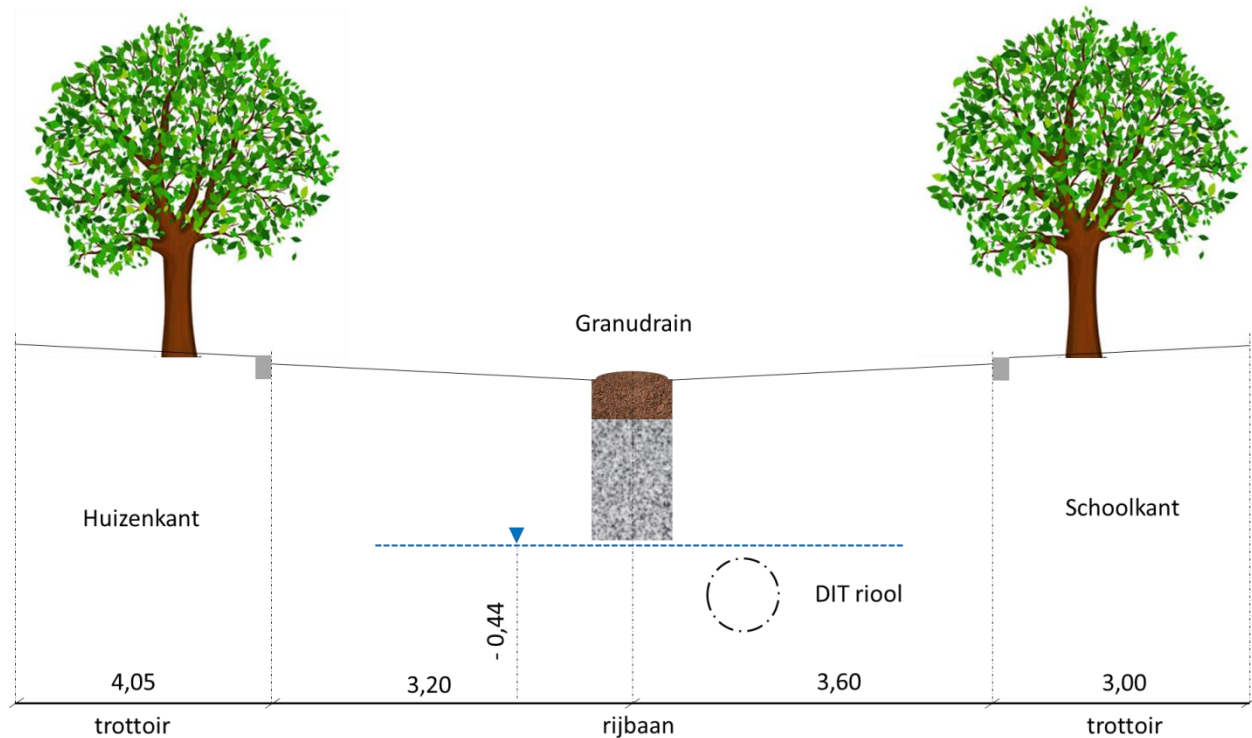
De Argonautenstraat bevindt zich in de Olympia buurt in Amsterdam-Zuid. De straat bestaat uit een oostelijk en westelijk gedeelte. In het oostelijke gedeelte van de straat bevindt zich de Granudrain in combinatie met een DIT riool. Het vervangt hier de traditionele rioolkolken en het hemelwaterafvoerstelsel. Het westelijke gedeelte van de Argonautenstraat doet in dit onderzoek dienst als referentiestraat. Zie figuur 1 voor een overzicht van het betreffende gebied.



Figuur 1 Locatie van de Granudrain en het DIT riool in de Argonautenstraat.

### 1.3 Het systeem

In de Argonautenstraat bevindt zich een Granudrain in combinatie met een DIT riool. Figuur 2 toont een schematische dwarsdoorsnede van de Argonautenstraat, inclusief de ligging van beide systemen. Aan de zuidkant van de Argonautenstraat bevindt zich een school en aan de noordkant liggen woonhuizen. Een Granudrain is een infiltratiestrook (Streetcare, 2013) die bestaat uit verschillende lagen granulaat die aan elkaar zijn gelijmd. Door de hoge doorlatendheid zou het regenwater snel kunnen infiltreren naar de ondergrond, waar het geborgen kan worden in het grondwatersysteem. De neerslag wordt hierdoor vertraagd afgevoerd naar het nabij gelegen oppervlaktewater. Het oppervlaktewatersysteem wordt dan minder zwaar belast als in de traditionele situatie, waar gebruik werd gemaakt van straatkolken en hemelwaterriolen. De gedachte bij de aanleg van de Granudrain was dat door zijn hoge doorlatendheid er geen straatkolken nodig zouden zijn. Uit dit onderzoek zal blijken dat de praktijk anders is gelopen.



**Figuur 2** Dwarsdoorsnede van de Argonautenstraat met een schematische weergave van de Granudrain en het DIT riool. De blauwe stippellijn geeft het niveau van het oppervlaktewater weer ten opzichte van NAP [m].

Naast de Granudrain bevat het systeem in de Argonautenstraat een DIT riool. Een DIT riool staat voor een drainage, infiltratie en transport riool (Wavin, 2017). Het DIT riool is verbonden met het Zuider-Amstelkanaal, het oppervlaktewater dat ten zuiden van de Argonautenstraat ligt, zie de overzichtskaart van het gebied in figuur 1. Doordat het DIT riool verbonden is met het oppervlaktewater zal het peil in het DIT riool vaak hetzelfde zijn als het oppervlaktewaterpeil.

Over het algemeen zal het DIT riool onder water staan. Als door gevallen neerslag het grondwaterpeil hoger is dan het oppervlaktewaterpeil zal het DIT riool het overtollige water draineren naar het Zuider-Amstelkanaal. In de zomer wanneer het grondwaterpeil kan uitzakken, door onder andere verdamping van de bomen in de straat, kan er via het oppervlaktewater en het DIT riool juist water worden aangevoerd. Het DIT riool infiltreert in dit geval. Zie hoofdstuk 4 voor een gedetailleerde omschrijving van het systeem.

De combinatie van de Granudrain en een DIT riool is, voor zover bekend, nog niet eerder tegelijkertijd toegepast. Dit onderzoek bestudeert en evalueert de werking van beide systemen.

## 1.4 Leeswijzer

Als eerste wordt een algemene inleiding gegeven waarin onder andere de relevantie van het onderzoek wordt toegelicht. Ook wordt de onderzoekslocatie en het systeem kort besproken.

Hoofdstuk 2 bevat de probleemdefinitie en de bijbehorende onderzoeksvragen.

Hoofdstuk 3 presenteert een uitgebreid literatuuronderzoek naar klimaatadaptieve regenwatervoorzieningen, waarbij de nadruk ligt op waterdoorlatende bestrating.

In hoofdstuk 4 wordt het systeem in meer detail besproken.

Hoofdstuk 5 beschrijft het monitoringsnetwerk en de uitgevoerde proeven.

Hoofdstuk 6 presenteert en bediscussieert de resultaten van de grondwateranalyse, de infiltratieproeven met de Granudrain en de infiltratie- en drainageproef met het DIT riool.

Hoofdstuk 7 geeft een leidraad voor het meten van de verdamping van de bomen in de Argonautenstraat.

Als laatste volgt hoofdstuk 8. Hier worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek besproken.

## 2 Probleemdefinitie en onderzoeksvragen

### 2.1 Probleemdefinitie

Door uitspoelende grond van boomkransen, bloesem, bladeren en ander straatvuil raakt de Granudrain relatief snel verstopt, wat zorgt voor een slechtere doorlatendheid van de infiltratiestrook. Waternet maakt zich zorgen dat de Granudrain hierdoor niet meer voldoet aan de ontwerpeisen, zie tabel 1.

Tabel 1 Ontwerpeisen Waternet voor hemelwaterafvoer.

Huidig hemelwaterafvoerstelsel	Amsterdam Rainproof
19,8 mm / u (Stichting RIONED, 2004b) geen water op straat toegestaan	60 mm / u (ambitie) wel water op straat toegestaan, echter geen schade aan vitale infrastructuur of aan de huizen (Waternet, 2016)

### 2.2 Onderzoeksvragen

Om het onderzoek af te bakenen wordt hieronder de scope van dit stageonderzoek aangegeven. Vervolgvragen die van belang zijn, maar buiten de scope van dit onderzoek vallen, worden voor de volledigheid ook genoemd.

De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

- Wat is de infiltratiecapaciteit van de Granudrain?
- Voldoet de Granudrain in combinatie met het DIT riool aan de beoogde afvoercapaciteit van regenwater van 19,8 mm/uur?
- Vervult het DIT riool de infiltratie en drainage functie zoals die beoogd is?
  - Hoe snel draineert het water uit de omgeving naar het DIT riool?
  - Wat is het effect van oppervlaktewater fluctuaties op het grondwaterniveau, hoe snel infiltreert het water uit het DIT riool naar de omgeving?
- Hoeveel water verdampen de bomen in de Argonautenstraat in de zomer en kan het DIT riool deze hoeveelheden water aanvoeren?
- Bestaan er geschikte alternatieven voor de klassieke rioolkolken en een hemelwaterafvoer om regenwater te bergen en/of af te voeren?

De volgende onderzoeksvragen vallen buiten de scope van dit stageonderzoek:

- Zorgt het DIT riool voor een gewenst grondwaterpeil?
- Is het mogelijk een zomer- en winterpeil te hanteren met behulp van een DIT riool?
- Wat zijn de ideale afmetingen voor een DIT riool?
- Wat is het effect van meerdere DIT riolen in een buurt/wijk op het hydraulisch functioneren van het hemelwaterstelsel?
- Is het mogelijk een straat te ontwerpen zonder de klassieke rioolkolken en een hemelwaterafvoer? En hoe ziet deze straat er dan uit?

## 3 Literatuuronderzoek naar klimaatadaptieve regenwatervoorzieningen

De verwachte klimaatsverandering zorgt voor extremere neerslagomstandigheden, hitte en mogelijke overstromingen (KNMI, 2014). Om het bebouwde gebied minder kwetsbaar te maken voor de gevolgen van klimaatverandering is het van belang het stedelijk waterbeheer klimaatbestendig en waterrobuust in te richten (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

In dit hoofdstuk worden een aantal voorbeelden gegeven van klimaatadaptieve voorzieningen om overtollige neerslag te infiltreren, te bergen en af te voeren. De voorbeelden zijn afkomstig uit de nationale en internationale literatuur. Als eerste wordt waterdoorlatende verharding behandeld en vervolgens zullen onderzoeken met betrekking tot het DIT riool worden geanalyseerd.

### 3.1 Waterdoorlatende verharding

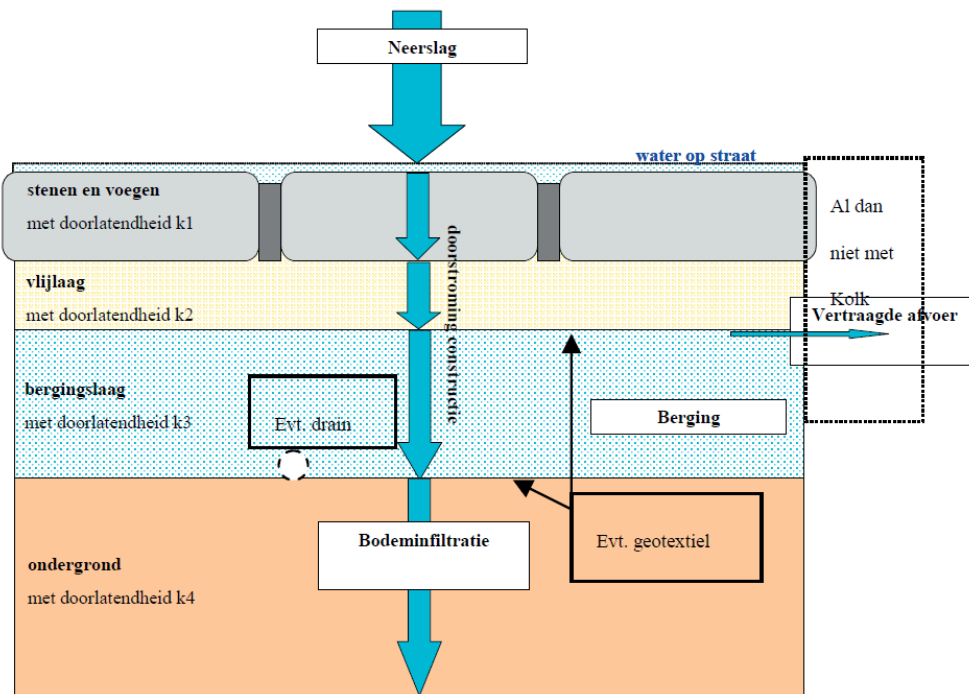
#### 3.1.1 Inleiding

Door de verwachte klimaatsverandering krijgen gemeenten steeds vaker te maken met extreme neerslag, wat kan leiden tot wateroverlast (KNMI, 2014). Naast intensieve neerslag zijn de belangrijkste oorzaken van de wateroverlast de toename van verhard oppervlak, zowel door straten als bebouwing. De neerslag kan hierdoor niet meer op een natuurlijke wijze infiltreren in de ondergrond. Bij extreme neerslagomstandigheden kan het rioleringsstelsel de overvloedige neerslag niet aan, met als gevolg dat riooloverstorten in werking treden en mogelijk zelfs stedelijk gebied overstroomt. Een ander belangrijk punt is of het oppervlaktewater voldoende capaciteit heeft. Dit valt verder buiten dit onderzoek.

Waterdoorlatende verharding, ook wel infiltrerende verhardingsconstructies genoemd, zijn voorbeelden van oplossingen die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het verminderen van de wateroverlast. Waterdoorlatende verharding kan hemelwater bufferen en is in staat het water vertraagd af te voeren en of te laten infiltreren (Beecham et al., 2010). Ook kan waterdoorlatende verharding een zuiverende functie hebben door filtratie, adsorptie en afbraak van verontreinigingen die aanwezig zijn in afstromend regenwater (Beecham et al., 2012; Dierkes et al., 2002; STOWA, 2007).

In figuur 3 is een opbouw weergegeven van een typische waterdoorlatende of waterpasserende verhardingsconstructie. Een waterdoorlatende verharding bestaat uit waterdoorlatende of -passerende verharding. Bij waterpasserende verharding zijn de voegen breder of bevinden er zich drainageopeningen tussen de stenen waardoor het water via de vlijlaag naar de bergingslaag kan worden afgevoerd. Bij waterdoorlatende verharding kan het hemelwater door zowel de betonstraatsteen als de voegen infiltreren. Een voorbeeld van waterdoorlatende stenen zijn poreuze betonstraatstenen, zie paragraaf 3.1.2. Bij beide typen waterdoorlatende bestrating kan het water via de bergingslaag infiltreren of via een drain worden afgevoerd naar het oppervlaktewater (Stichting RIONED, 2006b). Tussen de verharding en de vlijlaag en tussen de bergingslaag en het zandbed kan een scheidingsdoek of geotextiel zitten. Dit moet voorkomen dat de lagen gaan mengen.

Geadviseerd wordt om geen scheidingsdoek toe te passen, omdat dit de gevoeligheid voor dichtslibben vergroot (Ras & Rook, 2016; Deltares, 2017).



Figuur 3 Dwarsdoorsnede waterdoorlatende en -passerende verharding (Tauw, 2005).

Er wordt geadviseerd drainage toe te passen als de doorlatendheid van de ondergrond kleiner is dan 1 m/dag. De overtollige neerslag kan op deze wijze worden afgevoerd naar het dichtstbijzijnde oppervlaktewater. Verder geldt een ontwerprichtlijn voor de ontwateringsdiepte van 0,3 m onder de bergingslaag bij de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG). Grondwater in de bergingslaag en de rest van de voorziening is onwenselijk aangezien dit voor uitvloeking van ijzer, pH fluctuaties en bacteriologische aangroei kan zorgen. Ook kan in de winter het water bevriezen waardoor de straatstenen uit elkaar gedrukt kunnen worden. De hoogste grondwaterstand dient op voldoende afstand onder de constructie te liggen. Bij het bepalen van de positie van de drain dient hiermee rekening gehouden te worden, zeker bij ijzerhoudend grondwater (STOWA, 2007).

### 3.1.2 Verschillende typen waterdoorlatende verharding

Infiltrerende verhardingsconstructies komen in verschillende vormen voor en zijn over het algemeen monolithisch of modulair opgebouwd (Fletcher et al., 2004). Onder monolithische doorlatende verharding valt waterdoorlatend asfalt en waterdoorlatend beton waarin het water door de open structuur van het materiaal kan infiltreren. Bij modulair opgebouwde verharding kan sprake zijn van betonklinkers in combinatie met voegen waardoor het water kan infiltreren. Ook kunnen poreuze betonklinkers worden gecombineerd met voegen waarbij in de laatste situatie het hemelwater zowel door het oppervlakte van de verharding zelf als door de voegen kan infiltreren.



In tegenstelling tot klassieke verharding worden de voegen bij waterdoorlatende verhardingsconstructies niet gevuld met zand, maar met grover materiaal. Meestal wordt voegmateriaal toegepast met een diameter van 2-5 mm (Boogaard et al., 2014b).

Waterdoorlatende bestrating komt in het algemeen in vier verschillende types voor:

- poreuze betonstraatstenen
- betonstraatstenen met drainageopeningen
- betonstraatstenen met verbrede voegen
- klassieke grasbetontegels



**Figuur 4** (a) Poreuze betonstraatstenen (Straategie, 2017); (b) betonstraatstenen met drainagevoegen (Stradus Infra, 2011); (c) betonstraatstenen met verbrede voegen (Stradus Infra, 2017); (d) grasbetontegels (Wikimedia Commons, 2007).

Figuur 4 toont de verschillende types waterdoorlatende betonstraatstenen en in tabel 2 zijn de types in meer detail beschreven.



Tabel 2 Verschillende types betonstraatstenen.

<b>type betonstraatsteen</b>	<b>beschrijving</b>
poreuze betonstraatsteen	Poreuze betonstraatstenen hebben een open structuur door hun specifieke betonsamenstelling. De open structuur zorgt ervoor dat over het gehele volume van de betonstraatsteen het water kan infiltreren.
betonstraatsteen met drainageopeningen	Betonstraatstenen met drainageopeningen bestaan uit klassieke betonstraatstenen die van uitsparingen zijn voorzien. Door hun specifieke vormgeving kan het hemelwater via openingen infiltreren.
betonstraatsteen met verbrede voegen	Betonstraatstenen met verbrede voegen bestaan eveneens uit klassieke betonstraatstenen die aan de zijkanten zijn voorzien van afstandhouders waardoor na aanlegging brede voegen ontstaan. Het hemelwater kan via deze bredere voegen infiltreren.
klassieke grasbetontegels	Ook klassieke grasbetontegels kunnen als waterdoorlatende verharding worden gebruikt. Belangrijk is dat de tegels worden aangelegd op een doorlatende structuur en dat de holtes worden gevuld met steenslag of worden beplant met grasplanten (FEBESTRAL, 2008).

De keuze van het type bestrating bij waterdoorlatende betonstraatstenen wordt voornamelijk bepaald door de plaats van toepassing. Even belangrijk als de keuze van de juiste bestrating is de keuze van de vlijlaag en de bergingslaag. Alle lagen dienen waterdoorlatend te zijn, maar er moet ook voldoende rekening gehouden worden met de stabiliteit (FEBESTRAL, 2008). Zo dient het materiaal verdichtbaar te zijn en moet voorkomen worden dat de verschillende materialen zich mengen. Gebeurt dit niet, dan kan de waterdoorlatende bestrating losgereden worden. Een manier om de stabiliteit van de verschillende lagen te bevorderen en het mengen te voorkomen is het toepassen van een geotextiel, ook wel een waterdoorlatend scheidingsdoek genoemd. Er zijn echter ook studies die aantonen dat een geotextiel een biologische actieve laag vormt waar vervuiling kan worden afgebroken (Boogaard et al., 2010; Pratt et al., 1990; Sartor et al., 1974). Een nadeel van een waterdoorlatende scheidingsdoek is dus dat het gevoelig is voor dichtslibben. Ook zijn de scheidingsdoeken moeizaam te herstellen na graafwerkzaamheden door nutsbedrijven of huisaansluitingen (Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007). Aangeraden wordt om de verschillende lagen waaronder de vlijlaag en de bergingslaag in diameter zo af te stemmen dat de stabiliteit gewaarborgd is. Een geotextiel hoeft hierdoor niet meer te worden toegepast (Van de Ven, 2017b).

### 3.1.3 Waterdoorlatendheid infiltrerende verhardingsconstructies

De indringing van water in de ondergrond wordt aangegeven met een waterdoorlatendheidsfactor of doorlatendheidscoëfficiënt  $k$ . De doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  voor verhardingsconstructies wordt meestal uitgedrukt in meter per seconde (m/s) of liter per seconde per hectare (l/s·ha) en staat voor het watervolume dat per tijdseenheid door een eenheidsoppervlak stroomt. De waterdoorlatendheid van de bodem wordt meestal uitgedrukt in meter per dag (m/d). Algemeen geldt dat de ondergrond een minimale doorlatendheid  $k$  (in m/s) moet hebben voor de infiltratie van een gestelde ontwerp regenintensiteit in liter per seconde per hectare (l/s·ha).

Aangelegde infiltrerende verhardingsconstructies in België, Nederland en andere delen van Europa dienen te voldoen aan een minimale infiltratiecapaciteit van 270 l/(s·ha) of 97,2 mm/u (Kiwa, 2014; OCW, 2008). Deze norm is gebaseerd op neerslagtabellen van het KMI te Ukkel. Het betreft een bui met een duur van 10 minuten, een regendiepte van 16,3 mm en een herhalingsperiode  $T=30$  jaar. Met andere woorden de herhalingsperiode dat er zich een bui voordoet met een neerslaghoeveelheid van 16,3 mm gedurende 10 minuten is eens in de 30 jaar. Als 16,3 mm per 10 minuten wordt omgerekend naar l/s·ha dan komt dat op de genoemde 270 l/s·ha.

Om een neerslaggebeurtenis van 270 l/s·ha te verwerken dient de bodem en de daarboven gelegen fundering en betonverharding tenminste een doorlatendheid te bezitten van 270 l/s·ha. Omrekenen naar meter per seconde geeft een doorlatendheidsfactor  $k$  van  $270 \cdot 10^{-7}$  m/s of 97 mm/u die de bodem moet hebben om de gestelde regenintensiteit te verwerken. Ondanks dat deze infiltratiecapaciteit in de praktijk extreem hoog is gebleken, gebruiken ontwerpers vaak nog een veiligheidsfactor van 2 wat resulteert in een gemiddeld minimale infiltratiecapaciteit van 540 l/s·ha of 194 mm/u. Een betonstraatsteen in gebruikstoestand is lang niet altijd verzadigd. Hierdoor vullen de betonporiën zich met lucht, wat een zekere weerstand biedt aan het te infiltreren water. Een andere belangrijke reden waarom ontwerpers vaak nog een veiligheidsfactor gebruiken, is dat een waterdoorlatende verharding na verloop van tijd verstopt raakt. Om hier rekening mee te houden wordt bij het ontwerp een hogere neerslaggebeurtenis gehanteerd (BETONIEK, 2016; Kiwa, 2014; Stichting RIONED, 2008a). Deze ontwerprichtlijn geldt voor nieuwe infiltrerende verhardingsconstructies zonder kolken. In de praktijk slibben waterdoorlatende verhardingsconstructies dicht en is een vervang- of onderhoudseis nuttiger.

In Nederland wordt geadviseerd om doorlatende verharding te vervangen of onderhoud uit te voeren als de infiltratiecapaciteit lager is dan 0,50 m/d of 20,8 mm/u (Stichting RIONED, 2006b).

### 3.1.4 Testmethodes waterdoorlatende verhardingen

Het is belangrijk om infiltrerende verhardingsconstructies in de praktijk te kunnen toetsen op de doorlatendheid. Zo kan na aanleg worden vastgesteld of de waterdoorlatende verharding voldoet aan de beloofde infiltratiecapaciteit en of er geen fouten zijn gemaakt in het uitvoeringsproces. Ook is een doorlatendheidstest belangrijk om te bepalen of er moet worden gereinigd of eventueel herstraat dient te worden.

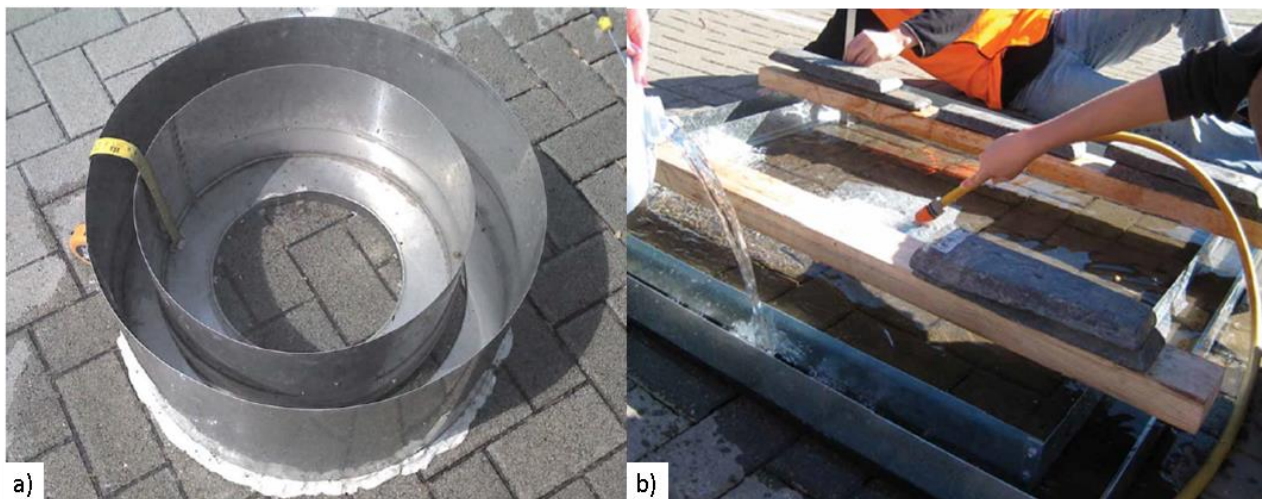
Een standaard methode om infiltrerende verhardingsconstructies te toetsen op de doorlatendheid lijkt op dit moment te ontbreken. De methodes die tot nu toe vaak worden gehanteerd zijn gebaseerd op een enkele- of een dubbele ringinfiltrometer of een variatie hierop, zie figuren 5 en 6. Hieronder worden de enkele- en de dubbele ringinfiltrometertest besproken. Ook wordt een nieuwe methode toegelicht die het mogelijk maakt grotere oppervlaktes of gehele waterdoorlatende verhardingen te toetsen op de doorlatendheid.

### **De dubbele ringinfiltrometertest:**

De dubbele ringinfiltrometer bestaat uit twee cilinders van verschillende diameters, met ongeveer dezelfde hoogte. De ringinfiltrometer wordt geplaatst op de verharding waarvan de doorlatendheid wordt bepaald. Belangrijk is dat de cilinders goed worden vastgemaakt aan de bestrating zodat geen water horizontaal tussen de ringen en de verharding kan weglekken. Het water in de buitenste ring zorgt ervoor dat het water in de binnenste ring zo veel mogelijk verticaal de grond in kan zakken. De waterdoorlatendheid wordt met de binnenste ring gemeten.

De doorlatendheidsmeting kan zowel met de *constant-head* als de *falling-head* test worden uitgevoerd (ASTM, 2009; Stichting RIONED, 2005). Bij een *falling-head* test wordt een hoeveelheid water in de binnen en buiten ring gegoten, zodat beide waterpeilen gelijk zijn. Vervolgens start de meting op  $t=0$  en wordt het waterniveau om de 5 á 30 seconden bijgehouden. De test kan worden gestopt als de waterdaling per tijdseenheid constant is.

De meting kan ook worden uitgevoerd met een *constant-head* test. Hierbij wordt het waterpeil in binnen en buiten ring constant gehouden en wordt er een volume water aan beide ringen toegevoegd. Het volume water dat wordt toegevoegd wordt per tijdseenheid bijgehouden. De test kan worden gestopt als het toegevoegde volume water per tijdseenheid constant is.



Figuur 5 (a) Dubbele ringinfiltrometer (Fassman & Blackbourn, 2010); (b) aangepaste vierkante dubbele ringinfiltrometer (Lucke & Beecham, 2011).

De *constant-head* test en de *falling-head* test worden beiden toegepast, maar de *falling-head* test heeft

de voorkeur aangezien deze eenvoudiger uit te voeren is. Voor de *falling-head* test hoef je niet een constant waterpeil vast te houden, maar giet men een hoeveelheid water in de infiltrometer en wordt in de tijd de waterdaling bijgehouden.

#### **De enkele ringinfiltrometertest:**

De enkele ringinfiltrometertest wordt alleen toegepast als een dubbele ringinfiltrometer niet kan worden toegepast. Dit is het geval bij infiltratiesnelheden die te hoog zijn om een constant waterpeil vast te houden. In dit geval is alleen een *falling-head* test mogelijk. Er wordt een afgemeten hoeveelheid water in de ring gegoten en de waterdaling wordt per tijdseenheid bijgehouden. Deze methode is minder nauwkeurig dan de dubbele ringinfiltrometertest, omdat het water vanuit de ring ook horizontaal kan infiltreren bij de afwezigheid van een tweede ring. Toch kan deze methode gehanteerd worden voor een schatting van de infiltratiecapaciteit (Bean et al., 2004; Helden, 2014).



Figuur 6 De enkele ringinfiltrometer (Lucke et al., 2015).

De dubbele ringinfiltrometer heeft de voorkeur boven de enkele ringinfiltrometer, omdat het water niet horizontaal kan weglekken. Verder geldt hoe groter het getoetste oppervlak, hoe representatiever de gemeten infiltratiesnelheid is voor de gehele waterdoorlatende verharding.

#### **Infiltratietest voor toetsing van volledige verharding:**

De hiervoor besproken methodes zijn gebaseerd op het toetsen van een klein gedeelte van de waterdoorlatende verharding. De Amerikaanse richtlijn ASTM D3385-09 voor de dubbele ringinfiltrometer beschrijft een test oppervlak voor de binnenste ring van  $0,0707 \text{ m}^2$  (ASTM, 2009). In Nederland hanteert men zelfs een nog kleiner oppervlak, respectievelijk  $0,01 \text{ m}^2$  (Kiwa, 2014). Het toetsen van een klein gedeelte van de verharding in het geval van ringinfiltrometertesten kan foute resultaten in de hand werken, aangezien het geteste oppervlak niet representatief hoeft te zijn voor de gehele verharding. Zoals een aantal onderzoeken hebben aangetoond kan de lokale infiltratiecapaciteit flink verschillen (Bean et al., 2004; Borgwardt, 2006; Van Dam & Van de Ven, 1984; Lucke & Beecham, 2011). Het zou beter zijn als er een methode beschikbaar is waarmee een groter oppervlak of zelfs de gehele verharding getoetst kan worden.

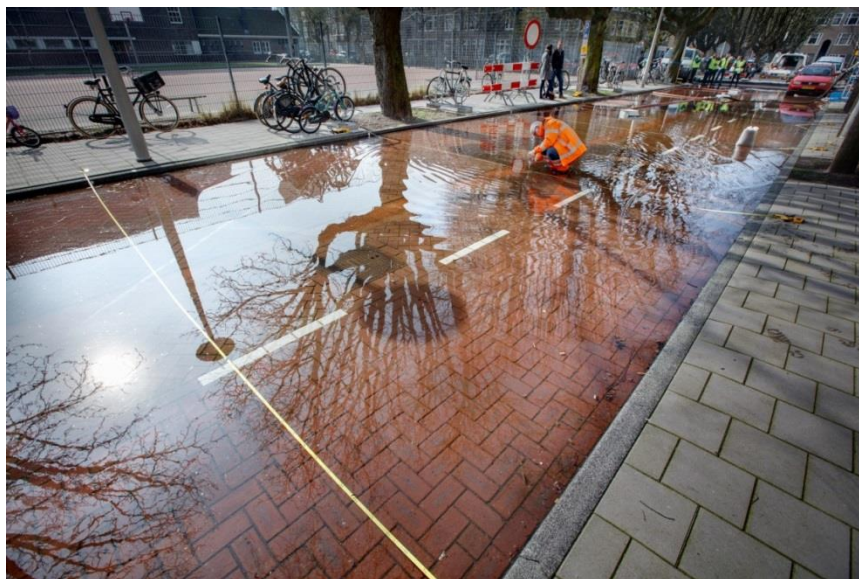
Lucke et al. (2014a) introduceerde een nieuwe methode om de doorlatendheid van waterdoorlatende verhardingsconstructies te testen. Deze methode maakt het mogelijk grotere oppervlaktes of *full scale* doorlatendheidstesten uit te voeren. De gedachte is dat door een groter gedeelte van waterdoorlatende verhardingsconstructies te testen, realistischere resultaten verkregen kunnen worden. De nieuw



geïntroduceerde meetmethode waarbij *full scale* testen worden uitgevoerd wordt ook wel *floodfighting* genoemd (Boogaard et al., 2017). Om met *floodfighting* een goede schatting te kunnen maken van de gemiddelde infiltratiecapaciteit van een waterdoorlatende verhardingsconstructie wordt aanbevolen tenminste een oppervlak van rond de 50 m<sup>2</sup> te testen. Dit geeft een realistischere representatie van het gehele oppervlak en minimaliseert het effect van eventuele lekkages. Om de doorlatendheidstest zo nauwkeurig mogelijk uit te voeren en om het water vast te houden binnen een testgebied, dient aan de zijkanten van de waterdoorlatende verharding een tijdelijke afsluiting te worden geconstrueerd. Dit kan bijvoorbeeld worden gerealiseerd door vijverfolie in combinatie met zandzakken of er kan slim gebruik worden gemaakt van eventueel aanwezige verkeersdrempels.

Met *floodfighting* worden grote hoeveelheden water op de bestrating gespuid om de straat goed onder water te kunnen zetten. Afhankelijk van de locatie kan men denken aan verschillende aanvoer opties: een tankwagen gevuld met water, watertanks, pompen vanuit nabij gelegen oppervlaktewater of het gebruik maken van een aanwezige brandkraan. De straat wordt maximaal gevuld, dit houdt in dat het water net niet over de stoep, de drempel of de tijdelijk aangebrachte afsluiting mag lopen. Nadat het testgebied is gevuld met water wordt de leegloop gemonitord met drukopnemers. Deze metingen worden vervolgens geverifieerd met handmetingen, (onderwater)camera's en visuele inspecties. Het is verstandig om meerdere meetmethodes te hanteren, zodat men niet alleen afhankelijk is van de drukopnemers. De drukopnemers zijn soms onbetrouwbaar of kunnen onnauwkeurige resultaten geven. Een kalibratie en verificatie van de metingen van de drukopnemers is een vereiste, net als het corrigeren voor de luchtdruk (Lucke et al., 2014a).

Een voorbeeld van *floodfighting* is de infiltratieproef die is uitgevoerd met de Granudrain in de Argonautenstraat, zie figuur 7. Hier is de RIONED ontwerpbui type 08 van 19,8 mm/u gesimuleerd waarbij er geen plassen op straat mochten ontstaan (Stichting RIONED, 2004b). Voor een uitgebreidere beschrijving van deze proef zie paragraaf 5.2.



Figuur 7 *Floodfighting* tijdens de infiltratieproef met de Granudrain in de Argonautenstraat (Waternet, 2016).

### 3.1.5 Het effect van de leeftijd van doorlatende verharding op de infiltratiecapaciteit

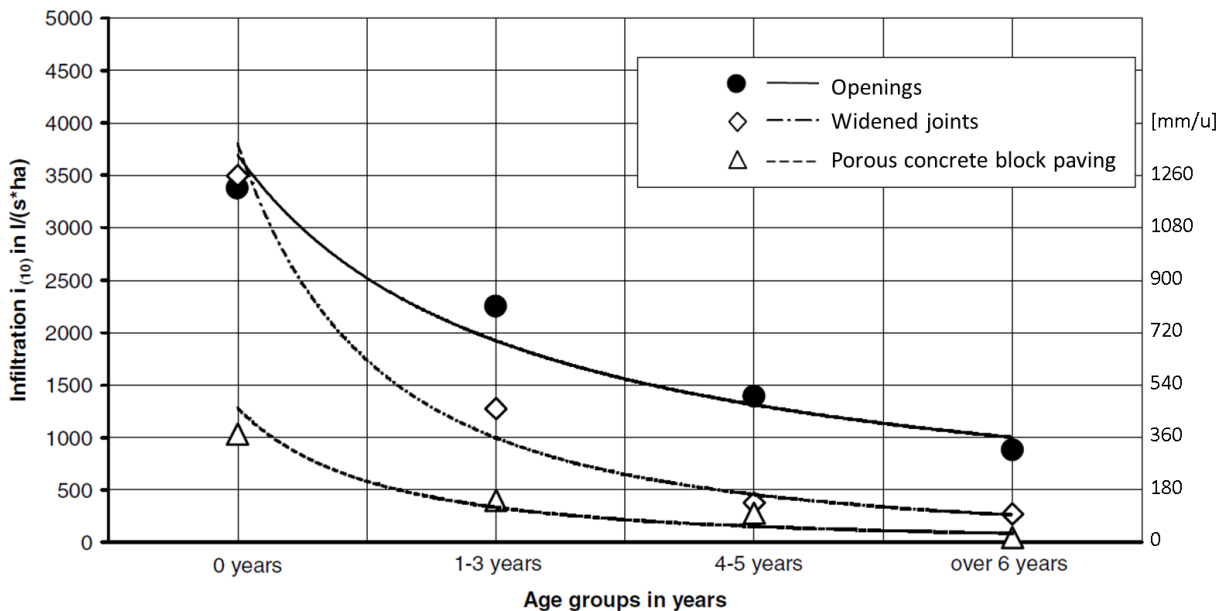
Waterdoorlatende bestrating wordt nationaal en internationaal toegepast om aan een verharding ook bufferende en infiltrerende eigenschappen toe te voegen. Het afgelopen decennium is een stijging zichtbaar in het aantal aangelegde infiltrerende verhardingsconstructies (Boogaard et al., 2014b).

Uit verschillende nationale en internationale studies (Dierkes et al., 2002; Lucke & Beecham, 2011; Pratt, 1990; Stichting RIONED, 2008b) naar de zuiverende werking van stedelijke infiltratievoorzieningen, blijkt dat de verontreiniging aanwezig in het afstromend regenwater effectief kan binden aan de bovenste decimeter(s) van de ondergrond. Verontreinigd regenwater kan bestaan uit gesuspendeerd materiaal, zware metalen, minerale olie en PAK-verbindingen. Door de verontreinigingen verandert de samenstelling en de kwaliteit van regenwater. De samenstelling van de verontreiniging is onder andere afhankelijk van het gebruik en de aard van het oppervlak waarvan het regenwater afstroomt (STOWA, 2007).

Het organisch materiaal dat aanwezig is in het regenwater zorgt op den duur voor het dichtslibben van de infiltrerende verhardingsconstructies. Nationale en internationale literatuur beschrijven onderzoeken naar de duurzaamheid van waterdoorlatende betonstraatstenen. Een aantal van deze onderzoeken zullen hieronder worden toegelicht.

Eén van de eerste onderzoeken naar het lange termijn functioneren van waterdoorlatende betonstraatstenen is uitgevoerd in Duitsland door Borgwardt (2006). Over een periode van 10 jaar onderzocht hij 80 infiltrerende verhardingsconstructies, bestaande uit poreuze betonstraatstenen, betonstraatstenen met verbrede voegen en betonstraatstenen met drainageopeningen. De metingen zijn uitgevoerd met een ring infiltrometer die met een sproeisysteem is aangesloten op een watertank. In figuur 8 is het resultaat zichtbaar van de afname van de infiltratiecapaciteit van de verschillende infiltrerende verhardingsconstructies.

Borgwardt (2006) concludeert dat de infiltratiecapaciteit van betonstraatstenen snel achteruit gaat naarmate ze ouder worden. Uit de resultaten blijkt dat er een afname van 10 tot 25% van de oorspronkelijk infiltratiecapaciteit kan optreden. Ook komt uit het onderzoek naar voren dat het meeste meegevoerde sediment zich accumuleert in de eerste 20 - 25 mm van de voegvullingen of het bovenste gedeelte van de poreuze betonstraatstenen (Bean et al., 2007; Borgwardt, 2006; Gerrits & James, 2002).



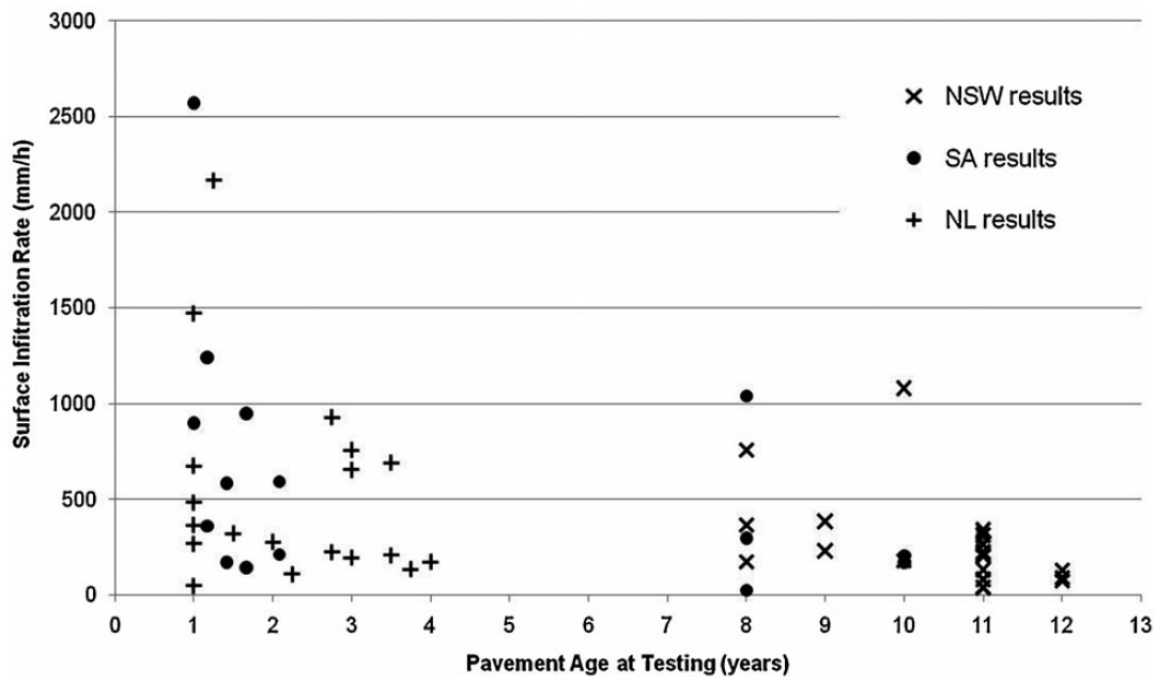
**Figuur 8** Infiltratiesnelheden van verschillende waterdoorlatende verhardingen uitgezet tegen de leeftijd van de constructies (naar Borgwardt, 2006).

Uit figuur 8 blijkt dat vanaf jaar nul poreuze betonstraatstenen al een lagere infiltratiecapaciteit bezitten dan betonstraatstenen met verbrede voegen of drainageopeningen.

Een ander onderzoek uitgevoerd door Boogaard et al. (2014b) onderzocht 55 waterdoorlatende betonbestratingen waarvan er 19 zich bevinden in Nederland en 36 in Australië. De leeftijd van de infiltrerende verhardingsconstructies varieerde tussen de 1 en 12 jaar.

De Australische metingen zijn uitgevoerd met een aangepaste vierkante dubbele ringinfiltrometer (Beecham et al., 2009) en worden vergeleken met een 3 maandelijks ontwerpneerslaggebeurtenis met een tijdsinterval van vijf minuten (tot ongeveer 60 mm/u). De Nederlandse metingen daarentegen zijn uitgevoerd met een 'gewone' dubbele ringinfiltrometer en worden vergeleken met de minimale Europese eis van 270 l/s·ha of 97,2 mm/.

Figuur 9 toont de resultaten van de 55 getoetste waterdoorlatende betonbestratingen.



Figuur 9 Gemeten infiltratiesnelheden van de 55 getoetste waterdoorlatende verhardingen uitgezet tegen de leeftijd van de constructies (Boogaard et al., 2014).

Uit de resultaten blijkt dat meer dan 90% van de getoetste waterdoorlatende bestratingen in Australië en Nederland voldoen aan de minimale Europese waterdoorlatend eis of de gestelde eis van een 3 maandelijks neerslaggebeurtenis in het geval van Australië. De studie suggereert dat de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende bestratingen gedurende de leeftijd afneemt door vervuiling van bijvoorbeeld werkzaamheden en de gestage accumulatie van sediment in de voegen of poriën van de betonstraatstenen. Toch toont dit onderzoek ook aan dat de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende betonbestrating na jaren van dienst ruimschoots voldoende kan zijn.

In België is ook onderzoek verricht naar waterdoorlatende betonbestrating bestaande uit poreuze betonstraatstenen, betonstraatstenen met verbrede voegen en betonstraatstenen met drainageopeningen (Helden, 2014). Verspreid over Vlaanderen zijn 15 locaties bemeaten waarvan de leeftijd van de verharding varieerde tussen de 9 en 16 jaar. Er is gebruik gemaakt van enkele en dubbele ringinfiltrimeters. De waarden van de bemeaten locaties zijn vergeleken met de Europese eis zonder veiligheidsfactor 270 l/s·ha of 97,2 mm/u en met een veiligheidsfactor, dus 540 l/s·ha of 194 mm/u. Uit dit onderzoek komt naar voren dat 9 van de 12 locaties voldoen aan de gestelde norm zonder veiligheidsfactor en 7 van de 12 locaties voldoen zelfs aan de waterdoorlatendheid eis met veiligheidsfactor. Net als bij de eerder besproken onderzoeken neemt de infiltratiecapaciteit af naarmate de leeftijd vordert, maar wordt de norm vaak wel nog gehaald. Verder wordt geconcludeerd, net als bij het onderzoek van Borgwardt (2006), dat poreuze betonstraatstenen van dezelfde leeftijd als betonstraatstenen met verbrede voegen of drainageopeningen een mindere infiltratiecapaciteit bezitten. Dit is aannemelijk doordat poreuze betonstraatstenen fijnere poriën hebben die makkelijker dicht kunnen slibben.

Als laatste onderzoek wordt een vervolg onderzoek van Boogaard et al. (2014b) besproken. Hierbij zijn 8 waterdoorlatende verhardingen getest verdeeld over vijf verschillende gemeentes in Nederland. De



infiltrerende verhardingsconstructies waren tenminste 7 jaar in gebruik en vergelijkbaar van constructie. In dit onderzoek is *floodfighting* als testmethode gehanteerd. De resultaten van Boogaard et al. (2014b) zijn in tabel 2 uitgezet. De tabel is aangevuld met later onderzoek van Boogaard et al. (2017). Hierin zijn nog eens 12 waterdoorlatende verhardingsconstructies met behulp van *floodfighting* getoetst. In totaal zijn 20 waterdoorlatende verhardingsconstructies getest variërend in leeftijd tussen de 2 en 9 jaar oud. De gemeten infiltratiecapaciteiten lopen uiteen van 20 mm/u tot aan 342 mm/u.

Nieuwe infiltrerende verhardingsconstructies in Nederland moeten voldoen aan de eis gesteld door Kiwa (2014) van 540 l/s-ha of 194 mm/u. Van de 20 geteste waterdoorlatende constructies zijn er vijf die een hogere infiltratiecapaciteit hebben dan 194 mm/u. Als de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende verharding kleiner wordt dan 20,8 mm/u dient er onderhoud te worden verricht (Stichting RIONED, 2006b). In dit geval zou voor één van de 20 infiltrerende verhardingsconstructie onderhoudswerkzaamheden moeten worden gepland.

**Tabel 3** Geteste waterdoorlatende verhardingen met bijbehorende leeftijd en infiltratiecapaciteit (aangepast naar Boogaard et al., 2014b en Boogaard et al., 2017).

Test locatie	Type bestrating	Leeftijd [jaren]	Infiltratiecapaciteit [mm/u]
Alkmaar	waterdoorlatende verharding	2	177
Almere	waterpasserende verharding	5	30
	waterpasserende verharding	7	20
Beverwijk	waterpasserende verharding	2	51
	waterpasserende verharding	2	63
Breda Effen	waterpasserende verharding	8	109
Delft	waterpasserende verharding	8	124
Goirle	waterpasserende verharding	8	308
	waterpasserende verharding	8	300
Groningen	waterpasserende verharding	6	103
Meppel	waterdoorlatende verharding	5	93
Utrecht	waterpasserende verharding	7	29
	waterpasserende verharding	7	71
Werkendam	waterpasserende verharding	8	69
	waterpasserende verharding	8	132
Zwolle	waterdoorlatende verharding	8	284
	waterdoorlatende verharding	8	186
	waterdoorlatende verharding	8	342
	waterdoorlatende verharding	8	212
	waterdoorlatende verharding	9	40

### 3.1.6 Het effect van onderhoud op de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende verharding

Infiltrerende verhardingsconstructies verstopen naarmate ze ouder worden. Met name in de eerste paar jaren is er een sterke reductie waar te nemen in de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende verharding (Borgwardt, 2006; Dierkes et al., 2002). Dit komt door sediment, organisch materiaal en andere verontreiniging die aanwezig zijn in afstromend regenwater (STOWA, 2007).

Om de levensduur van waterdoorlatende verhardingsconstructies te vergroten is onderhoud nodig. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat verstopping vooral plaatsvindt in de bovenste 2,5 cm van het voegmateriaal. Uit onderzoek blijkt dat het verwijderen van de bovenste 1,25 – 2,5 cm van het voegmateriaal een aanzienlijke verhoging geeft van de infiltratiecapaciteit ten opzichte van de verstopte situatie (Bean et al., 2007; Gerrits & James, 2002).

Een van de methodes om waterdoorlatende verhardingsconstructies te reinigen is het vegen met een straatveger (Baladès et al., 1995). Er zijn verschillende typen straatvegers zoals de mechanische straatveger, de veeg-zuigmachine en de ZOAB-reiniger.

Uit onderzoek van Drake & Bradford (2013) blijkt dat een ZOAB reiniger of vacuüm straatveger het effectiefst is bij waterpasserende verharding waarbij het water niet via de steen, maar via de voegen infiltreert. Waterdoorlatende verharding en poreus asfalt reageert minder goed op deze reinigingsmethode. Ook komt bij dit onderzoek naar voren dat wel een gedeelte van de oorspronkelijke infiltratiecapaciteit hersteld kan worden, maar dat 100% reiniging lastig is. Dit wordt bevestigd door Lucke (2014b), die aantoont dat sediment migreert naar de vlijlaag onder de betonstraatstenen en dat dit het volledig verwijderen van de vervuiling bemoeilijkt.

Ook Boogaard (2015) ondersteunt het gegeven dat na reinigen de infiltratiecapaciteit niet voor 100% hersteld kan worden. Boogaard (2015) heeft onderzoek gedaan in de gemeente Werkendam. Hier onderzocht hij twee secties van een waterdoorlatende verharding, zowel voor als na reinigen. De waterdoorlatende verharding was zeven jaar oud en het was voor het eerst dat er onderhoudswerkzaamheden werden uitgevoerd. De infiltratiecapaciteit van de secties betrof 111 en 245 mm/u voor de reiniging en verbeterde na reinigen respectievelijk met een factor 2,8 en 2,2.

Winston et al. (2015) hebben het effect van verschillende onderhoudsmethodes onderzocht voor het herstellen van de infiltratiecapaciteit van waterdoorlatende verhardingen. In totaal zijn tien verschillende doorlatende verhardingen getest in Amerika en Zweden. Het onderzoek maakt gebruik van acht kleinschalige en grootschalige onderhoudstechnieken. Het handmatig verwijderen van de bovenste 2 cm van het voegmateriaal, een mechanische straatveger, een straatveger met zuigfunctie, een ZOAB reiniger, handmatige bediende hoge drukspuit, handmatige vacuüm zuiger en een asfaltfrezer waarmee de toplaag van waterdoorlatend asfalt kan worden verwijderd. De belangrijkste worden hier gepresenteerd.

Voor waterdoorlatende en waterpasserende verhardingen van betonstraatstenen bleek de veeg-zuigmachine of de ZOAB reiniger de beste reinigingsmethode. Voor poreus asfalt werd een asfaltfrezer

gebruikt waarbij een gedeelte van het asfalt wordt geschraapt. Na deze reiniging werden zeer hoge infiltratiesnelheden gemeten. Het asfalt dient na het frezen wel weer hersteld te worden. Ook bleek dat een hoge drukspuit effectiever is dan een vacuüm zuiger voor het reinigen van doorlatend asfalt.

Kazemi et al. (2017) onderzochten twee waterdoorlatende verhardingsconstructies in Louisville Kentucky. Hier bleek dat een vacuüm zuiger of ZOAB reiniger in combinatie met hogedruk reiniging het meest effectief was. Uit dit en voorgaande onderzoeken blijkt dat reinigen van waterdoorlatende verhardingsconstructies effect heeft op het herstellen van de infiltratiecapaciteiten. Toch wordt volledig herstel bijna niet bereikt. Ook moet er frequenter worden onderhouden naarmate de leeftijd van de waterdoorlatende verharding vordert (Winston et al., 2015).

Algemeen wordt geadviseerd waterdoorlatende verhardingen direct na constructie te testen op de doorlatendheid en vervolgens om de vijf jaar na de aanleg (Boogaard et al., 2014a). De waterdoorlatende bestrating kan met het reguliere onderhoud in een gemeente door een veegzuigmachine mee worden genomen, met een frequentie van 4-12 keer per jaar (Stichting Rioned, 2006a). Hierbij moet worden opgepast met poreuze stenen, deze dienen alleen met kunststofborstels te worden geveegd. Bovendien dient het eerste jaar na aanleg de zuigkracht niet te hoog te zijn ingesteld zodat geen voegen worden leeggezogen. Jaarlijks dienen de voegen van de infiltrerende verharding te worden gecontroleerd en waar nodig aangevuld te worden. De verwachting is dat waterdoorlatende verharding maximaal 20 jaar kan functioneren (Pratt, 1990), hierna dient de constructie te worden herstraat. Hierbij moet aandacht worden besteedt aan de vervuiling in de vlijlaag (Ras & Rook, 2016).

### 3.1.7 Aandachtspunten en richtlijnen bij waterdoorlatende verharding

#### **Ontwerp:**

- Er geldt een ontwerprichtlijn voor de ontwateringsdiepte van 0,3 m onder de bergingslaag. Er wordt gebruik gemaakt van de GHG. De richtlijn dient als veiligheidsmarge en biedt flexibiliteit (STOWA, 2007).
- Bepaal voor de aanleg de doorlatendheid van de bodem en de GHG. Bij voorkeur wordt alleen geïnfilteerd in ondergrond met een doorlatendheid  $k > 1$  m/dag. Indien de  $k < 1$  m/dag dient een drain te worden aangesloten op het dichtstbijzijnde oppervlaktewater. Zoals al eerder is besproken is het onwenselijk om grondwater in de infiltrerende voorziening te hebben, want dit kan zorgen voor ijzerafzettingen, bacteriologische aangroei en pH-fluctuaties. Bij kalkgronden met een hoge pH-waarde kan het geotextiel dichtslibben, doordat de aanwezige kalk met het infiltrerende regenwater in contact komt en zo een slechtdoorlatende laag vormt (Stichting RIONED, 2007). De hoogste grondwaterstand dient voldoende diep onder de infiltrerende voorziening te liggen. Bij een hoge grondwaterstand kan de draagkracht en de vorstgevoeligheid in gevaar komen (STOWA, 2007).
- Gebruik bij voorkeur geen geotextiel. Geotextielen hebben een te hoge kans op dichtslibben. (Deltares, 2017; STOWA, 2007; Van de Ven, 2017b).
- Groenstroken zorgen voor vervuiling van de waterdoorlatende verhardingsconstructies. Boomwortels kunnen de constructie aantasten en hiermee de werking van een water-

doorlatende verharding verminderen. Tijdens de periode van bladval kan de voorziening verstopt raken. Er wordt afgeraden waterdoorlatende verhardingen aan te leggen naast groenstroken of op een locatie met veel bomen. Indien men toch een verharding wil aanleggen dient men rekening te houden met extra onderhoud (Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007).

- Er wordt geadviseerd een neerslaggebeurtenis te hanteren met een herhalingsperiode van 30 jaar. Dit houdt in dat tenminste 270 l/s·ha verwerkt dient te worden. Bij een toepassing van een correctiefactor van 2 wordt dit 540 l/s·ha of 194 mm/u (BETONIEK, 2016; Kiwa, 2014; Stichting RIONED, 2008a).
- Bij waterdoorlatende verharding wordt bij voorkeur een overloopvoorziening aangelegd om water op straat te voorkomen. Indien er voor wordt gekozen geen overloop aan te leggen, dient na gegaan te worden waar het water heen loopt in het geval van falen van de voorziening in het geval van hoosbuien of dichtslibbing (STOWA, 2007).
- In woonwijken kan waterdoorlatende verharding het beste alleen in de rijbaan worden aangelegd en niet bij parkeervakken, want deze zijn lastiger schoon te maken met bijvoorbeeld een veeg-zuigwagen vanwege geparkeerde auto's (STOWA, 2007).
- Stem de voegvulling af op de vlijlaag. De voegvulling dient een korreldiameter van 2-5 mm te bezitten om de infiltratie van hemelwater zo makkelijk mogelijk te maken. Ook dient het verschil in korreldiameter tussen de voegvulling en de vlijlaag niet te groot te zijn, anders zakt de voegvulling in de vlijlaag. Dit kan worden veroorzaakt door trillingen van het verkeer. Als dit gebeurt dan kunnen de stenen los gaan zitten, wat zorgt voor een verhoogde kans op schade aan de verharding (Boogaard et al., 2014b; STOWA, 2007).
- Het korrelskelet van een waterdoorlatende verharding is minder stabiel dan een conventionele verharding. Het is af te raden zwaar verkeer met een hoge intensiteit over infiltrerende verhardingsconstructies te laten rijden. In België wordt een norm gehanteerd van maximaal 50 zware en 500 lichte voertuigen die per dag over een infiltrerende verhardingsconstructie mogen rijden (OCW, 2009; Ras & Rook, 2016).

#### **Aanleg:**

- De waterdoorlatende verharding kan het beste zonder afschot worden aangelegd. Op deze manier kan de neerslag op een groot oppervlak infiltreren. Bij neerslag die groter is dan de infiltratiecapaciteit dient het mogelijk te zijn het water op een andere manier af te voeren, denk bijvoorbeeld aan verhoogde kolken (Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007).
- Zorg bij de opslag van materialen dat de waterdoorlatende verharding niet vervuild of beschadigd (STOWA, 2007).
- Voorkom verdichting van de ondergrond door bij ontgraven te letten op het zo min mogelijk roeren of verdichten van de bodem. Hierdoor zal de waterdoorlatendheid zo goed mogelijk behouden blijven. Bij de aanleg van een waterdoorlatende verharding gaat de voorkeur uit naar droge omstandigheden. Bij natte omstandigheden kan de ondergrond dichtgesmeerd worden waardoor een minder goed doorlatende laag ontstaat (STOWA, 2007).
- Tijdens de aanleg is het niet wenselijk om bouwverkeer over de waterdoorlatende verharding te laten rijden (STOWA, 2007). Bij de aanleg van de Granudrain in de Argonautenstraat zat een

plastic bescherming om de elementen, deze is later pas weggehaald nadat het plastic er in was gereden.

### **Beheer en onderhoud:**

- Waterdoorlatende verharding kan het beste gereinigd worden met een ZOAB reiniger. Hiermee wordt de doorlatendheid voor een gedeelte hersteld, maar vaak niet volledig (Boogaard, 2015; Winston et al., 2015). Bij waterpasserende verharding waarbij het water via de voegen infiltreert kan het vulmateriaal tijdens reinigen worden meegezogen. Als te veel van het materiaal is verdwenen dient dit te worden aangevuld. Bij infiltratie door poreuze betonstraatstenen kan hardnekkige verontreiniging achterblijven in de poriën (STOWA, 2007).
- Het is belangrijk de infiltrerende verhardingsconstructie direct na aanleg al te reinigen en de doorlatendheid te toetsen. Hierna kan de verharding worden meegenomen in het reguliere onderhoud (Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007). Wel wordt aangeraden een onderhoudsprogramma te koppelen aan de monitoring van de doorlatendheid van de toplaag. Bijvoorbeeld het toetsen van de doorlatendheid om de vijf jaar na aanleg (Boogaard et al., 2014a; Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007).
- Vanwege de eroderende werking wordt het gebruik van staalborstels afgeraden in het geval van poreuze stenen. Kunststofborstels zijn een beter alternatief (Ras & Rook, 2016; STOWA, 2007).
- Bij het gebruik van poreuze betonstraatstenen dient ook rekening te worden gehouden met omstandigheden in de winter. Denk hierbij aan het strooien van zand of zout als maatregelen om gladheid tegen te gaan. Het zand kan zorgen voor het dichtslibben van de poriën en zout kan poreuze betonstraatstenen en dus de doorlatendheid aantasten (Ras & Rook, 2016; Winston et al., 2016).
- De infiltratiecapaciteit blijft behouden door adequaat beheer en onderhoud van de verhardingsconstructie. Het beheer en ook de reinigingstechniek is afhankelijk van het type stenen dat is toegepast. Het wordt aangeraden de voorziening tenminste vier keer per jaar te vegen met een veeg-zuigwagen. Het reinigen met een ZOAB reiniger gebeurt bij voorkeur ongeveer één keer per jaar (STOWA, 2007).
- Bij het beheer wordt onderscheid gemaakt tussen waterdoorlatende en –passerende verharding. Stichting Rioned heeft een beheerschema waarin beheermaatregelen en onderhoudsactiviteiten staan voor waterdoorlatende en –passerende verharding, zie tabel 4.

Tabel 4 Samenhang van de beheeractiviteiten van de waterdoorlatende en –passerende verharding (naar Stichting RIONED, 2006a).

Aansturing maatregel	Onderdeel	Aspect	Maatregel	Aanbevolen frequentie
tijdsafhankelijk	verharding	dichtslibben	bouwverkeer, zand- en grondtransporten en zandopslag beperken	n.v.t.
	gehele systeem	verzakking	zwaar verkeer en veelvuldig draaien op de verharding beperken	
	gehele systeem	bodemkwaliteit	vervuiling bij de bron voorkomen	
periodiek	verharding	dichtslibben, bodemkwaliteit	straat vegen	4-12/j
	drain	dichtslibben, afzetting, verstopping	drain doorspuiten	1/j
visuele inspectie	verharding	verzakking	verzakking herstraten	1/j
doorlatendheid meten	gehele systeem	afzetting, dichtslibben	vegen/zuigen verharding en voegen	1/2-5 j
	gehele systeem	dichtslibben	onkruid bestrijden met heet water	

### 3.1.8 Aandachtspunten waterdoorlatende verharding voor Amsterdam

Hieronder volgen aandachtspunten bij het toepassen van waterdoorlatende –en passerende verharding specifiek voor de stad Amsterdam. Deze punten zijn opgesteld op basis van overleg met JanJaap Tenhaeff van het ingenieursbureau van Amsterdam:

- In Amsterdam rijdt veel vrachtverkeer ook in woonwijken. Het minder sterke korrelskelet bij waterpasserende verharding vormt dan een extra risico voor het losrijden van de straatstenen. Zeker als de voegvulling bij het regulier onderhoud eruit wordt gezogen.
- De stad Amsterdam wil de straten en straatstenen zoveel mogelijk standaardiseren. Over het algemeen worden de straten machinaal gelegd. De grootte van de waterdoorlatende –en passerende betonstraatstenen dienen dan ook op de rest van het assortiment straatstenen afgestemd te worden, zodat geen extra handelingen of materieel nodig zijn.
- In verband met vorst en stabiliteit voorkomt de gemeente Amsterdam het liefst water in de onderfundering.
- De gemeente Amsterdam beschikt niet over een ZOAB reiniger. De aanschaf van een ZOAB reiniger is dan ook een behoorlijke investering.
- De gemeente Amsterdam heeft weinig tot geen doorlatende verhardingen op dit moment. Dit houdt in dat op grote schaal een omslag moet plaatsvinden wil het lonen ook te investeren in intensiever onderhoud en bijbehorend materieel.

- Amsterdam is relatief groen en heeft veel bomen en vanwege de verwachte klimaatsverandering wil Amsterdam dit in de toekomst verder uitbreiden om hittestress tegen te gaan. Dit maakt het lastig om waterpasserende of waterdoorlatende verharding toe te passen.

## 3.2 DIT riool

Door de verwachte klimaatsverandering kan extreme neerslag vaker voorkomen. Hierdoor worden riolering en afwateringssystemen zwaarder belast. De winters worden natter en ook hevige regenbuien komen vaker voor. De regenintensiteit in de zomer neemt toe, maar het aantal regendagen daalt. Dit houdt in dat de lengte van droge periodes toeneemt (KNMI, 2014). Bij de inrichting van stedelijk gebied dient rekening gehouden te worden met een toename van de extremen, zowel in de zin van watertekort als wateroverlast (Waternet, 2016).

In het gemeentelijk rioleringsplan van Amsterdam (Waternet, 2016) staat dat de gemeente de sponswerking van de stad wil vergroten door hemelwater zo veel mogelijk te infiltreren daar waar het valt. Infiltratie of zelfs gebruik van hemelwater heeft de voorkeur boven afvoeren.

De nieuwe strategie is om hemelwater beter vast te houden, beter te bergen en alleen waar nodig af te voeren. Bij deze visie sluit het gebruik van een DIT riool mooi aan. Een DIT riool is bedoeld om hemelwater te laten infiltreren in het geval van een lage grondwaterstand, maar kan ook dienst doen als een drain in het geval van hoge grondwaterstanden.

Een drainage-infiltratie-transport riool (DIT-riool) combineert drie functies waarbij het afhankelijk van de grondwaterstand kan infiltreren of draineren. Bij een grondwaterstand lager dan de overstortdrempel zal hemelwater infiltreren, maar bij een te hoge piekbelasting zal het riool het overtollige hemelwater lozen op het dichtstbijzijnde oppervlaktewater. In het geval dat het grondwaterpeil hoger ligt dan de overstortdrempel werkt het DIT riool als een drain en wordt grondwater samen met het regenwater afgevoerd naar het oppervlaktewater.

Een DIT riool wordt aangelegd tussen het hoogst en laagst voorkomende grondwaterpeil en ligt soms onder of boven de grondwaterstand (Bouma & Rus, 2010). In gebieden met ijzerhoudend grondwater kan dit voor problemen zorgen. IJzerafzettingen kunnen ontstaan doordat in grondwater opgelost ijzer in aanraking komt met zuurstof. Het geotextiel of de geperforeerde gaatjes van een DIT riool kunnen door de ontstane ijzeroxide vlokken dichtslibben. Hierdoor neemt de infiltratiecapaciteit af. Aanbevolen wordt om een drainage- infiltratievoorziening aan te leggen in een grindkoffer, bij voorkeur zonder scheidingsdoeken (Deltares, 2017).

Een voorbeeld van een infiltratievoorziening die is aangelegd in een grindkoffer zijn de drains van de Amsterdamse Waterleidingduinen, waar oppervlaktewater wordt geïnfiltreerd om drinkwater voor te zuiveren (Smits, 2017).

In het geval dat men toch een DIT riool wil plaatsen op een locatie met ijzerrijk grondwater, is het verstandig deze onder de laagste grondwaterstand te plaatsen in combinatie met berging boven de hoogste grondwaterstand (Bouma & Rus, 2010). Waternet legt daarom ook, over het algemeen, een DIT riool aan onder de laagste grondwaterstand. Het risico op verstopping van ijzer is kleiner als het DIT riool permanent onder de grondwaterspiegel ligt. In dat geval zijn er minder afwisselingen van zuurstofrijke en zuurstofarme condities in en rond de buis. Door de aanleg onder de laagste grondwaterstand wordt ook wortel-ingroei voorkomen. De meeste bomen hebben geen wortelgroei onder de permanente grondwaterstand (Deltares, 2017).

Getracht is om onderzoeken uit de nationale en internationale literatuur te vinden met betrekking tot het DIT riool, maar dit bleek lastiger dan gedacht. Behalve de hierboven verwerkte literatuur is er niks gevonden. Samen met mijn begeleider Frans van de Ven (Van de Ven, 2017a) is vastgesteld dat er internationaal geen eenduidige terminologie bestaat voor de aanduiding van een DIT riool. Hoe het DIT riool over de tijd functioneert lijkt nog niet eerder onderzocht. Dit suggereert dat er op dit vlak een kennisleemte is. Om deze kennisleemte op te lossen zijn er onderzoeken nodig naar het functioneren van DIT riolen na een aantal jaren van dienst. De DIT riolen dienen zowel op hun infiltrerende als drainerende eigenschappen te worden getoetst.

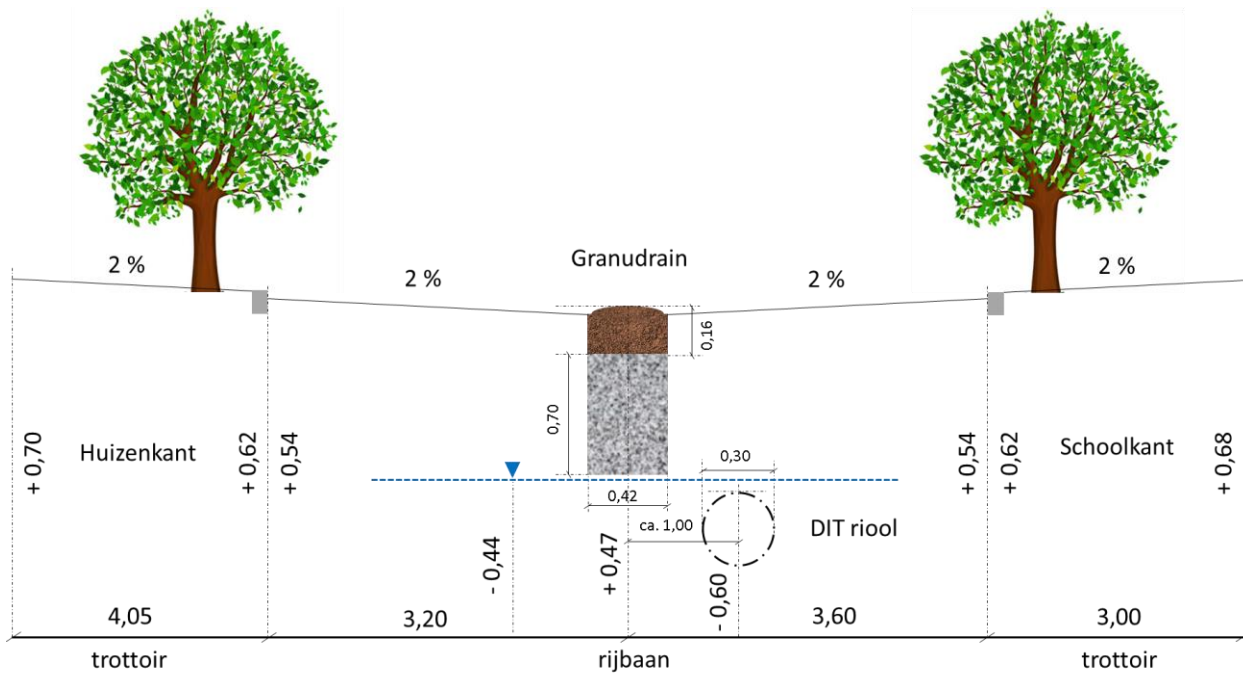


## 4 Werking van het systeem

In dit hoofdstuk zal de Granudrain in combinatie met het DIT riool in meer detail worden beschreven. Als eerste wordt het gehele systeem gepresenteerd. Daarna wordt de dimensionering van het Granudrainsysteem en de berekening van de theoretische infiltratiecapaciteit besproken. Als laatste zal het DIT riool aan bod komen.

### 4.1 Het systeem in meer detail

Zoals beschreven in paragraaf 1.3 bestaat het systeem in de Argonautenstraat uit zowel de Granudrain als het DIT riool. Figuur 10 toont een dwarsdoorsnede van de Argonautenstraat en de ligging van de beide systemen. Uit de dwarsdoorsnede blijkt dat het DIT riool schuin onder de Granudrain ligt. De geroteerde cijfers met een plus of min geven de hoogtes weer van de verschillende onderdelen ten opzichte van NAP. Ook de hart op hart afstand tussen de Granudrain en het DIT riool is weergegeven, deze is circa 1,00 m. De breedte van de rijbaan en de trottoirs zijn horizontaal weergegeven.



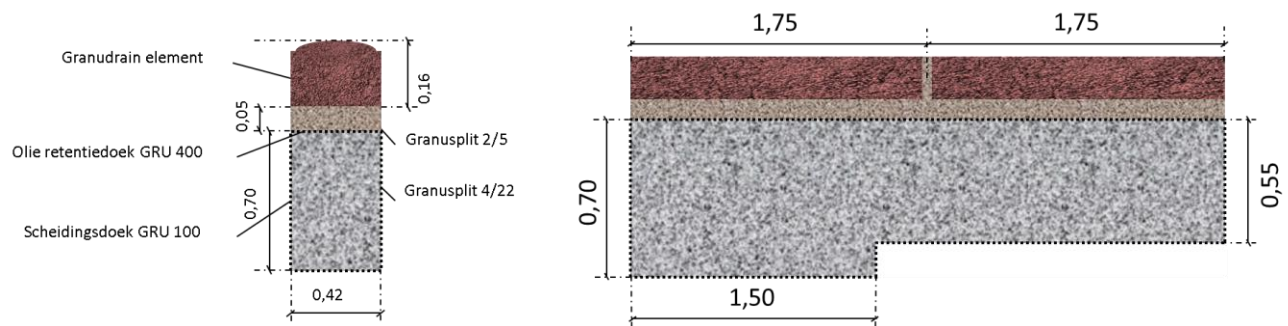
**Figuur 10** Dwarsdoorsnede Argonautenstraat, afstanden (horizontale getallen) zijn in meter en niveaus (verticale getallen) zijn in meter ten opzichte van NAP.

De boven- en onderkant van de Granudrain bevinden zich op respectievelijk NAP +0,47 m en NAP -0,39 m. De bovenkant van het DIT riool bevindt zich op NAP -0,60, dit is 0,21 m onder het niveau van de onderkant van de Granudrain. De onderkant van het DIT riool ligt op NAP -0,90 m. Het gemiddeld oppervlaktewaterpeil ligt op NAP -0,44 m, aangegeven met de blauwe stippellijn in figuur 10. Omdat het DIT riool is verbonden met het oppervlaktewater zal deze over het algemeen dus onder water staan.

## 4.2 De Granudrain

### 4.2.1 Dimensionering van het Granudrainsysteem

Figuur 11 toont een dwars- en langsdoornede van het Granudrainsysteem. Te zien is dat het systeem bestaat uit een toplaag, een vlijlaag en een bergingslaag. De toplaag van het Granudrainsysteem bestaat uit poreuze elementen van verlijmd granulaat. Een element is 1,75 m lang, 0,42 m breed en 0,16 m hoog. De elementen worden met elkaar verbonden door middel van een voegafdichting. Onder de toplaag bevindt zich een vlijlaag die bestaat uit Granusplit met een diameter van 2-5 mm. Na de vlijlaag volgt de bergingslaag, ook wel de grindkoffer genoemd, die bestaat uit Granusplit met een diameter van 4-22 mm. Figuur 11 toont ook de ligging van een olie retentiedoek (GRU 400), tussen de vlijlaag en de bergingslaag en een scheidingsdoek om de grindkoffer (GRU 100).



**Figuur 11** Dwars- en langsdoorsnede van het Granudrainsysteem, afmetingen zijn in meter.

Figuur 11 toont de dwarsdoorsnede van de kopse kant met de verdiepte grindkoffer. Figuur 12 toont een bovenaanzicht van de ligging van de Granudrain in de Argonautenstraat en geeft ook de locaties weer van de verdiepte grindkoffers. In totaal ligt een lengte van 129 meter aan Granudrain in de Argonautenstraat.



Figuur 12 Bovenaanzicht ligging Granudrain.

#### 4.2.2 Theoretische infiltratiecapaciteit

In deze paragraaf zal de theoretische infiltratiecapaciteit bepaald worden van het Granudrainsysteem. Het Granudrainsysteem is aangebracht in vier verschillende stroken, zie figuur 12. Het systeem bevindt zich op een laag ophoogzand dat een doorlatendheid heeft van 5-10 m/dag (Flink, 2017). In de volgende berekening wordt aangenomen dat de doorlatendheid van het zandpakket de maatgevende doorlatendheid betreft. Dit omdat de grindkoffer bestaat uit grof materiaal met een porositeit van circa 0,30 en verondersteld mag worden dat deze een hogere doorlatendheid heeft dan het onderliggende zandpakket.

Hemelwater dat via de Granudrainelementen in de grindkoffer terecht komt kan via de bodem en wanden van de grindkoffer infiltreren naar het grondwater, onder de aanname dat het grondwaterpeil lager ligt dan de onderkant van de grindkoffer. De bodem van de grindkoffer zal, naarmate het systeem ouder wordt, dichtslibben. Bij een capaciteitsberekening wordt daarom alleen met de hoogtes van de wanden gerekend en vaak nog met een veiligheidsfactor van twee. De infiltratiecapaciteit kan dan berekend worden met  $Q_{infiltratie} = \frac{1}{2} * A_{wanden} * k = \frac{1}{2} * H_{wand} * 2 * L * k$  (Van de Ven, 2016). Hierin is  $A_{wanden}$  het oppervlak van de wanden. Per strekkende meter reduceert de formule tot:  $q_{infiltratie} = \frac{1}{2} * H_{wand} * 2 * k$ .

Voor een doorlatendheid van  $k = 5$  m/dag en een hoogte van de grindkoffer van 0,55 m plus de hoogte van de vlijlaag 0,05 m plus de hoogte van het Granudrainelement van 0,15 m (verwaarlozen van de bolling) wordt de infiltratiecapaciteit per strekkende meter  $0,16 \text{ m}^3/\text{m}/\text{u}$ .

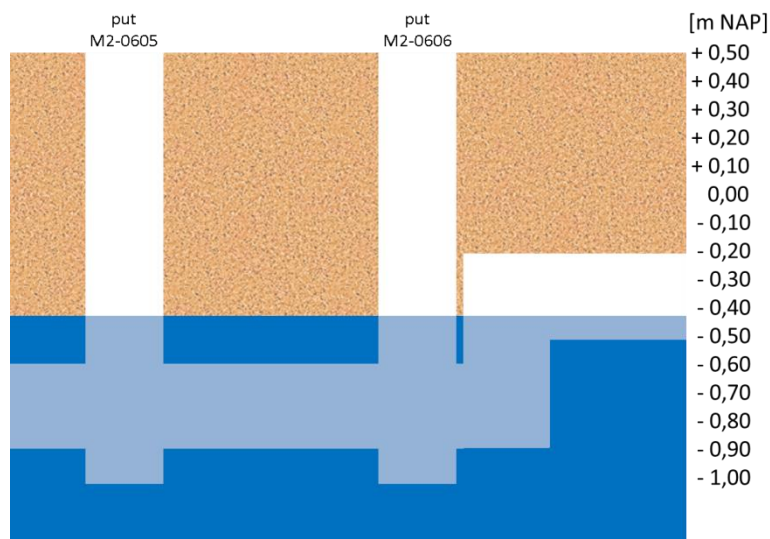
### 4.3 Het DIT riool

Figuur 13 toont een overzicht van het hemelwaterafvoerstelsel en de ligging van het DIT riool. Het DIT riool bevindt zich tussen de putten M2-0603 en M2-0609 en heeft een totale lengte van circa 182 m.



Figuur 13 Overzicht hemelwaterafvoerstelsel.

Het gedeelte van het DIT riool, tussen de putten M2-0606 en M2-0609 is verhoogd aangelegd en bevindt zich onder een klein verhang.



Figuur 14 Schematische weergave van het hoogteverschil in het DIT riool.



Gekozen is om het DIT riool verhoogd aan te leggen, omdat er een vuilwaterriool kruiste op deze positie. Waar de onderkant van de buis eerst op NAP -0,90 m lag, ligt hij bij de verhoging naar verwachting op NAP -0,51 m. Ook ligt het DIT riool, tussen de putten M2-0606 en M2-0609 waarschijnlijk onder een klein verhang. De onderkant van de buis ligt bij put M2-0609 waarschijnlijk op NAP -0,90 m.

Het DIT riool is een geperforeerde polyester buis die water kan draineren of infiltreren, zie figuur 15. Als door gevallen neerslag het grondwaterpeil hoger ligt dan het nabij gelegen oppervlaktewaterpeil draineert het DIT riool. In de zomer, wanneer het grondwaterpeil kan uitzakken, door onder andere verdamping van de bomen in de straat, kan er via het oppervlaktewater en het DIT riool juist water worden aangevoerd. Het DIT riool werkt dan als een infiltratieriool. De infiltratiefunctie van het DIT riool is belangrijk. In de zomer wanneer de bomen (iepen en kastanjes) flink kunnen transpireren kan het grondwaterpeil ver uit zakken. Dit brengt een risico met zich mee voor de huizen die zijn gefundeerd op houten palen. Wanneer de houten paalkoppen boven het grondwaterpeil uitkomen kunnen ze gaan rotten. Dit kan leiden tot verzakkingen van huizen. De Europese norm voor waterdekking van houten funderingen schrijft voor dat houten palen voor constructies alleen mogen worden gebruikt als ze worden aangelegd onder de laagste grondwaterstand (NEN, 2015). Bij Waternet hanteert men de eis dat houten funderingspalen moeten voldoen aan een waterdekking van tenminste 0,40 m. Dit aangezien de hoogte gegevens van houten palen een grote onbetrouwbaarheid laten zien. De koppen van de houten paalfunderingen in de Argonautenstraat liggen ongeveer op NAP -0,50 m (Visser, 2017).



**Figuur 15** Het DIT riool tijdens de installatie in de Argonautenstraat.

## 5 Beschrijving monitoringsnetwerk en uitgevoerde proeven

In dit hoofdstuk zal als eerste worden besproken het ontwerpen en monitoren van een meetnet voor niveaumetingen van het DIT riool, grondwater en het oppervlaktewater. Vervolgens worden de infiltratieproeven met de Granudrain toegelicht. Tenslotte volgt een beschrijving van de infiltratie- en drainageproef met het DIT riool.

### 5.1 Ontwerpen en monitoren van een meetnet

Om de werking van de Granudrain en het DIT riool te kunnen beoordelen zullen er metingen moeten worden gedaan. Hiervoor zal een meetnet moeten worden ontworpen die het mogelijk maakt niveaumetingen te doen in het DIT riool, grondwater en het oppervlaktewater.

Bij onderzoek hoort bij voorkeur een nulmeting, hiervoor was echter onvoldoende tijd. In plaats daarvan is het westelijke gedeelte van de Argonautenstraat gekozen ter referentie, aangezien de situatie hier vergelijkbaar is ten opzichte van het oostelijke gedeelte vóór de aanleg van het infiltratie- en drainagesysteem. Zo bestaat de bestrating uit klinkers, is de afstand tot het oppervlaktewater ongeveer gelijk en zijn er straatkolken en hemelwaterriolen aanwezig.

Figuur 16 toont het meetnet met peilbuizen in en rondom de Argonautenstraat. Er zijn drie raaien van elk drie peilbuizen aangelegd over het dwarsprofiel van de straat. Hierdoor is het mogelijk het effect van de Granudrain en het DIT riool goed te monitoren. Behalve de peilbuizen van het grondwater zijn in figuur 16 ook de drukopnemers zichtbaar die in het DIT riool en de overige hemelwaterafvoeren zijn ingehangen. Hiermee worden de peilen in de riolen gemonitord. Figuur 17 geeft een overzicht van het rioolstelsel in het algemeen, met zowel de rioolputten, hemelwaterafvoer (HWA), droogweerafvoer (DWA) en de positie van het DIT riool. Het DIT riool maakt deel uit van het hemelwaterafvoerstelsel.



Figuur 16 Meetnet van peilbuizen en drukopnemers in en rondom de Argonautenstraat.



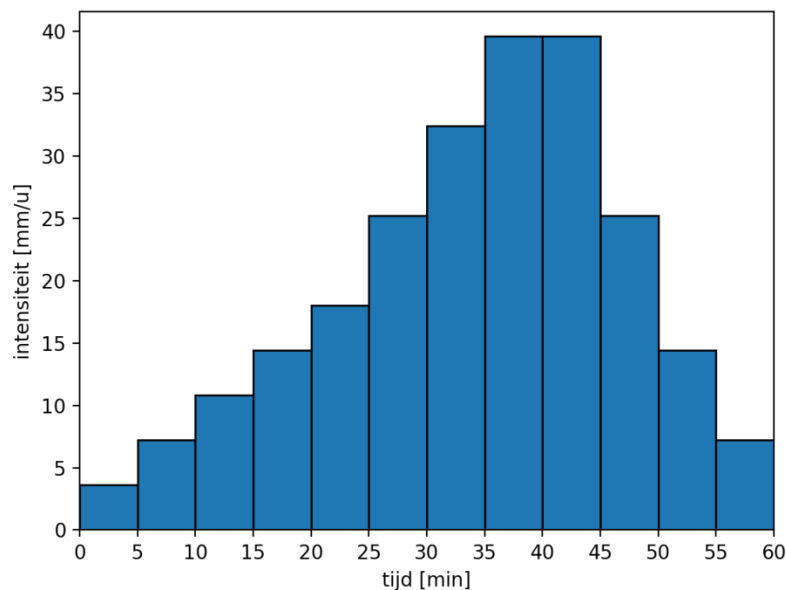
Figuur 17 Schematische weergave HWA, DWA en DIT riool.

## 5.2 Infiltratieproeven Granudrain

In juli 2015 is de Granudrain in combinatie met het DIT riool aangelegd. Ongeveer een jaar na de aanleg zijn twee infiltratieproeven uitgevoerd om de doorlatendheid van de Granudrain te bepalen. Deze zullen hieronder verder worden besproken.

Als eerste is een infiltratieproef uitgevoerd waarbij een bui is gesimuleerd, de RIONED ontwerp-bui type 08 van gemiddeld 19,8 mm/u (Stichting RIONED, 2004b). Waternet hanteert, net als andere waterschappen, deze ontwerp-bui voor het ontwerp van het hemelwaterafvoerstelsel. De type 08 ontwerp-bui heeft een herhalingsperiode van T=2 jaar en de richtlijn schrijft voor dat er net nog geen water op straat mag staan.

Gekozen is voor een ontwerp-bui type 08 omdat de piek zich hier achteraan bevindt. Het hemelwaterafvoersysteem moet in staat zijn om als het vol is alsnog de piek te verwerken. Dit is bij dezelfde hoeveelheid neerslag moeilijker als de piek achteraan is dan als die zich vooraan zou bevinden, aangezien het systeem vol raakt voordat de piek is gearriveerd. Figuur 18 toont de opbouw van de type 08 ontwerp-bui (Stichting RIONED, 2004b).



Figuur 18 Karakteristieken ontwerp-bui 08.

Voordat de ontwerp-bui type 08 gesimuleerd kan worden is een gedeelte van de Argonautenstraat afgesloten met zandzakken en vijverfolie. De zandzakken zijn geplaatst ter hoogte van put M20603, zie figuur 16. Bij het andere uiteinde bevindt zich een verkeersdrempel, waardoor het daar niet nodig is zandzakken te plaatsen. De infiltratieproeven zijn uitgevoerd over een lengte van 43 m. Dit is iets langer dan de eerste strook Granudrain, die een lengte van 34 m heeft, zie figuur 12. Het afwaterend oppervlak is gelijk aan  $13,85 * 43 = 596 \text{ m}^2$ .





Figuur 19 Afgesloten gedeelte van de Argonautenstraat tijdens de infiltratieproeven van de Granudrain.

Als wateraanvoer is een brandkraan gebruikt. De brandkraan is met slangen verbonden aan een meetinstallatie. Dit maakt het mogelijk om nauwkeurig het debiet te regelen. Vanuit de meetinstallatie wordt het water via slangen en uitstroombakken naar de straat geleid. Figuur 19 toont een impressie van de meetopstelling en de uitstroombakken.

Door gebruik te maken van de meetinstallatie waarmee de aanvoer van water naar de straat gereguleerd kan worden is zo goed mogelijk getracht de ontwerpbeurt type 08 na te bootsen. Het volume water op straat is bijgehouden door een aantal medewerkers van Waternet, door zowel de hoogte van de waterlaag te laten meten, als de breedte af te lezen op de meetlinten die zijn aangebracht in het dwarsprofiel van de straat. Een impressie hiervan is weergegeven in de figuren 19, 20 en 21.

Na de simulatie van de type 08 ontwerpbeurt is er nog een tweede infiltratieproef uitgevoerd. Hierbij is de straat relatief snel onder water gezet totdat het straatprofiel tussen de trottoirs bijna helemaal onder water stond. Aan de zijde van kastanjabomen (schoolplein) is met krijt aangegeven tot hoever het water kwam. Getracht is om het volume water op straat constant te houden door het nauwkeurig afstellen van de watertoevoer. Op het moment dat het volume water op straat constant is, is de stationaire infiltratiecapaciteit van de Granudrain plus de klinkers gelijk aan het debiet dat door de meetinstallatie naar de straat wordt geleid. Met behulp van deze proef kan de stationaire infiltratiesnelheid van de Granudrain geschat worden.





Figuur 20 Impressie van de handmatige hoogtemeting van de waterlaag op straat (Waternet, 2016).



Figuur 21 Impressie infiltratieproeven met de Granudrain (Waternet, 2016).

### 5.3 Infiltratie- en drainageproeven DIT riool

Schuin onder de Granudrain ligt een DIT riool in de Argonautenstraat. Om het functioneren van het DIT riool te kunnen evalueren zijn twee proeven uitgevoerd. Het gaat om respectievelijk een infiltratie- en een drainageproef. Om deze proeven uit te kunnen voeren is een deel van het DIT riool afgesloten met zogeheten balgen. Een balg is een soort ballon van rubber waarmee het riool kan worden afgesloten als deze wordt opgeblazen. Het gedeelte van het DIT riool dat voor deze proeven is gebruikt bevindt zich tussen put M20603 en put M20605, zie figuur 22.



Figuur 22 Overzicht proeflocatie infiltratie- en drainageproef met het DIT riool.

Er is gekozen voor put M20603 aangezien hier een kruising zit, dit maakt het mogelijk voor weggebruikers om ongehinderd te passeren. Bovendien bevindt zich een brandkraan in dit gedeelte van de straat. Verder is hier ook de infiltratieproef met de Granudrain gedaan, de locatie en de lokale omstandigheden zijn dus bekend.

Als eerste zal de infiltratieproef van het DIT riool worden besproken. Vervolgens komt de drainageproef aan bod.

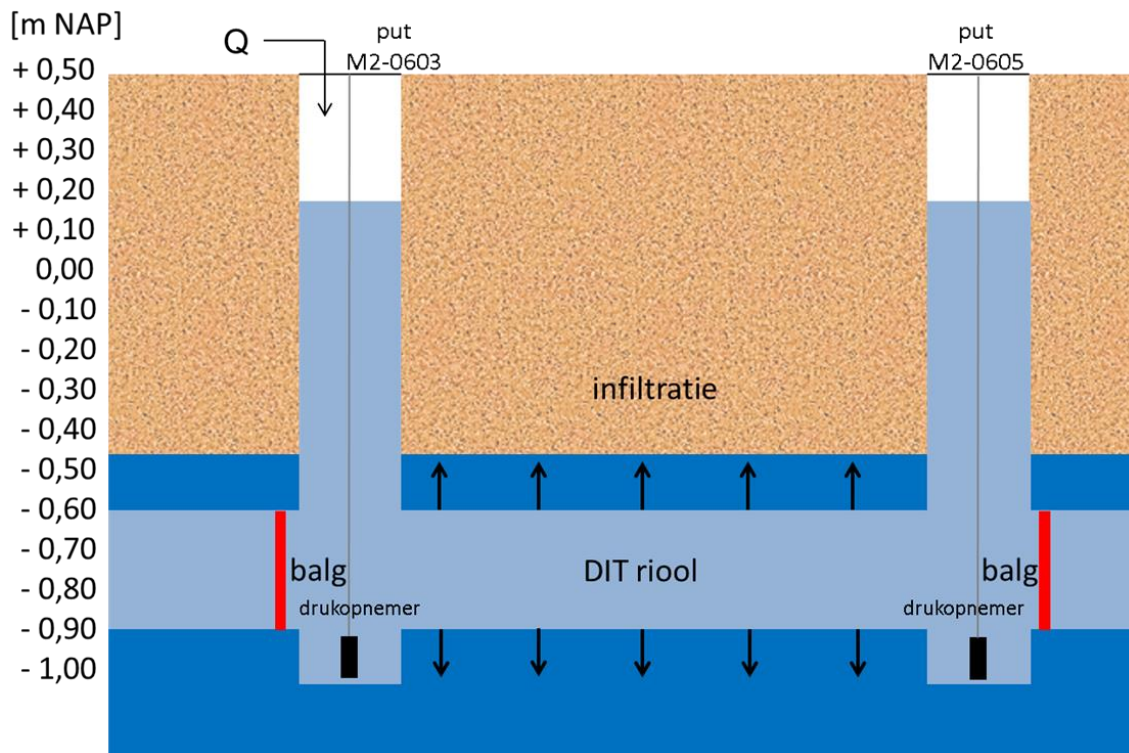


### 5.3.1 Infiltratieproef DIT riool

Om het DIT riool te kunnen beoordelen op haar infiltratie capaciteit wordt een proef uitgevoerd waarin een hoog oppervlaktewaterniveau wordt gesimuleerd. Het gedeelte van het DIT riool tussen de putten M20603 en M20605 wordt hiervoor afgesloten met balgen, zie figuur 23. Om een hoog oppervlakte-waterniveau te simuleren wordt de waterhoogte in de genoemde putten in verschillende stappen opgevoerd. Door de waterstand in deze putten omhoog te brengen wordt een drukverschil gecreëerd tussen het DIT riool en het omliggende grondwater. Het water zal via de gaatjes in het DIT riool infiltreren naar de bodem totdat het grondwaterpeil gelijk is aan het oppervlaktewaterpeil. Het water wordt in stappen van 0,25 m ten opzichte van het niveau in de put verhoogd en er is getracht dit niveau constant te houden, zie tabel 5. Als het niveau in de put niet veranderd is de toevoer van water gelijk aan het water dat infiltreert en aangezien de toevoer wordt geregeld via een meetframe kan de constante infiltratiecapaciteit per niveau worden bepaald. Het verhogen van het niveau in de put is doorgezet totdat het niveau in de put bijna gelijk is aan het straatniveau.

Tabel 5 Opzet infiltratieproef met het DIT riool.

verhoging	niveau in de put [m]	tijdsduur [min]
1	gelijk aan oppervlaktewaterniveau	15
2	oppervlaktewaterniveau +0,25 m	15
3	oppervlaktewaterniveau +0,50 m	15
4	oppervlaktewaterniveau +0,75 m	15



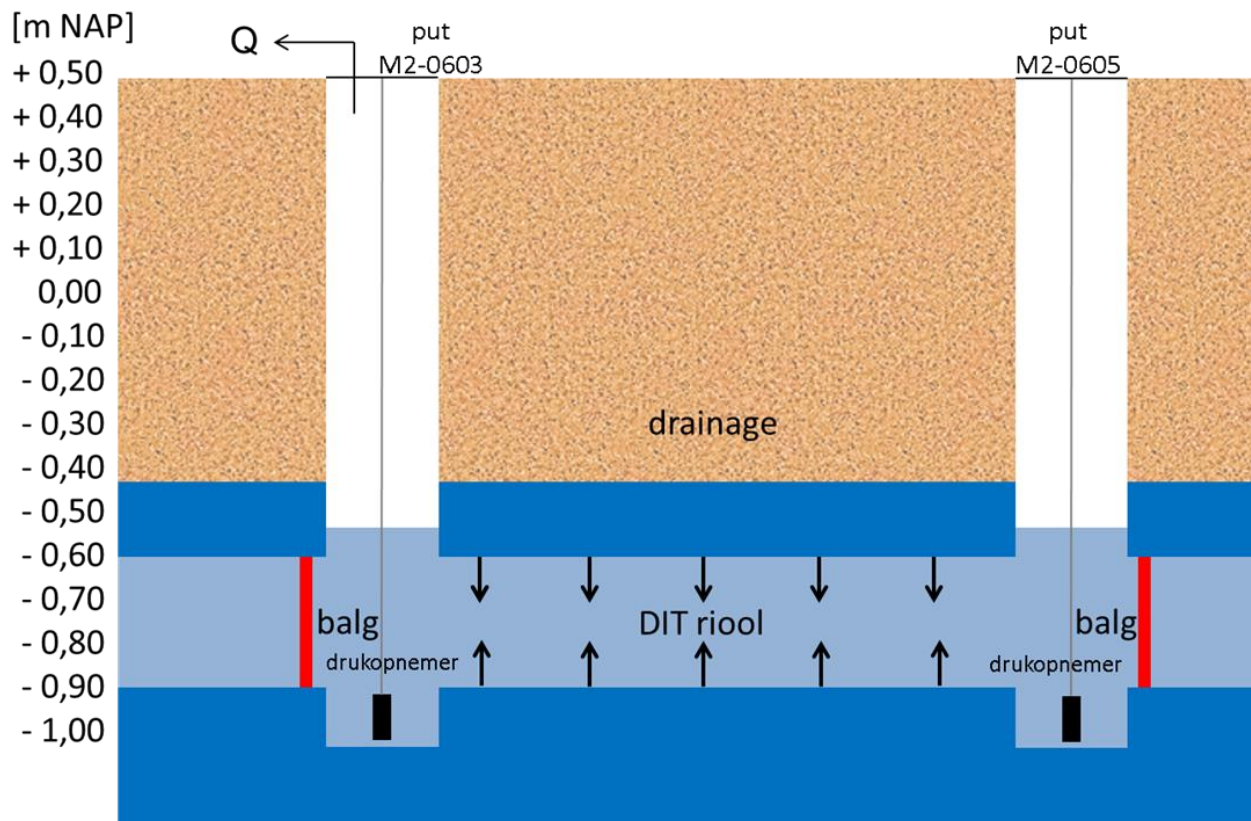
Figuur 23 Schematische weergave infiltratieproef DIT riool.

### 5.3.2 Drainageproef DIT riool

Naast de infiltratieproef is ook een drainageproef uitgevoerd voor het DIT riool, zie figuur 24. Hiervoor is opnieuw het gedeelte van het DIT riool tussen de putten M20603 en M20605 afgesloten met balgen. Bij deze proef wordt water uit put M2-0603 gepompt. Het water dat uit de put wordt onttrokken wordt door een meetinstallatie geleid zodat het debiet bekend is.

Zoals genoemd in de inleiding staat het DIT riool over het algemeen vol met water, omdat het is aangesloten op het nabij gelegen oppervlaktewater. Ter voorbereiding op de proef is de grondwaterstand in de dichtstbijzijnde peilfilter F05322 gemeten, zie figuur 16 voor de locatie. Het niveau in de put is met behulp van een pomp zo snel mogelijk verlaagd tot 0,20 m onder het gemeten grondwaterniveau. Dit is om vast te stellen hoe snel het water draineert uit het DIT riool en hoe snel het niveau in de putten terugkomt op het oorspronkelijke grondwaterniveau.

Vervolgens wordt dezelfde methode toegepast, maar met een grotere verlaging van het niveau in put M2-0603. Het niveau in de put wordt opnieuw verlaagd totdat het DIT riool helemaal leeg is. Vervolgens wordt de pompcapaciteit verlaagd en wordt gewacht totdat het oorspronkelijke niveau in de put (grondwaterniveau) bereikt is. De tijd die verstrijkt totdat het oorspronkelijke niveau weer wordt bereikt wordt gemeten, net als de hoeveelheid water die door de meetinstallatie wordt geleid. Uit deze gegevens en de gegevens van de omringende peilbuizen kan de drainagecapaciteit worden berekend.



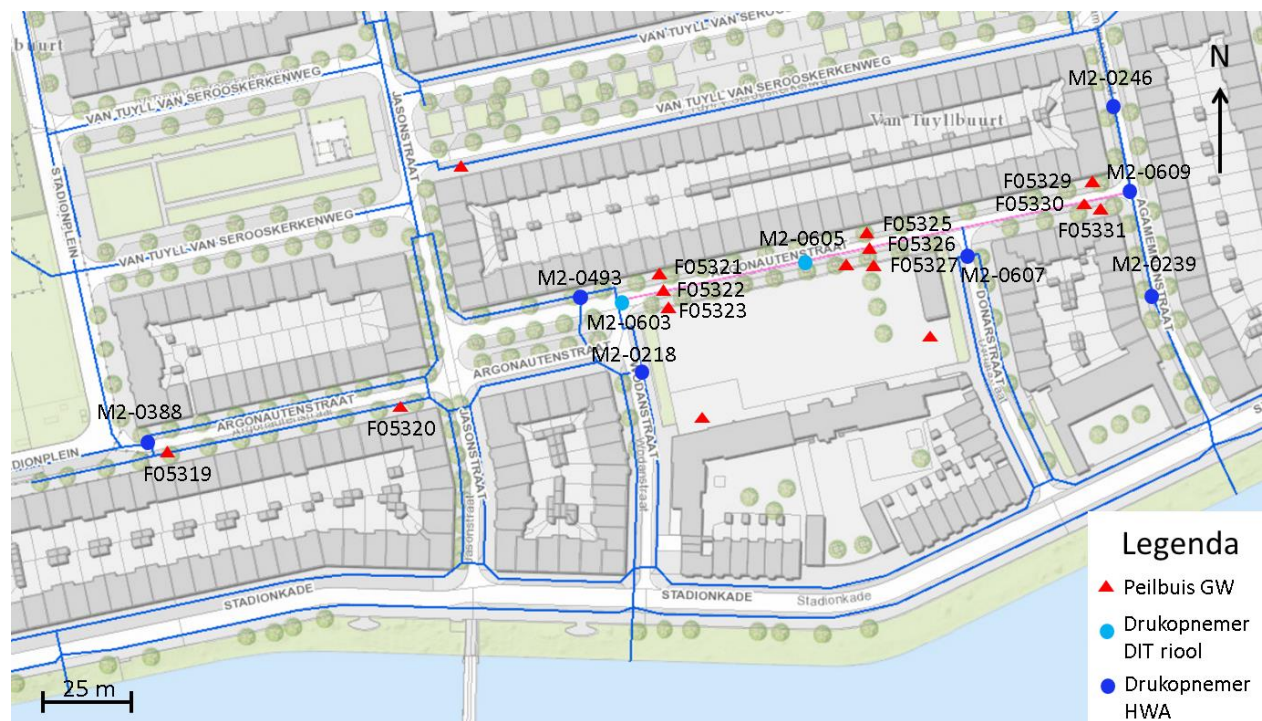
Figuur 24 Schematische weergave drainageproef DIT riool.

## 6 Resultaten en discussie

In dit hoofdstuk worden de metingen van het grondwater en het hemelwaterafvoerstelsel geanalyseerd. Vervolgens worden de resultaten van de proeven met de Granudrain en het DIT riool gepresenteerd en bediscussieerd.

### 6.1 Analyse grondwater

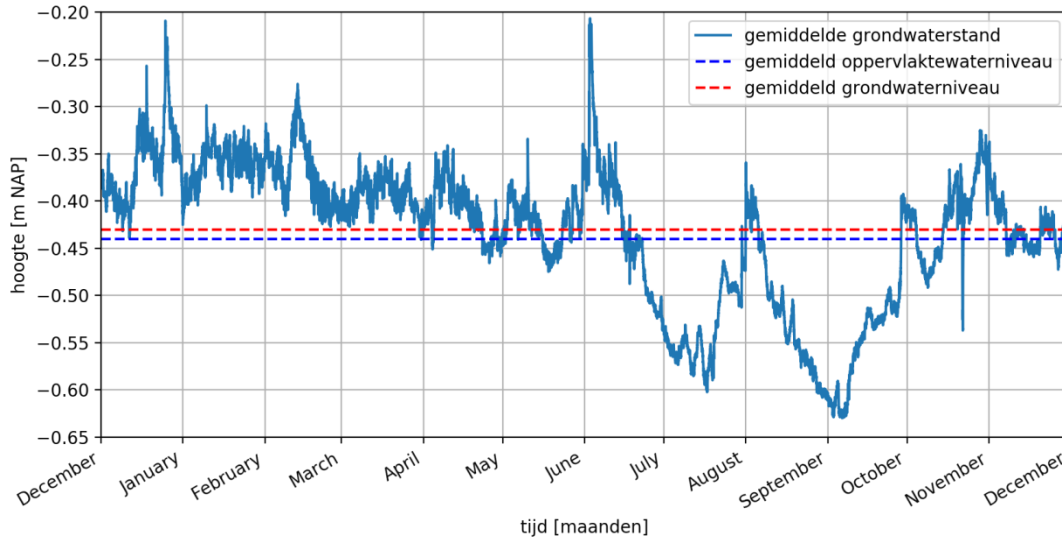
De monitoring van het grondwaterniveau en de waterstanden in het hemelwaterafvoerstelsel in de Argonautenstraat en omgeving is gestart in december 2015. Figuur 25 toont het overzicht van het monitoringsnetwerk.



Figuur 25 Locaties van de peilfilters en de drukopnemers van de Argonautenstraat en omgeving.

De metingen die worden onderzocht zijn tussen december 2015 en juni 2017 uitgevoerd, ongeveer een periode van anderhalf jaar. Uit metingen van het hemelwaterafvoerstelsel, dat direct is verbonden met het oppervlaktewater, blijkt dat het gemiddeld oppervlaktewaterpeil gelijk is aan NAP -0,44 m. Dit is iets lager dan het streefpeil van NAP -0,40 m. Het gemiddeld grondwaterpeil gemeten door de peilfilters in de Argonautenstraat is nagenoeg gelijk en ligt op NAP -0,43 m. Figuur 26 toont beide peilen. Uit de metingen van de peilfilters in de Argonautenstraat blijkt dat de raaien in langs- en dwarsrichting niet veel verschillen, zie bijlage 1.

Figuur 26 toont ook het gemiddeld grondwaterpeil tussen december 2015 en december 2016. Het grondwaterpeil fluctueert in de winter en voorjaar om het gemiddeld oppervlaktewaterpeil van NAP -0,44 m. In de zomermaanden juli, augustus en september is er echter een daling van de grondwaterstand zichtbaar tot NAP -0,63 m. Deze daling suggereert dat het DIT riool onvoldoende in staat is genoeg water aan te voeren in deze periode om de grondwaterstand op het gemiddeld oppervlaktewaterpeil te houden.



**Figuur 26** Gemiddelde grondwaterstand van de Argonautenstraat tussen december 2015 en december 2016.

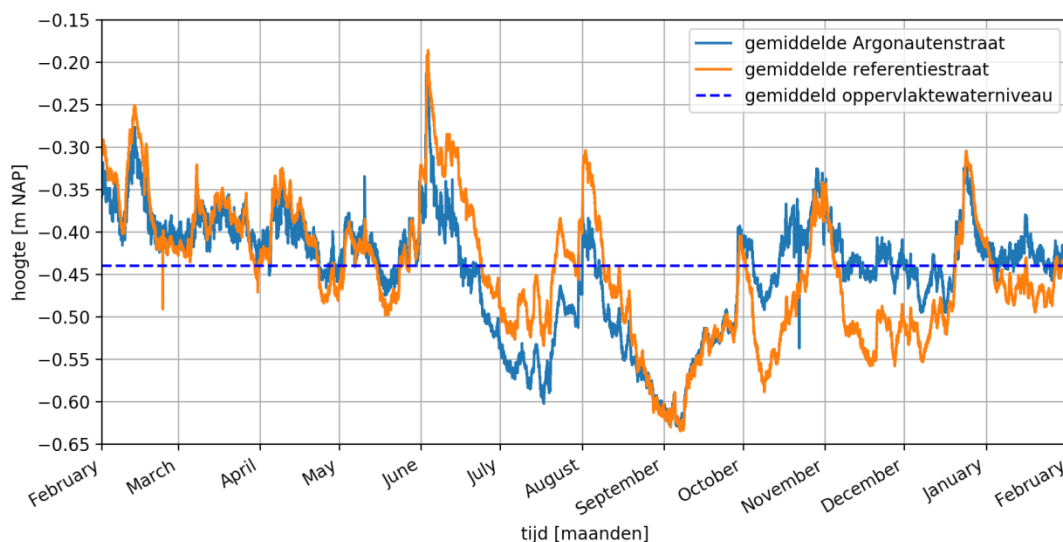
Om de infiltrerende werking van het DIT riool beter te kunnen beoordelen worden de gemiddelde grondwaterstanden in de Argonautenstraat en de referentiestraat met elkaar vergeleken, zie figuur 27. Wat opvalt is de daling van de grondwaterstanden aan het begin van de zomer van 2016, de maanden juli tot halverwege augustus. De gemiddelde grondwaterstand van de referentiestraat ligt boven die van de Argonautenstraat in deze periode. Het verschil tussen beide gemiddelden lijkt constant. Dit is opvallend, omdat verwacht kan worden dat het DIT riool in deze periode van het jaar water zou moeten aanvoeren. Het gemiddeld oppervlaktewaterpeil (NAP -0,44 m) is immers hoger dan het grondwaterpeil in deze maanden.

In september komen beide gemiddelden wel dicht bij elkaar te liggen. Vanaf eind oktober tot en met februari (2017) ligt het gemiddelde van de referentiestraat over het algemeen zelfs onder die van de Argonautenstraat. Het kleinere verschil tussen de gemiddelden in september en begin oktober suggereert de aanvulling van water door het DIT riool, maar dat dit niet zichtbaar is aan het begin van de zomer ontkracht deze bevinding. Waarom het verschil tussen de gemiddelden aan het begin van de zomer in 2016 niet afneemt, maar constant lijkt te blijven valt lastig te verklaren. Hieronder volgt een mogelijke verklaring.



De gemiddelde grondwaterstand in de referentiestraat is berekend uit de metingen van de peilfilters F05319 en F05320, zie figuur 23 voor de locaties van beide filters. Wat opvalt in de meetreeks van beide peilfilters is dat peilfilter F05319 op bepaalde momenten sterke dalingen vertoont. Gedurende de meetperiode is de peilfilter zelfs een keer droog gevallen. Dit gedeelte van de meetreeks is dan ook uit het gemiddelde gehaald, zie bijlage 1 voor een uitgebreidere analyse. Het droog vallen van de drukopnemer lijkt veroorzaakt door een bemaling. Peilfilter F05319 bevindt zich aan de meest westelijke kant van de referentiestraat, hier is lange tijd een bouwput geweest die de bemaling zou kunnen verklaren. Een verklaring voor de afname van het verschil tussen de gemiddeldes in de Argonautenstraat en de referentiestraat zou kunnen zijn dat peilfilter F05319 de gemiddelde grondwaterstand in de referentiestraat omlaag haalt doordat het peilfilter onderhevig is aan bemalingen. Dit lijkt een logischere verklaring dan dat in deze periode het DIT riool ineens wel water zou hebben aangevoerd resulterend in een hogere grondwaterstand in de Argonautenstraat.

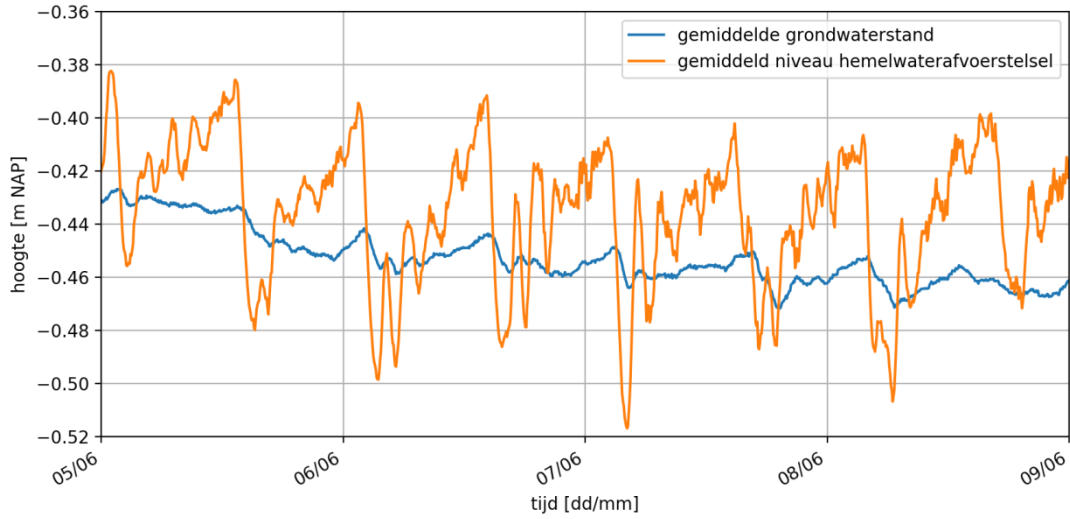
Algemeen suggereert de data dat als er al invloed merkbaar is van het DIT riool, dit zeer beperkt is. Het DIT riool lijkt dan ook onvoldoende in staat om genoeg water aan te voeren om een daling van de grondwaterstand in de zomer tegen te gaan.



**Figuur 27** Vergelijking gemiddelde grondwaterstanden tussen februari 2016 en februari 2017.

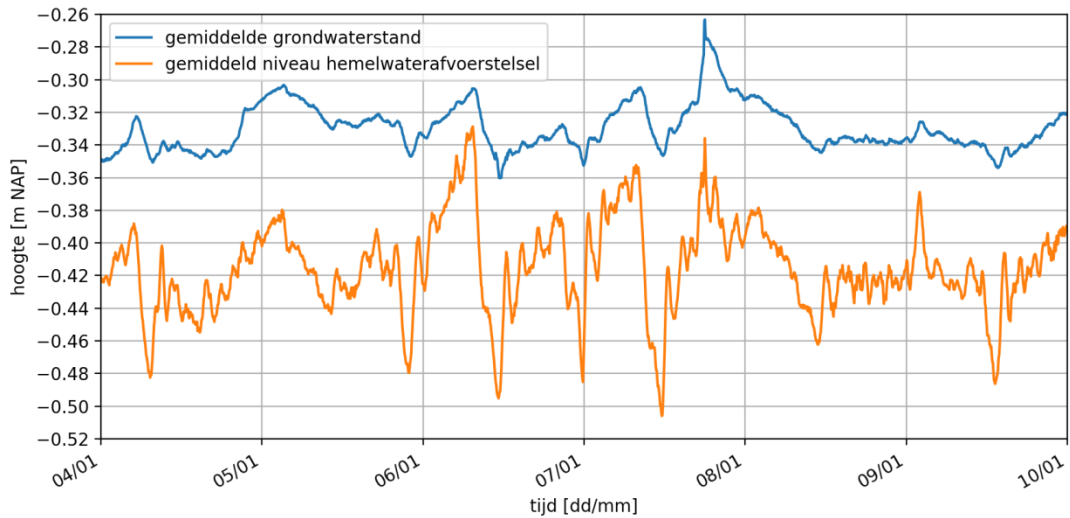
Verder blijkt uit de metingen dat de drie raaien in de Argonautenstraat zowel in langs- als dwarsrichting niet veel van elkaar verschillen, zie voor een beknopte analyse bijlage 1. Uit de metingen van de drukopnemers in het hemelwaterafvoerstelsel valt een dagelijks patroon te herkennen. Dit patroon waarbij de waterstand twee maal per dag daalt en weer stijgt wordt ook wel een pseudogetij genoemd. Dit wordt veroorzaakt door het tweemaal daags spuien van water, tijdens laag tij, door de sluisen bij IJmuiden. Het pseudogetij is in gedempte vorm ook terug te vinden in de gemiddelde grondwaterstand. Figuur 28 toont een stuk van de meetreeks van de drukopnemers in het hemelwaterafvoerstelsel in de zomer van 2016. Het pseudogetij valt goed te herkennen. Het oppervlaktewaterniveau ligt in deze periode hoger dan het grondwaterniveau, het DIT riool infiltreert in deze situatie.





Figuur 28 Pseudogetij in het hemelwaterafvoerstelsel en gemiddelde grondwaterstand in juni 2016.

In de winter, wanneer de gemiddelde grondwaterstand hoger ligt dan het oppervlaktewaterniveau, draineert het DIT riool. Figuur 29 toont een stuk van de meetreeks van de drukopnemers in het hemelwaterafvoerstelsel in de winter, aan het begin van 2016. Uit de figuur blijkt dat het grondwaterpeil mee fluctueert met het oppervlaktewaterpeil, zelfs als het DIT riool niet infiltreert.



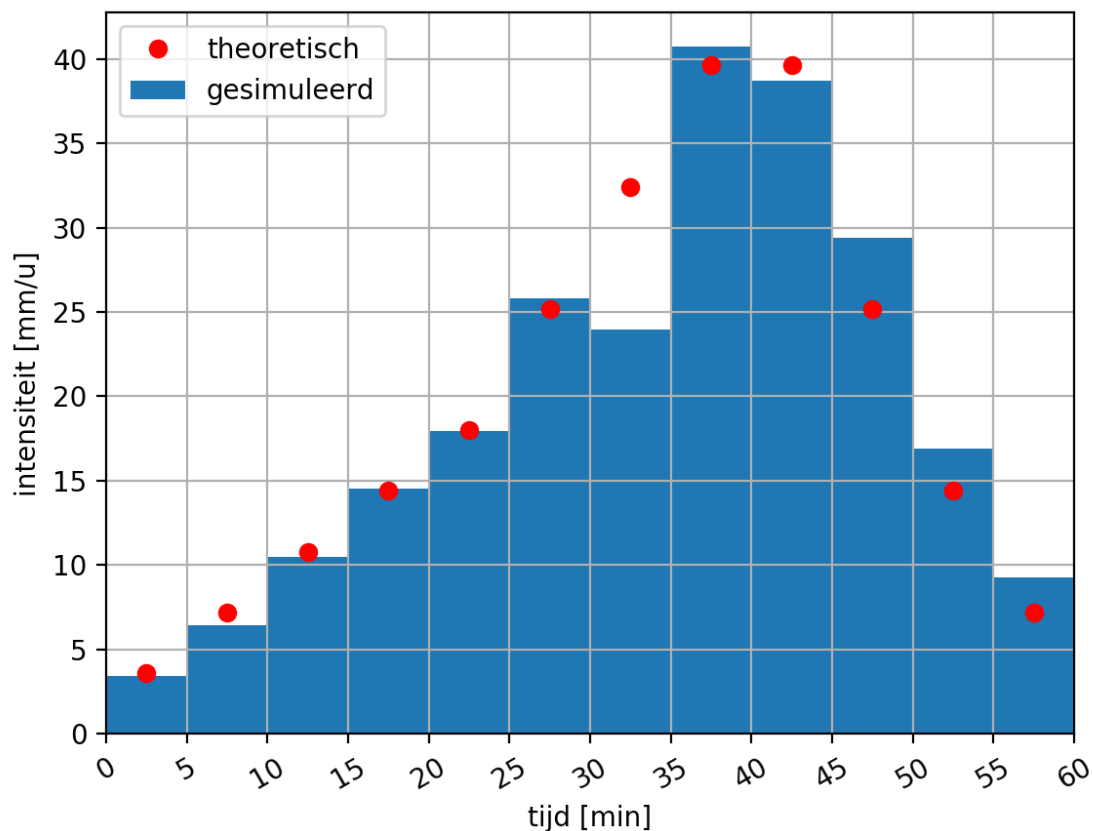
Figuur 29 Pseudogetij in het hemelwaterafvoerstelsel en gemiddelde grondwaterstand in januari 2016.

## 6.2 Infiltratieproeven Granudrain

### 6.2.1 Volumes

Zoals beschreven in paragraaf 5.2 zijn er twee infiltratieproeven uitgevoerd om de Granudrain te testen op de infiltratiecapaciteit. Bij de eerste proef is de RIONED ontwerp-bui 08 gesimuleerd. Deze ontwerp-richtlijn schrijft voor dat het systeem in staat moet zijn de bui 08 te verwerken zonder dat er water op straat komt te staan.

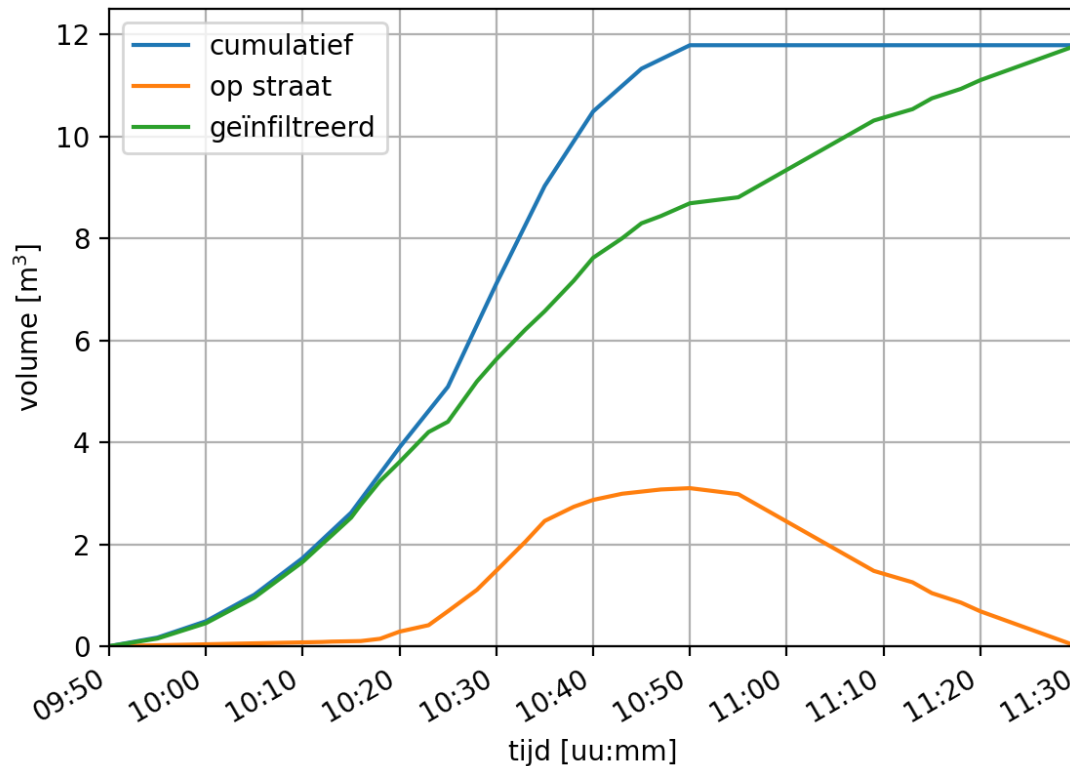
Door gebruik te maken van een brandkraan in combinatie met een meetopstelling kan het debiet gereguleerd worden. Figuur 30 toont het resultaat van de simulatie van de RIONED ontwerp-bui 08. De theoretische en gemeten intensiteiten zijn uitgezet tegen de tijd. De figuur toont dat de gemeten waarden goed overeenkomen met de theoretische waarden, met uitzondering van het punt tussen 30 en 35 minuten. Tijdens de proef bleek dat het hoge debiet niet gerealiseerd kon worden, vandaar dat rond dit tijdstip het spuien kort is gestopt, snel de kraan is vervangen door een grotere kraan, zodat het wel mogelijk was een hoger debiet te leveren.



Figuur 30 Simulatie RIONED ontwerp-bui 08. Theoretische en gemeten intensiteiten.

De meetopstelling meet naast het debiet ook het cumulatieve volume water dat op straat wordt gespuid. Door het volume water op straat te meten en af te trekken van het cumulatief gespuid volume

water kan het geïnfiltreerde volume water worden berekend. Figuur 31 toont deze drie volumes tijdens de simulatie van de ontwerpbui.



Figuur 31 Volumes tijdens de simulatie van de RIONED ontwerpbui 08.

Figuur 31 toont duidelijk aan dat de Granudrain in combinatie met de grindkoffer en de ondergrond niet in staat is de ontwerpbui 08 te verwerken. Na ongeveer 30 minuten, om 10:20 uur, beginnen plassen op straat te ontstaan. Het maximale volume water op straat is  $3,1 \text{ m}^3$  en wordt bereikt na 61 minuten om 10:50 uur. Om 10:50 uur en 20 seconde wordt de toevoer van water stopgezet. Het water op straat blijft infiltreren in de Granudrain, totdat om 11:30 uur de straat droog is.

De infiltratieproeven zijn gefilmd met een camera die vlakbij de brandkraan is opgehangen. Figuur 32 toont screenshots van de opgenomen beelden op  $t = 0$ ,  $t = 30 \text{ min}$ ,  $t = 61 \text{ min}$  en aan het einde van de proef op  $t = 1 \text{ u } 38 \text{ min}$ .

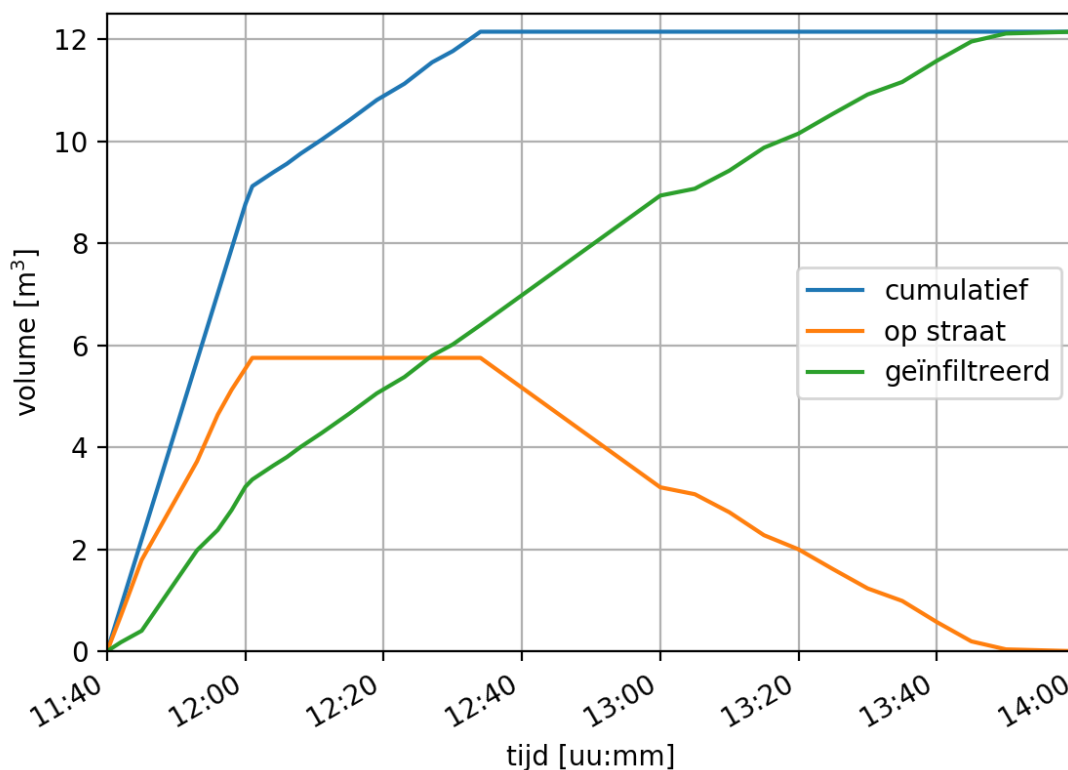


Figuur 32 Screenshots van camerabeelden tijdens de simulatie van de ontwerpbeurt 08.

Figuur 32 toont na 30 minuten om 10:20 uur plassen op straat, dit betekent dat de Granudrain op dit moment verzadigd is en de berging van de grindkoffer vol zit.

De plassen op straat zijn pas verdwenen na 1 uur en 40 minuten om 11:30 uur, op dit moment zit de berging in de Granudrain echter nog vol. De infiltratiecapaciteit van de Granudrain kan berekend worden door het cumulatief geïnfiltreerde volume water op bovengenoemde tijdstippen van elkaar af te trekken en te delen door het afwaterend oppervlak van  $596 \text{ m}^2$ . Uit de berekening volgt dat de infiltratiecapaciteit van de Granudrain  $11,8 \text{ mm/u}$  is of per strekkende meter gelijk is aan  $0,21 \text{ m}^3/\text{m/u}$ . Hierin is de bijdrage van de infiltratie via de voegen van de straatklinkers buiten beschouwing gelaten. In werkelijkheid zal de infiltratiecapaciteit van de Granudrain lager zijn.

Tien minuten na de eerste proef is nog een infiltratieproef uitgevoerd. Bij deze proef is de straat snel onder water gezet en vervolgens is het volume water op straat constant gehouden. Het gespuide volume water is in deze situatie gelijk aan het volume water dat infiltreert. Figuur 33 toont de verschillende volumes tijdens deze proef.



Figuur 33 Volumes tijdens tweede infiltratieproef, waarbij het volume op straat constant wordt gehouden.

Figuur 33 toont dat na 20 minuten de balans tussen de toevoer en de infiltratie van water wordt bereikt. Het volume water op straat blijft constant tussen 12:00 en 12:35 uur. Vanaf 12:35 uur wordt de toevoer van water gestopt en infiltreert het aanwezige water op straat langzaam in de Granudrain. Om 14:00 is al het aanwezige water op straat geïnfiltreerd. Ook van deze proef kan de infiltratiecapaciteit van de

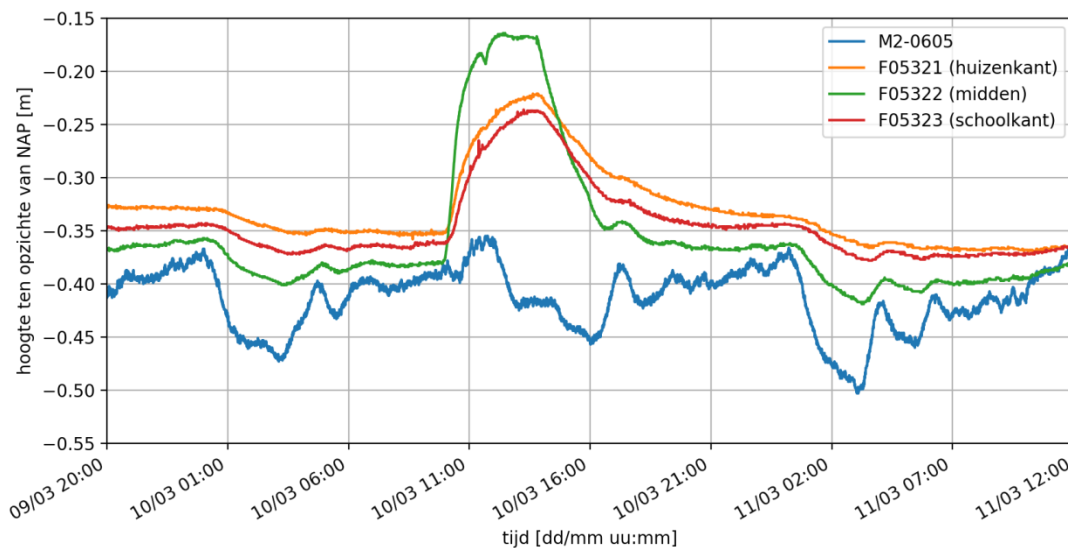


Granudrain worden berekend. Opnieuw wordt de bijdrage van de klinkers in deze berekening buiten beschouwing gelaten.

Figuur 33 toont onder andere het cumulatief geïnfiltreerde volume water (groene lijn) uitgezet tegen de tijd. De figuur toont dat de infiltratiecapaciteit constant is tussen 12:01 en 13:00 uur. Door het cumulatief geïnfiltreerde volume op de genoemde tijdstappen van elkaar af te trekken en te delen door het verschil in de tijd kan de infiltratiecapaciteit berekend worden. Uit de berekening blijkt dat de infiltratiecapaciteit gelijk is aan 9,51 mm/u of per strekkende meter gelijk is aan 0,17 m<sup>3</sup>/m/u. Deze waarde is iets lager dan berekend bij de eerste proef waar de infiltratiecapaciteit 0,20 m<sup>3</sup>/m/u is en net hoger dan de theoretisch berekende infiltratiecapaciteit van 0,16 m<sup>3</sup>/m/u, maar orde grootte komt dit goed overeen.

## 6.2.2 Stijghoogtes tijdens infiltratieproeven

Figuur 34 toont de reactie van het grondwater en de reactie in het DIT riool op de uitgevoerde infiltratieproeven. Hierin zijn de peilbuizen van de westelijke raai gebruikt in combinatie met de drukopnemer in het DIT riool M2-0605, zie figuur 25 voor de locaties.



Figuur 34 Reactie grondwater op de infiltratieproeven met de Granudrain.

Figuur 34 laat een stijging zien in peilbuis F05322 van ongeveer 0,20 m. Peilbuis F05322 bevindt zich in het midden van het deel waar het water op straat is gespuid. De peilbuis bevindt zich het dichtst bij de Granudrain en de reactie is daarom ook het grootst. De peilbuizen F05322 en F05323 die zich aan de huizen- en schoolkant bevinden laten een stijging zien van ongeveer 0,13 m. Ook het niveau in het DIT riool reageert op de infiltratieproeven, maar veel minder sterk in vergelijking met de peilbuizen. Het gaat om het gedeelte tussen 11:00 en 16:00 uur. Te zien is dat het niveau in het DIT riool niet onder NAP -0,45 m komt, wat onder normale omstandigheden wel het geval is. Het patroon dat valt waar te

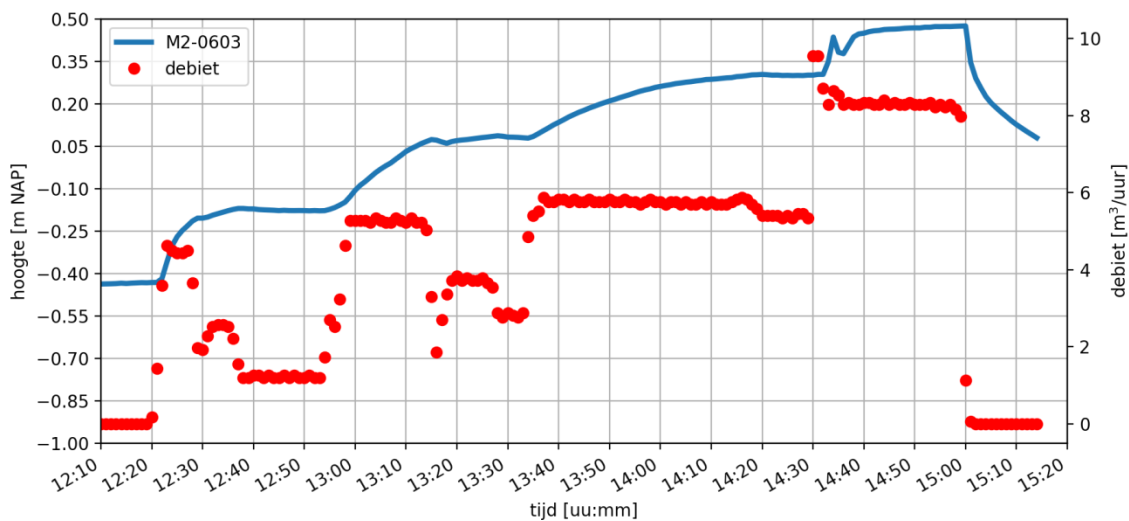
nemen in het DIT riool volgt het patroon van het oppervlaktewater omdat het DIT riool op het oppervlaktewater zit aangesloten. Het patroon, ook wel pseudogetij genoemd komt voort uit het tweemaal daags spuien van de sluizen in IJmuiden tijdens laagwater. Na de infiltratieproeven, laatste gedeelte van figuur 33, zijn de verschillen in grondwaterstanden weer nagenoeg gelijk aan het begin van de proef. De andere raaien in de Argonautenstraat laten geen waarneembare stijging zien van het grondwater, zie bijlage 1.

## 6.3 Proeven met het DIT riool

### 6.3.1 Infiltratieproef DIT riool

Op 13 december 2016 is een infiltratieproef met het DIT riool uitgevoerd, zoals beschreven in paragraaf 5.3.1. Figuur 35 toont het niveau in put M2-0603 en het geloosde debiet tijdens deze proef. Het niveau in put M2-0603 is in stappen verhoogd en wordt over een periode van steeds ongeveer een kwartier constant gehouden. Op het moment dat het niveau in de putten M2-0603 en M2-0605 constant blijft is de infiltratiecapaciteit van het DIT riool gelijk aan het geloosde debiet in put M2-0603. In bijlage 1 zijn de niveaus van beiden putten tijdens de infiltratieproef te vinden.

Het eerste gedeelte waarop het niveau in de putten constant is start om 12:38 uur en duurt tot 12:53 uur. Het niveau in de put is hier ongeveer NAP -0,17 m, een verhoging van 0,27 m ten opzichte van de beginsituatie. De infiltratiecapaciteit is hier gelijk aan het geloosde debiet en heeft een waarde van 1,2 m<sup>3</sup>/uur.

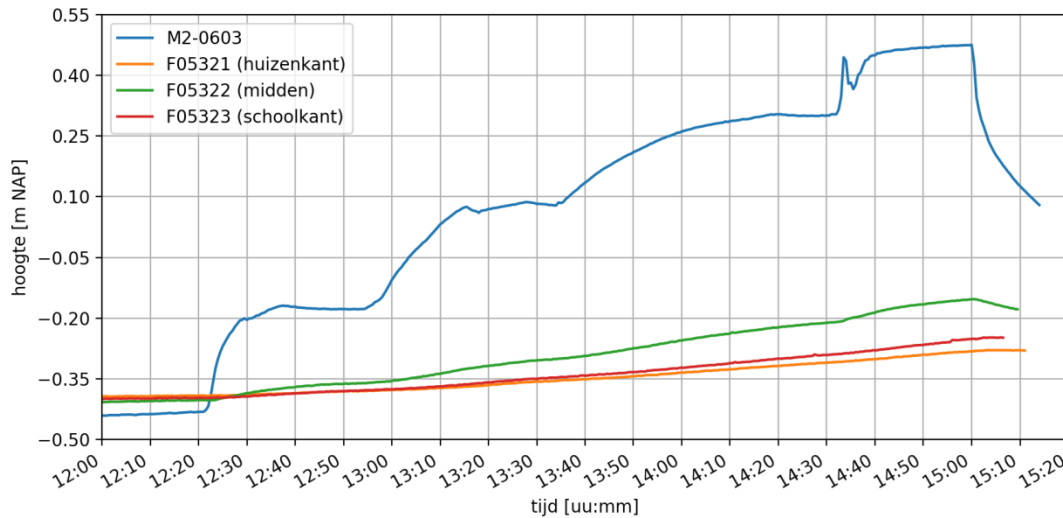


Figuur 35 Niveau in put M2-0603 en het geloosde debiet tijdens de infiltratieproef met het DIT riool op 13 december 2016.

Figuur 36 toont de reactie van het grondwater op de infiltratieproef. Om het potentiaalverschil te berekenen dat hoort bij de infiltratiecapaciteit van 1,2 m<sup>3</sup>/uur, wordt de hoogte in put M20603 afgetrokken van de hoogte in het dichtstbijzijnde peilfilter (F05322), zie figuur 36. Dit levert een poten-

tiaalverschil van  $-0,17 + 0,37 = 0,20$  m. Het tweede gedeelte met een ongeveer constant niveau loopt van 13:18 tot 13:27 uur. Het niveau is hier gelijk aan NAP +0,07 m, een verhoging van 0,24 m.

De infiltratiecapaciteit is gelijk aan  $3,7 \text{ m}^3/\text{uur}$ , bij een potentiaalverschil van  $0,07 + 0,32 = 0,39$  m. Het volgende gedeelte met een constant niveau bevindt zich tussen 14:19 en 14:29 uur. Het niveau in put M2-0603 is hier gelijk aan NAP +0,30 m, een verhoging van 0,23 m. De infiltratiecapaciteit is gelijk aan  $5,4 \text{ m}^3/\text{uur}$ , bij een potentiaalverschil van  $0,30 + 0,22 = 0,52$  m. Het laatste gedeelte met een constant niveau bevindt zich tussen 14:36 en 14:59 uur. Het niveau in de put is gelijk aan NAP +0,46 m, een verhoging van 0,16 m. De infiltratiecapaciteit is gelijk aan  $8,3 \text{ m}^3/\text{uur}$ , bij een potentiaalverschil van  $0,46 + 0,20 = 0,66$  m.



**Figuur 36** Het niveau in put M2-0603 en de reactie van het grondwater tijdens de infiltratieproef met het DIT riool op 13 december 2016.

De infiltratieproef met het DIT riool is gestart om 12:20 uur en is gestopt om 15:01 uur, in totaal heeft de proef 2 uur en 41 minuten geduurd. De verhogingen van het niveau in de put samen met relevante grootheden zijn samengevat in tabel 6.

**Tabel 6** Relevante grootheden tijdens de infiltratieproef met het DIT riool.

verhoging	begin niveau [m NAP]	eind niveau [m NAP]	verhoging cumulatief [m]	potentiaalverschil met F05322 [m]	infiltratiecapaciteit [ $\text{m}^3/\text{uur}$ ]
1	-0,44	-0,17	+0,27	0,20	1,2
2	-0,17	+0,07	+0,51	0,39	3,7
3	+0,07	+0,30	+0,74	0,52	5,4
4	+0,30	+0,46	+0,90	0,66	8,3

De proef is uitgevoerd over een lengte van 62,1 m. De infiltratiecapaciteit per strekkende meter is hieronder weergegeven, net als de infiltratiecapaciteit per strekkende meter per meter potentiaalverschil.

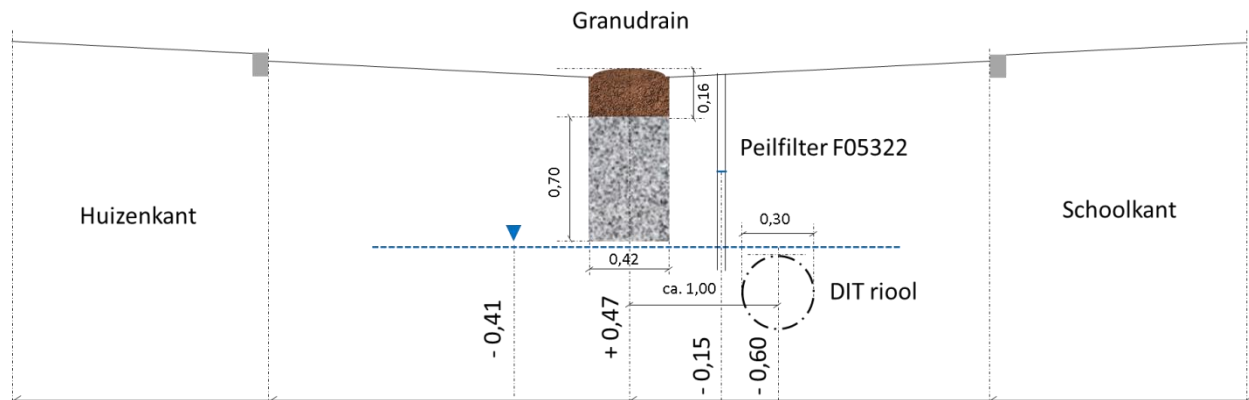


Tabel 7 Infiltratiecapaciteiten tijdens de infiltratieproef met het DIT riool.

verhoging	potentiaalverschil met F05322 [m]	infiltratiecapaciteit [m <sup>3</sup> /m/uur]	infiltratiecapaciteit [m <sup>3</sup> /m/uur per meter potentiaalverschil]
1	0,20	0,02	0,10
2	0,39	0,06	0,15
3	0,52	0,09	0,17
4	0,66	0,13	0,20

Tabel 6 toont dat de infiltratiecapaciteit omgerekend naar meter potentiaalverschil bij de verschillende verhogingen. De infiltratiecapaciteit bij verhoging vier is ongeveer twee keer zo groot als bij verhoging één. Als de ondergrond een constante doorlatendheid zou hebben dan zouden de infiltratiecapaciteiten omgerekend naar meter potentiaalverschil orde grootte overeen moeten komen. Dit is niet het geval en dat is opmerkelijk.

Een verklaring zou kunnen zijn dat op een bepaald moment tijdens de proef de grindkoffer van de Granudrain wordt gevuld en dat dit leidt tot een andere infiltratiecapaciteit. Het grondwaterpeil aan het begin van de proef ligt op NAP -0,41 m en het maximale peil ligt op NAP -0,15 m. Figuur 37 toont een dwarsdoorsnede van de Argonautenstraat tijdens de infiltratieproef.

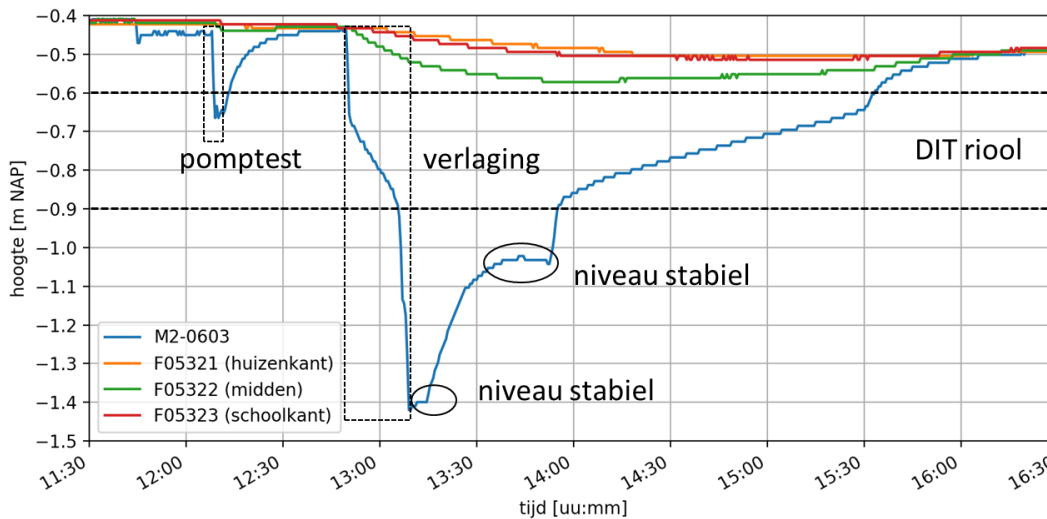


Figuur 37 Dwarsdoorsnede van de Granudrain, het DIT riool en peilfilter F05322. De blauwe stippellijn geeft het grondwaterpeil aan het begin van de proef en het niveau in de peilfilter geeft het maximale grondwaterpeil tijdens de proef.

Een andere verklaring waarom de infiltratiecapaciteiten verschillen zou kunnen liggen in het feit dat het grondwaterpeil nog geen volledig stationaire situatie heeft bereikt. Anders gezegd het vasthouden van het niveau in de put zou langer vastgehouden moeten worden. Uit figuur 36 is te zien dat het grondwaterpeil wel iets afvlakt, maar niet voldoende om een constant peil aan te houden. Tijdens de proef wordt eerst de berging in de ondergrond en grindkoffer gevuld, de berekende infiltratiecapaciteiten weerspiegelen nog niet de stationaire infiltratiecapaciteit. Daarvoor is de proef te kort. Met een niet-stationair grondwatermodel kan hier in meer detail aan gerekend worden.

### 6.3.2 Drainageproef DIT riool

Op 22 december 2016, een aantal dagen na de infiltratieproef met het DIT riool is een drainageproef uitgevoerd. Figuur 38 toont het resultaat van deze proef.



**Figuur 38** Reactie grondwater en het niveau in put M2-0603 tijdens de drainageproef met het DIT riool op 22 december 2016.

Zoals beschreven in paragraaf 5.3.2 is eerst een pomptest met een kleine verlaging uitgevoerd om vast te stellen hoe snel het water terugkomt naar de oorspronkelijke grondwaterstand. Nadat het niveau terug is op het oorspronkelijke niveau is een tweede, veel grotere verlaging uitgevoerd. Hierbij zijn het DIT riool en put M2-0603 helemaal leeg gepompt. Figuur 38 toont de ligging van het DIT riool met de horizontale zwarte stippellijnen. Na de verlaging is het debiet van de pomp teruggeschroefd totdat het niveau in de put stabiel was. Dit bleek het geval bij een afvoer van  $3,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ . Doordat de put leeg gepompt is werd lucht aangezogen waardoor de pomp het stabiele niveau lastig kon vasthouden. De pomp is even stopgezet totdat het niveau in de put bijna tot de onderkant van het DIT riool is gestegen. Vervolgens is de afvoer zo afgesteld dat het niveau in de put wel constant gehouden kon worden. Het debiet bleek in deze situatie ook gelijk aan  $3,5 \text{ m}^3/\text{uur}$  of  $0,06 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$ , bij een potentiaalverschil van ongeveer  $0,34 \text{ m}$  tussen het DIT riool en de dichtstbijzijnde peilfilter. Dit is omgerekend  $0,18 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$  per meter potentiaalverschil.

Naast deze drainagecapaciteit kan ook een gemiddelde drainagecapaciteit worden verkregen door te kijken naar het gedeelte waar het DIT riool zich vult met water. Het DIT riool vult zich vanaf 13:55 tot aan 15:33 uur, in totaal over een periode van 98 minuten. Het volume van het DIT riool is te berekenen met  $V = \frac{1}{4} * \pi * D^2 * L$ , hierin is D de diameter en L de lengte van het DIT riool waarover de proef is uitgevoerd. Het DIT riool heeft een diameter van  $D = 0,3 \text{ m}$  en  $L = 62,1 \text{ m}$  en het volume is dan gelijk aan  $V = 4,4 \text{ m}^3$ . De gemiddelde drainagecapaciteit is in dit geval  $(4,4 / 98) * 60 = 2,7 \text{ m}^3/\text{uur}$  of  $0,04 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$ , bij een gemiddeld potentiaalverschil van ongeveer  $0,19 \text{ m}$  tussen het DIT riool en de dichtstbijzijnde peilfilter. Dit is omgerekend  $0,21 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$  per meter potentiaalverschil.

## 7 Vervolg onderzoek: verdampingsproeven

Uit de analyse van het grondwater blijkt dat het grondwater in de zomer flink daalt en dat het DIT riool onvoldoende in staat is om water aan te voeren om deze daling te voorkomen. Verdamping lijkt hiervan de voornaamste reden. Voor een grondwatermodel is de verdamping een belangrijke parameter. In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op het verdampingsproces en de vochtthuishouding van een boom. Verder zullen verschillende proeven worden voorgesteld waarmee de transpiratie van de bomen in de Argonautenstraat kan worden bepaald. Als eerste proef wordt een stopproef van het DIT riool besproken, waarbij een gedeelte van het DIT riool wordt afgesloten met behulp van balgen. Vervolgens zal het meten van sapstromen aan bod komen. Als laatste proef wordt het schatten van de actuele verdamping met behulp van de kroonprojectie besproken.

### 7.1 Vochtthuishouding van een boom

Water is van essentieel belang voor de groei van bomen. Het verdampen van water via de bladeren is een van de drijvende krachten achter het transport van stoffen die belangrijk zijn voor de groei. Maar liefst 95 % van het water dat de boom opneemt verlaat de boom door transpiratie (IPC Groene Ruimte, 2006). De groei van een boom is maximaal wanneer een boom onbeperkt kan transpireren, onder de aanname dat de voorraad water in de ondergrond niet gelimiteerd is. Een beperking in de transpiratie betekent een mindere sterke groei van de boom.

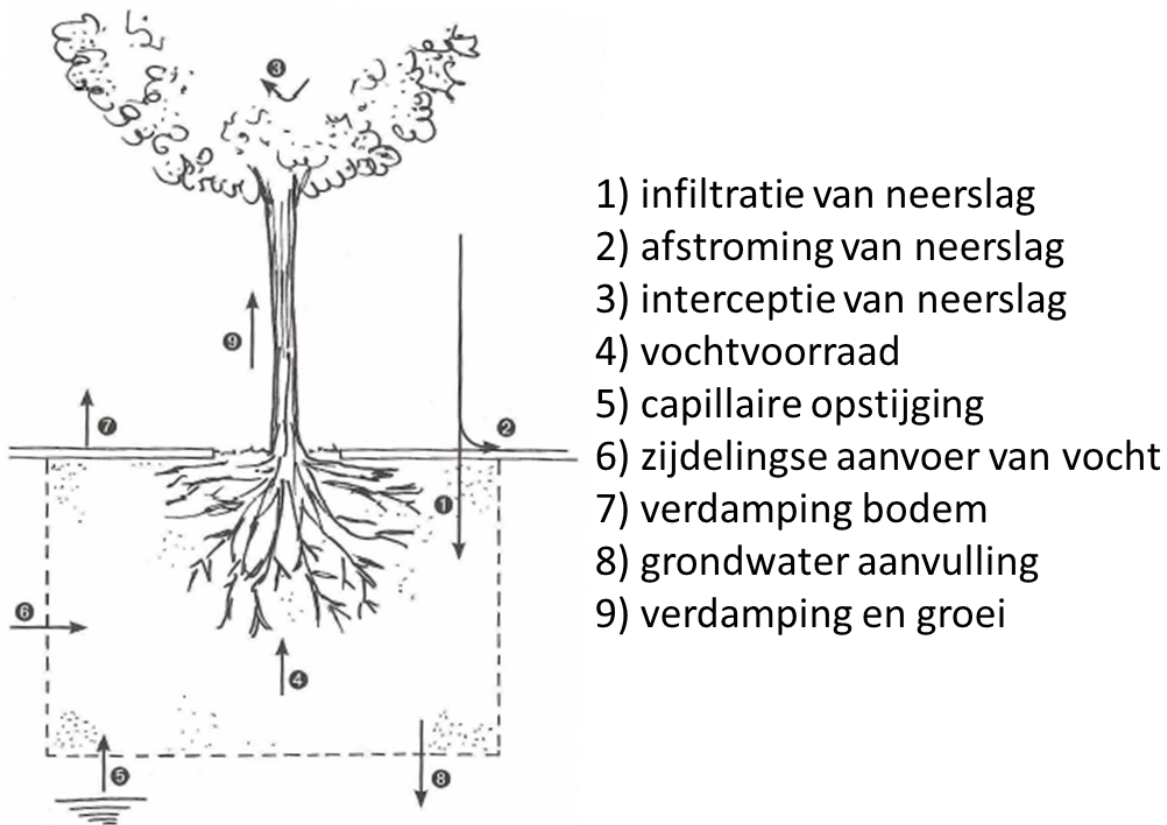
In de praktijk is de hoeveelheid water voor een boom eindig en kan een vochttekort optreden. Een boom kan zijn transpiratie niet volledig stop zetten, ook al zijn de huidmondjes gesloten. Wanneer een vochttekort optreedt zal de celspanning van de bladeren afnemen, wat leidt tot verwelken van de bladeren. De verwelking kan tijdelijk zijn, want als een boom weer voldoende water kan opnemen kunnen de bladeren zich herstellen. Echter bij een te lange droge periode verdrogen en verdorren de bladeren totdat de boom ze laat vallen. Een boom kan tot op een zekere hoogte het vocht aanbod en de transpiratie in evenwicht houden door bij aanhoudende droogte massaal bladeren te laten vallen. Hierdoor zijn bomen in staat om droge periodes te overbruggen zonder al te veel blijvende schade hieraan over te houden (IPC Groene Ruimte, 2006). Ook te veel water in de ondergrond is niet goed voor een boom. Wortels van een boom hebben zuurstof nodig om te kunnen functioneren. Zuurstof kan alleen via de met lucht gevulde poriën in de ondergrond doordringen om zo bij de wortels te kunnen komen. Te veel water in de ondergrond verdringt de lucht uit de poriën en belemmert daarmee de zuurstofaanvoer.

Of voldoende vocht voor een boom beschikbaar is hangt af van de hoeveelheid neerslag die tijdens het groeiseizoen in de gewortelde zone infiltreert, de bereikbaarheid van het grondwater voor de wortels en de vochtvoorraad die aan het begin van het groeiseizoen in de ondergrond aanwezig is. Dit kan worden beschreven door een vochtbalans. Figuur 39 toont een schematische weergave van factoren die bijdragen aan de vochtbalans. De vochtbehoefte van een boom hangt sterk af van de verdamping.

De mate waarin een boom kan transpireren hangt af van de volgende onderdelen:

- transpiratieoppervlak,
- stand van de huidmondjes in de bladeren,
- de dampspanningsdeficit: het verschil in dampspanning tussen de buitenlucht en het blad.

De dampspanningsdeficit bepaalt hoe hard er door de omgeving van het blad aan het blad wordt 'gezogen'. Dit wordt weer bepaald door: de hoeveelheid zonnestraling, de luchtvochtigheid, de windsnelheid en de luchttemperatuur (IPC Groene Ruimte, 2006).



Figuur 39 Schematische weergave van factoren die bijdragen aan de vochtbalans (naar IPC Groene Ruimte, 2006).

Een boom transpireert vooral om het transport van stoffen door de boom mogelijk te maken en in principe niet om de bladeren te koelen. De bladeren worden gekoeld door de aanwezige wind door de kroon die zorgt voor voldoende warmte uitwisseling tussen het blad en de langsstromende lucht. Het blad neemt de luchttemperatuur aan, of het nu door de zon wordt beschenen of niet. De transpiratie van een boom is afhankelijk van interne en externe factoren. De mate van transpiratie is niet op eenvoudige wijze exact te bepalen, vandaar dat vaak gebruik wordt gemaakt van een referentieverdamping. Door het KNMI worden dagelijks metingen verricht om de referentieverdamping te bepalen. Uit de referentieverdamping kan met behulp van een correctiefactor een schatting worden gemaakt van de potentiële verdamping (IPC Groene Ruimte, 2006).

De potentiële verdamping is gelijk aan de actuele verdamping onder de voorwaarde dat er geen belemmering in beschikbaarheid van water is (Luxemburg & Coenders, 2015). De potentiële verdamping geeft dan ook de bovengrens van de verdamping aan. De actuele verdamping is dus per definitie kleiner of gelijk aan de potentiële verdamping. De waarde van de correctiefactor die gebruikt wordt voor het schatten van de potentiële verdamping hangt af van de bladbezetting en de standplaats van een boom. Hierin wordt de bladbezetting uitgedrukt in de zogeheten 'Leaf Area Index' (L.A.I.). De L.A.I. geeft het aantal vierkante meters blad per vierkante meter kroonprojectie weer (IPC Groene Ruimte, 2006). De grootte van de L.A.I. is sterk afhankelijk van de conditie van de boom en de boomsoort. Bomen in bebouwd gebied hebben een L.A.I. die varieert tussen 2-8 m<sup>2</sup> blad/m<sup>2</sup> kroonprojectie. Over de relatie tussen bladbezetting en de mate van transpiratie van een boom is nog niet alles bekend. Vandaar dat gebruik wordt gemaakt van een correctiefactor. Tabel 8 toont de waarden van de correctiefactoren en de potentiële verdamping voor verschillende boomstandplaatsen.

**Tabel 8** Correctiefactoren om referentieverdamping om te rekenen naar potentiële verdamping voor bomen van verschillende standplaatsen (naar IPC Groene Ruimte, 2006).

standplaats	correctiefactor	E-pot (l/m <sup>2</sup> kroonprojectie)
bos	1	500
laan	1,5	750
geheel vrijstaand	2	1000

De actuele verdamping van een boom hangt af van het vocht aanbod en de zuinigheid waarmee een boom dit aanbod gebruikt. Dit is per boomsoort verschillend. Het waterverbruik van een aantal verschillende soorten bomen tijdens het groeiseizoen is in onderstaande tabel weergegeven.

**Tabel 9** Verdamping van een aantal boomsoorten (naar IPC Groene Ruimte, 2006).

boomsoort	verdamping (liter per groeiseizoen)	verdamping (liter per m <sup>2</sup> bladoppervlak, per groeiseizoen)
Salix alba 'Liempde' (knotwilg)	823	159
Populus 'Robusta' (Zeeuwse populier)	747	99
Populus 'Barn' (Barn populier)	850	97
Populus 'Oxford' (Oxford populier)	657	90
Fraxinus excelsior (es)	342	96
Alnus glutinosa (zwarte els)	369	94
Acer pseudoplatanus (esdoorn)	110	87
Acer platanoides (Noorse esdoorn)	141	56

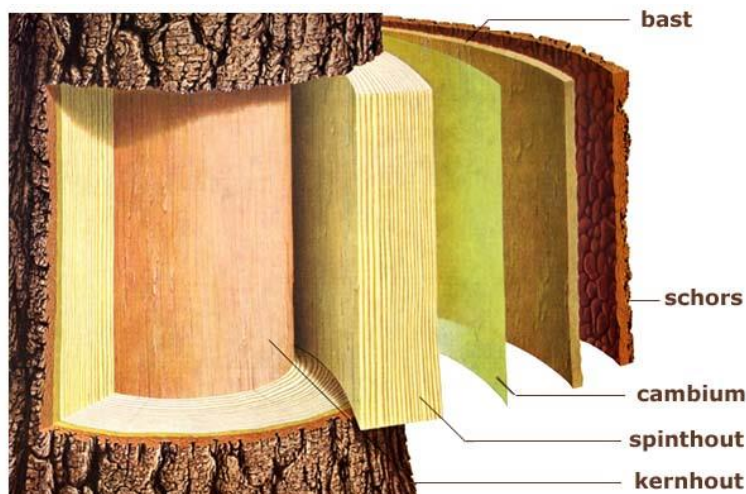
De gegevens van de bomen in bovenstaande tabel hebben betrekking op jonge bomen bij een optimale vochtvoorziening.

## 7.2 Afsluiten gedeelte DIT riool

Een manier om te onderzoeken hoeveel de bomen in de Argonautenstraat verdampen is om een gedeelte van het DIT riool af te sluiten met balgen, net als bij de infiltratie en drainageproef van het DIT riool. De gemeten grondwaterstand van het afgesloten gedeelte DIT riool wordt vergeleken met het stuk van het DIT riool dat niet is afgesloten met balgen. Bij het afgesloten gedeelte van het DIT riool kan er geen water meer worden aangevoerd vanaf het oppervlakte water. Het is interessant de ontwikkeling van het grondwaterpeil tussen het afgesloten en het niet afgesloten gedeelte van het DIT riool te vergelijken, om te zien of er verschil is tussen die twee. Op het moment dat de grondwaterstand in het afgesloten gedeelte van het DIT riool lager is dan het niet afgesloten gedeelte van het DIT riool is dit verschil een orde grootte maat voor wat de bomen in de Argonautenstraat verdampen.

## 7.3 Meten van de sapstromen

Naast de vochtbalans is de transpiratie ook te schatten door het meten van de sapstromen door een boom. Het transport van water vindt plaats door een specifiek gedeelte van de boom, het zogeheten spinhout. Dit is het gedeelte van de boom dat zich tussen het kernhout en het cambium bevindt. Figuur 40 toont de opbouw van de verschillende houtlagen van een boom.



Figuur 40 Opbouw van de houtlagen van een boom (VHN, 2014).

De sapstroomsnelheid van een boom kan gemeten worden met behulp van empirische methodes die gebruik maken van warmtedissipatie. De methodes maken gebruik van het elektrisch verwarmen van de sapstroom en het bepalen van een temperatuurverschil over een bepaalde afstand. Het temperatuurverschil kan bepaald worden door een tweetal of meerdere naalden met ingebouwde thermometers.

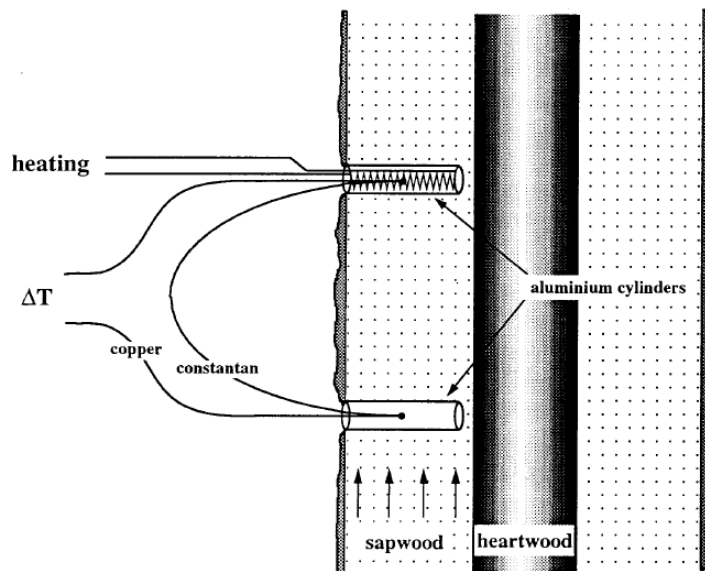
In dit onderzoek wordt de 'Thermal Dissipation Method', een van de empirische methodes voor het meten van sapstromen, in meer detail besproken. Deze methode is geïntroduceerd door Granier (1985, 1987) van het nationaal onderzoeksinstituut voor agricultuur (INRA) in Frankrijk. De 'Thermal Dissipation' techniek meet het temperatuurverschil tussen twee naalden, zie figuur 41. Waarin de bovenste naald wordt opgewarmd met + 8 °C ten opzichte van de omgevingstemperatuur en vergeleken met de onderste naald die ter referentie dient. Met dit temperatuurverschil ( $\Delta T$ ) in combinatie met het maximale temperatuurverschil ( $\Delta T_0$ ) die optreedt bij geen of minimale sapstroom kan de sapstroomsnelheid empirisch bepaald worden. De volgende formules worden hiervoor gebruikt (Smith & Allen, 1996):

$$u = 0,000119 * Z^{1,231}$$

$$Z = \frac{(\Delta T_0 - \Delta T)}{\Delta T}$$

Hierin is  $u$  de sapstroomsnelheid en  $Z$  een dimensieloze factor die wordt bepaald uit de gemeten temperatuurverschillen. Nu de sapstroomsnelheid bekend is kan de flux door de boom berekend worden door een schatting te maken van het spinthout oppervlak en dit te vermenigvuldigen met de sapstroomsnelheid, zie onderstaande formule:

$$Q_{sap} = u * A_{spinhout}$$



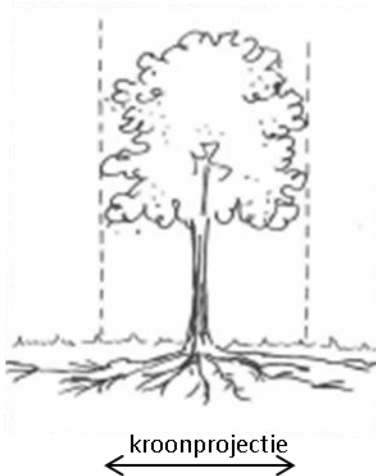
Figuur 41 Schematische weergave 'Thermal Dissipation Method' (Dynamax, 2017)



## 7.4 Verdamping op basis van de kroonprojectie

Uit bosbouwkundig onderzoek blijkt dat een 'gemiddelde' boom nog vitaal blijft wanneer de actuele verdamping in het groeiseizoen gemiddeld gelijk is aan 75% van de potentiële verdamping. De verschillen tussen boomsoorten zijn echter zeer groot. Sommige droogteresistente boomsoorten hebben genoeg aan 40% van de potentiële verdamping. Hier zijn echter geen concrete richtlijnen voor per boomsoort, omdat te weinig gegevens hierover bekend zijn. Bij dit soort berekeningen wordt uitgegaan van dat een boom het gehele groeiseizoen op het minimum van zijn verdamping leeft en dat er aan het eind van het groeiseizoen niks van de vochtvoorraad meer over is (IPC Groene Ruimte, 2006). Dit is niet geheel juist. Aan het eind van het groeiseizoen overtreft de gemiddelde neerslag de verdamping, waardoor er wel degelijk een voorraad is. Bij verdampingsberekeningen wordt daarom een marge van 5% gehanteerd en wordt in totaal met 80% van de potentiële verdamping gerekend. Voor een laanboom geldt dan onderstaande berekening voor de actuele verdamping:

$$E\text{-act} = 80 \% * 750 = 600 \text{ liter/m}^2 \text{ kroonprojectie.}$$



De kroonprojectie wordt bepaald door het oppervlak dat een kroon projecteert op de ondergrond. Voor een laanboom met een bolvormige kroon met een diameter van 6 m wordt de kroonprojectie  $\frac{1}{4} * \pi * D^2 = 9\pi \text{ [m}^2\text{]}$ . In een seizoen gebruikt een laanboom met een diameter van 6 m ongeveer  $9\pi * 600 \approx 17.000$  liter water.

**Figuur 42** Schematische weergave kroonprojectie (naar IPC Groene Ruimte, 2006).

## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Door de verwachte klimaatsverandering krijgen steden als Amsterdam steeds vaker te maken met extreme neerslag, wat kan leiden tot wateroverlast. Waterdoorlatende en –passerende verhardingen zijn voorbeelden van oplossingen die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het verminderen van deze overlast. Waterdoorlatende bestrating lijkt dan ook een geschikt alternatief voor het klassieke hemelwaterafvoerstel wanneer dit wordt toegepast in combinatie met kolken. Een straat zonder kolken lijkt onverstandig, immers er mogen geen plassen op straat ontstaan. Uit literatuuronderzoek blijkt dat waterdoorlatende bestrating minder geschikt is voor locaties met een hoge verkeersintensiteit, groenstroken en/of bomen. De toepasbaarheid voor Amsterdam lijkt hierdoor beperkt.

Uit onderzoek blijkt dat een DIT riool omringd met een geotextiel een hogere kans heeft op dichtslibben. Met name in gebieden met ijzerrijk grondwater kunnen ijzerafzettingen de geperforeerde gaatjes van een DIT riool en het geotextiel verstoppen. Hierdoor neemt de infiltratie- en drainagecapaciteit af.

De infiltratieproeven met de Granudrain tonen aan dat de Granudrain in combinatie met het DIT niet voldoet aan de Waternet ontwerp eis voor hemelwaterafvoer. De Granudrain blijkt niet of onvoldoende in staat de RIONED ontwerp bui 08 te verwerken, zonder dat plassen op straat ontstaan. De berekende infiltratiecapaciteiten tijdens de proeven zijn gelijk aan respectievelijk 0,17 en 0,20 m<sup>3</sup>/m/u en komen orde grootte overeen met de theoretisch berekende infiltratiecapaciteit van 0,16 m<sup>3</sup>/m/u. Hierin is de bijdrage van de klinkers buiten beschouwing gelaten, de werkelijke infiltratiecapaciteit van de Granudrain is lager.

Uit de grondwateranalyse blijkt dat het grondwater, ondanks de aanwezigheid van het DIT riool, in de zomer flink kan uitzakken tot een hoogte van NAP -0,63 m. Het streefpeil van het oppervlaktewater ligt op NAP -0,40 m. De daling van de grondwaterstand lijkt voornamelijk veroorzaakt door de verdamping van de bomen in de Argonautenstraat. De infiltrerende werking van het DIT riool is dan ook niet of nauwelijks zichtbaar. Geconcludeerd kan worden dat het DIT riool dan ook onvoldoende in staat is om genoeg water aan te voeren om de daling van de grondwaterstand in de zomerperiode tegen te gaan.

De infiltratiecapaciteit gemeten tijdens de infiltratieproef met het DIT riool varieerde tussen de 0,10 – 0,20 m<sup>3</sup>/m/u per meter potentiaalverschil. Verder blijkt dat de gemeten drainagecapaciteit gelijk is aan 0,18 m<sup>3</sup>/m/u per meter potentiaalverschil. De drainagecapaciteit kan ook bepaald worden door te kijken hoe snel het DIT riool zich vult nadat de drainageproef is uitgevoerd. Dit geeft een gemiddelde drainagecapaciteit van 0,20 m<sup>3</sup>/m/u per meter potentiaalverschil.

## 8.2 Aanbevelingen

Uit literatuuronderzoek blijkt dat waterdoorlatende bestrating een geschikt alternatief kan zijn voor het klassieke hemelwaterafvoerstel. Wel wordt aanbevolen deze in combinatie met kolken aan te leggen. Bij neerslag die groter is dan de infiltratiecapaciteit kan het water dan via de kolken op een andere manier worden afgevoerd. Bij het aanleggen van waterdoorlatende bestrating dient rekening gehouden te worden dat dit bij voorkeur wordt aangelegd in gebieden met een lage verkeersintensiteit, weinig groen en zo min mogelijk bomen. Ook dient de bestrating te worden meegenomen in het reguliere wegonderhoud met bijvoorbeeld een veeg-zuigmachine en bij voorkeur één keer per jaar te worden gereinigd met een ZOAB reiniger. De infiltratiecapaciteit blijft op deze manier zo goed mogelijk gewaarborgd.

Aanbevolen wordt om drainage- en infiltratievoorzieningen, zoals een DIT riool, in een grindkoffer aan te leggen en bij voorkeur zonder scheidingsdoeken. Bij de aanleg van een DIT riool op een locatie met ijzerrijk grondwater wordt geadviseerd deze altijd onder de laagste grondwaterstand te plaatsen.

Uit dit onderzoek wordt niet duidelijk waarom het DIT riool geen of nauwelijks infiltratie vertoont. Dit zou kunnen komen door de omhulling. Uit de literatuur blijkt dat verschillende soorten geotextiel snel kunnen dichtslibben en een hoge uittreeweerstand hebben. Dit zou met behulp van een proefopstelling verder onderzocht kunnen worden. Het mooiste zou zijn als een stuk DIT riool opgegraven kan worden en dat dit als proefopstelling wordt gebruikt. Ook is het interessant om een proefopstelling te maken waarin een gedeelte van een DIT riool met een geotextiel wordt vergeleken met een DIT riool in een grindkoffer. Een andere verklaring waarom de infiltratie van het DIT riool nauwelijks zichtbaar is zou kunnen liggen in de doorlatendheid van de ondergrond. Is de doorlatendheid namelijk zeer hoog dan is een verhoging lastig te detecteren door het dichtstbijzijnde peilfilter.

Dit onderzoek beveelt aan om een grondwatermodel te maken waarin de uitgevoerde proeven gesimuleerd kunnen worden. De gemeten waardes dienen dan ter kalibratie van het model. Vervolgens kan met het grondwatermodel berekend worden hoeveel DIT riolen nodig zijn om de daling van de grondwaterstand in de zomer tegen te gaan. Ook kan met dit model het effect van een eventueel zomer en winterpeil van het DIT riool worden onderzocht. Een belangrijke parameter voor het grondwatermodel is de verdamping van de bomen in de Argonautenstraat. Aanbevolen wordt om de transpiratie van de bomen te meten en mee te nemen in de modellering. Hoofdstuk 7 biedt een leidraad voor het meten van de transpiratie.

## Referenties

Amsterdam Rainproof (2017). *Het verhaal*. <https://www.rainproof.nl/het-verhaal>. Geraadpleegd 10 oktober 2017.

ASTM (2009). *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer*. West Conshohocken. ASTM D3385-09.

ASTM (2013). *Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems*. West Conshohocken. ASTM C1781M-13.

Baladès, J.D., Legret, M., Madiec, H. (1995). Permeable pavements: pollution management tools. *Water Sci. Technol.*, 32, 49–56.

Bean, E.Z., Hunt, W.F., Bidelspach, D.A., Burak, R.J. (2004). *Study on the surface infiltration rate of permeable pavements*. In Proceedings of the 1<sup>st</sup> Water and Environment Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Saskatoon.

Bean, E.Z., Hunt, W.F., Bidelspach, D.A. (2007). Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133, 249–255.

Beecham, S., Pezzaniti, D., Myers, B., Shackel, B., Pearson, A. (2009). *Experience in the application of permeable interlocking concrete paving in Australia*. 9<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving. Buenos Aires.

Beecham, S., Lucke, T., Myers, B. (2010). *Designing Porous and Permeable Pavements for Stormwater Harvesting and Reuse*, 1<sup>st</sup> European IAHR Congress. Edinburgh.

Beecham, S., Pezzaniti, D., Kandasamy, J. (2012). Stormwater Treatment Using Permeable Pavements, *J. Water Manage.*, 165 (3), 161–170.

BETONIEK (2016). *Waterdoorlatende betonbestrating*. <https://www.mbi.nl/wp-content/uploads/2016/07/Waterdoorlatende-betonbestrating-Betoniek.pdf>. Geraadpleegd 21 september 2017.

Boogaard, F. C., Blanksby, J., Jong, J. de, Ven, F. H. M. van de (2010). *Optimizing SUDS by transnational knowledge exchange – guidelines for the design & construction and operation*. NOVATECH conference. Lyon.

Boogaard, F., Lucke, T., Giesen, N. van de, Ven, F. van de (2014a). Evaluating the Infiltration Performance of Eight Dutch Permeable Pavements Using a New Full-Scale Infiltration Testing Method. *Water*, 6, 2070–2083.

Boogaard, F., Lucke, T., Beecham, S. (2014b). Effect of age of permeable pavements on their infiltration function. *Clean Soil Air Water*, 42 (2), 146–152.

Boogaard, F.C. (2015). *Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands*. Delft: proefschrift Technische Universiteit Delft.

- Boogaard, F., Rozendaal, B., Steenbruggen, G.P.R. (2017). Overschatten we het hydraulisch functioneren van wadi's en doorlatende verharding? *H2O vakartikelen*, 21 juni 2017.
- Boogaard, F., Harten, F., Lucke, T. (2017). *Long term infiltration capacity of permeable pavement determined with new full scale test method*. In Proceedings of the 14<sup>th</sup> IWA/IAHR international conference on urban drainage. Prague.
- Borgwardt, S. (2006). *Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement*. In Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco.
- Bouma, J., Rus, M. (2010). Ontwerpen van een IT-riool bij ijzerrijk grondwater vraagt aandacht. *Vakblad Riolering*, 17, 24-25.
- Dam, C.H. van, Ven, F.H.M. van de (1984). *Infiltration in pavement*. In Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Urban Storm Drainage. Göteborg.
- Deltares (2017). *Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer in bebouwd gebied*. Delft: Deltares.
- Dierkes, C., Kuhlmann, L., Kandasamy, J., Angelis, G. (2002). *Pollution Retention Capability and Maintenance of Permeable Pavements*. 9<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. Portland.
- Drake, J., Bradford, A. (2013). Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. *Water Sci. Technol.*, 68, 1950–1958.
- Dynamax (2017). Thermal Dissipation Probe, presentation. [http://dynamax.com/images/uploads/papers/TDP\\_Presentation.pdf](http://dynamax.com/images/uploads/papers/TDP_Presentation.pdf). Geraadpleegd 6 december 2017.
- Fassman, E., Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *J. Hydrol. Eng.*, 15, 475–485.
- FEBESTRAL (2008). *Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen*. Brussel: FEBESTRAL.
- Fletcher, T.D., Duncan, H.P., Poelsma, P., Lloyd, S.D. (2004). *Storm Water Flow and Quality, and the Effectiveness of Non-Proprietary Storm Water Treatment Measures – a Review and Gap Analysis*. Melbourne: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical Report 04/8.
- Flink, J.J.E. (2017). Persoonlijke mededeling.
- Gerrits, C., James, W. (2002). *Restoration of infiltration capacity of permeable pavers*. In Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference of Urban Drainage, American Society of Civil Engineers. Portland.
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42, 81–88.
- Granier, A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309–320.

- Helden, P. (2014). *Onderzoek naar de waterdoorlatendheid van bestratingen in functie van de tijd*. Peer: afstudeeronderzoek Universiteit van Hasselt.
- IPC Groene Ruimte (2006). *Stadsbomen Vademecum 2A: Groeiplaatsaspecten*. Arnhem: IPC Groene Ruimte.
- Kazemi, H., Rockaway, T.D., Rivard, J., Abdollahian, S. (2017). Assessment of Surface Infiltration Performance and Maintenance of Two Permeable Pavement Systems in Louisville, Kentucky. *J. Sustainable Water Built Environ.*, 3(4): 04017009.
- Kiwa (2014). *Waterdoorlatende bestratingselementen van beton – bindend verklaarde versie 21-03-2014*. Rijswijk: Kiwa Nederland B.V. Rapportnummer BRL2317.
- KNMI (2014). *Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective*. De Bilt: KNMI. Scientific Report WR2014-01.
- Lucke, T., Beecham, S. (2011). Field investigation of clogging in a permeable pavement system. *J. Build. Res. Inf.*, 39, 603–615.
- Lucke, T., Boogaard, F., Ven, F. van de (2014a). Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems. *Urban Plan. Transp. Res.*, Vol.2, No.1, 22–35.
- Lucke, T. (2014b). Using drainage slots in permeable paving blocks to delay the effects of clogging: proof of concept study. *Water*, 6, 2660–2670.
- Lucke, T., White, R., Nichols, P., Borgwardt, S. (2015). A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements. *Water*, 7, 2542–2554.
- Luxemburg, W.M.J., Coenders, A.M.J. (2015). *Hydrological Processes and Measurements, lecture notes*. Delft: TU Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016). *Nationale klimaatadaptatiestrategie 2016*. Den Haag: ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- NEN (2015). *Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk – Verdringingspalen*. Delft: NEN. NEN-EN 12699.
- OCW (2008). *Dossier 5: Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen*. Brussel: OCW.
- OCW (2009). *Handleiding voor het ontwerp en de uitvoering van verhardingen in betonstraatstenen*. Brussel: OCW.
- Pratt, C.J. (1990). *Permeable Pavements for Stormwater Quality Enhancement*. In Proceedings of the Retrofitting and Combined Sewer Technology Conference, American Society of Civil Engineers. Reston.



Pratt, C.J., Mantle, J. D., Schofield, P. A. (1995). UK Research into the Performance of Permeable Pavement, Reservoir Structures in Controlling Stormwater Discharge Quantity and Quality, *Water Sci. Technol.*, 32 (1), 63–69.

Ras, M.A., Rook, J.H. (2016). *Handreiking Infiltrerende verhardingsconstructies*. Deventer: Tauw in opdracht van gemeente Deventer.

Sartor, J. D., Boyd, G. B., Agardy, F. J. (1974) Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants, *J. Water Pollut. Control.*, 46 (3), 458–467.

Smith, D.M., Allen, S.J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47 (305), 1833–1844.

Smits, F.J.C. (2017). Persoonlijke mededing.

Stichting RIONED (2004a). *Neerslaggebeurtenissen*. <https://www.riool.net/1525/neerslaggebeurtenissen>. Geraadpleegd 19 juni 2017.

Stichting RIONED (2004b). *Neerslaggebeurtenis 08*. <https://www.riool.net/1620/herhalingstijd-2.0-jaar>. Geraadpleegd 19 juni 2017.

Stichting RIONED (2005). *Dubbele-ringinfiltrometermethode*. <https://www.riool.net/2435/dubbele-ringinfiltrometermethode>. Geraadpleegd 21 september 2017.

Stichting RIONED (2006a). *Leidraad riolering: beheer van infiltratievoorzieningen*. Ede. Rapportnummer C3200.

Stichting RIONED (2006b). *Waterdoorlatende en waterpasserende verharding*. <https://www.riool.net/834/waterdoorlatende-en-waterpasserende-verharding>. Geraadpleegd 21 september 2017.

Stichting RIONED (2007). *Dichtslibben van infiltratievoorzieningen*. Ede.

Stichting RIONED (2008a). *Oppervlakte-infiltratie*. <https://www.riool.net/505/oppervlakte-infiltratie>. Geraadpleegd 21 september 2017.

Stichting RIONED (2008b). *Ondergrondse infiltratie van regenwater*. Ede.

STOWA (2007). *Zuiverende voorzieningen regenwater*. Utrecht. Rapportnummer 2007-20.

Straategie (2017). *Leidsche Rijn Utrecht bezit veel waterdoorlatende bestratingen*. <http://www.strategie.nl/beeldbank/alle-projecten+nieuwste-projecten+projecten-waterbeheer/leidsche-rijn-utrecht-bezit-veel-waterdoorlatende-bestratingen>. Geraadpleegd 5 oktober 2017.

Stradus Infra (2011). *Paseo is nieuw type waterdoorlatende betonstraatsteen van Stradus Infra*. <http://www.architectura.be/nl/nieuws/2375/paseo-is-nieuw-type-waterdoorlatende-betonstraatsteen-van-stradus-infra>. Geraadpleegd 5 oktober 2017.

Stradus Infra (2017). *Betonstraatstenen*. <https://www.wegenbouw.be/bedrijven/428869/producten-item/81503016/stradus-infra-n-v/waterdoorlatende-stenen/>. Geraadpleegd 5 oktober 2017.

Streetcare (2013). *Infobrief Streetcare*. <http://streetcare.nu/140-015-Infobrief-Streetcare.pdf>. Geraadpleegd 19 juni 2017.

Tauw (2005). *Leidraad waterdoorlatende verharding*. Deventer: Tauw. Rapportnummer R002-0461857LER-mfv-V01-NL.

Ven, F.H.M. van de (2016). *Water Management in Urban Areas, lecture notes*. Delft: TU Delft.

Ven, F.H.M. van de (2017a). Persoonlijke mededeling.

Ven, F.H.M. van de (2017b). Persoonlijke mededeling.

VHN (2014). Opbouw hout. <http://www.vhn.org/afbeeldingen/opbouw.jpg>. Geraadpleegd 6 december 2017.

Visser, A.L. (2017). Persoonlijke mededeling.

Waternet (2016). *Gemeentelijk Rioleringsplan Amsterdam 2016-2021*. Amsterdam.

Wavin. *Infiltratie Transport riool*. <http://nl.wavin.com/web/catalogus/regenwater/transport-en-drainage/infiltratie-transport-riool/it-buis-geo-gn-dn300-sn8-l6-ms.htm>. Geraadpleegd 4 oktober 2017.

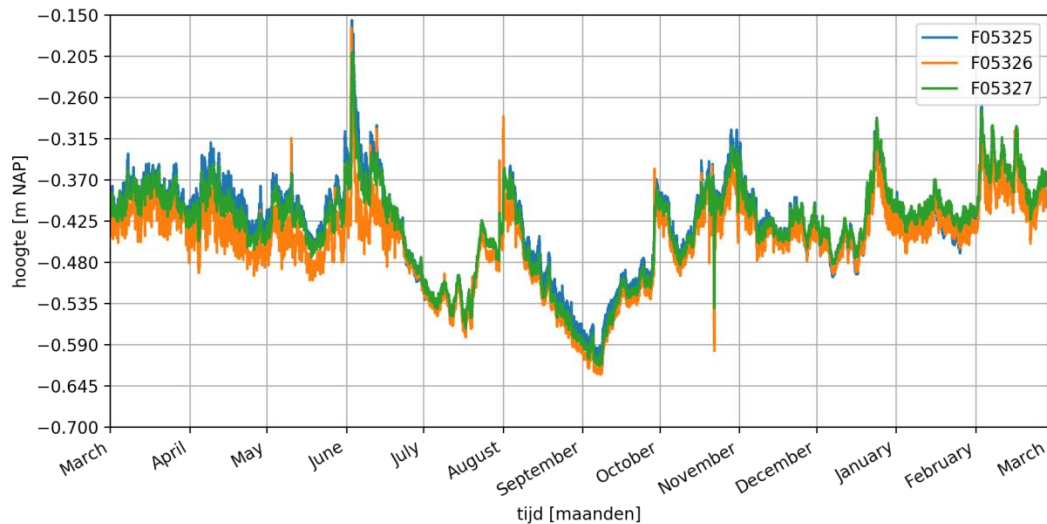
Wikimedia Commons (2007). *Rasenpflasterstein*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rasenpflasterstein\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rasenpflasterstein_1.jpg). Geraadpleegd 5 oktober 2017.

Winston, R.J., Al-Rubaei, A.M., Blecken, G.T., Viklander, M., Hunt, W.F. (2015). Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. *J. Environ. Manage.*, 169, 132–144.

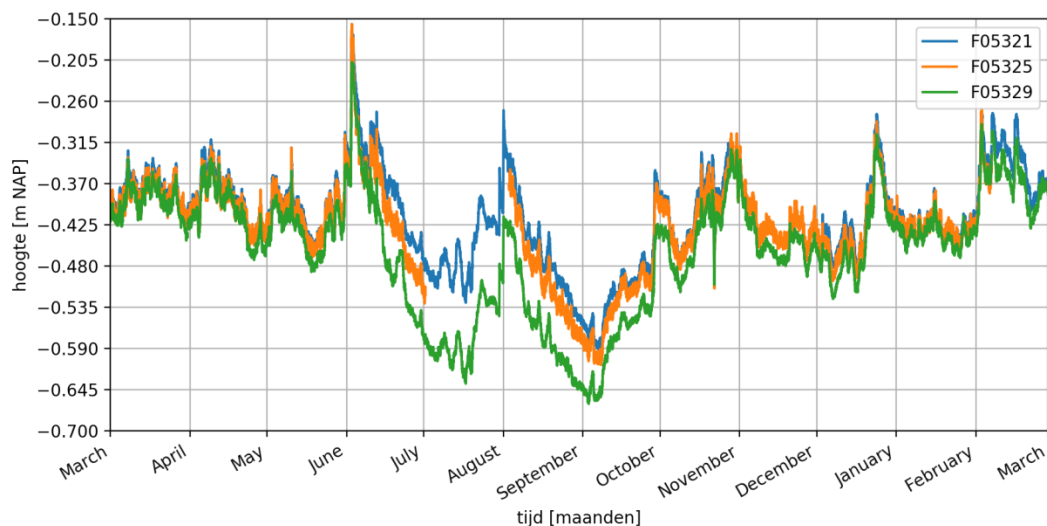
## Bijlage 1: Aanvullende figuren bij hoofdstuk resultaten en discussie

### Analyse grondwater

Uit de analyse van de grondwatermetingen in de Argonautenstraat blijkt dat de raaien in langs- en dwarsrichting niet veel van elkaar verschillen. Ter illustratie wordt de middelste raai hieronder in dwarsrichting getoond. Te zien is dat de metingen van de peilfilters F05325, F05326 en F05327 bijna gelijk zijn.

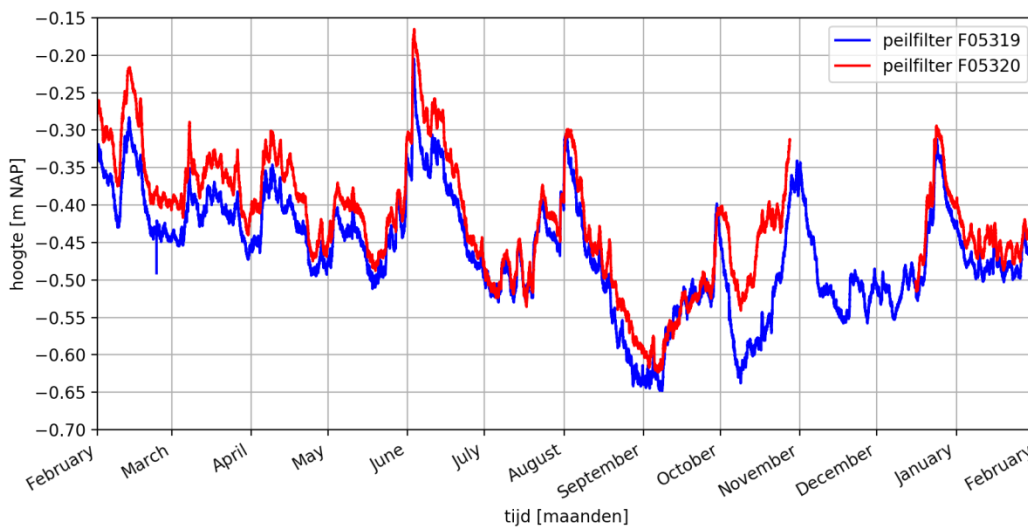


Naast de dwarsrichting is ook de langsrichting van de raaien geanalyseerd. De langsrichting met het grootste verschil is hieronder weergegeven en bevat de peilfilters F05321, F05325 en F05329. Wat opvalt is dat de peilfilters F05321 en F05325 goed overeenkomen, maar dat de meest oostelijke peilfilter in F05329, met name in de zomer, een lagere grondwaterstand meet. Het maximale verschil is ongeveer 0.10 m.

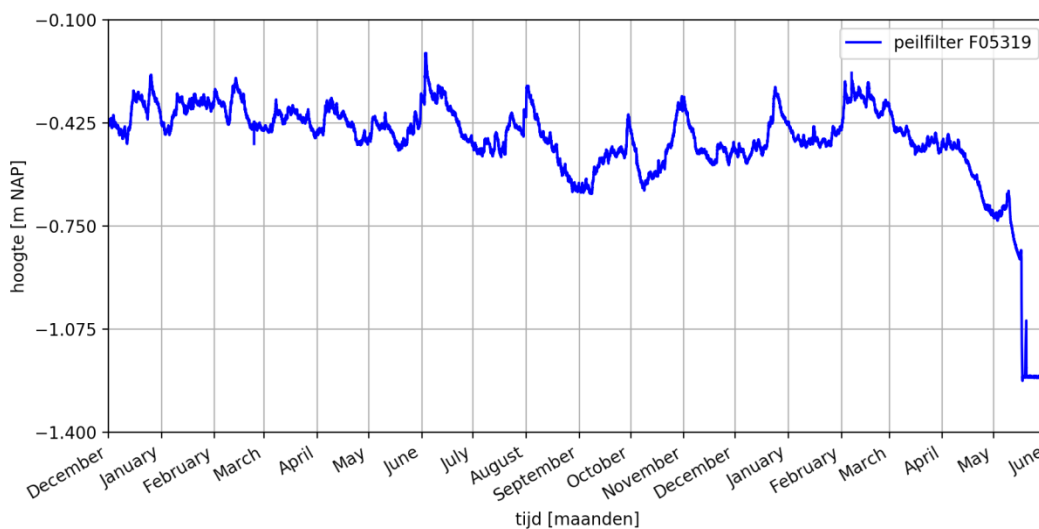


In paragraaf 6.1 wordt het gemiddelde grondwaterniveau in de referentiestraat vergeleken met die in de Argonautenstraat. Wat opvalt is dat het gemiddelde in de referentiestraat in bepaalde maanden lager uitkomt dan die in de Argonautenstraat, dit terwijl over het algemeen het gemiddelde in de referentiestraat iets hoger ligt. Hieronder worden de peilfilters uit de referentiestraat F05319 en F05320 met elkaar vergeleken om te achterhalen of er een verklaring voor het lagere gemiddelde is.

De onderstaande figuur toont de metingen van beide peilfilters tussen februari 2016 en februari 2017. Uit de grafiek blijkt dat peilfilter F05319, gelegen aan de meest westelijke zijde van de referentiestraat, een lagere grondwaterstand meet dan peilfilter F05320.

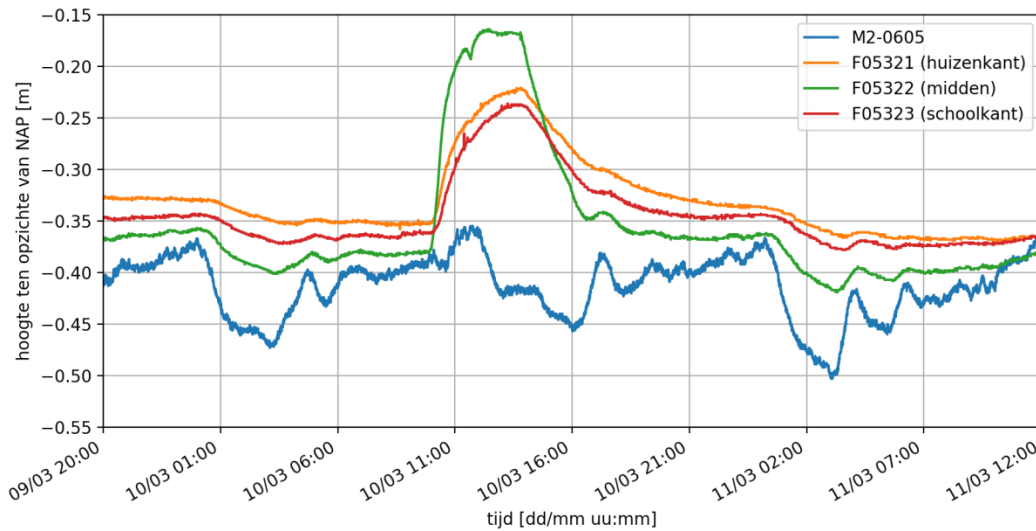


De onderstaande figuur toont de volledige meetreeks van peilfilter F05319. Wat opvalt is dat het peilfilter droog komt te liggen vanaf midden mei 2017. De peilfilter lijkt onderhevig aan bemaling. Aan de westelijke kant van de referentiestraat heeft lange tijd een bouwput gelegen, het is aannemelijk dat deze verantwoordelijk is voor deze bemaling. Het is mogelijk dat eerder ook is bemalen, dit zou de lagere waterstand gemeten door peilfilter F50319 kunnen verklaren.

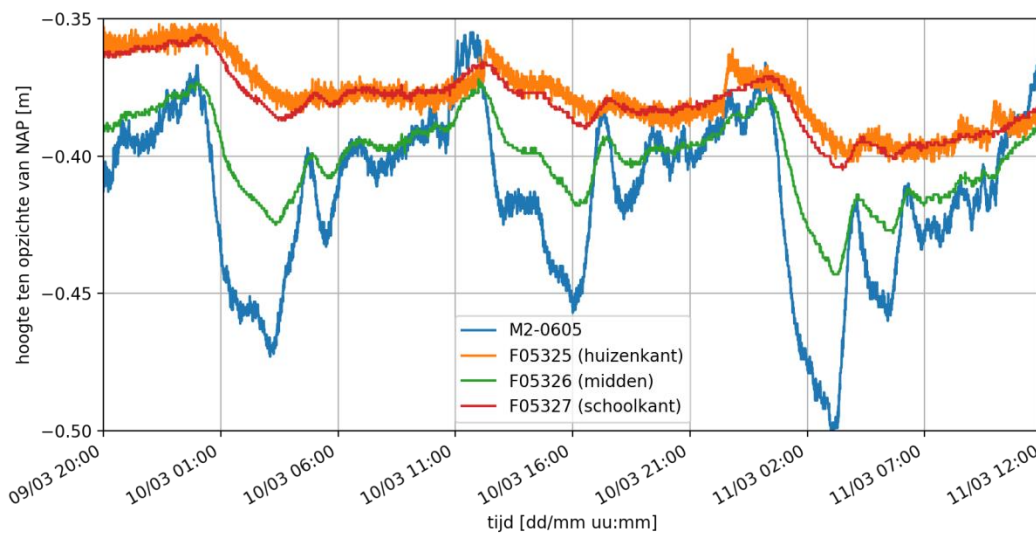


## Infiltratieproeven Granudrain

Zoals vermeld in paragraaf 6.2 laat alleen de westelijke raai een stijging van de grondwaterstand zien dat wordt veroorzaakt door de infiltratieproeven met de Granudrain. Onderstaande figuur toont de reactie van het grondwater van de westelijke raai. De dichtstbijzijnde peilfilter F05322 stijgt het meest, in totaal ongeveer 0,20 m. De peilfilter aan de school- en huizenkant laten een mindere stijging zien.



Onderstaande figuur toont de gemeten grondwaterstand in de middelste raai. De figuur toont geen waarneembare stijging van de grondwaterstand door de uitgevoerde proeven. Als de middelste raai al geen stijging laat zien, laat de oostelijke raai al helemaal geen stijging zien aangezien deze nog verder weg ligt van het gedeelte waar de proeven met de Granudrain zijn uitgevoerd. Voor de eenvoud is de oostelijke raai hier dan ook niet geplot.



## Infiltratieproef DIT riool

Onderstaande grafiek geeft het niveau in put M2-0203 en M2-0605 weer tijdens de infiltratieproef met het DIT riool. Het niveau van put M2-0605 geeft een vreemd verloop weer. De verwachting is dat beide putten dezelfde waarden zouden moeten meten. Dit omdat het water zich via het DIT riool over de twee putten verdeeld. Te zien is dat rond omstreeks 13:05 uur put M2-0605 een ander verloop laat zien dan put M2-0603. Iets voor 14:00 uur maakt het niveau een sprong en loopt dan gelijk met put M2-0603. Wat hier aan de hand was is dat de drukopnemer die de luchtdruk meet te diep in put M2-0605 hing, waardoor deze onder water kwam te staan. Een van de medewerkers van Waternet kwam hier tijdens de proef achter en heeft de drukopnemer buiten de put gehesen. Dit verklaart de rechte sprong in het niveau van put M2-0605. In hoofdstuk 6 wordt hierom alleen gebruik gemaakt van het niveau in put M2-0603.

