

# WP2: FUNCTIONEREN VAN INFILTRERENDE VERHARDING IN DE PRAKTIJK

RAAK MKB project: De Infiltrerende Stad

WIODS / Urban Technology / Faculteit Techniek  
2020

# WP2: FUNCTIONEREN VAN INFILTRERENDE VERHARDING IN DE PRAKTIJK

RAAK MKB project: De Infiltrerende Stad

## AUTEURS

Ted Veldkamp  
Tom Schoenmaker  
Jeroen Klück

## AFDELING

WIODS / Urban Technology / Faculteit Techniek

## DATUM

9 oktober 2020

## TYPE PROJECT

RAAK MKB

## VERSIE

1.0

© 2019 Copyright Hogeschool Amsterdam

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door print-outs, kopieën, of op welke manier dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Hogeschool Amsterdam.

# Samenvatting

Infiltrerende verharding is in potentie een zeer effectieve klimaatadaptatie maatregel om problemen met betrekking tot wateroverlast, hitte, en verdroging in het stedelijk gebied tegen te gaan. In diverse gemeenten zijn de afgelopen 10-12 jaar verschillende vormen van infiltrerende verhardingen aangelegd als alternatief voor een regenwaterriool om het regenwater vast te houden, te bergen en daarna af te voeren. In de praktijk functioneren deze infiltrerende verhardingen echter niet altijd optimaal, onder andere door problemen met de afname van infiltratiesnelheid en onduidelijkheid over het beheer- en onderhoud. MKB-ondernemingen gespecialiseerd in infiltrerende verharding willen gemeenten graag overtuigen van het nut van hun innovaties en zijn daartoe op zoek naar meer inzicht in het functioneren van de infiltrerende verharding op de lange termijn in de praktijk en beheer en onderhoud. Dit onderzoek is uitgevoerd door onafhankelijke onderzoekers van hogescholen en is onderdeel (werkpakket 2) van het project De Infiltrerende stad. De Infiltrerende Stad wordt uitgevoerd met ondersteuning van een RAAK-MKB subsidie en is een samenwerking tussen de Hogeschool Rotterdam (penvoerder), Hogeschool van Amsterdam, Hanzehogeschool Groningen, Aquaflow BV, Bufferblock BV, Building Changes, Drainvast bv, Germieco, Water Innovation Consulting (Hemels water), Markus BV, EWB, Van Gelder Aannemingsbedrijf, Gemeente Bergen, Gemeente Groningen, Gemeente Rotterdam en het Hoogheemraadschap van Delfland.

Als onderdeel van het project De Infiltrerende Stad zijn meer dan 100 infiltratieproeven gedaan. Middels 70 infiltratieproeven uitgevoerd door heel Nederland (waarvan 67 gebruikt voor de analyse) is onderzocht hoe infiltrerende verharding functioneert in de praktijk. Daarbij is gekeken naar het functioneren van infiltrerende verharding op de korte en lange duur en is onderzocht hoe diverse systeemkenmerken en omgevingsfactoren het functioneren in de praktijk beïnvloeden. Met behulp van reinigingsproeven is beoordeeld wat het effect is van verschillende beheer- en onderhoudsmethodes op de infiltratiesnelheid.

Uit de resultaten blijkt dat met een gemiddelde infiltratiesnelheid van 540 mm/uur de onderzochte infiltrerende voorzieningen ruim boven de Nederlandse en internationale streefwaarden functioneren. Bij 65 infiltratieproeven is een infiltratiesnelheid gemeten van ten minste 60 mm/uur. Bij 43 infiltratieproeven was de gemeten infiltratiesnelheid hoger dan 194 mm/uur. De gemiddeld gemeten infiltratiesnelheid van de onderzochte innovaties ligt zelfs op 740 mm/uur.

De infiltratiesnelheid neemt in de tijd af met gemiddeld 74 mm/uur per jaar. Leeftijd is echter slechts één verklarende variabele voor de gemeten verschillen in infiltratiesnelheid. Onze resultaten laten zien dat diverse omgevingsfactoren de infiltratiesnelheid en terugloop van infiltratiesnelheid beïnvloeden, zoals de aanwezigheid van bomen en struiken, en de verkeersintensiteit. Beheer- en onderhoud kan een grote rol spelen bij het behouden of verbeteren van de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding in de praktijk. De analyse van de resultaten uit 17 reinigingsproeven laat zien dat reiniging van infiltrerende verharding de infiltratiesnelheid gemiddeld met 380% kan verhogen.

De conclusies van dit onderzoek bieden zowel gemeenten als MKB-ondernemingen een goed startpunt om verder te werken met en aan de toepassing van infiltrerende verharding in de praktijk. De metingen laten zien dat veel van de infiltrerende verharding die in Nederlandse gemeenten ligt naar behoren functioneert. Tegelijkertijd tonen de resultaten dat de infiltratiecapaciteit van infiltrerende verhardingen achteruit gaat met de tijd (74 mm/uur per jaar). De toename in infiltratiecapaciteit die bereikt kan worden

middels reiniging toont tenslotte aan dat beheer en onderhoud, mits juist toegepast, een cruciale rol kan spelen in het bewaren of verbeteren van de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding in de praktijk.

Om voor individuele locaties de lange termijneffecten van diverse omgevingsfactoren én van beheer en onderhoud op de effectiviteit van infiltrerende verharding in de praktijk te kunnen bepalen zijn echter meerjarige metingen nodig op locatie. Gemeenten adviseren wij dan ook om bij aanleg van infiltrerende verharding een meet- en monitoringsprotocol op te stellen welke de uitvoering van meerjarige metingen waarborgt en vastlegt. Alleen zo kan een optimaal onderhoudsschema worden ontwikkeld waarmee een goede werking van infiltrerende verharding op de langere termijn kan worden geborgd en kan een afweging op kosten en baten worden gemaakt wat betreft grootschaligere implementatie van de infiltrerende verharding in de praktijk.

# Inhoudsopgave

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Inleiding.....</b>   | <b>7</b>  |
| 1.1       | Aanleiding.....   | 7         |
| 1.2       | Doelstelling.....   | 8         |
| 1.3       | Leeswijzer .....  | 8         |
| 1.4       | Acknowledgements .....  | 9         |
| <b>2.</b> | <b>Methode.....</b>   | <b>10</b> |
| 2.1       | Praktijkproeven op locatie .....  | 10        |
| 2.2       | Opzet praktijkproeven per locatie.....                                      | 11        |
| 2.3       | Registratie systeemkenmerken, omgevingsfactoren, en type onderhoud .....    | 11        |
| 2.4       | Interpretatie testresultaten per locatie.....                               | 13        |
| 2.5       | Overkoepelende analyse van de resultaten.....                               | 14        |
| <b>3.</b> | <b>Resultaten .....</b>   | <b>15</b> |
| 3.1       | Algemene beschrijving resultaten praktijkproeven.....                       | 15        |
| 3.1.1     | Constructie en opbouw proeflocaties .....                                   | 15        |
| 3.1.2     | Omgevingsfactoren proeflocaties.....  | 16        |
| 3.1.3     | Gemeten infiltratiesnelheid op de proeflocaties .....                       | 17        |
| 3.2       | Invloed van omgevingsfactoren op gemeten infiltratiesnelheid .....          | 19        |
| 3.3       | Invloed van beheer- en onderhoud op gemeten infiltratiesnelheid .....       | 23        |
| <b>4.</b> | <b>Discussie.....</b>   | <b>26</b> |
| 4.1       | Belangrijkste resultaten in het licht van eerder uitgevoerd onderzoek ..... | 26        |
| 4.2       | Onderzoeksbependingen en aanbevelingen .....                                | 28        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusie .....</b>  | <b>31</b> |
|           | <b>Literatuurlijst .....</b>  | <b>33</b> |
|           | <b>Bijlage A: Overzichtstabel praktijkmetingen.....</b>                     | <b>34</b> |
|           | <b>Bijlage B: Invloed omgevingsfactoren.....</b>                            | <b>35</b> |

# 1. Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Klimaatverandering en veranderend landgebruik zetten het leefklimaat en het watersysteem in de stad steeds meer onder druk (VNG, 2016). Als gevolg van het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie, dat eind september 2017 is gepresenteerd in Den Haag, moeten alle gemeenten vanaf 2020 bij herinrichting rekening houden met de klimaatveranderingen en de stad klimaatbestendig inrichten. Met het Deltaplan moet Nederland zo goed mogelijk worden voorbereid op de gevolgen van klimaatverandering.

Eén van de manieren om klimaatbestendiger te worden is ervoor te zorgen dat meer regenwater in de bodem infiltreert en minder hoeft te worden afgevoerd via het rioolstelsel. Dit beperkt problemen met wateroverlast, hitte en verdroging. Enige jaren geleden hebben we in Nederland daarom voor het stedelijke waterbeheer ingezet op het meer infiltreren van regenwater in de bodem in plaats van het afvoeren van regenwater naar het rioolstelsel. Dit heeft voordelen als minder wateroverlast, minder belasting van de riolerings-, zuiverings- en oppervlaktewatersystemen, en bovendien gaat het verdroging tegen. In diverse gemeenten zijn dan ook infiltrerende verhardingen aangelegd als alternatief voor een regenwaterriool om het regenwater vast te houden, te bergen en daarna pas af te voeren.

Door de opkomst van doorlatende verhardingen heeft de afgelopen tien jaar een groot aantal MKB-ondernemingen zich toegelegd op het aanbieden van infiltrerende verhardingen. Het gaat hierbij met name om innovaties op het gebied waterpasserende (verharding met vergrote voegen waardoor het water passeert) en waterdoorlatende (verharding van poreus bestratingsmateriaal dat regenwater doorlaat) verhardingen<sup>1</sup>. Door problemen met de afname van infiltratiesnelheid, en onduidelijkheid over beheer en onderhoud zakt de markt momenteel in. Vele gemeenten besluiten na enkele praktijkmetingen de aanleg van doorlatende verharding sterk te verminderen en of hiermee geheel te stoppen. Dit is echter vaak gebaseerd op een beperkt aantal (onnauwkeurige) metingen en zonder onderscheid voor de verschillende soorten infiltrerende verharding en innovaties. De MKB-ondernemingen zitten met de vraag hoe ze hun doorlatende verharding zo kunnen aanpassen dat gemeenten en andere inrichters van straten erin blijven geloven en het aan blijven leggen. Ze willen daartoe meer inzicht in het functioneren van de doorlatende verharding op de lange termijn uitgevoerd door onafhankelijke onderzoekers van hogescholen. Hiermee kunnen zij het product optimaliseren alsmede het beheer en onderhoud ervan. Dit zijn essentiële ingrediënten om naar hun klanten overtuigend over hun goed functionerende systemen te kunnen vertellen. Er bestaat een duidelijke noodzaak voor meer inzicht, innovatie, en richtlijnen voor beheer en onderhoud.

Het project 'Infiltrerende stad' heeft als doel het kennishiaat van de effectiviteit van infiltrerende verharding aanpakken ten behoeve van de innovatieve MKB-ondernemingen. Hierbij gaat het om het verkrijgen van meer inzicht in het korte en lange termijn functioneren van hun producten. Daarnaast betreft het de opbouw van inzicht omtrent het nut van en de noodzaak tot beheer en onderhoud om de effectiviteit op lange termijn te waarborgen.

Het consortium, bestaande uit een unieke samenwerking van 3 hogescholen, 9 MKB-ondernemingen met verschillende en overlappende disciplines en een tweetal organisaties die MKB-ondernemingen op dit vakgebied ondersteunen, hebben de handen ineens geslagen om infiltrerende verharding te monitoren en

---

<sup>1</sup> <https://www.riool.net/waterdoorlatende-en-waterpasserende-verharding>

kennis te ontsluiten voor de opgave waar steden voor staan: de transformatie naar een veerkrachtige en op een toekomstig klimaat aangepaste gebouwde omgeving.

De overkoepelende onderzoeksvraag die is geformuleerd vanuit het project 'Infiltrerende stad' luidt daarmee als volgt:

### **Hoe kunnen MKB-ondernemingen met innovaties het vertrouwen van de markt zodanig versterken dat de markt (weer) kiest voor meer toepassing van infiltrerende verhardingen?**

Via een systeemanalyse (werkpakket 1, WP1), een onderzoek naar het functioneren van infiltrerende verhardingen in de praktijk (werkpakket 2, WP2), het testen van innovaties en onderzoek op testlocaties (werkpakket 3, WP3), en een analyse van de marktvrage en formulering van de marktstrategie (werkpakket 4, WP4) is een antwoord gezocht op bovengenoemde onderzoeksvraag.

## 1.2 Doelstelling

Dit rapport betreft de rapportage van WP2 uit het project 'Infiltrerende stad'. In WP2 staat de praktijk centraal. Middels infiltratieproeven is in WP2 onderzocht hoe infiltrerende verharding functioneert in de praktijk en met name hoe de infiltratiecapaciteit in de loop der tijd afneemt. Een eerste doelstelling van WP2 is daarbij inzicht te krijgen in hoe het functioneren van doorlatende verhardingen in de praktijk wordt beïnvloed door lokale omgevingskenmerken. Het onderzoek valt uiteen in enerzijds onderzoek op verschillende plekken in Nederland waar de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding wordt onderzocht en anderzijds het verzamelen van de omgevingskenmerken van deze locaties. Door relaties te leggen tussen de gemeten infiltratiesnelheid op locatie, de ouderdom van de locatie, en verschillende omgevingskenmerken probeert WP2 een antwoord te formuleren op de volgende onderzoeksvraag:

### **Hoe functioneren infiltrerende verhardingen op de korte en lange duur en hoe is dat afhankelijk van omgevingsfactoren?**

Een tweede doelstelling van WP2 is inzicht te krijgen in de effectiviteit van verschillende strategieën en innovaties in beheer en onderhoud op het functioneren van infiltrerende verharding. Door verschillende methoden van onderhoud en reiniging te testen voor verschillende typen infiltrerende verharding en te meten wat het effect van dit beheer en onderhoud is op de infiltratiesnelheid probeert WP2 een antwoord te formuleren op de volgende onderzoeksvraag:

### **Welk beheer en onderhoud is nodig om het functioneren op lange duur te garanderen?**

Met een antwoord op bovengenoemde onderzoeksvragen streeft WP2 ernaar een bijdrage te leveren aan de verbetering van en een verbeterd inzicht in het (optimaal) ontwerp, gebruik, en beheer en onderhoud van infiltrerende verharding in de praktijk, met als doel de betrokken MKB-ondernemingen met innovaties op het gebied van infiltrerende verharding te ondersteunen en de markt handvatten te bieden wat betreft de keuze voor infiltrerende verharding als maatregel om het stedelijk gebied klimaatbestendig in te richten.

## 1.3 Leeswijzer

Deze rapportage is opgebouwd als volgt. Hoofdstuk 2 beschrijft de methodische stappen die zijn ondernomen voor het verzamelen van de benodigde data en het analyseren van de gegevens. Dit betreft: 1) Het opzetten van praktijkproeven op locatie; 2) de registratie van omgevingsfactoren per locatie; 3) De

interpretatie van testresultaten per locatie; en 4) Een overkoepelende analyse naar de effecten van omgevingsfactoren en verschillende beheer- en onderhoudsstrategieën op de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding. Hoofdstuk 3 betreft de resultaten. Hoofdstuk 3 start met een algemene uiteenzetting omtrent de uitkomsten van de verschillende praktijkproeven, aanvullend worden in meer detail de belangrijkste resultaten omtrent 'invloed omgevingsfactoren' en 'effectiviteit beheer en onderhoud' besproken. Hoofdstuk 4 omvat de discussie. In de discussie worden de belangrijkste resultaten van werkpakket 2 in het licht geplaatst van eerder uitgevoerd (wetenschappelijk) onderzoek. Daarnaast bespreekt hoofdstuk 4 de belangrijkste beperkingen omtrent het uitgevoerde onderzoek, bijvoorbeeld als het gaat om aannames en onzekerheden in ontwerp, uitvoering en analyse van de praktijkproeven. Hoofdstuk 4 eindigt met een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek, het beleid, en de praktijk. Hoofdstuk 5 vat het onderzoek in de conclusie.

#### 1.4 Acknowledgements

Het project De Infiltrerende Stad wordt uitgevoerd met ondersteuning van een RAAK-MKB subsidie en is een samenwerking tussen de Hogeschool Rotterdam (penvoerder), Hogeschool van Amsterdam, Hanzehogeschool Groningen, Aquaflow BV, Bufferblock BV, Building Changes, Drainvast bv, Germieco, Water Innovation Consulting (Hemels water), Markus BV, EWB, Van Gelder Aannemingsbedrijf, Gemeente Bergen, Gemeente Groningen, Gemeente Rotterdam en het Hoogheemraadschap van Delfland.



## 2. Methode

Dit onderzoek test de werking van infiltrerende verharding in de praktijk. Door middel van praktijkproeven is in diverse gemeenten in Nederland de infiltratiesnelheid van diverse vormen van passerende verharding onderzocht. Door de resultaten van deze praktijkproeven uit te zetten tegen diverse omgevingsfactoren wordt daarnaast bepaald wat de invloed van de omgeving is op het teruglopen van de infiltratiesnelheid. Het effect van verschillende typen beheer en onderhoud is tenslotte beoordeeld door per locatie proeven voor en na onderhoud uit te voeren. De volgende paragrafen beschrijven de methode voor uitvoering en analyse van deze praktijkproeven.

### 2.1 Praktijkproeven op locatie

Binnen het project de Infiltrerende Stad zijn in totaal meer dan 100 infiltratieproeven uitgevoerd. Voor 70 van deze proeven is niet alleen de effectiviteit van infiltrerende verharding gemeten in de praktijk, maar zijn ook systeemkenmerken en omgevingsfactoren geregistreerd (tabel A.1, bijlage A). Deze 70 proeven vormen de basis voor WP2. Drie proeven zijn uitgevoerd onder bijzondere omstandigheden, te weten hevige regen, gebruik van vervuild water, of aanpassingen in de meetopstelling, die de betrouwbaarheid van resultaten hebben beïnvloed. Deze drie proeven zijn daarom niet meegenomen in de overkoepelend analyse. De gemeenten waar proeven zijn uitgevoerd liggen verspreid door Nederland en hebben verschillende typen infiltrerende verharding liggen van een variërende leeftijd (tabel 1).

Tabel 1: Locaties en kenmerken van de praktijkproeven uitgevoerd als onderdeel van WP2.

| Locatie         | Type systeem (Leverancier)   | Leeftijd verharding | Aantal proeven | Omstandigheden           | Reinigingsmethodes                     |
|-----------------|--|---------------------|----------------|--------------------------|--|
| Almere          | Waterdoorlatend; Waterpasserend (Imp. PCIP)                                | 8 – 10 jaar         | 8              | Onverzadigd en verzadigd | Vervangen voegvulling                  |
| Amersfoort      | Waterpasserend (Aquaflow, Drainvast bv)                                    | 2 – 9 jaar          | 6              | Onverzadigd en verzadigd | ZOAB-reiniger; Hogedruk lucht reiniger |
| Bergen          | Waterpasserend (Drainvast bv)  | 3 jaar              | 4              | Onverzadigd en verzadigd | ZOAB-reiniger                          |
| Breukelen       | Waterpasserend (Aquaflow)  | 2 jaar              | 2              | Onverzadigd en verzadigd | -                                      |
| Egmond a/d Hoef | Waterpasserende (Drainvast bv)   | 1 – 1,5 jaar        | 2              | Onverzadigd en verzadigd | -                                      |
| Grubbenvorst    | Waterdoorlatend (ZOAK Tilesystems)   | 0 – 5 jaar          | 13             | Onverzadigd en verzadigd | ZOAB-reiniger; Veeg-Zuig combi         |
| Heemskerk       | Waterpasserend   | 0,5 jaar            | 2              | Onverzadigd en verzadigd | Hogedruk lucht reiniger (spuitlans)    |
| Huizen          | Waterpasserende (Morssinkhof UNI-Priora Aqua)                              | 2 – 10 jaar         | 6              | Onverzadigd en verzadigd | Hogedruk lucht reiniger                |
| Loosdrecht      | Waterdoorlatend (Easy Flow Struyk Verwo)                                   | 2 jaar              | 1              | Onverzadigd              | -                                      |
| Utrecht         | Waterdoorlatend (Grasbetonsteen); Waterpasserend (Imp. PCIP, Drainvast bv) | 1 – 12 jaar         | 15             | Onverzadigd en verzadigd | Hogedruk lucht reiniger                |
| Zeist           | Waterdoorlatend; Waterpasserend (Aquaflow)                                 | 4 – 12 jaar         | 9              | Onverzadigd en verzadigd | ZOAB-reiniger                          |

## 2.2 Opzet praktijkproeven per locatie

Om de effectiviteit van waterdoorlatende en waterpasserende verharding te meten in de praktijk zijn verschillende methodes beschikbaar: enkele ring infiltrometer, dubbele ring infiltrometer, full-scale, en het gebruik van een regen simulator (Boogaard et al., 2013). Deze methodes zijn beschreven en vergeleken in hoofdstuk 4 van het rapport over WP1 van het project 'De Infiltrerende Stad' (Leskens & Lekkerkerk, 2020)

De praktijkproeven uit het project 'De Infiltrerende Stad' zijn uitgevoerd middels de full-scale methode. Wetenschappelijk onderzoek laat zien dat proeven middels een full-scale methode robuustere resultaten opleveren dan proeven die gebruik maken van een dubbele ring-infiltrometer (Boogaard, 2015). Een groter deel van het straatoppervlak wordt immers getest waardoor het risico op uitkomsten die niet representatief zijn voor de werkelijkheid worden verkleind.

Volgens de full-scale methode is per locatie een representatief gedeelte van de straat met een grootte van tenminste 4 m<sup>2</sup> afgebakend met zandzakken en daaropvolgend een aantal maal onder water gezet tot een diepte van ten minste 5 centimeter. Het water kan door de afbakening met zandzakken niet uitstromen naar andere afvoermogelijkheden. Hierdoor geeft de snelheid van het zakken van de waterstand een goede representatie van de infiltratiesnelheid op locatie. Het zakken van de waterstand is gemeten met behulp van drie waterstandsmeters (hydraulische druk), met een meetinterval van 30 seconden. Handmetingen zijn gebruikt ter controle en als back-up van de automatische waterstandsmetingen.

Door per infiltratieproef de testopstelling ten minste 2 – 3 keer onder water te zetten en te laten leeglopen kan worden getoetst wat de infiltratiesnelheid onder verzadigde en onverzadigde omstandigheden is (Boogaard & Lucke, 2019). Op 10 van de 12 bemeten locaties de infiltratiesnelheid getoetst onder zowel verzadigde en onverzadigde omstandigheden (zie tabel 1).

Door per proeflocatie proeven uit te voeren voor en na onderhoud is onderzocht wat het effect van specifieke vormen van beheer en onderhoud is op de infiltratiesnelheid van de specifieke locatie. Hiertoe zijn op 8 van de 12 locaties aanvullende proeven uitgevoerd naar het effect van beheer en onderhoud (zie tabel 1).

## 2.3 Registratie systeemkenmerken, omgevingsfactoren, en type onderhoud

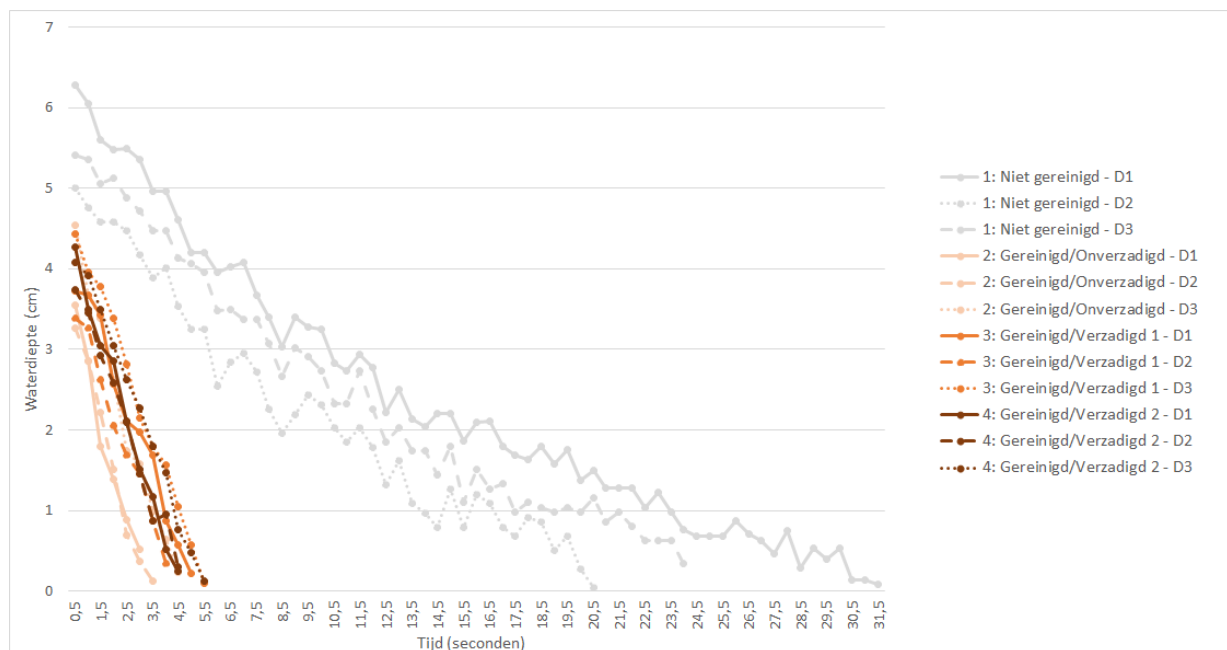
Diverse omgevingsfactoren kunnen van invloed zijn op de snelheid van achteruitgang van de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding in de praktijk (Boogaard & Lucke, 2014) zoals bomen, struiken en verkeerintensiteit. De mogelijke invloed van deze factoren is echter nooit met een grote dataset geverifieerd. Op basis van de literatuurstudie uitgevoerd als onderdeel van WP1 zijn per meetlocatie informatie de volgende omgevingsfactoren vastgelegd en opgenomen in het meetprotocol (tabel 2): Aanwezigheid van bomen en struiken; Conditie van het straatwerk (spoorvorming, plaatvorming, losse stenen); Wijktypologie; Verkeer- en parkeerintensiteit; Ondergrond (maaiveldhoogte, bodemkenmerken). Aanvullend op de omgevingsfactoren zijn ook enkele kenmerken van het infiltratiesysteem vastgelegd per locatie: Opbouw en conditie van de voegen; Opbouw van de straatlaag; Opbouw van de fundering; Verkanting van het oppervlak; Aanwezigheid van kolken; Werking van het systeem. Tabel 2 geeft een overzicht van de diverse omgevingsfactoren en systeemkenmerken die voor elke locatie zijn vastgelegd. De tabel beschrijft ook de reinigingsmethodes die zijn onderzocht: ZOAB-reiniger (50–125 bar); Hogedruk lucht; Vervangen voegvulling.

Tabel 2: Overzicht van geregistreerde systeemkenmerken en omgevingsfactoren praktijkproeven.

|                     | Factor  | Registratie   |
|---------------------|---|---|
| Omgevingsfactoren   | Bomen   | Geen; Klein; Gemiddeld; Groot   |
|                     | Boom over weg ratio   | %   |
|                     | Struiken  | Geen; Klein; Gemiddeld; Groot   |
|                     | Bladeren  | Geen; Weinig; Gemiddeld; Veel   |
|                     | Conditie Straatwerk   | Goed; Slecht  |
|                     | Losse stenen  | Ja; Nee   |
|                     | Spoorvorming  | Ja; Nee   |
|                     | Plaatvorming onder straatlaag                                       | Ja; Nee   |
|                     | Wijktypologie   | Buitengebied; Bedrijven; Groen; Villa; Historische binnenstad; Vooroorlogs bouwblok; Stedelijk bouwblok; Volkswijk; Tuindorp; Vernieuwd; Hoogbouw stadscentrum; Tuinstad hoogbouw; Sub-urbane uitbreiding; Bloemkoolwijk; Naoorlogse woonwijk; Naoorlogse tuinstad laagbouw; Vernieuwd hoogbouw |
|                     | Maximumsnelheid   | km/uur  |
|                     | Verkeersintensiteit   | Laag; Gemiddeld; Hoog   |
|                     | Parkeerintensiteit (parkeerwijze: vakken/straat)                    | Laag; Gemiddeld; Hoog   |
|                     | Ondergrond materiaal  | Klei; Klei/Zand; Zand   |
|                     | Maaiveldhoogte  | m. t.o.v. NAP   |
|                     | GHG/GLG   | m. t.o.v. NAP   |
| Systeemkenmerken    | Werking systeem   | Waterdoorlatend; Waterpasserend   |
|                     | Aanwezigheid kolk   | Ja; Nee; Onbekend   |
|                     | Aanwezigheid drain  | Ja; Nee; Onbekend   |
|                     | Aanwezigheid overstort  | Ja; Nee; Onbekend   |
|                     | Voeg-breedte  | Mm  |
|                     | Voeg-materiaal  | Basalt split; Bestone split; Gebroken hardsteen; Drainvoeg viltjes  |
|                     | Voeg-conditie   | Goed; Slecht  |
|                     | Straatlaag dikte  | cm  |
|                     | Straatlaag materiaal  | Aquabase; Hollans split; Bestone split; Gebroken hardsteen  |
|                     | Fundering dikte   | cm  |
|                     | Fundering materiaal   | Aquabase; Drainmix, Menggranulaat; Gebroken hardsteen; Onbekend   |
| Verkanting          | Vlak profiel; Hol profiel; Dak profiel; Eenzijdig verkant; Tonrond; |   |
| Beheer en onderhoud | Gereinigd als onderdeel van test                                    | Ja; Nee   |
|                     | Reinigingsmethode   | ZOAB-reiniger; Hogedruk lucht; Vervangen voegvulling  |

## 2.4 Interpretatie testresultaten per locatie

De infiltratiesnelheid van de infiltrerende verharding is bepaald door de gemiddelde afname in waterhoogte per minuut af te leiden uit de waterstandsmetingen (diver-metingen) die zijn uitgevoerd per proef (drie verdeeld over het proefvak). Hiervoor is eerst een lineaire trendlijn geplot langs de curve die die waterafname per proef weergeeft. Vervolgens is van deze trendlijn de richtingscoëfficiënt en betrouwbaarheid bepaald. De infiltratiesnelheid in mm/uur is eerst berekend voor de drie diver-metingen afzonderlijk die zijn uitgevoerd per proef. Om tot een gemiddelde infiltratiesnelheid te komen per proef is van de drie richtingscoëfficiënten het gewogen gemiddelde genomen. Figuur 1 laat ter illustratie de infiltratiecurves van de individuele divers zien van de infiltratieproeven die zijn uitgevoerd in de gemeente Heemskerk. Tabel 3 presenteert de resultaten van de trendlijn-analyse per proef en per diver, evenals de gemiddelde uitkomsten per proef. Met behulp van de afgeleide infiltratiesnelheden onder verzadigde en onverzadigde omstandigheden, voor en na reiniging van de proefopstelling, is voor iedere individuele testlocatie berekend welk effect verzadiging en de toepassing van één of meerdere reinigingsmethoden heeft op de infiltratiesnelheid van de infiltrerende verharding op locatie. Ter illustratie, op basis van de infiltratieproeven uitgevoerd in de gemeente Heemskerk kunnen we concluderen dat reiniging met behulp van een hogedruk luchtreiniger (spuitlans) een toename oplevert van de infiltratiesnelheid van 459% onder onverzadigde condities [berekening:  $((100/123*687)-100)$ ]. De afname van de infiltratiesnelheid door verzadiging onder gereinigde condities is daarbij voor deze testlocatie berekend als 25% [berekening:  $((100/687*518)-100)$ ].



Figuur 1: Infiltratiecurves infiltratieproeven gemeente Heemskerk.

Tabel 3: Resultaten infiltratieproeven gemeente Heemskerk. De resultaten geven de infiltratiesnelheid in mm/uur weer per proef en per diver. Tussen haakjes staat de  $R^2$  (0-1) welke inzicht geeft in de betrouwbaarheid van de trendlijn. Gezien de nauwkeurigheid van de metingen is een  $R^2$  van 0,9 geaccepteerd.

| Meting #                             | Diver 1<br>Infiltratie-snelheid<br>(mm/uur) | Diver 2<br>Infiltratie-snelheid<br>(mm/uur) | Diver 3<br>Infiltratie-snelheid<br>(mm/uur) | Gemiddelde<br>infiltratiesnelheid<br>(mm/uur) |
|--------------------------------------|---|---|---|---|
| 1: Niet<br>gereinigd;<br>Onverzadigd | 107 (0,94)                                  | 137 (0,94)                                  | 126 (0,95)                                  | 123   |
| 2: Gereinigd;<br>Onverzadigd         | 735 (0,97)                                  | 683 (0,98)                                  | 642 (0,98)                                  | 687   |
| 3: Gereinigd;<br>Verzadigd 1)        | 500 (0,98)                                  | 530 (0,99)                                  | 524 (0,99)                                  | 518   |
| 4 (Gereinigd;<br>Verzadigd 2)        | 602 (0,99)                                  | 530 (0,98)                                  | 499 (0,99)                                  | 544   |
| 1: Niet<br>gereinigd;<br>Onverzadigd | 107 (0,94)                                  | 137 (0,94)                                  | 126 (0,95)                                  | 123   |

## 2.5 Overkoepelende analyse van de resultaten

Alle testresultaten, bestaande uit infiltratiesnelheden, geregistreerde systeemkenmerken, omgevingsfactoren en type beheer en onderhoud per testlocatie, zijn verzameld in tabel 1 in bijlage A. Deze tabel vormt de basis voor de overkoepelende analyse van resultaten gericht op het effect van omgevingsfactoren op de infiltratiesnelheid en de invloed van verschillende technieken van beheer- en onderhoud op het vergroten van de infiltratiesnelheid.

Allereerst is er voor de gehele set aan testresultaten beoordeeld hoe infiltratiesnelheden zich verhouden afgezet tegen de leeftijd. Om een beter beeld te scheppen is daarnaast onderscheid gemaakt tussen de (verandering in) infiltratiesnelheid door de tijd afgezet tegen het type infiltrerende verharding. Tenslotte is getoetst wat de invloed van diverse omgevingsfactoren is op de (verandering in) infiltratiesnelheid door de tijd.

Het effect van (verschillende typen) beheer en onderhoud is getoetst door voor die locaties waar reinigingsproeven zijn uitgevoerd de infiltratiesnelheid voor en na reiniging met elkaar te vergelijken. Daarbij is bovendien een onderscheid gemaakt tussen het effect van verschillende methoden van reiniging, het effect van reiniging op verschillende typen infiltrerende verharding, en verandering van het effect van reiniging als functie van de levensduur van de infiltrerende verharding.

De getoonde resultaten zijn groepsgemiddelde (tenzij anders aangegeven). In de bijbehorende visualisaties wordt met behulp van boxplots ook de mediaan (dat is de meeste voorkomende waarde) waarden getoond evenals de spreiding van de individuele meetresultaten om deze groeps-gemiddelde en -mediaan waarden heen. Gezien de relatief kleine sub-dataset (e.g. 18 reinigings-proeven, waarvan 17 geschikt voor analyse) zijn als onderdeel van deze rapportage geen statistische analyses uitgevoerd om de getoonde verschillen te testen op statistische significantie. Bij een grotere dataset kan een dergelijk analyse worden uitgevoerd met behulp van een T-toets of ANOVA analyse.

## 3. Resultaten

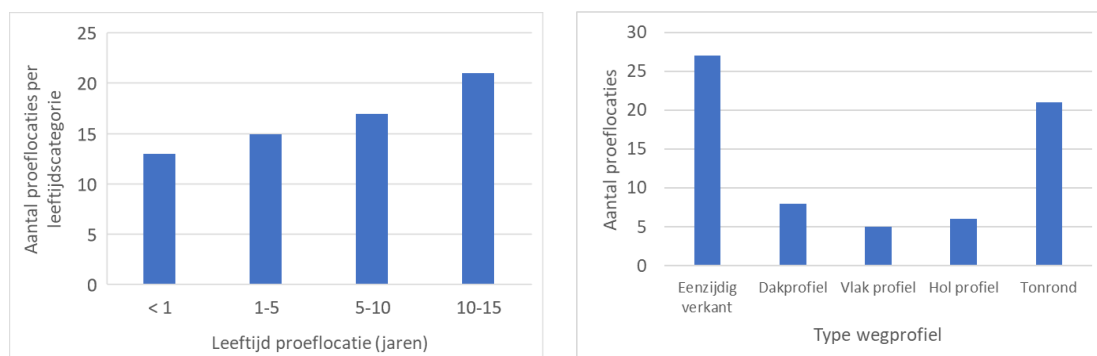
### 3.1 Algemene beschrijving resultaten praktijkproeven

De resultaten van 67 praktijkproeven, uitgevoerd in 11 verschillende gemeenten, zijn verzameld in bijlage A (tabel 1) en gebruikt in de analyse naar de invloed van omgevingsfactoren en de invloed van beheer- en onderhoud op de infiltratiesnelheid. Deze paragraaf geeft een algemene beschrijving van de resultaten en omgevingsfactoren van de 67 praktijkproeven uitgevoerd als onderdeel van het project Infiltrerende stad.

#### 3.1.1 Constructie en opbouw proeflocaties

Van de 67 infiltratieproeven die zijn uitgevoerd zijn 29 infiltratieproeven uitgevoerd op een locatie met waterdoorlatende verharding, 38 infiltratieproeven zijn uitgevoerd op een locatie met een waterpasserende verharding. Op een aantal testlocaties liggen ook kolken om het water van de straat in de ondergrond te krijgen. De testen zijn telkens zo opgezet en uitgevoerd dat de kolken geen rol speelden.

De leeftijd van de testlocaties waar infiltratieproeven zijn uitgevoerd is gemiddeld 5,7 jaar en varieert tussen 0–13 jaar (figuur 2). De locaties zijn overwegend eenzijdig verkant of tonrond (figuur 2). Een kleiner aandeel van de proeven is uitgevoerd op een locatie met een dak-, vlak- of holprofiel. Voegbreedte van de verharding op de verschillende proeflocaties is tot 8 mm breed. Van de 39 infiltratieproeven waarvoor de voegbreedte is geregistreerd zijn 20 proeven uitgevoerd op een locatie met een voegbreedte <4 mm. Op de meeste plekken zijn voegafstandhouders toegepast. Voegmateriaal veelal toegepast is Brekerzand 0-2, Basalt split 0-2, Bestone split 1-3. Op zes proeflocaties zijn Drainvoegviltjes geplaatst. Conditie van de voegen is in de meeste gevallen goed, soms vervuild of begroeid met mos. Als straatlaagmateriaal is op de meeste locaties Bestone Split, Hollands Steenslag, of gebroken hardsteen 2-6 toegepast. Op enkele plekken is gebruik gemaakt van Aquabase C1 1-3. De dikte van de straatlaag varieert tussen 3–7 cm. Dikte van de fundering varieert tussen 25–35 cm, materiaal gebruikt ter fundering is meestal menggranulaat of gebroken hardsteen 3/32 tot 8/32. Op enkele plaatsen is gebruik gemaakt van Drainmix 4/16 of Aquabase A5 8/32. Individuele systeemkenmerken per locatie zijn beschreven in tabel A.1 (Bijlage A).

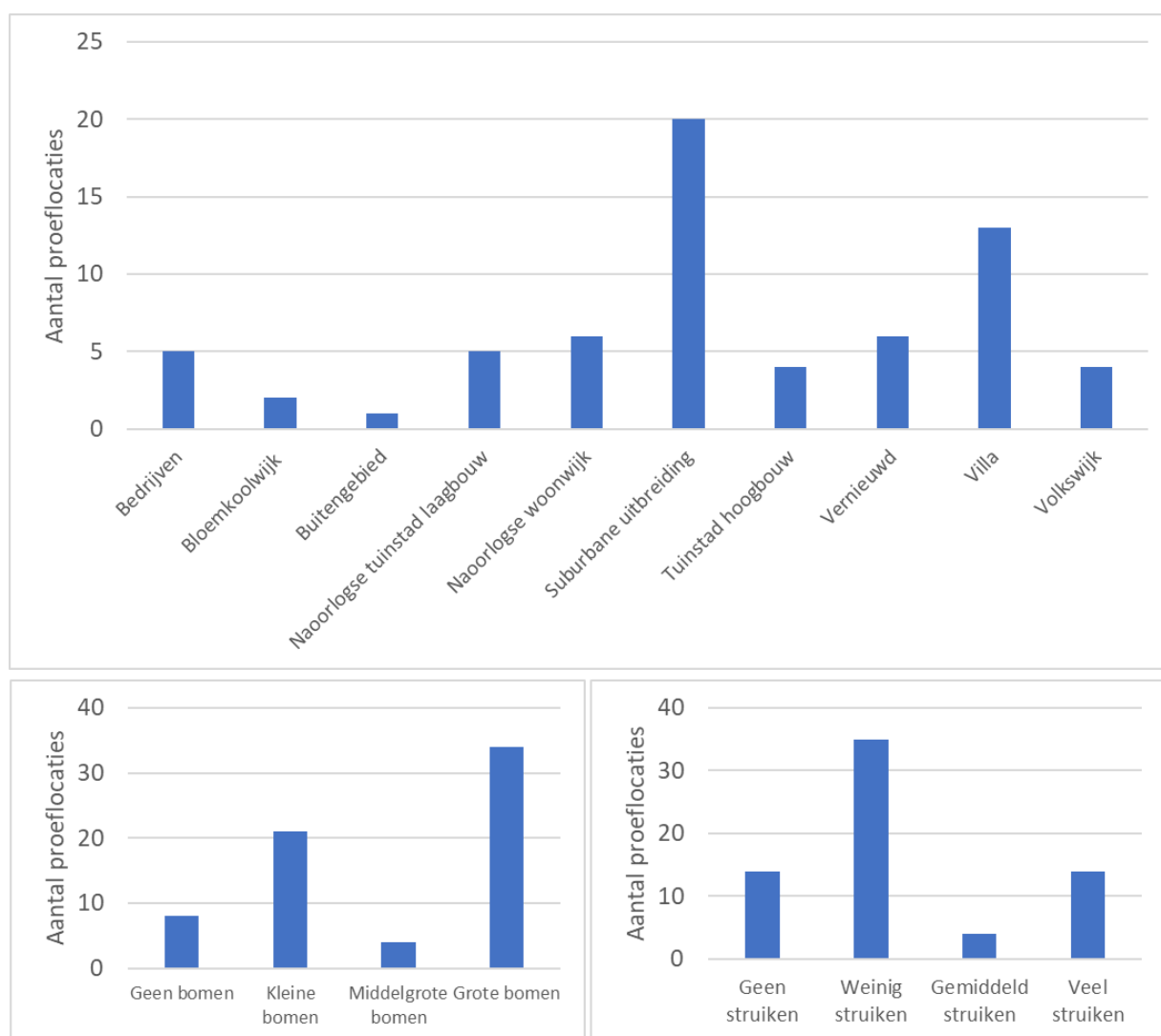


Figuur 2: Systeemeigenschappen proeflocaties infiltratieproeven in de praktijk. Links: leeftijd van de proeflocatie. Rechts: type wegprofiel.

### 3.1.2 Omgevingsfactoren proeflocaties

De omgevingsfactoren van de 67 proeflocaties verschillen. Enkele daarvan zijn weergegeven in figuur 3. De meeste infiltratieproeven zijn uitgevoerd in wijken van het type 'sub-urbane uitbreiding' (ook wel Vinexwijk) (20x), daarnaast zijn meerdere infiltratieproeven uitgevoerd in 'villawijken' (13x), 'vernieuwd gebied' (6x), 'naoorlogse woonwijken' (6x) en 'naoorlogse tuinstad laagbouw' (5x), en 'bedrijventerreinen' (5x). Slechts één proef is uitgevoerd in het buitengebied.

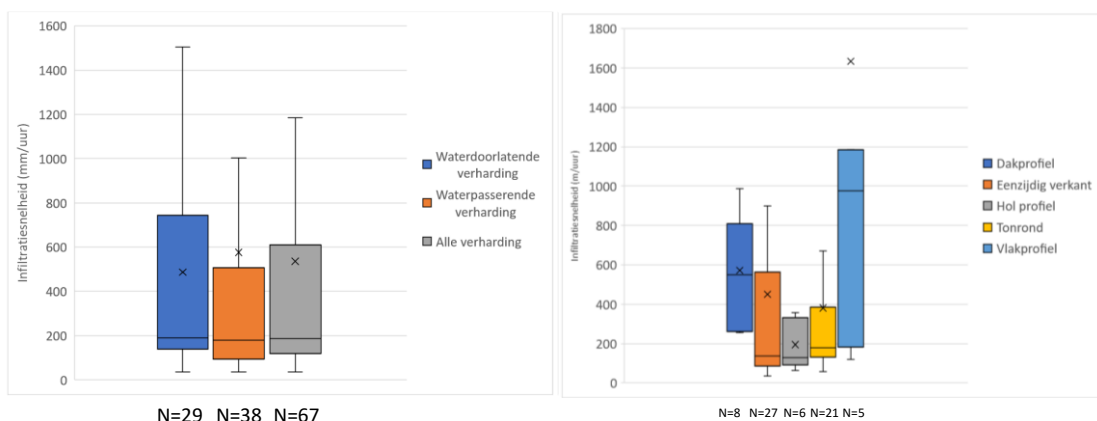
Nabij 55 meetlocaties stonden bomen (34 locaties met grote bomen en 21 locaties met kleine bomen). Op de meeste locaties (35x) kwamen weinig struiken voor, op de locatie van 14 proeven kwamen helemaal geen struiken voor, en in 14 gevallen was er sprake van veel struikgewas in nabijheid van de proeflocatie. De proeflocaties scoren over het algemeen laag tot gemiddeld op verkeer- en parkeerintensiteit.



Figuur 3: Omgevingsfactoren proeflocaties infiltratieproeven in de praktijk. Boven: wijktypologie. Onder-links: aanwezigheid van bomen. Onder-rechts: aanwezigheid van struiken.

### 3.1.3 Gemeten infiltratiesnelheid op de proeflocaties

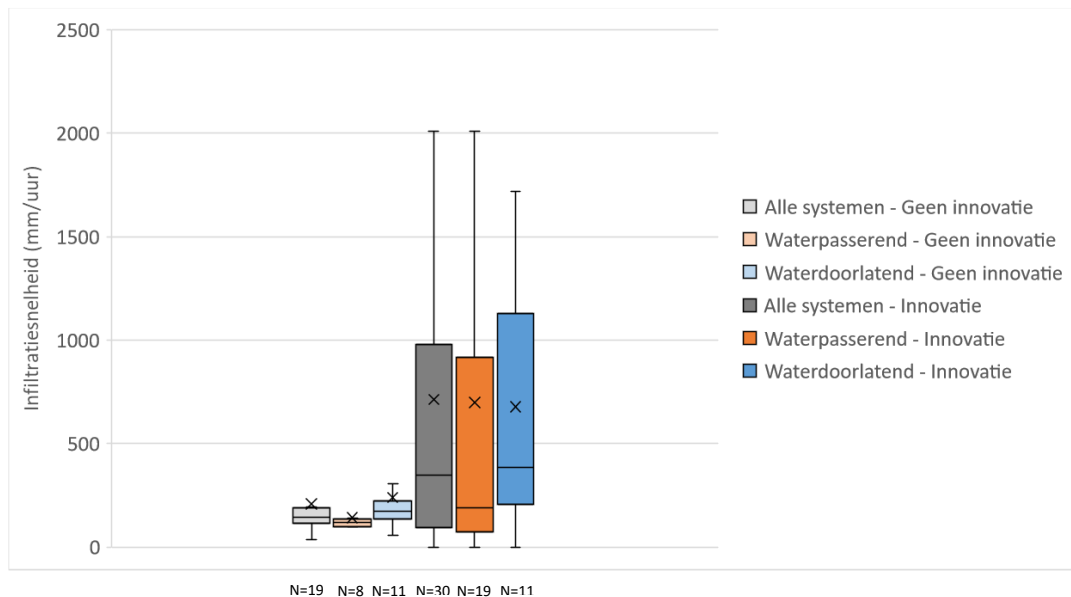
De gemeten infiltratiesnelheid op de locaties waar praktijkproeven zijn uitgevoerd varieert tussen 35 mm/uur tot 5707 mm/uur onder onverzadigde en niet-gereinigde condities en is gemiddeld van 540 mm/uur (gezien de nauwkeurigheid waarmee de metingen zijn uitgevoerd worden gemiddelde waarden afgerond op 10-tallen). Wanneer een onderscheid wordt gemaakt tussen waterpasserende en waterdoorlatende verharding verschillen de gemeten infiltratiesnelheden nauwelijks van elkaar, met respectievelijk gemiddeldes van 500 mm/uur ten opzichte van 570 mm/uur onder onverzadigde en niet-gereinigde condities (figuur 4). Ook het type ondergrond lijkt relatief weinig invloed te hebben op de gemeten infiltratiesnelheid. De gemiddelde infiltratiesnelheid gemeten op locaties met een 'Klei' ondergrond is 530 mm/uur, tegenover 570 mm/uur voor 'Klei/Zand', en 540 mm/uur voor 'Zand'. Op één locatie was er sprake van een 'Zand/Veen' ondergrond, hier is een infiltratiesnelheid gemeten van 140 mm/uur. Omdat dit slechts één locatie betreft kunnen we hier geen eenduidige conclusies aan verbinden. Wanneer we de infiltratiesnelheid per proeflocatie vergelijken met het profiel van de verharding op locatie vinden we aanzienlijke verschillen (figuur 4). Van gemiddeld 190 mm/uur voor een hol profiel tot gemiddeld 1630 mm/uur voor een vlakprofiel. De infiltratiesnelheid op locaties met een voegafstand < 4 mm gemiddeld is iets groter dan de infiltratiesnelheid op locaties met een voegafstand > 4 mm, 510 mm/uur tegenover 340 mm/uur.



Figuur 4: Gemeten infiltratiesnelheden afgezet tegen de systeemeigenschappen (N=67). Links: type verharding, Rechts: type wegprofiel. De boxplots tonen per selectie de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1e en 3e kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers in hoge infiltratiesnelheden zijn ten behoeve van de visualisatie niet weergegeven bij het opstellen van de boxplots, maar zitten wel in de analyse.

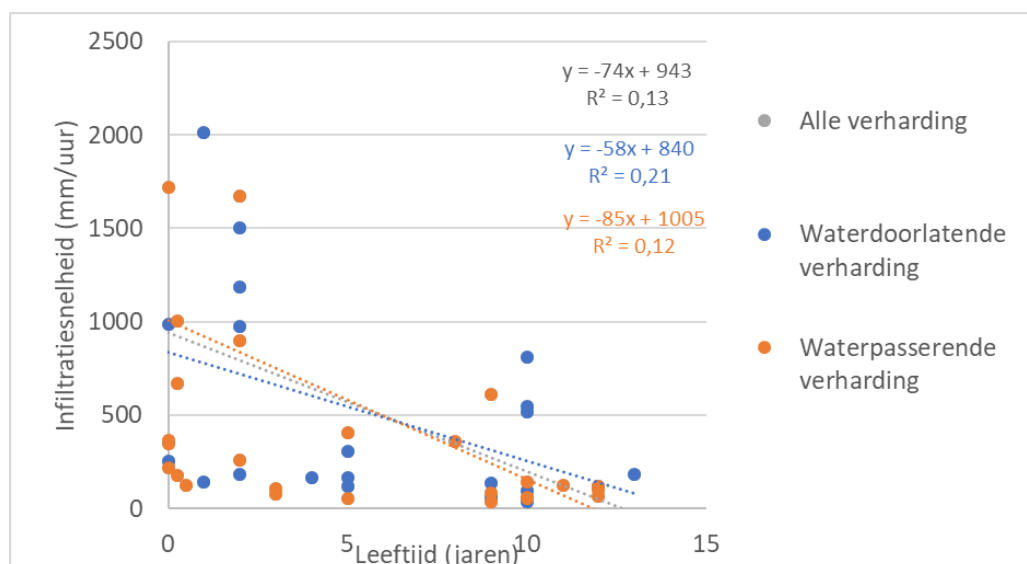
Als onderdeel van de praktijkproeven zijn verschillende innovatieve oplossingen van deelnemende MKB-ondernemingen voor waterdoorlatende en waterpasserende verharding getest (zie tabel 1, en voor een beschrijving WP1 en WP3). Op het gebied van infiltratiesnelheid scoren deze innovaties gemiddeld beter dan reguliere vormen van waterdoorlatende of waterpasserende verharding (figuur 5). Gemeten gemiddelde infiltratiesnelheden, gemeten onder onverzadigde en niet-gereinigde omstandigheden (N=49), variëren daarbij van 220 mm/uur (geen innovatie) tot 740 mm/uur (innovatie) voor alle systemen. De innovaties hebben gemiddeld genomen een iets jongere leeftijd, 4 jaar tegenover 7,6 jaar voor andere infiltrerende systemen. Wanneer we de infiltratiesnelheid verdisconteren voor dit leeftijdseffect (gebruikmakend van een gemiddelde jaarlijkse afname in infiltratiesnelheid van 74 mm/uur, zie figuur 6) functioneren de innovaties nog steeds beter dan de reguliere vormen van waterdoorlatende of waterpasserende verharding.





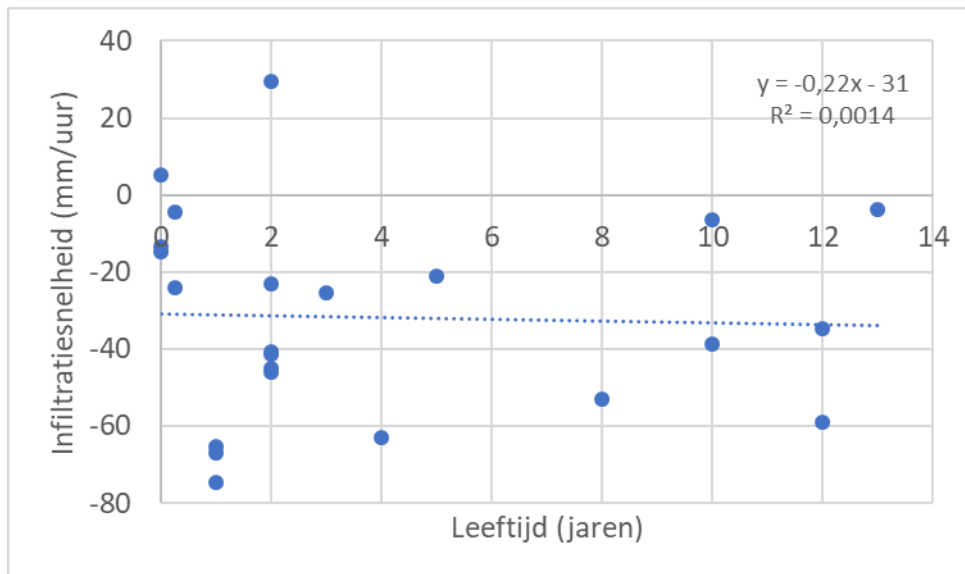
Figuur 5: Gemeten infiltratiesnelheden voor innovatieve oplossingen voor waterpasserende en waterdoorlatende verharding in vergelijking met reguliere systemen voor waterpasserende en waterdoorlatende verharding (N=49). De boxplots tonen per type verharding de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers zijn ter visualisatie niet weergegeven bij het opstellen van de boxplots.

Resultaten uit de praktijkproeven laten zien dat de leeftijd van de waterpasserende of waterdoorlatende verharding negatief is gecorreleerd met de gemeten infiltratiesnelheid onder onverzadigde en niet gereinigde condities (figuur 6, N=49). Dat wil zeggen: hoe ouder het systeem hoe lager de infiltratiesnelheid. De  $R^2$  die het verklarend vermogen van deze correlatie weergeeft is echter zwak (waterpasserende verharding: 0,21; waterdoorlatende verharding: 0,07). Dit duidt erop dat behalve leeftijd ook andere factoren een significante invloed hebben op de infiltratiesnelheid van een specifieke testlocatie, bijvoorbeeld diverse omgevingsfactoren en beheer en onderhoud (paragraaf 3.2 en 3.3).



Figuur 6: Gemeten infiltratiesnelheid onder onverzadigde en niet-gereinigde condities afgezet tegen de leeftijd van het systeem (N=49). Enkele outliers zijn ter visualisatie niet weergegeven maar wel gebruikt in de analyse.

Bij 24 van de 49 infiltratieproeven die zijn uitgevoerd onder niet-gereinigde condities zijn de infiltratiesnelheden ook gemeten onder verzadigde condities om het potentiële effect van bui-op-bui te simuleren, de gemeten infiltratiesnelheden variëren hierbij van 36 mm/uur tot 1974 mm/uur. De gemiddelde terugloop in infiltratiesnelheid als gevolg van verzadiging is 32%. Figuur 7 laat de terugloop in infiltratiesnelheid als gevolg van verzadiging zien afgezet tegen de leeftijd van de constructie. We vinden hier niet tot nauwelijks een verband tussen de ouderdom van de constructie en de terugloop in infiltratiesnelheid als gevolg van verzadiging. Hier geldt bovendien voor het gevonden verband een zeer kleine  $R^2$  (0,0014).



Figuur 7: Terugloop van de gemeten infiltratiesnelheid als gevolg van verzadiging afgezet tegen de leeftijd van het systeem voor verzadigde condities (N=24).

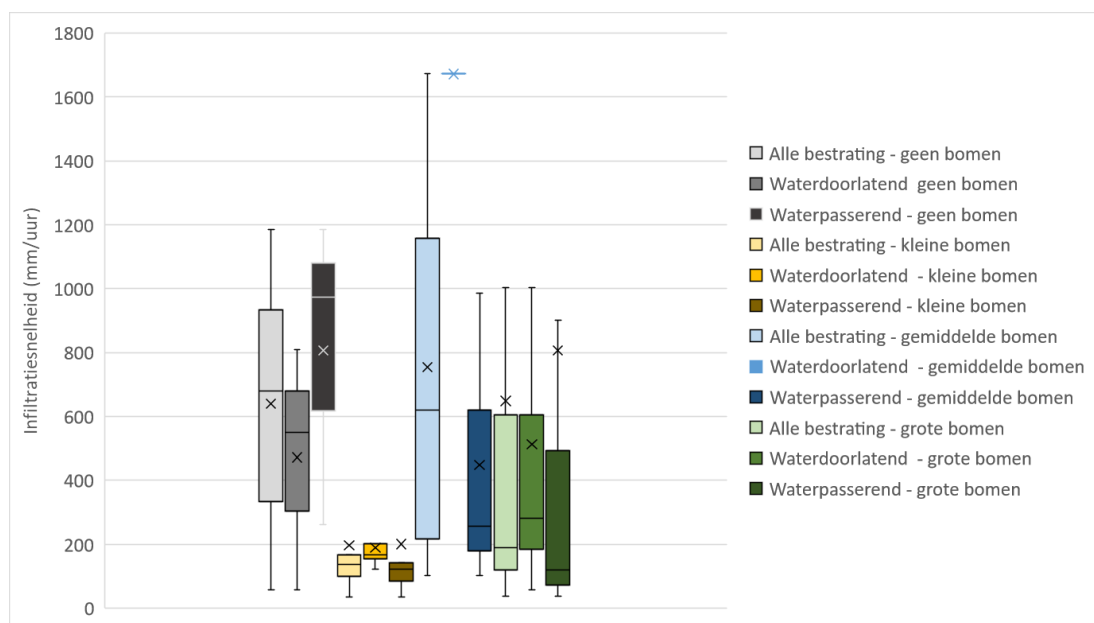
### 3.2 Invloed van omgevingsfactoren op gemeten infiltratiesnelheid

Om beter te begrijpen wat de invloed is van verschillende omgevingsfactoren op de gemeten infiltratiesnelheid en de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd hebben we een aanvullende analyse uitgevoerd waarin we bekijken wat de gemiddelde infiltratiesnelheid is voor verschillende clusters van infiltratieproeven met dezelfde omgevingsfactoren. Ook hebben we bestudeerd of het uitsplitsen van deze groepen per omgevingsfactor leidt tot een verbetering in het verklarend vermogen van de lineaire regressieanalyse die de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd beschrijft. Dit hebben we gedaan voor alle typen bestratingen en voor waterpasserende en waterdoorlatende verharding afzonderlijk. Tabel B-1 in Bijlage B vat de belangrijkste resultaten samen.

De eerste omgevingsfactor bestudeerd is de aanwezigheid van bomen (figuur 8). Op basis van de box-plots in figuur 8 en gemiddelde infiltratiesnelheden per omgevingsfactor uit tabel B-1 kunnen we enkele verschillen ontwaren. De afwezigheid van bomen in de directe nabijheid van de proeflocatie gaat samen met een relatief hoge (gemiddelde) gemeten infiltratiesnelheid. Deze gemeten infiltratiesnelheid is een stuk lager in het geval van de aanwezigheid van kleine bomen. Het effect van de aanwezigheid van (middel-)grote bomen bij de proeflocatie is diffuser. Met een grotere spreiding aan gemeten infiltratiesnelheden komen deze locaties relatief hoog uit wat betreft gemiddeld gemeten infiltratiesnelheid. Dit valt mogelijk te verklaren door het feit dat, met name grote bomen, vaak op een grotere afstand van de testlocatie staan, dan kleine bomen. De grotere bladeren van grote bomen zorgen naar verwachting bovendien minder makkelijk voor verstopping van het systeem. Geen duidelijk

onderscheid kan er worden gemaakt tussen de verschillende typen verharding en het effect van de aanwezigheid van bomen op de infiltratiesnelheid van deze verharding.

De resultaten in tabel B-1 laten zien dat de aanwezigheid van bomen een versterkend effect heeft op de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd. Als we een onderscheid maken tussen de afwezigheid van bomen, en de aanwezigheid van kleine tot (middel-)grote bomen dan valt een toenemende terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd op te merken. Van  $-39$  mm/uur per jaar in het geval van afwezigheid van bomen tot  $-87$  mm/uur per jaar in het geval van de aanwezigheid van grote bomen. Ook de  $R^2$  die het verklarend vermogen van de lineaire regressielijn beschrijft stijgt wanneer een onderscheid wordt gemaakt tussen de af- en aanwezigheid van kleine en (middel-)grote bomen, van  $0,0014$  (zonder onderscheid) tot  $0,40$  (met onderscheid). Een uitzondering hierop vormt de categorie 'Kleine bomen'. Voor deze categorie vinden we geen significante trend als het gaat om de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd ( $R^2 = 0,07$ ). Een mogelijke verklaring is dat de gemiddelde infiltratiesnelheden voor locaties met kleine bomen al erg laag liggen. Soortgelijke resultaten zijn te vinden wanneer hierop aanvullend een onderscheid wordt gemaakt in het type verharding (tabel B-1).

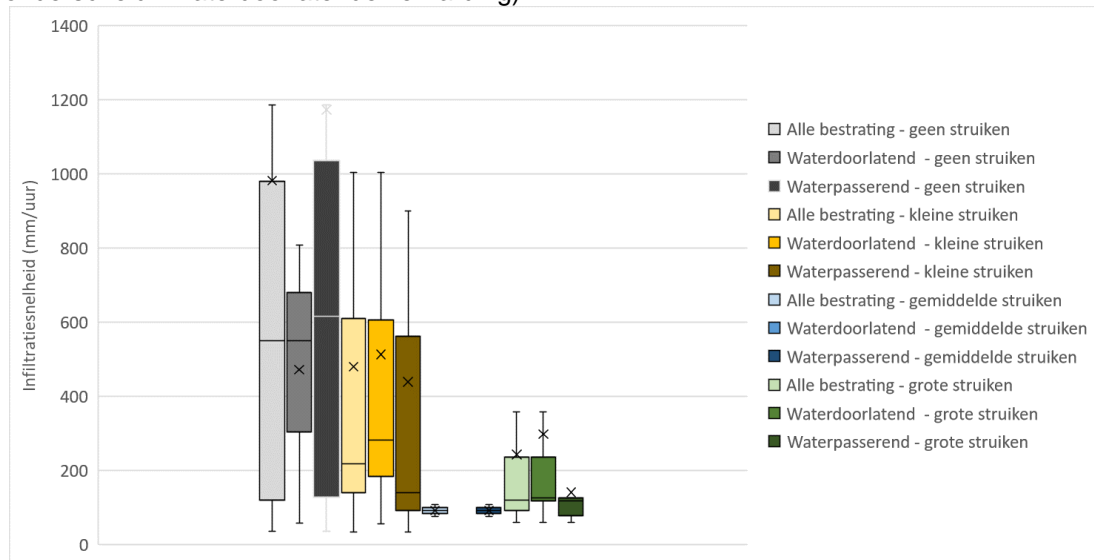


Figuur 8: Gemeten infiltratiesnelheid uitgesplitst naar omgevingsfactor 'Bomen' en type verharding (N=49). De boxplots tonen per categorie de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers zijn ter visualisatie verwijderd bij het opstellen van de boxplots.

De tweede omgevingsfactor bestudeerd is de aanwezigheid van struiken (figuur 9). Op basis van de boxplots in figuur 9 en gemiddelde infiltratiesnelheden per omgevingsfactor uit tabel B-1 kunnen we de volgende observaties maken. De afwezigheid van struiken in de directe nabijheid van de proeflocatie gaat samen met een relatief hoge (gemiddelde) gemeten infiltratiesnelheid. Deze gemeten infiltratiesnelheid daalt in het geval van de aanwezigheid van weinig tot veel struiken. Geen duidelijk onderscheid kan er worden gemaakt tussen de verschillende typen verharding en het effect van de aanwezigheid van struiken op de infiltratiesnelheid van deze verharding.

De resultaten in tabel B-1 laten een diffuus effect zien van de aanwezigheid van struiken op de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd. Alleen in het geval van waterpasserende verharding zien we een sterkere terugloop in infiltratiesnelheid door de tijd als gevolg van aanwezigheid van struiken. Een

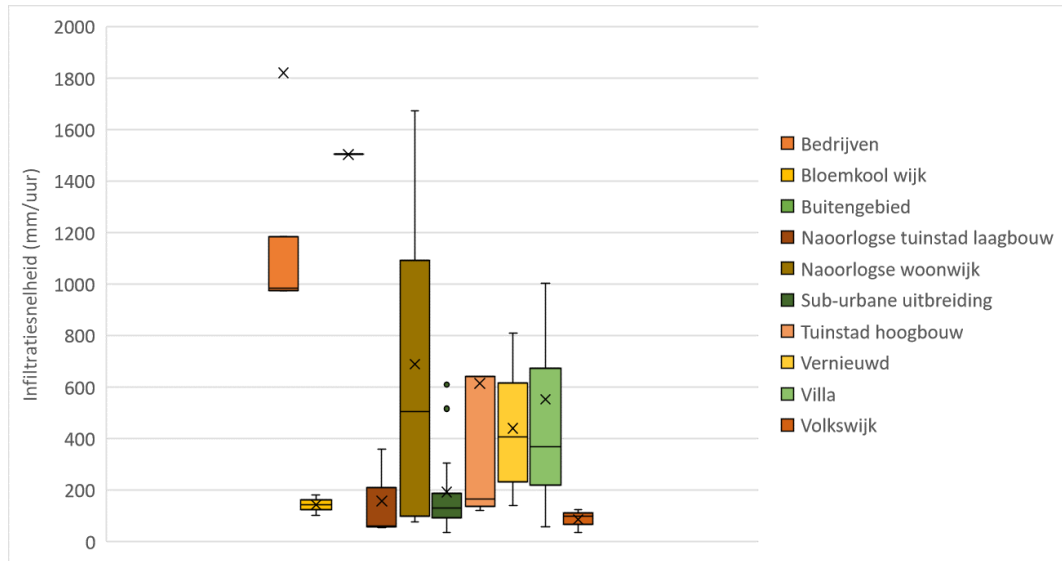
toename in aanwezigheid van struiken leidt hier echter tot het kleiner worden van de terugloop in infiltratiesnelheid door de tijd. Bij waterdoorlatende verharding zien we een omgekeerd effect. Een toename in aanwezigheid van struiken leidt in dit geval tot een versterking van de terugloop in infiltratiesnelheid door de tijd. Ook voor de omgevingsfactor struiken geldt dat het maken van een onderscheid specifiek op basis van deze omgevingsfactor in het bestuderen van de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd de  $R^2$  sterk positief beïnvloedt, van 0,0014 (zonder onderscheid) tot 0,89 (met onderscheid - waterdoorlatende verharding).



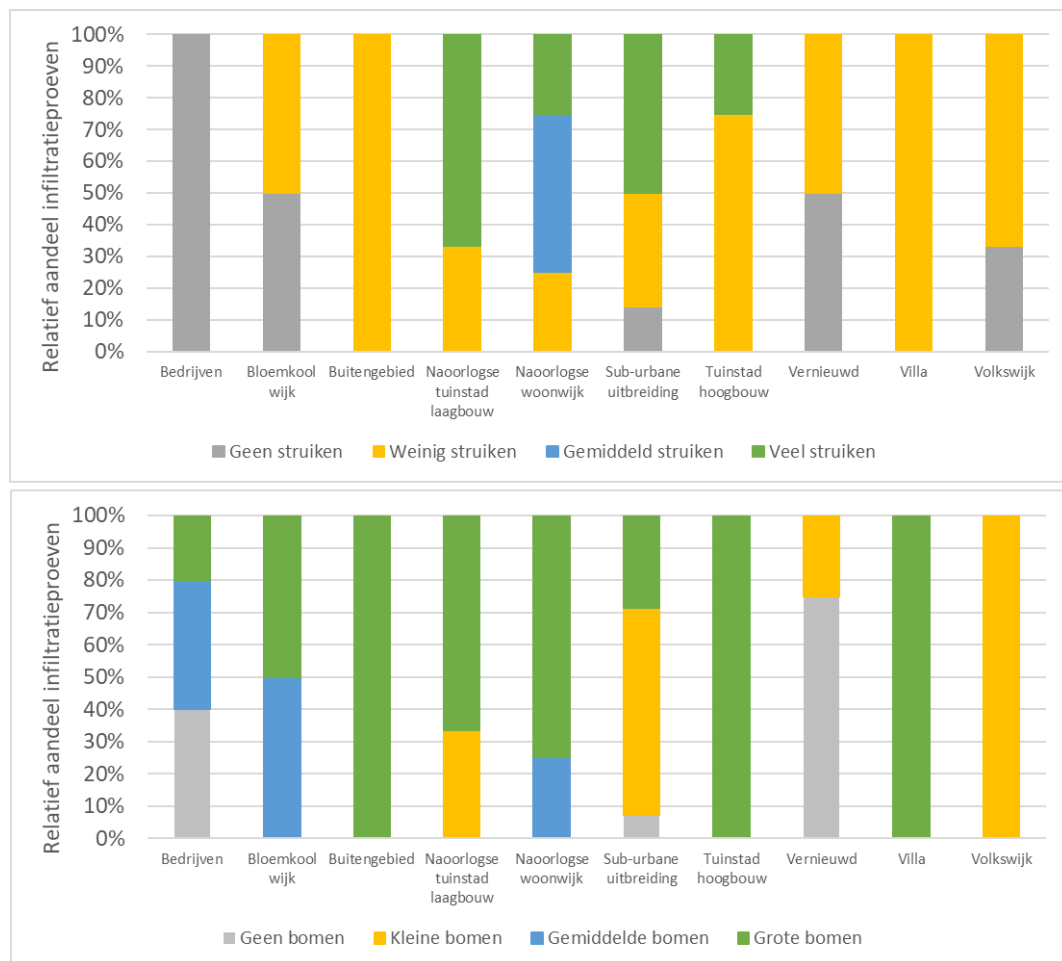
Figuur 9: Gemeten infiltratiesnelheid uitgesplitst naar omgevingsfactor 'Struiken' en type verharding (N=49). De boxplots tonen per categorie de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers zijn ter visualisatie verwijderd bij het opstellen van de boxplots.

Wanneer we de gemeten infiltratiesnelheden uitsplitsen op basis van wijktypologie zien we dat met name het 'bedrijventerrein', de 'naoorlogse woonwijk', en de 'tuinstad hoogbouw' relatief hoge infiltratiesnelheden behalen (figuur 10). Voor overige wijktypologieën zijn gemiddeld lagere infiltratiesnelheden gemeten. Verschil in de gemeten infiltratiesnelheden kan voor een deel verklaard worden aan de hand van de typologieën en de aanwezigheid van groen in de verschillende typen wijken (figuur 11). De proeflocaties gelegen op een bedrijventerrein of in vernieuwd terrein hadden bijvoorbeeld relatief weinig bomen in de nabije omgeving en geen tot weinig struiken.

De uitsplitsing naar wijktype resulteert in relatief weinig metingen per categorie. Een robuuste analyse naar de invloed van wijktype op de terugloop van gemeten infiltratiesnelheden door de tijd is hierdoor in veel gevallen niet mogelijk (tabel B-1).

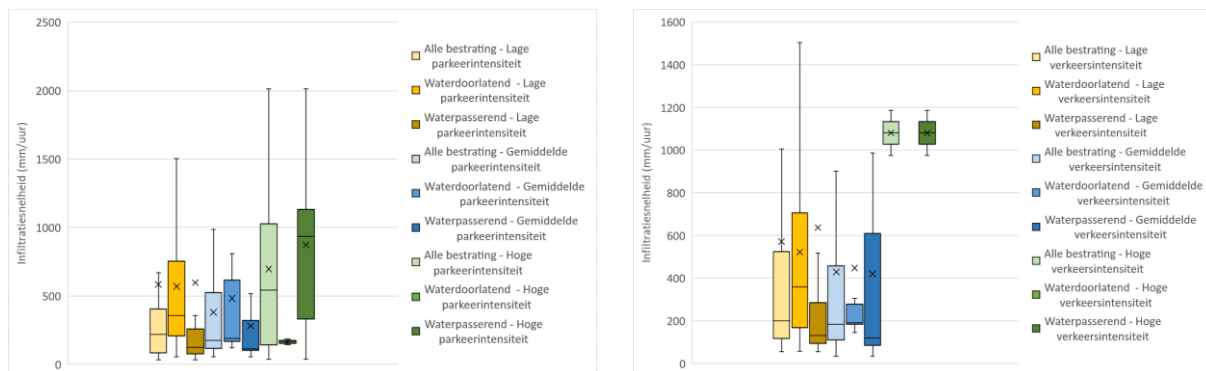


Figuur 10: Gemeten infiltratiesnelheid per wijktypologie (N=49). De boxplots tonen per categorie de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers zijn ter visualisatie niet weergegeven bij het opstellen van de boxplots, maar zitten wel in de analyse (N=67).



Figuur 11: Relatief aandeel struiken (Boven) en bomen (Onder) per wijktypologie in de infiltratieproeven (N=49).

Waar de omgevingsfactor parkeerintensiteit geen eenduidig effect laat zien op de gemeten infiltratiesnelheid, doet de omgevingsfactor verkeersintensiteit dit wel (figuur 12, tabel B-1). Met name locaties met een 'hoge' verkeersintensiteit laten namelijk een relatief hoge gemeten infiltratiesnelheid zien. De terugloop van de gemeten infiltratiesnelheid door de tijd neemt bovendien af met een toenemende verkeersintensiteit. Een verklaring hiervoor is dat vervuiling in straten met een hogere verkeersintensiteit relatief minder 'voet aan de grond' krijgt wat de kans op verstopping van een infiltrerend systeem verkleint.



Figuur 12: Gemeten infiltratiesnelheid uitgesplitst naar omgevingsfactor 'Parkeer-' (Links) en 'Verkeersintensiteit' (Rechts)(N=49). De boxplots tonen per categorie de gemiddelde (X) en mediaan waarden (horizontale zwarte streep in de box); het gebied tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel (box); en de minima en maxima (wiskers). Enkele outliers zijn ter visualisatie niet weergegeven bij het opstellen van de boxplots, maar zitten wel in de analyse.

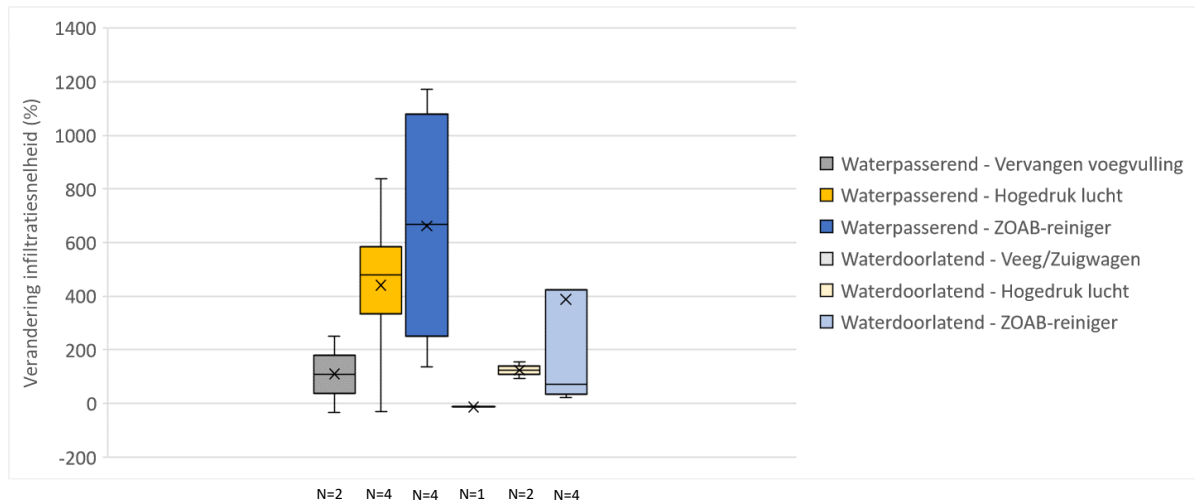
### 3.3 Invloed van beheer- en onderhoud op gemeten infiltratiesnelheid

Achttien proeven zijn er in totaal uitgevoerd om de effecten van diverse beheer- en onderhoud methoden te testen op de infiltratiesnelheid van waterdoorlatende en waterpasserende systemen. Van één proef is niet bekend welke reinigingsmethode is toegepast op locatie, de resultaten van deze proef zijn daarom niet meegenomen in deze analyse.

Reiniging van infiltrerende systemen leidt over het algemeen tot een toename van de infiltratiesnelheid (figuur 13). Gemiddeld wordt de infiltratiesnelheid door reiniging met 380% verhoogd (gemiddeld +460% voor waterpasserende verharding, gemiddeld +260% voor waterdoorlatende verharding). Verandering van de infiltratiesnelheid na reiniging varieert van -15% (veeg/zuigwagens - waterdoorlatend systeem) tot +1390% (ZOAB-reiniger 100 bar – waterdoorlatend systeem). Het vervangen van de voegvulling van waterpasserende verharding heeft een wisselend effect. Op de proeflocatie Almere is getest wat het effect is van het vervangen van de voegvulling van waterpasserende verharding met basalt en brekerzand. Waar vervangen van de voegvulling met basalt resulteert in een toename van de infiltratiesnelheid met 250%, leidde vervanging van de voegvulling met brekerzand tot een lichte afname in de infiltratiesnelheid (-35%). Het toepassen van een hogedruk lucht reiniger lijkt op basis van de resultaten uit figuur 13 het meest effectief voor waterpasserende verharding. Deze reiniging, resulteert mits goed uitgevoerd, bij waterpasserende verharding in een toename van de infiltratiesnelheid van -30% tot +840%. Het negatieve resultaat betreft een proef waarin de hogedruk luchtreiniger onder natte condities is gebruikt. Gebruik van een hogedruk luchtreiniger leidt bij toepassing op waterdoorlatende verharding tot een toename van de infiltratiesnelheid van 95-155%.

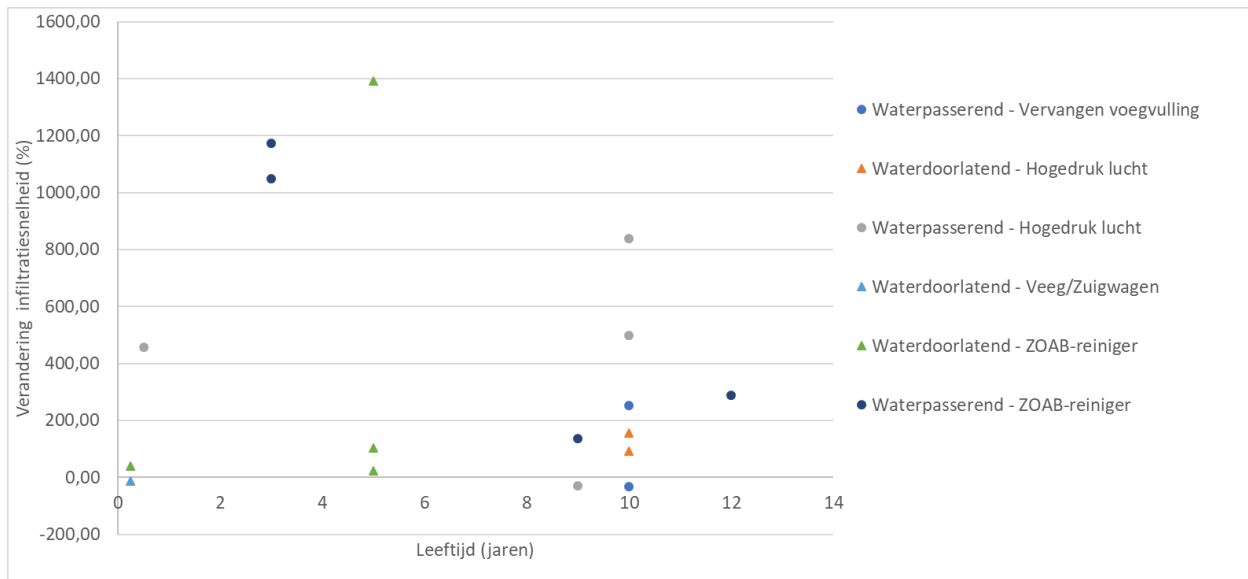
Figuur 13 laat zien dat het gebruik van een ZOAB-reiniger effectief is voor het vergroten van de infiltratiesnelheid van zowel waterpasserende als waterdoorlatende verhardingen. Gebruik van een ZOAB-reiniger op waterdoorlatende verharding resulteert in een toename van de infiltratiesnelheid met

390%. Toepassing van een ZOAB-reiniger op waterpasserende verharding leidt tot een toename van de infiltratiesnelheid met 660%. In de gemeenten Bergen en Grubbenvorst is getest wat het effect is van het gebruik van een ZOAB-reiniger met variërende druk (bar) op respectievelijk waterpasserende en waterdoorlatende verharding. In beide gevallen leidt een hogere druk tot een grotere toename in infiltratiesnelheid. In de gemeente Bergen werd een toename in infiltratiesnelheid van +1050% gevonden na gebruik van een ZOAB-reiniger onder 50-60 bar, tegenover een toename van +1170% na gebruik van een ZOAB-reiniger onder 125 bar. In Grubbenvorst resulteerde gebruik van een ZOAB-reiniger onder 80-90 bar in een toename van de infiltratiesnelheid van 40%, het toepassen van een ZOAB-reiniger onder 100 bar leidde daar tot een toename van de infiltratiesnelheid van 105-1390%.



Figuur 13: Invloed van beheer- en onderhoud op de verandering in gemeten infiltratiesnelheid (N=17).

Figuur 14 laat de procentuele toename in infiltratiesnelheid na reiniging zien uiteengezet tegen de leeftijd van het gereinigde systeem. Op basis van de algemene resultaten in de figuur is niet direct een verband waar te nemen tussen de leeftijd en bereikte toename in infiltratiesnelheid na reiniging. Wanneer we deze verbanden voor de individuele systemen en reinigingsmethoden bestuderen vinden we voor het gebruik van een ZOAB-reiniger op waterpasserende systemen een negatief verband met de leeftijd van het systeem ( $R^2 = 0,84$ ) (tabel 4). Dit betekent dat hoe ouder het systeem is, hoe minder effectief de ZOAB-reiniger de infiltratiesnelheid kan verhogen tot oorspronkelijke condities. Voor gebruik van de ZOAB-reiniger op een waterdoorlatend systeem vinden we een positief verband (weliswaar met lage  $R^2 = 0,12$ ). Een verklaring voor deze observaties kan zijn dat waterpasserende verharding het met name moet hebben van het reinigen van de voegen. Hoe ouder het systeem en hoe vervuiler de voeg, hoe moeilijker het is met een ZOAB-reiniger om deze vervuiling te verwijderen. Een hogedruk luchtreiniger speciaal voor de voegen kan dan uitkomst bieden. Het gebruik van een hogedruk luchtreiniger op een waterpasserend systeem toont geen verband ( $R^2 = 0,004$ ). Waterdoorlatende verharding, daarentegen, laat water door via de verharding zelf. Vervuiling boven op de verharding die de infiltratiesnelheid belemmert kan effectief schoongemaakt worden met behulp van een ZOAB-reiniger. Hoe ouder het systeem en hoe groter de vervuiling, hoe groter de te bereiken toename in infiltratiesnelheid na reiniging.



Figuur 14: Invloed van beheer- en onderhoud op de verandering in gemeten infiltratiesnelheid afgezet tegen leeftijd van het systeem.

Tabel 4: Relatie tussen de verandering in gemeten infiltratiesnelheid door reiniging en leeftijd van het systeem.

|                        | Waterpasserend systeem | Waterdoorlatend systeem |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Vervangen voegvulling  | -                      | -                       |
| Hogedruk luchtreiniger | +5% ( $R^2 = 0,004$ )  | -                       |
| ZOAB-reiniger          | -107% ( $R^2 = 0,84$ ) | +98% ( $R^2 = 0,12$ )   |



## 4. Discussie

### 4.1 Belangrijkste resultaten in het licht van eerder uitgevoerd onderzoek

In 67 praktijkproeven zijn de infiltratiesnelheden van waterpasserende en waterdoorlatende systemen in de praktijk onderzocht. Deze zijn gebruikt om de invloed van diverse omgevingsfactoren op (de jaarlijkse terugloop van) deze infiltratiesnelheden, en de effectiviteit van verschillende typen beheer- en onderhoud ter verbetering van de infiltratiesnelheid te onderzoeken. De resultaten uit deze rapportage geven een eerste indicatie van het functioneren van infiltrerende verharding in de praktijk. Aanvullende gegevens zijn echter noodzakelijk om deze resultaten verder te verifiëren.

Op de 67 locaties waar praktijkproeven zijn uitgevoerd ligt de gemeten infiltratiesnelheid met een gemiddelde van 540 mm/uur ruim boven de Nederlandse en internationale streef-/referentiewaarden van 60 en 194 mm/uur (Boogaard et al., 2014, Boogaard & Lucke, 2019). Bij 65 infiltratieproeven is een infiltratiesnelheid gemeten van ten minste 60 mm/uur. Bij 43 infiltratieproeven was de gemeten infiltratiesnelheid hoger dan 194 mm/uur. De variatie in gemeten infiltratiesnelheid is echter groot, van 35 mm/uur tot 5707 mm/uur onder onverzadigde en niet-gereinigde condities. De gemeten infiltratiesnelheid tussen waterpasserende en waterdoorlatende verharding verschillen nauwelijks van elkaar. Overige systeemeigenschappen, zoals type wegprofiel, hebben een grotere invloed op de gemeten verschillen in infiltratiesnelheid. Resultaten van metingen uitgevoerd aan zowel waterdoorlatende als waterpasserende verhardingen laten zien dat de infiltratiesnelheid terugloopt met de tijd, gemiddeld met 74 mm/uur per jaar. Voor zowel waterdoorlatende als waterpasserende verharding geldt: hoe ouder het systeem, hoe lager de infiltratiesnelheid. Waterpasserende verharding lijkt daarbij gevoeliger te zijn voor de terugloop in infiltratiesnelheid door de tijd. De infiltratiesnelheid loopt voor waterpasserende verharding terug met 85 mm/uur per jaar, voor waterdoorlatende verharding is dit 58 mm/uur per jaar. De  $R^2$  behorend bij deze trends is echter klein. Dit impliceert dat leeftijd slechts één verklarende variabele is voor de gemeten terugloop in infiltratiesnelheid. Ook andere factoren spelen een rol.

Eerdere studies uitgevoerd naar de infiltratiesnelheid van waterpasserende en/of waterdoorlatende verharding in binnen- en buitenland presenteren soortgelijke resultaten (Borgwardt, 2006; Boogaard et al., 2014; Boogaard et al., 2019; Lucke et al. 2013; Winston et al., 2016), zowel wat betreft gemeten infiltratiesnelheid als wat betreft de terugloop van infiltratiesnelheid in verhouding tot de leeftijd van het systeem. Boogaard et al. (2014) en Boogaard et al. (2019) presenteren infiltratiesnelheden die variëren van 21 mm/uur tot 503 mm/uur, met een gemiddelde van 150 mm/uur. De gemiddeld gemeten infiltratiesnelheid in deze studie ligt met een gemiddelde van aanzienlijk 540 mm/uur hoger. Dit verschil wordt voornamelijk veroorzaakt doordat in het huidige onderzoek circa 30 proeven met innovatieve vormen van waterdoorlatende en/of waterpasserende verharding met een hoge tot zeer hoge infiltratiesnelheid (gemiddelde infiltratiesnelheid innovaties: 740 mm/uur) zitten. Zonder deze innovaties is de variatie van 36 tot 809 mm/uur en het gemiddelde van 220 mm/uur, wat meer in lijn is met de observaties gedaan door Boogaard et al. (2014, 2019). De innovaties zijn dus een duidelijke verbetering.

Op basis van een exponentiele vervalfunctie concluderen Borgwardt (2006), Lucke et al. (2013) en Winston et al. (2016) dat leeftijd van het systeem negatief gekoppeld is aan de gemeten infiltratiesnelheid. Borgwardt (2006) komt daarbij tot een verval van 10-25% van de infiltratiesnelheid over een periode van 12 jaar, een conclusie die wordt ondersteund door Lucke et al. (2013) en Winston et al. (2016). Op basis van een lineaire fit presenteren onze resultaten een relatief sterker verval door de tijd (74 mm/jaar, i.e.

~8-10% per jaar). Ook bij toepassing van een exponentiele vervalfunctie tonen de uitkomsten van onze studie met ~80% een hoger verval over een periode van 12 jaar. Verschillende factoren kunnen een uitleg vormen voor het geobserveerde verschil in verval. Waar Borgwart (2006) en Lucke et al. (2013) bijvoorbeeld geen onderscheid maken tussen locaties die zijn gereinigd of niet, nemen we in onze studie voor deze analyse alleen niet-gereinigde locaties mee. Ook variaties in de systeemkenmerken en omgevingsfactoren van de verschillende locaties beproefd kunnen hierin mogelijk een rol spelen. Tot slot is van belang dat de nu gebruikte dataset groter is dan de eerder gepresenteerde studies.

De 24 verzadigingsproeven die op verschillende locaties zijn uitgevoerd laten zien dat verzadiging van het systeem gemiddeld leidt tot een terugloop in de infiltratiesnelheid van 32%. Een licht negatief verband tussen leeftijd en terugloop in infiltratiesnelheid als gevolg van verzadiging laat bovendien zien dat dit effect iets sterker is bij systemen met een oudere leeftijd. Ook hier geldt echter dat de  $R^2$  behorend bij dit verband laag is: ook andere factoren spelen hierin een rol. De resultaten uit deze studie komen overeen met de bevindingen eerder gepresenteerd door Boogaard et al. (2019). Op basis van de uitkomsten van infiltratieproeven uitgevoerd op 16 locaties in Nederland berekenden Boogaard et al. (2019) dat verzadiging leidt tot een terugloop in de infiltratiesnelheid van 23% tot 65%.

Van diverse omgevingsfactoren is onderzocht welke invloed zij uitoefenen op de gemeten infiltratiesnelheid en de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd, te weten: aanwezigheid van bomen en struiken, wijktypologie, en verkeers- en parkeerintensiteit. Resultaten van deze analyse laten zien dat met name de aanwezigheid van struiken (en in mindere mate ook de aanwezigheid van bomen) een invloed heeft op de gemeten infiltratiesnelheid en terugloop van deze infiltratiesnelheid door de tijd. Waar de omgevingsfactor parkeerintensiteit geen eenduidig effect sorteert op de gemeten infiltratiesnelheid, doet de omgevingsfactor verkeersintensiteit dit wel. Met name locaties met een 'hoge' verkeersintensiteit laten een relatief hoge gemeten infiltratiesnelheid zien. De terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd neemt bovendien af met een toenemende verkeersintensiteit. Een verklaring voor deze observatie is dat vervuiling in straten met een hogere verkeersintensiteit relatief minder 'voet aan de grond' krijgt. Hierdoor verkleint de kans op verstopping van het waterdoorlatende of waterpasserende systeem. Ook kan het zijn dat deze locaties relatief vaker worden onderhouden. Bovengenoemde observaties op omgevingsfactoren hangen samen met het gemeten effect van verschillende wijktypes op de gemeten infiltratiesnelheid. Gemiddeld genomen zijn hogere infiltratiesnelheden gemeten in wijktypes met relatief weinig bomen en struiken en een relatief hoge verkeersintensiteit, zoals bedrijventerrein, naoorlogse woonwijken en tuinstad hoogbouw. Alhoewel verschillende studies (Boogaard et al., 2014, 2019; Lucke et al., 2013) de mogelijke invloed van systeemkenmerken en omgevingsfactoren, zoals de aanwezigheid van bomen en mate van intensiteit van gebruik van het weggoppervlak, op de infiltratiesnelheid en de terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd bespreken is dit niet eerder op kwantitatieve wijze vastgesteld zoals gedaan in dit project.

Borgwardt et al. (2006) heeft aangetoond op basis van testen dat er slechts een gelimiteerd verband bestaat tussen de infiltratiesnelheid en de voegbreedte. Borgwardt et al. (2006) concluderen in aanvulling daarop dat voegmateriaal een belangrijkere indicator is voor de infiltratiesnelheid. Ook op basis van de resultaten van onze studie concluderen we dat voegbreedte (<4 mm/>4 mm) maar een kleine invloed heeft op de gemeten infiltratiesnelheid. Te weinig gegevens waren beschikbaar over het type voegmateriaal om daar als onderdeel van deze studie uitspraken over te doen.

Middels 17 proeven is de invloed van diverse beheer- en onderhoudstechnieken (vervangen voegvulling, ZOAB-reiniger, veeg/zuigwagens, hogedruk lucht) op het verbeteren van de infiltratiesnelheid van

waterdoorlatende en waterpasserende verharding onderzocht. Reiniging van infiltrerende verharding verhoogt de infiltratiesnelheid gemiddeld met 380%. De resultaten laten zien dat gebruik van een ZOAB-reiniger effectief is voor het vergroten van de infiltratiesnelheid van zowel waterpasserende als waterdoorlatende verharding. Hierbij geldt, hoe hoger de druk die wordt toegepast bij reiniging, hoe beter het resultaat. Het gebruik van een hogedruk lucht reiniger vertoont met name positieve effecten wanneer deze wordt toegepast op waterpasserende verharding. Tenslotte is de relatie tussen de te bereiken verbetering in infiltratiesnelheid als gevolg van reiniging en leeftijd van het systeem bestudeerd. Resultaten van deze analyse laten allereerst een negatief verband zien tussen de leeftijd van een waterpasserend systeem en de effectiviteit van een ZOAB-reiniger. De infiltratiesnelheid van een waterpasserend systeem verbetert met name als de voegen goed kunnen worden schoongemaakt. Een ZOAB-reiniger lijkt hier, met name bij oudere systemen, minder geschikt voor. Gebruik van Hogedruk lucht vertoont daarentegen een positief effect als het gaat om de te behalen procentuele verbetering in infiltratiesnelheid afgezet tegen te leeftijd. Dit kan verklaard worden door het feit dat deze methode er speciaal op is gericht om de voegen te reinigen. Iets wat met name bij flinke vervuiling in oudere systemen een sterke verbetering oplevert. Voor waterdoorlatende systemen, tenslotte, geldt dat de inzet van een ZOAB-reiniger bij systemen van een hogere leeftijd wel effectiever wordt in het verbeteren van de infiltratiesnelheid. Waterdoorlatende systemen moeten het water doorlaten vanaf de systeemzijde aan het straatoppervlak. Een ZOAB-reiniger is goed in staat dit oppervlak te reinigen. Bij oudere systemen met een hogere vervuilinglast is daarbij de te behalen procentuele verbetering in infiltratiesnelheid groter dan bij relatief jonge systemen.

In een gelijkwaardige studie, hebben Winston et al. (2016) op basis van metingen op 10 verschillende locaties in de V.S. en Zweden (met waterdoorlatende en waterpasserende verharding) bestudeerd wat het effect is van verschillende onderhoudstechnieken op de infiltratiesnelheid van systemen met een variabele leeftijd. Bestudeerde technieken in die studie zijn: straatvegen, hogedruk lucht, hogedruk water en frezen. De resultaten onderstrepen het belang van grondige reiniging voor het verhogen van de infiltratiesnelheid. Alhoewel de verschillende reinigingstechnieken niet 100% effectief zijn laten zij over het algemeen een toename zien van de infiltratiesnelheid. Alleen straatvegen leidt in een aantal gevallen niet tot een toename in infiltratiesnelheid. Winston et al. (2016) laten zien dat voor waterdoorlatende verharding met name hogedruk lucht, hogedruk water en frezen een (in toenemende mate) positief effect hebben op de infiltratiesnelheid. Het verwijderen van de bovenste 2 cm vervuiling uit de voegen van waterpasserende verharding leidde volgens Winston et al. (2016) niet tot een significante verbetering van de infiltratiesnelheid. Winston et al. (2016) wijzen dit resultaat voornamelijk toe aan een verkeerde keuze in voegmateriaal op deze locaties. Deze observaties onderstrepen niet alleen het belang van het maken van de juiste keuze als het gaat om beheer- en onderhoud van waterpasserende en/of waterdoorlatende verharding. Het benadrukt ook nogmaals het belang van een juist ontwerp en keuzes in aanleg voor het succes van infiltrerende verharding in de praktijk.

## 4.2 Onderzoeksbependingen en aanbevelingen

Bij het interpreteren van de resultaten van dit onderzoek moet rekening gehouden worden met een aantal aannames, keuzes, en beperkingen in het uitgevoerde onderzoek. In de opzet en uitvoering van de infiltratieproeven op locatie is gestreefd naar een zo consistent mogelijke opzet en aanpak wat betreft het opbouwen van de testvakken, uitvoeren van de metingen, en analyse van de resultaten.

Het aantal van 67 infiltratieproeven is een relatief klein sample, zeker wanneer een uitsplitsing wordt gemaakt over diverse omgevingsfactoren of beheer- en onderhoudsstrategieën. In sommige gevallen blijven er dan slechts enkele metingen over per uitgesplitste categorie waarop gemiddelden en statistiek

kan worden gebaseerd. Het aanvullen van de dataset met extra proeven, met name met omgevingsfactoren die nu relatief onder gemiddeld voorkomen in de dataset, is nodig om de robuustheid van de gepresenteerde resultaten te verbeteren.

Bij het uitvoeren van de analyses op infiltratiesnelheid, het effect van omgevingsfactoren en beheer- en onderhoud op deze infiltratiesnelheid en de terugloop van de infiltratiesnelheid door de tijd zijn alle infiltratieproeven tezamen gebruikt als het gaat om de absoluut gemeten infiltratiesnelheid op locatie. Bij het interpreteren van de resultaten moet rekening gehouden worden met het feit dat verschillende locaties op een verschillende wijze zijn gedimensioneerd. Het vergelijken van absolute waarden van locatie tot locatie is daardoor niet zinvol. Wel kan het vergelijken van de groepsgemiddelden een inzicht geven in de rol die omgevingsfactoren of beheer- en onderhoud speelt in de hoogte van de infiltratiesnelheid. Ook hier moet in het achterhoofd worden gehouden dat dimensionering van de infiltratiesnelheid verschilt van locatie tot locatie. Het aanvullen van de dataset met informatie over de gedimensioneerde infiltratiesnelheid bij ontwerp/aanleg van de locatie, en het uitdrukken van de terugloop in infiltratiesnelheid als percentage van het origineel ontwerp afgezet tegen de tijd zou een eerste stap zijn om de gemeten infiltratiesnelheden en terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd per locatie op een objectievere wijze met elkaar te kunnen vergelijken en de invloed van diverse omgevingsfactoren en beheer- en onderhoud hierop te kunnen beoordelen. Gemeenten hebben deze informatie echter lang niet altijd op een consistente wijze gearhiveerd en direct beschikbaar.

Het onderzoek naar de infiltratiesnelheid is uitgevoerd met behulp van een full-scale infiltratietest, met gebruikmaking van een test-oppervlak ongeveer 4 m<sup>2</sup>. Wetenschappelijk onderzoek laat zien dat proeven middels een full-scale test robuustere resultaten opleveren dan proeven die gebruik maken van een dubbele ring-infiltrometer (Boogaard et al., 2014). Een groter deel van het straatoppervlak wordt immers getest waardoor de het risico op uitkomsten die niet representatief zijn voor de werkelijkheid worden verkleind. Er bestaat echter, ook met een test-oppervlak van 4 m<sup>2</sup>, nog steeds een kans op testresultaten die afwijken van de werkelijke situatie. Indien een volledige simulatie van de werkelijkheid is gewenst wordt daarom aangeraden in dat geval een full-scale test uit te voeren waarbij het volledige straatoppervlak in de proef wordt meegenomen.

Op verschillende locaties zijn soms meerdere infiltratieproeven uitgevoerd onder wisselende weersomstandigheden. Niet alleen de weersomstandigheden op het moment van de proeven zelf, maar ook de weersomstandigheden voorafgaand aan de proeven hebben invloed op de testresultaten, e.g. door verzadiging van de bodem. Alhoewel het meetprotocol voorschrijft dat proeven worden uitgevoerd op een droge dag, voorafgegaan aan enkele droge dagen, is hier in de praktijk niet altijd rekening mee gehouden. Voor deze variërende weersomstandigheden is geen correctie uitgevoerd in de berekening en analyse van de testresultaten. Wel is er gecorrigeerd voor variaties in atmosferische druk bij het uitlezen en omrekenen van de diver-data.

De drie divers die gebruikt zijn in het onderzoek zijn niet voor elke locatie individueel gekalibreerd. Dit kan in sommige gevallen resulteren in negatieve gemeten waterhoogtes. Voor het berekenen van de infiltratiesnelheid wordt echter geen gebruik gemaakt van deze absolute waarden waterhoogtes maar van de afname in waterhoogte door de tijd heen. Het ontbreken van een kalibratie-proces per meetlocatie voor de divers heeft hierdoor geen invloed op de berekende infiltratiesnelheid. In lijn met eerder gepubliceerd onderzoek wordt de infiltratiesnelheid in mm/minuut en mm/uur berekend door een lineaire trendlijn te fitten en de richtingscoëfficiënt van deze trendlijn te bepalen voor de individuele infiltratiecurves. Ter controle is voor alle opgestelde trendlijnen de  $R^2$  (goodness-of-fit) bepaald. Over het

algemeen is deze  $R^2$  goed met een gemiddelde van 0,94 en overeenkomstig met eerder uitgevoerde studies (Boogaard et al., 2014; Boogaard et al., 2019; Lucke et al. 2013). Een keuze voor een ander type trendlijn kan echter potentieel leiden tot een nog verdere verbetering van de  $R^2$  en tot andere resultaten met betrekking tot de gemeten infiltratiesnelheid. Verder onderzoek is hiervoor noodzakelijk.

In dit onderzoek is gekeken naar de infiltratiesnelheid van waterdoorlatende en waterpasserende verharding, en de effecten van diverse omgevingsfactoren en onderhoud en beheer op deze infiltratiesnelheid. Het functioneren van een infiltratievoorziening in de praktijk wordt echter bepaald door de gehele constructie (inclusief bergingscapaciteit van de funderingsconstructie in relatie tot de k-waarde van de ondergrond, aan/afwezigheid van afvoervoorzieningen zoals riolering & kolken, etc.) en de afmetingen van het afvoerend oppervlak waarop de constructie is gedimensioneerd. Om te kunnen bepalen of een gepresenteerde oplossing op wijkniveau voldoet aan de gestelde verwachtingen en eisen is aanvullend onderzoek noodzakelijk waarin al deze aspecten worden meegenomen.

De resultaten uit dit onderzoek laten zien dat het plegen van onderhoud over het algemeen een positief effect heeft op de infiltratiesnelheid. Op de verschillende locaties is echter vaak slechts éénmaal of enkele malen getest voor en na reiniging en zijn slechts één of enkele reinigingsmethodieken in praktijk gebracht. Aanvullende metingen en analyse naar de effectiviteit van andere reinigingsmethodieken en naar de terugloop van de infiltratiesnelheid door de tijd voor en na afloop van reiniging zijn daarom gewenst. Om de uitvoering van dit soort meerjarige metingen te waarborgen adviseren we gemeenten meet- en monitoringsprotocollen op te stellen waarin zij dit vastleggen. Alleen op die wijze kunnen de langere termijneffecten van diverse omgevingsfactoren en van beheer en onderhoud op waterdoorlatende en waterpasserende verhardingen worden bepaald, kan een optimaal onderhoudsschema worden ontwikkeld om een goede werking van de infiltratievoorziening te waarborgen, en kan een afweging op kosten en baten worden gemaakt wat betreft verdere implementatie van de infiltratievoorziening.

## 5. Conclusie

Infiltrerende verharding is in potentie een zeer effectieve klimaatadaptatie maatregel om problemen met betrekking tot wateroverlast, hitte, en verdroging in het stedelijk gebied tegen te gaan. In diverse gemeenten zijn de afgelopen 10-12 jaar dan ook verschillende vormen van infiltrerende verhardingen aangelegd als alternatief voor een regenwaterriool om het regenwater vast te houden, te bergen en daarna pas af te voeren. In de praktijk functioneren deze infiltrerende verhardingen echter niet altijd optimaal, onder andere door problemen met de afname van infiltratiesnelheid en onduidelijkheid over het beheer- en onderhoud. MKB-ondernemingen gespecialiseerd in infiltrerende verharding willen gemeenten graag overtuigen van het nut van hun innovaties en zijn daartoe op zoek naar meer inzicht in het functioneren van de infiltrerende verharding op de lange termijn uitgevoerd door onafhankelijke onderzoekers van hogescholen.

Middels 70 infiltratieproeven uitgevoerd in 11 gemeenten door heel Nederland (waarvan 67 gebruikt voor de analyse) is als onderdeel van het project Infiltrerende Stad onderzocht hoe infiltrerende verharding functioneert in de praktijk. Daarbij is allereerst gekeken naar het functioneren van infiltrerende verharding op de korte en lange duur. Aanvullend is bestudeerd wat het effect van diverse systeemkenmerken en omgevingsfactoren is op het functioneren van infiltrerende verharding in de praktijk. Met behulp van reinigingsproeven is tenslotte beoordeeld wat het effect is van verschillende beheer- en onderhoudsmethodes op de infiltratiesnelheid. De resultaten uit dit onderzoek laten zien dat met een gemiddelde infiltratiesnelheid van 540 mm/uur de onderzochte infiltrerende voorzieningen ruim boven de Nederlandse en internationale streefwaarden functioneren. Bij 65 infiltratieproeven is een infiltratiesnelheid gemeten van ten minste 60 mm/uur. Bij 43 infiltratieproeven was de gemeten infiltratiesnelheid hoger dan 194 mm/uur. Een deel van de proeflocaties was voorzien van innovaties in infiltrerende verhardingen. De gemiddeld gemeten infiltratiesnelheid van deze innovaties ligt zelfs op 740 mm/uur. Dit is aanzienlijk hoger dan de gemiddelde gemeten infiltratiesnelheid van 220 mm/uur voor reguliere systemen, ook na verdiscontering van de infiltratiesnelheden voor het leeftijdseffect (gebruikmakend van een gemiddelde jaarlijkse afname in infiltratiesnelheid van 74 mm/uur). Gemiddeld genomen is het gemeten verschil in infiltratiesnelheid tussen waterpasserende en waterdoorlatende relatief klein. Van de overige systeemkenmerken (ondergrond, hoogte maaiveld, type wegprofiel) heeft alleen het type wegprofiel een groot effect. Infiltrerende verharding is veel effectiever op een vlak profiel dan op een ander type wegprofiel.

Resultaten van metingen uitgevoerd aan zowel waterdoorlatende als waterpasserende verhardingen laten zien dat de infiltratiesnelheid terugloopt met de tijd, gemiddeld met 74 mm/uur per jaar. De  $R^2$  behorend bij deze trends is echter klein. Dit impliceert dat leeftijd slechts één verklarende variabele is voor de gemeten terugloop in infiltratiesnelheid. Ook andere factoren spelen een rol. Uit onze resultaten blijkt dat diverse omgevingsfactoren invloed hebben op de infiltratiesnelheid en terugloop van infiltratiesnelheid door de tijd. Zo beïnvloedt de aanwezigheid van bomen en struiken de (terugloop van) infiltratiesnelheid negatief, terwijl verkeersintensiteit een positief effect heeft. Nader onderzoek naar, onder andere mogelijke kruisverbanden tussen omgevingsfactoren die hier een rol spelen, is nodig om deze resultaten verder te specificeren.

Uit ons onderzoek blijkt tenslotte dat juist beheer- en onderhoud een grote rol kan spelen bij het bewaren of verbeteren van de infiltratiesnelheid van infiltrerende verharding in de praktijk. De analyse van de resultaten uit 17 reinigingsproeven laat zien dat reiniging van infiltrerende verharding de infiltratiesnelheid

gemiddeld met 380% kan verhogen. Het toepassen van hogedruk lucht lijkt op basis van onze resultaten voornamelijk voor waterpasserende verharding effectief, terwijl het gebruik van een ZOAB-reiniger de beste resultaten behaalt bij waterdoorlatende verharding.

De conclusies van dit onderzoek zijn gebaseerd op de resultaten van 67 infiltratietesten, uitgevoerd op locaties in 11 gemeenten in Nederland, met infiltrerende verharding van variërende ouderdom. Zij bieden daarmee zowel gemeenten als MKB-ondernemingen een goed startpunt om verder te werken met en aan de toepassing van infiltrerende verharding in de praktijk. Om voor individuele locaties de lange termijneffecten van diverse omgevingsfactoren én van beheer en onderhoud op de effectiviteit van infiltrerende verharding in de praktijk te kunnen bepalen zijn echter meerjarige metingen nodig op locatie. Gemeenten adviseren wij dan ook om bij aanleg van infiltrerende verhardingen een meet- en monitoringsprotocol op te stellen welke de uitvoering van meerjarige metingen waarborgt en vastlegt. Het uitvoeren van een full-scale test is niet ingewikkeld en het protocol voor uitvoering is gereed. Daarbij kunnen studenten van de 3 hogescholen mogelijk worden ingezet. Alleen zo kan een optimaal onderhoudsschema worden ontwikkeld waarmee een goede werking van infiltrerende verharding op de langere termijn kan worden geborgd en kan een afweging op kosten en baten worden gemaakt wat betreft grootschaligere implementatie van de infiltrerende verharding in de praktijk.

# Literatuurlijst

Boogaard F.C. Stormwater characteristics and new testing methods for certain sustainable urban drainage systems in The Netherlands, Delft 2015.

Boogaard, F.C., Lucke, T., Beecham, S. (2013) Effect of Age of Permeable Pavements on Their Infiltration Function. CLEAN Soil Air Water, 42, 146–152.

Boogaard, F., Lucke, T (2019). Long-term infiltration performance evaluation of Dutch Permeable pavements using the full-scale infiltration method. Water, 11, 320, doi:10.3390/w11020320

Boogaard, F.C., Lucke, T., Van de Giesen, N., Van de Ven, F. (2014). Evaluating the infiltration performance of eight Dutch permeable pavements using a new full-scale infiltration testing method. Water, 6, 2070-2083. doi:10.3390/w6072070

Borgwardt, S. (2006). Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement. 8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving, November 6-8, 2006, San Francisco, California, USA.

Leskens, A., Lekkerkerk, J. (2020). WP1: Systeemanalyse. Raak MKB Project De Infiltrerende Stad.

Lucke, T., Beecham, S., Boogaard, F.C., Myers, B. (2013). Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable? <https://www.researchgate.net/publication/262567315>

Winston, R.J., Al-Rubaei, A.M., Blecken, G.T., viklander, M., Hunt, W.F. (2016). Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. Journal of Environmental Management 169 (2016) 132-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.026>



# Bijlage A: Overzichtstabel praktijkmetingen

Zie Excel-bestand: *Praktijkmetingen\_Infiltrerende\_Stad\_Publicatie.xlsx*

## Bijlage B: Invloed omgevingsfactoren

Tabel B-1: Invloed van omgevingsfactoren op de gemeten infiltratiesnelheid en afname van infiltratiesnelheid door de tijd. De tabel geeft de gemiddelde infiltratiesnelheid weer in mm/uur met daarachter tussen haakjes het aantal waarnemingen waarop deze gemiddelde waarde is gebaseerd. Terugloop in gemeten infiltratiesnelheid met de tijd wordt eveneens weergegeven in mm/uur. Met daarachter tussen haakjes de bijbehorende  $R^2$ .

| Variabele            | Conditie                            | Alle verharding |               | Waterpasserende verharding |                | Waterdoorlatende verharding |               |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|----------------|-----------------------------|---------------|
|                      |                                     | Inf (mm/uur)    | Terugloop Inf | Inf (mm/uur)               | Terugloop Inf  | Inf (mm/uur)                | Terugloop Inf |
| Bomen                | <b>Geen</b>                         | 640 (6)         | -39 (0,14)    | 807 (3)                    | -              | 472 (3)                     | 621 (0,89)    |
|                      | <b>Klein</b>                        | 197 (13)        | 7 (0,02)      | 200 (9)                    | 9 (0,02)       | 190 (4)                     | 30 (0,04)     |
|                      | <b>Gemiddeld</b>                    | 754 (4)         | -60 (0,23)    | 448 (3)                    | -43 (0,40)     | 1672 (1)                    | -             |
|                      | <b>Groot</b>                        | 649 (26)        | -87 (0,12)    | 807 (12)                   | -208 (0,35)    | 513 (14)                    | -41 (0,08)    |
| Struiken             | <b>Geen</b>                         | 982 (11)        | -160 (0,22)   | 1173 (8)                   | -171 (0,20)    | 472 (3)                     | 621 (0,89)    |
|                      | <b>Weinig</b>                       | 481 (25)        | -49 (0,15)    | 440 (11)                   | -73 (0,27)     | 513 (14)                    | -41 (0,08)    |
|                      | <b>Gemiddeld</b>                    | 91,86 (2)       | -             | 91,86 (2)                  | -              | -                           | -             |
|                      | <b>Veel</b>                         | 298 (11)        | -73 (0,34)    | 142 (6)                    | -54 (0,61)     | 486 (5)                     | -476 (0,87)   |
| Wijk-typologie       | <b>Bedrijven</b>                    | 1822 (5)        | 230 (0,01)    | 1822 (5)                   | 230 (0,01)     | -                           | -             |
|                      | <b>Bloemkoolwijk</b>                | 143 (2)         | -             | 103 (1)                    | -              | 183 (1)                     | -             |
|                      | <b>Buitengebied</b>                 | 1504 (1)        | -             | -                          | -              | 1504 (1)                    | -             |
|                      | <b>Naoorlogse tuinstad laagbouw</b> | 158 (3)         | -150 (0,99)   | 158 (3)                    | -150 (0,99)    | -                           | -             |
|                      | <b>Naoorlogse woonwijk</b>          | 689 (4)         | -1195 (0,83)  | 361 (3)                    | -809 (0,99)    | 1672 (1)                    | -             |
|                      | <b>Sub-urbane uitbreiding</b>       | 193 (14)        | -4 (0,003)    | 222 (7)                    | -46 (0,08)     | 1901 (5)                    | -28 (0,36)    |
|                      | <b>Tuinstad hoogbouw</b>            | 615 (4)         | -80 (0,33)    | 1066 (2)                   | -              | 165 (2)                     | -             |
|                      | <b>Vernieuwd</b>                    | 440 (4)         | 30 (0,15)     | 201 (2)                    | -              | 679 (2)                     | -             |
|                      | <b>Villa</b>                        | 552 (9)         | -85 (0,12)    | -                          | -              | 552 (9)                     | -85 (0,12)    |
| Verkeers-intensiteit | <b>Laag</b>                         | 571 (28)        | -76 (0,08)    | 637 (12)                   | -161 (0,16)    | 522 (16)                    | -34 (0,06)    |
|                      | <b>Gemiddeld</b>                    | 425 (19)        | -69 (0,34)    | 419 (13)                   | -84 (0,51)     | 447 (6)                     | -38 (0,08)    |
|                      | <b>Hoog</b>                         | 1080 (2)        | -             | 1080 (2)                   | -              | -                           | -             |
| Parkeer-intensiteit  | <b>Laag</b>                         | 584 (25)        | -89 (0,12)    | 597 (13)                   | -169,96 (0,21) | 570 (12)                    | -74 (0,16)    |
|                      | <b>Gemiddeld</b>                    | 381 (16)        | -31 (0,09)    | 280 (8)                    | -33 (0,29)     | 483 (8)                     | -8 (0,002)    |
|                      | <b>Hoog</b>                         | 698 (8)         | -93 (0,44)    | 875 (6)                    | -150 (0,78)    | 165 (2)                     | -             |