

A network diagram consisting of various-sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles are of different sizes and are scattered across the page, with some larger circles and some smaller ones. The lines connect these circles in a non-uniform, organic pattern.

KWR 2024.056 | Maart 2024

## **TKI Urban Photosynthesis**

**De integratie van drie  
functies op één dak:  
waterbuffering, grijswater-  
zuivering en zonnepanelen.**



## Samenwerkingspartners



# Colofon

## TKI Urban Photosynthesis

De integratie van drie functies op één dak: waterbuffering, grijswater-zuivering en zonnepanelen.

**KWR 2024.056 | maart 2024**

### Projectnummer

402914

### Projectmanager

Frank Oosterholt (KWR)

### TKI Samenwerkingspartners

Ron van Raam, Joris Voeten (Permavoid B.V.); Sacha Stolp, Vanni Hakkaard (Gemeente Amsterdam); Frank van Dien (Ecofyf); Wietse Buskermolen, Rianne Hiddes, Dominique Borggreve (Aedes Places B.V.); Michel Keijser (Techniplan adviseurs B.V.); André Praat (SDR elektrotechniek B.V.); Gijsbert Cirkel, Els van der Roest, Frank Oosterholt (KWR)

### Auteurs

Dr. ir. Gijsbert Cirkel (KWR), Dr. Els van der Roest (KWR, vanaf 1/11/2023 Gemeente Utrecht), ir. Frank Oosterholt (KWR) met bijdragen van verschillende projectpartners

### Kwaliteitsborging

Dr. ir. Ruud Bartholomeus & Prof. dr. Emile Cornelissen

### Dankwoord

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en uit bijdrages van EcoFyt, Permavoid BV, Aedes, Gemeente Amsterdam, Techniplan Adviseurs, SDR Elektrotechniek BV en KWR.

### Keywords

Blauw-groen dak, grijs water, waterhergebruik, helofytenfilter, koeling, pv-panelen

Jaar van publicatie  
2024

Meer informatie  
Dr. Ir. Gijsbert Cirkel  
T 030 60 69 734  
E [gijsbert.cirkel@kwrwater.nl](mailto:gijsbert.cirkel@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR**

Maart 2024 ©

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



# Samenvatting

Binnen het TKI-project Urban Photosynthesis is in een hoogstedelijke omgeving gewerkt aan een integrale oplossing voor het zoveel mogelijk sluiten van waterkringlopen op gebouwniveau, gecombineerd met het opwekken van zonne-energie op groene daken met waterberging (blauwgroene daken). Op deze manier wordt gelijktijdig bijgedragen aan drie functies in verdichte stedelijke gebieden: vergroening en daarmee verkoeling, waterhergebruik en energieopwekking.

## Probleemschets:

Met een toenemende bevolkingsdichtheid wereldwijd, en als gevolg van klimaatverandering – intensievere regenval en periodes met extreme droogte en hitte – hebben steden te maken met zowel wateroverlast als watertekorten. Oplossingen worden veelal gezocht in waterberging en groen op daken van gebouwen en bijvoorbeeld ondergrondse parkeerdekken. Ruimte in stedelijk gebied is echter schaars, zelfs op daken. In afwegingen tussen lokale duurzame energieopwekking met PV-panelen en ruimte voor blauwgroene oplossingen blijkt het laatste het steeds vaker af te leggen om te kunnen voldoen aan huidige vastgestelde duurzaamheidseisen voor gebouwen waarbij de focus ligt op energie. Tegelijkertijd kunnen deze PV-panelen minder presteren wanneer ze een plek krijgen op sterk opwarmende conventionele bitumen daken. Koeling door een verdampende vegetatie kan hiervoor een uitkomst bieden. Hier is echter wel permanente aanvoer van water naar de vegetatie nodig wat tijdens zomerse droogte niet altijd vanzelfsprekend is. Project Urban Photosynthesis heeft voor deze problemen oplossingen aangereikt die leiden tot een win-win-win situatie.

## Technologie:

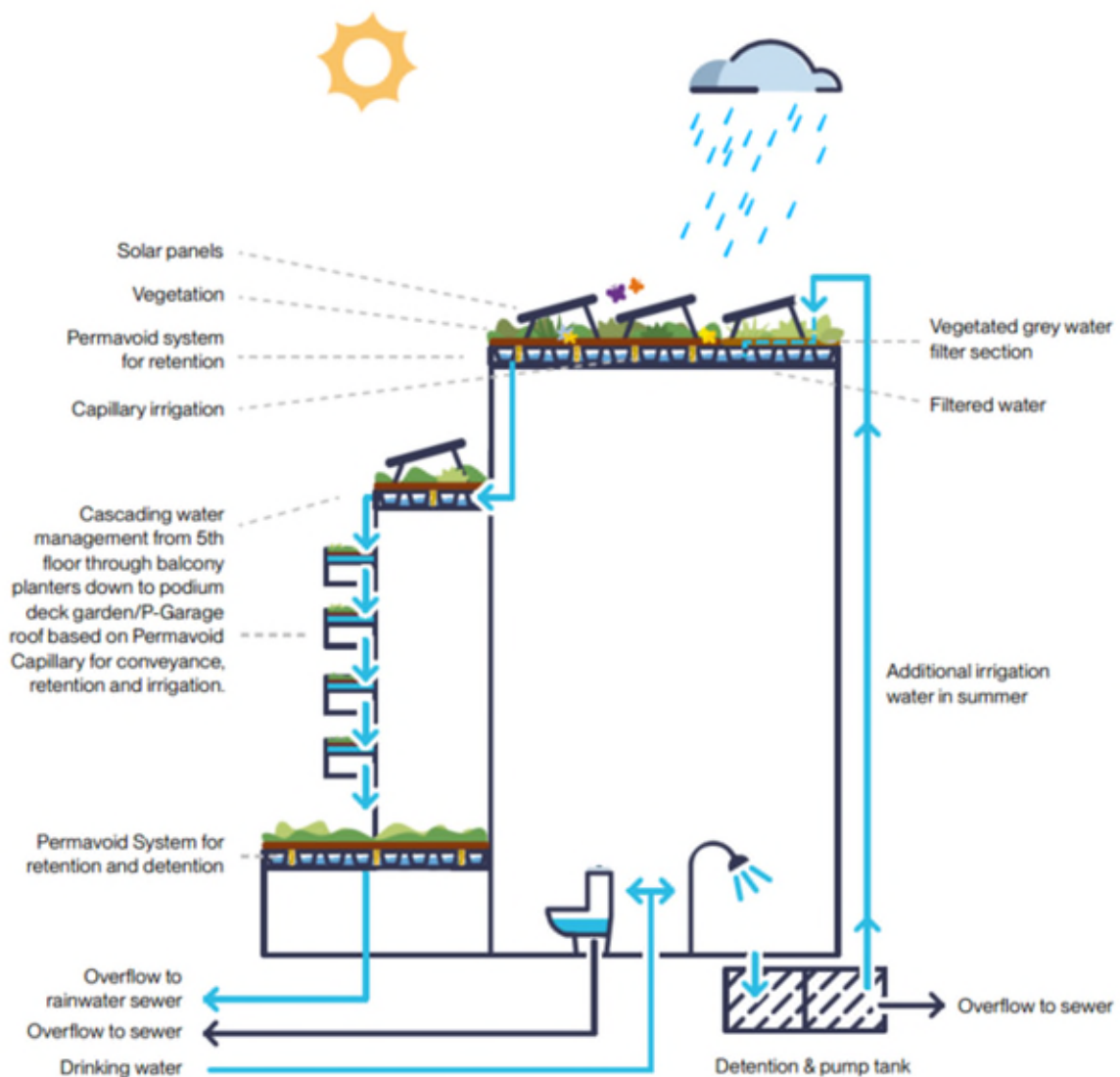
In verdichte steden is weinig ruimte en water beschikbaar voor optimale koeling, groene ruimte en opwekking van (zonne-)energie. Het aanvullen van watertekorten voor beplanting met drinkwater, is vanuit het oogpunt van kosten en duurzaamheid ongewenst. Het doel van dit onderzoeksproject was om met een oplossing te komen waardoor men bij de ontwikkeling van multifunctionele daken in steden niet langer hoeft te kiezen voor óf (blauw)groen óf PV-panelen, maar dat én-én een betrouwbare oplossing is. Een systeem dat beschikbaar grijs afvalwater op een natuurlijke wijze kan omzetten in irrigatiewater, is bruikbaar voor verkoeling, in aanvulling op het beschikbare regenwater. De hypothese is dat hierdoor ook bij lange droge perioden de verkoelende werking van het dak maximaal in stand blijft, zonder suppletie van drinkwater. Een andere hypothese is dat door een constante verdamping en daarmee koeling de efficiëntie van PV-panelen stijgt, waardoor eerder aan duurzaamheidseisen kan worden voldaan. Daardoor komt meer ruimte beschikbaar voor andere dakfuncties, zoals groen en/of waterberging en eventuele terrasruimte. Als laatste hypothese is getest of voldoende grijswater beschikbaar is en dit afdoende kan worden gezuiverd in een dunne filterlaag op het dak met specifieke beplanting. Het project is uitgevoerd op het Aedes gebouwcomplex Mannoury (in Amsterdam) met twee identieke woontorens die zijn uitgevoerd met beplanting op alle niveaus: daken, balkons en de daktuin op de parkeergarage. Voor het onderzoek is het bovenste dak van één van de gebouwen (voorlopig) bewust zwart gelaten (bitumen zonder groen). Op beide bovenste daken van de torens zijn PV-panelen geplaatst.

## Uitdaging:

Het project kende verschillende uitdagingen. Ten eerste is er de beschikbaarheid van water. Onder Nederlandse klimaatcondities is regenwater 's zomers wekenlang onvoldoende voorhanden. In meer zuidelijk gelegen landen is deze situatie nog vele malen nijpender. Daarom is een andere continue waterbron nodig. We hebben hiervoor douchewater gebruikt, dat is gezuiverd via een nieuw ontwikkeld in het blauwgroene dak geïntegreerd helofytenfilter. De zuivering zelf is hiermee onderdeel van het blauwgroene daksysteem, met planten die water

verdampen. Vervolgens stroomt het gezuiverde water naar de drainage en waterretentielaag onder de vegetatie op de rest van het dak, waar het voor verdamping en koeling zorgt.

De tweede uitdaging is de PV-panelen zodanig in het daksysteem te integreren dat de verkoelende werking van de begroeiing op de panelen optimaal tot zijn recht komt, terwijl de planten niet te veel in de schaduw staan. Vervolgens is een meetsysteem ontworpen en geplaatst om te kunnen onderzoeken of en zo ja hoeveel extra energie pv-panelen boven een verdampende vegetatie opleveren ten opzichte van pv-panelen boven een zwart dakoppervlak. Met het meetsysteem zijn inkomende straling, luchtvochtigheid en de temperatuur van het dakoppervlak, de luchtlaag en de panelen nauwkeurig gemeten. Ten slotte is ook de elektriciteitsopbrengst van de panelen nauwkeurig gevolgd.



Figuur 1 Schematische weergave van Urban Photosynthesis, met hergebruik van douchewater, zuivering op het dak en gebruik voor beplanting, en PV-panelen boven de begroeiing.

**Resultaten & conclusies:**

In het onderzoek is aangetoond dat de PV-panelen op een blauwgroen dak door de verkoelende werking van het verdampende groen een op jaarbasis 4,4 % hogere opbrengst halen dan op een bitumen dak. Deze extra opbrengst is vergelijkbaar met het energieverbruik van één van de appartementen in het gebouw en weegt op tegen de ruimte die tussen de panelen moet worden vrijgehouden voor de vegetatie. Dit resultaat is gepubliceerd in het wetenschappelijk tijdschrift *Building and Environment*.

In het onderzoek is aangetoond dat douchewater uit de appartementen prima kan worden gezuiverd via een kleinschalig ondiep horizontaal helofytenfilter dat is geïntegreerd op het dak. Het zuiveringsrendement was vergelijkbaar of voor enkele parameters zelfs wat beter dan de conventionele membraanbioreactor (MBR) voor de grijswaterzuivering in het andere gebouw. Alleen voor ammonium en verwijdering van bacteriën presteerde de MBR beter. De ammonium bleek echter gedurende verdere cascadering voldoende omgezet en opgenomen te worden. Op die manier hoeft niet te worden aangevuld met drinkwater in droge periodes. De resultaten zijn vastgelegd in een aparte rapportage.

De biodiversiteit van de beplanting en voorkomende insecten is in dit project niet specifiek onderzocht, maar de beplanting op het blauwgroene dak bestaat uit een zeer diverse bloeiende beplanting van inheemse plantensoorten. Onderzoek aan hetzelfde capillaire irrigatiesysteem in eerder TKI-onderzoek ([Smartroof 2.0](#)) heeft echter laten zien dat met het systeem een zeer biodivers ecosysteem verkregen kan worden.

De partners in dit project is het gelukt om het idee van een watersensitief, natuurinclusief en energiebewust gebouw om te zetten naar een succesvolle werkelijkheid. Ons onderzoek heeft laten zien dat er een win-win-win situatie ontstaat door water, energie en biodiversiteit te combineren. Het project biedt daarmee een blik op de toekomst van klimaatadaptief bouwen, die hopelijk andere projecten inspireert en laat zien dat er geen keuze hoeft te worden gemaakt tussen (blauw)groen óf zonnepanelen, maar dat de combinatie juist meerwaarde biedt.

In het voorliggende rapport (KWR 2024.056) zijn integraal opgenomen: een overzicht van alle uitingen op congressen, online en via geschreven media, de publiekssamenvatting, de wetenschappelijke publicatie, de resultaten van het grijswatersysteem, de resultaten van een bewonersonderzoek en een drietal presentaties.

# Inhoudsopgave

<b>Samenwerkingspartners</b>	<b>2</b>
<b>Colofon</b>	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>7</b>
<b>1 Kennisontwikkeling en disseminatie</b>	<b>9</b>
1.1 Toelichting op documentatie resultaten	9
1.2 Uitingen via online en geschreven media, radio	10
1.3 Presentaties op conferenties	11
1.4 Bijzonderheden/prijzen	11
<b>2 Publiekssamenvatting “TKI-project Urban PhotoSynthesis. Waterbewuste en natuurinclusieve energie uit Amsterdam”</b>	<b>12</b>
<b>3 Wetenschappelijk artikel ‘Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development’</b>	<b>22</b>
<b>4 Meetresultaten grijswatersysteem</b>	<b>36</b>
4.1 Aanleiding en achtergrond	36
4.1.1 Grijswater voor groen	36
4.1.2 Zuivering van douchewater als onderdeel van het blauwgroene dak	36
4.2 Systeembeschrijving	37
4.2.1 Horizontaal doorstroomd helofytenfilter	37
4.2.2 Conventionele membraanbioreactor	38
4.3 Meetresultaten & discussie	39
4.3.1 Douchewaterkwaliteit	39
4.3.2 Effectiviteit horizontaal doorstroomd helofytenfilter	39
4.3.3 Vergelijking met het conventionele MBR systeem	40
4.3.4 Uitstroom naar het hemelwaterriool	41
4.4 Conclusies & aanbevelingen	43
4.4.1 Conclusies	43
4.4.2 Aanbevelingen	44
<b>5 Resultaten bewonersonderzoek</b>	<b>45</b>
5.1 Inleiding	45
5.2 Bewonersonderzoek Mannoury gebouwen	45
5.3 Onderzoek wijk Westlandgracht uitgevoerd door I&O Research	46
5.3.1 Algemene informatie	46

5.3.2	Mannoury-woontorens bekend van buiten, niet van binnen	46
5.3.3	Brede interesse en waardering voor Mannoury-woontorens, maar nog geen aanzet tot actie	47
5.3.4	Conclusies en aanbevelingen buurtonderzoek	50
<b>6</b>	<b>Overzicht project presentaties</b>	<b>52</b>
6.1	Constructed WetRoof (CWR) Technology as a new approach to supply and enhance the cooling effect of PV Systems on Green Roofs	53
6.2	Green-blue roofs with solar PV – A win-win-win situation	73
6.3	Does nature love technology?	82
<b>I</b>	<b>Bijlage: vragenlijsten enquêtes bewoners Mannoury</b>	<b>101</b>
<b>II</b>	<b>Bijlage: resultaten enquêtes bewoners Mannoury</b>	<b>107</b>
<b>III</b>	<b>Bijlage: Vragen gerelateerd aan de Mannoury woontorens als onderdeel van het buurtonderzoek uitgevoerd door I&amp;O research.</b>	<b>111</b>
<b>IV</b>	<b>Bijlage: analyseresultaten douchewater, effluent zuiveringen en hemelwaterafvoer</b>	<b>113</b>

# 1 Kennisontwikkeling en disseminatie

## 1.1 Toelichting op documentatie resultaten

Dit eindrapport voor het project TKI Urban Photosynthesis is opgebouwd uit verschillende elementen die zijn samengebracht in dit rapport (Tabel 1). In hoofdstuk 1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste communicatieuitingen, waaronder websites, podcastinterviews, presentaties op congressen, een projectfilm, een wetenschappelijk artikel en diverse nieuwsitems en artikelen in vaktijdschriften. Om de resultaten breder toegankelijk te maken is een publieksvriendelijke samenvatting van zowel de PV resultaten als het grijswatersysteem opgenomen in Hoofdstuk 2. Ook de geleerde lessen met betrekking tot de samenwerking tussen de verschillende projectpartners is hier benoemd. De meetopstelling, methodes voor data-analyse en resultaten van het onderzoek met betrekking tot de PV output in relatie tot de verkoelende werking van het blauwgroene dak zijn beschreven in een wetenschappelijke publicatie in het tijdschrift Building and Environment die integraal is opgenomen in hoofdstuk 0. De resultaten van de waterkwaliteitsanalyses van het grijswater voor en na het zuiveringssysteem zijn vastgelegd in een rapportage die vrijwel integraal is opgenomen in hoofdstuk 4. De resultaten van het onderzoek naar de perceptie van de bewoners en de buurt is beschreven in hoofdstuk 5. Tenslotte volgen in hoofdstuk 6 drie relevante presentaties die verschillende onderdelen van het project belichten. De eerste is gehouden op de IWA ICWS conferentie in Lyon op 10 november 2022 over het helofytenfilter (constructed WetRoof) door Frank van Dien van ECOFYT. De tweede op de Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions conferentie over de eerste resultaten van het onderzoek aan het pv systeem door KWR op 20 juli 2022 in Bolzano en de derde door Joris Voeten als keynote speech op de TVVL techniek dag op 12 januari 2023 die meer in gaat op het ontwerp, de bouw en de samenwerking die nodig is.

Tabel 1 Leeswijzer en inhoudelijke verantwoording

Hfst	Auteurs	Soort output	Titel
1	Diverse	Overzicht kennis en disseminatie	Kennisontwikkeling en disseminatie
2	Gemeente Amsterdam met bijdrages van Joris Voeten, Gijsbert Cirkel en Els van der Roest	Publieksvriendelijke informatiefolder	TKI-project Urban PhotoSynthesis. Waterbewuste en natuurinclusieve energie uit Amsterdam
3	Els van der Roest, Joris Voeten, Gijsbert Cirkel	Wetenschappelijk artikel	Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development ( <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110704">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110704</a> )
4	Gijsbert Cirkel, Joris Voeten, Frank van Dien	Rapportage	Een horizontaal doorstroomd helofytenfilter voor douchewaterzuivering op daken ( <a href="https://library.kwrwater.nl/publication/71259482/een-horizontaal-doorstroomd-helofytenfilter-voor-douchewaterzuivering-op-daken/">https://library.kwrwater.nl/publication/71259482/een-horizontaal-doorstroomd-helofytenfilter-voor-douchewaterzuivering-op-daken/</a> )
5	Gem. A'dam ism KWR	Beknopte rapportage	Resultaten bewonersonderzoek
6.1	Frank van Dien	Presentatie	Constructed WetRoof (CWR) Technology as a new approach to supply and enhance the cooling effect of PV Systems on Green Roofs
6.2	Els van der Roest	Presentatie	Green-blue roofs with solar PV – A win-win-win situation
6.3	Joris Voeten	Presentatie	Does nature love technology?

## 1.2 Uitingen via online en geschreven media, radio

Hieronder volgt een selectie van de belangrijkste media-uitingen.

1. TKI project website: <https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/urban-photosynthesis-drie-functies-op-een-dak/>
2. KWR website: <https://www.kwrwater.nl/projecten/urban-photosynthesis-drie-functies-op-een-dak/>
3. Projectwebsite: <https://mannoury.nl/en/>
4. Podcastinterview Joris Voeten en Gijsbert Cirkel in de Mayors Manual podcast 'Eén plus één is zes', 3 juni 2022: [https://open.spotify.com/episode/3VSK4i4pcp2r8pjbG2G1HE?si=Wu2TZi1\\_Q3-PEy2lpOKxOA&nd=1](https://open.spotify.com/episode/3VSK4i4pcp2r8pjbG2G1HE?si=Wu2TZi1_Q3-PEy2lpOKxOA&nd=1)
5. Projectvideo, juni 2022, in het Engels: <https://vimeo.com/731349371> en Nederlands: <https://vimeo.com/730971056>
6. Ginkel Groep, 'Beter rendement wanneer een zonnepaneel wordt geplaatst op een blauw-groen dak?', <https://www.ginkelgroep.nl/actueel/beter-rendement-wanneer-een-zonnepaneel-wordt-geplaatst-op-een-blauw-groen-dak/>
7. Loosduinse Krant, 19 juli 2022, 'De Nederlandse investeerder Aedes, onderzoeksinstituut KWR en de gemeente Amsterdam slaan de handen ineen om de gevolgen van klimaatverandering tegen te gaan', <https://www.loosduinsekrant.nl/de-nederlandse-investeerder-aedes-onderzoeksinstituut-kwr-en-de-gemeente-amsterdam-slaan-de-handen-ineen-om-de-gevolgen-van-klimaatverandering-tegen-te-gaan/>
8. Vakblad Natuur Bos Landschap, special bodem, 'Groen voor de bodem, de bodem voor groen – betekenis van de bodem voor het stadsecosysteem', nr 189, p 18-21, november 2022.
9. Persbericht 19 juli 2022 Investeerder Aedes, onderzoeksinstituut KWR en gemeente Amsterdam gaan samen strijd aan tegen de gevolgen van klimaatverandering (NL/ENG)
10. Vakblad Roofs, 'In een klimaatbestendige stad is alles onderling verbonden', interview Joris Voeten, nr 2, p50-51, februari 2023, online versie: [14010-roofs-2023-02-50-in-de-klimaatbestendige-stad-is-alles-onderling-verbonden.pdf](https://www.roofs.nl/14010-roofs-2023-02-50-in-de-klimaatbestendige-stad-is-alles-onderling-verbonden.pdf) (dakweb.nl).
11. Installatie.nl 'Groene weelde op het dak', interview met Wietse Buskermolen en Joris Voeten, nr4, p.33-36, 2023. Inclusief podcastaflevering met interview Wietse Buskermolen & Joris Voeten, <https://www.installatie.nl/podcast/pv-paneel-presteert-beter-boven-groenblauw-dak/>
12. Podcastinterview Gijsbert Cirkel en Els van der Roest in de KWR Waterwetenschappers podcast 'Welke rol spelen daken in het omgaan met klimaatverandering?', juni 2023: [https://soundcloud.com/kwr\\_water/aflevering-26-welke-rol-spelen-daken-in-het-omgaan-met-klimaatverandering-met-cirkel-en-vd-roest](https://soundcloud.com/kwr_water/aflevering-26-welke-rol-spelen-daken-in-het-omgaan-met-klimaatverandering-met-cirkel-en-vd-roest)
13. Wetenschappelijk artikel in Building & Environment, 'Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development', nr. 244, p 110704, May 2023: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110704>
14. Tijdschrift PV Magazine Global, 'Well-irrigated roofs with vegetation have cooling effect on PV system', 8 augustus 2023, <https://www.pv-magazine.com/2023/08/08/well-irrigated-roofs-with-vegetation-have-cooling-effect-on-pv-systems/>
15. Nieuwsbericht website NWP (Netherlands Water Partnership) November 2023. <https://www.netherlandswaterpartnership.com/news/tki-project-urban-photosynthesis-blue-green-roof-integrated-solution-adapts-urban-environment>

Mooie citaten: "Maar als we in de jaren '60 naar de maan en terug konden vliegen, dan moeten we nu in staat zijn om betere gebouwen te maken." (Roofs feb 2023, interview Joris)

### 1.3 Presentaties op conferenties

1. Stolp, S. (2022) Presentatie 'TKI Urban Photosynthesis – Creating Mannoury, a living building', City Climate Impact Day (part of H22 Expo), Dunkers Kulturhus Helsingborg, Zweden.
2. Van der Roest, E. (2022) Presentatie 'Green-blue roofs with solar PV – A win-win-win situation' op de SSPCR conferentie, 20 juli 2022, Bolzano, Italië.
3. Stolp, S. (2022) Presentatie 'The Amsterdam approach in becoming a resilient city' op Ciudades del Futuro Congress op 26 oktober 2022 in Bilbao, Spanje.
4. Voeten, J. (2022) Keynote TVVL Techniekdag 'Does nature love technology?', 9 november 2022, Maarssen.
5. van Dien, F. (2022) Presentatie 'Constructed WetRoof (CWR) Technology as a new approach to supply and enhance the cooling effect of PV systems on Green Roofs' op de ICWS conferentie, 10 november 2022, Lyon, Frankrijk.
6. Voeten, J. (2023) Presentatie project 'Urban PhotoSynthesis' op het Blue Green Event van het Scandinavian Green Roof Institute op 13 maart 2023, online.
7. Voeten, J. (2024) Presentatie project Urban Photosynthesis. Congres 'Klaar voor Later' georganiseerd door TKI Urban Energy op 10 januari 2024.
8. Cirkel, D.G. (2024) Presentatie 'Geen groen zonder Blauw, over de veranderende rol van water in de stad' op Aqua Nederland Vakbeurs Gorinchem 20 maart 2024

### 1.4 Bijzonderheden/prijzen

TKI Urban Photosynthesis/Mannoury is Dak van het jaar 2022, uitgeroepen door de tijdschriften *Roofs* en *steilDAK*. <https://www.dakvanhetjaar.nl/PDF/Roofs2022-11p6-9.pdf>, en zie <https://www.kwrwater.nl/actueel/blauwgroen-energiedak-mannoury-wint-dak-van-het-jaar-2022/>



Figuur 1-1 Prijsuitreiking Dak van het jaar 2022. Vlnr Joris Voeten (WUR, voormalig Permavoid), Gijsbert Cirkel (KWR), Sacha Stolp (Gemeente Amsterdam), Frank van Dien (ECOFYT) & Wietse Buskermolen (Aedes).



## **2 Publiekssamenvatting “TKI-project Urban PhotoSynthesis. Waterbewuste en natuurinclusieve energie uit Amsterdam”**



# TKI-project Urban PhotoSynthesis

Waterbewuste en natuurinclusieve energie uit Amsterdam

# TKI-project Urban PhotoSynthesis

## Waterbewuste en Natuurinclusieve Energie uit Amsterdam

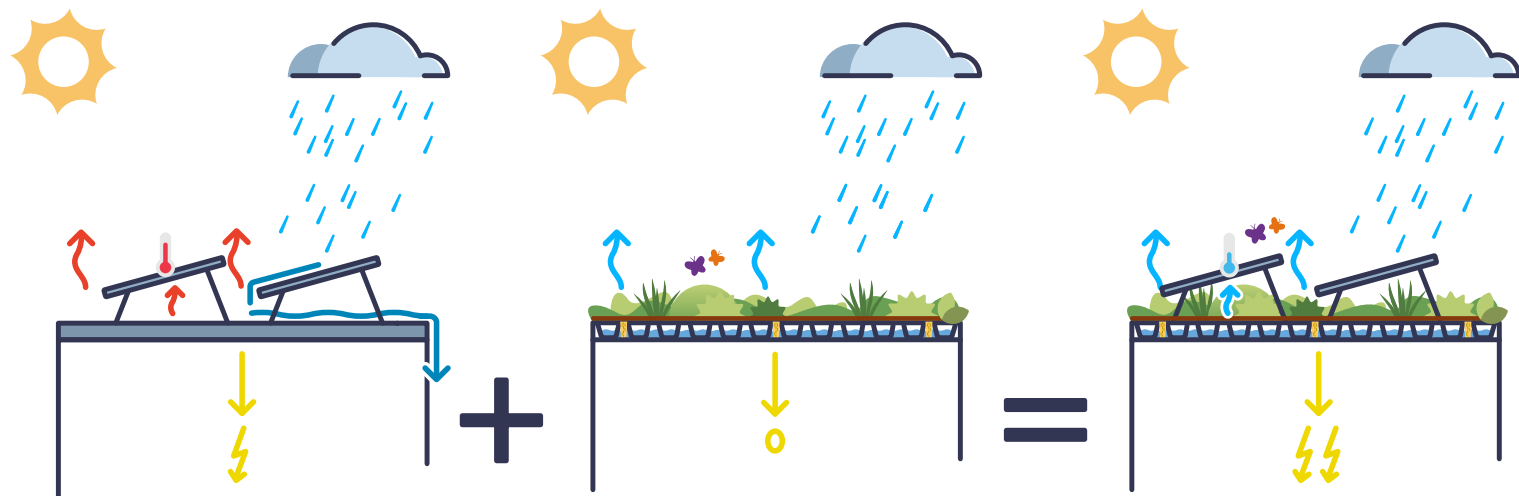
Steden worden geconfronteerd met een groot aantal uitdagingen op het gebied van voldoende woningen, de energietransitie, de achteruitgang van biodiversiteit en aanpassingen aan klimaatverandering. Zomers worden warmer en droger en regenbuien worden intenser terwijl, als we niet uitkijken, de ruimte voor groen afneemt.

Platte daken worden in het algemeen gezien als een ideale locatie voor zonnepanelen, maar ook voor blauw-groene daken. Dat zijn groene daken die ook piekbuien kunnen opvangen. Je kunt je afvragen waar je dan voor moet kiezen, maar dat is niet langer nodig: met project Urban PhotoSynthesis hebben we bewezen dat beide op hetzelfde dak kan, zodanig dat de systemen elkaar op de volgende manieren versterken:

- Het blauw-groene systeem bergt regenwater en zuivert douchewater (grijs water) voor capillaire irrigatie van de beplanting;
- De beplanting koelt door verdamping de zonnepanelen waardoor deze meer elektriciteit produceren;
- De panelen werpen schaduw waardoor er meerdere plantensoorten op het dak kunnen groeien.

De combinatie van zonnepanelen, groen, regenwaterberging en grijswaterzuivering geeft invulling aan een gecombineerde praktische oplossing die:

- De opwarming van de stad helpt tegengaan;
- Het dak nog beter isoleert;
- Bij regen werkt als een spons;
- Douchewater zuivert voor irrigatie van de planten;
- Ruimte maakt voor biodiversiteit;
- Lokale productie van energie verbetert.



Afbeelding 1: het concept van of-of oplossingen naar een succesvolle en-en combinatie.



Het Aedes gebouwcomplex Mannoury (2020-2021) met twee woontorens en ondergrondse parkeerkelder is ontworpen met biodiverse beplanting op alle niveaus: de daken, balkons en daktuin op de parkeergarage zijn voorzien van bloeiende beplanting die groeit op het Permavoid waterretentie en capillaire irrigatiesysteem. De begroeide etages zijn met elkaar verbonden: water stroomt onzichtbaar van de hoogste daken via de begroeide balkons naar de daktuin op de parkeergarage.

Er zijn steeds vaker lange droge periodes en uit het eerdere Amsterdamse project Smartroof 2.0 (<https://www.projectsmaartroof.nl/>) leerden we dat water voor de beplanting essentieel is om te kunnen groeien en koelen. Bij droogte irrigeren met drinkwater is niet duurzaam en wordt in periodes van droogte juist ontmoedigd door drinkwaterbedrijven om zo drinkwater te besparen voor de hoofdfuncties. Daarom wordt in dit project het douchewater uit de appartementen met een natuurlijk (horizontaal doorstroomd) begroeid filter van ECOFYT op het hoogste blauw-groene dak gezuiverd tot bruikbaar irrigatiewater waarmee de watervoorraad voor de planten dagelijks wordt aangevuld.

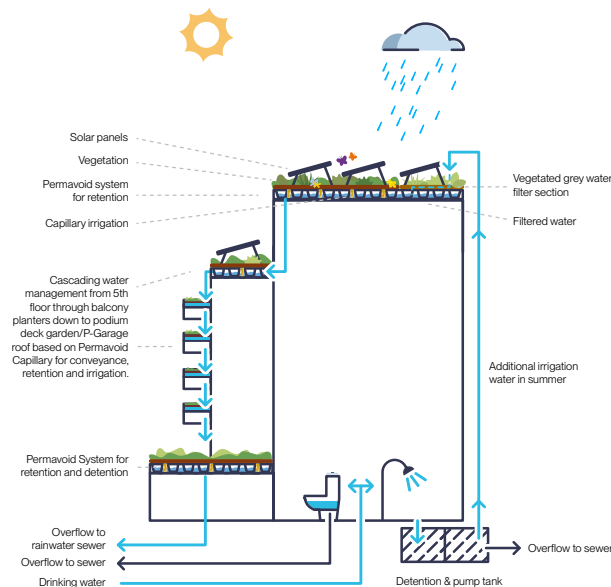
De combinatie van dit filtersysteem en de blauw-groene daken resulteert in:

- Minder regenwater naar de riolen;
- Jaarrond voldoende water voor de beplanting voor groei en verkoeling;
- Minder douche-afvalwater naar het riool.

In de film Mannoury – Project Urban PhotoSynthesis, wordt het belang en de opzet van het onderzoek uitgelegd: <https://vimeo.com/730971056> (Engelse versie: <https://vimeo.com/731349371>)



Afbeelding 2: de twee woontorens van Mannoury (Aedes) in de West-as van Amsterdam.



Afbeelding 3: de werking van het watersysteem in de gebouwen



Afbeelding 4a en 4b: filtersysteem in aanbouw (links) en in werking (rechts).



Volgens een zeer beperkt aantal eerdere onderzoeken kan de combinatie van groene daken en zonnepanelen een toename van 0,5 tot 6% van het vermogen van de zonnepanelen opleveren. Om inzicht te krijgen in het effect van een blauw-groen capillair geïrrigeerd dak in combinatie met zonnepanelen, specifiek in Nederland, hebben we de energieprestaties van het blauw-groene zonnedak (Mannoury toren 1) vergeleken met die van een standaard zwart bitumen dak met zonnepanelen (Mannoury toren 2). We hebben zowel de opbrengst van de zonnepanelen, als de temperatuur van de zonnepanelen, de relatieve vochtigheid en luchttemperatuur onder 6 panelen op ieder dak gemeten in 2022.

Als we de resultaten van de 5 warmste maanden (juni - oktober 2022) bekijken dan zien we het volgende:

1. Op het bitumen dak is de oppervlaktetemperatuur onder de panelen overdag gemiddeld 2,4°C hoger dan op het blauw-groene dak. Op een heldere zomerdag kan het temperatuurverschil oplopen tot 12°C. De paneeltemperatuur is tot 6,6°C hoger op het zwart bitumen dak.
2. Gemiddeld meten we een 4,4% hogere opbrengst bij zonnepanelen op een geïrrigeerd blauw-groen dak dan op een bitumen dak bij gelijke hoeveelheid zoninstraling. Dit resultaat is relatief hoog vergeleken met andere studies

van zonnepanelen op een groen dak. Het is waarschijnlijk dat de continue beschikbaarheid van water en daarmee optimale verdamping door de vegetatie hier een rol bij speelt.

Het wetenschappelijke artikel waarin de methoden en resultaten in detail beschreven zijn is te vinden op:

[Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development - ScienceDirect](#)



**Afbeelding 5a en 5b:** de zonnepanelen op het blauw-groene dak (rechts) en op het zwarte dak (links).

In de periode november 2021 – juni 2023 is het verzamelde douchewater vóór het helofytenfilter en de uitstroom van het helofytenfilter op toren 1 bemonsterd. Daarnaast is ook de uitstroom van de membraanbioreactor in gebouw 2 bemonsterd. Dit meer gebruikelijke kleinschalige zuiveringssysteem is in gebouw 2 geplaatst om de vergelijking te kunnen maken met het helofytenfilter op het dak van gebouw 1. Daarnaast is een monster genomen op de uitstroompunten naar het hemelwaterriool. Het bemonsterde water is onderzocht op 18 parameters waaronder nutriënten, zuurstofverbruik, was-actieve stoffen en bacteriën. Uit het meetprogramma blijkt dat met het begroeide filter (toren 1) goede zuiveringsrendementen worden gehaald, die voor de meeste parameters minimaal vergelijkbaar zijn met een conventionele membraanbioreactor (toren 2). Bij uitstroom van het helofytenfilter is enkel ammonium nog wat verhoogd in het water. Nadat het water echter trapsgewijs daalt van het dak, via de balkonbakken, naar het dak van de parkeergarage is het water ook voor deze parameter voldoende ver gezuiverd om te kunnen overstorten op het hemelwaterriool. Conclusie van de metingen is dat het water prima geschikt is voor irrigatie van de beplanting. Belangrijk is wel om op te merken dat het water niet direct geschikt is voor andere vormen van hergebruik in huis. In het douchewater zijn namelijk wel poepbacteriën aangetroffen in lage concentraties. Die worden er deels door de zuiveringen uitgehaald maar vormen toch een indicatie dat intensief contact met dit water beter wordt vermeden.

**Afbeelding 6:** door de zeer diverse bloeiende beplanting waan je je niet langer op een dak.

De rapportage over het onderzoek naar de effectiviteit van het horizontaal doorstroomde helofytenfilter is te vinden op: <https://library.kwrwater.nl/publication/71259482/een-horizontaal-doorstroomd-helofytenfilter-voor-douchewaterzuivering-op-daken/>

De biodiversiteit van de beplanting en voorkomende insecten is niet specifiek onderzocht, maar op de foto's is te zien dat de beplanting bestaat uit een zeer diverse bloeiende beplanting van vele soorten die goed in het Nederlandse ecosysteem passen.





- 1. Vanaf het begin**

Om al die extra functies van waterberging, energieopwekking en natuurinclusiviteit mogelijk te maken op de daken en de balkons moeten alle partijen vanaf het begin van het ontwerp betrokken zijn. Dergelijke multifunctionele daken hebben namelijk effect op de constructie van de daken, de architectuur van het dak en de toegang, water- en elektra systemen, het type dakbedekking en isolatie, de zonnepanelen met montage en de mogelijke beplanting.
- 2. Ontwerp geen groen zonder blauw**

Houdt bij het ontwerp van het watersysteem rekening met de te verwachten hoeveelheid plantverdamping. Ontwerp een balans tussen de plantverdamping en de hoeveelheid regenwater die je kunt opslaan en het extra water dat je uit douchewater kunt oogsten. Houd daarbij ook rekening met de door de gemeente gestelde minimale eisen aan regenwaterberging uit de hemelwaterverordening.
- 3. Samenwerking nodig tussen verschillende partijen tijdens de bouw**

Normaal gesproken is het dak de “laatste” fase van het waterdicht maken van het gebouw, maar om een multifunctioneel daklandschap te creëren, moeten specialisten uit verschillende vakgebieden (ventilatie, energie, waterbeheer, hoveniers, zonnepanelen) in de bouw samenwerken om het dak op een efficiënte manier en in de juiste volgorde functioneel in te kunnen richten.
- 4. Minimaliseer en cluster technische infra op het dak**

Waar het dak in het verleden werd beschouwd als verloren ruimte waar bijvoorbeeld ventilatie en andere technische infrastructuur kon worden geplaatst waar dat handig was, is het met het multifunctionele ontwerp nu belangrijk om de hoeveelheid ruimte die voor deze infrastructuur wordt gebruikt te minimaliseren en deze te clusteren in beperkte en specifieke gebieden op het dak zodat ook de andere functies de ruimte krijgen.
- 5. ‘Groen’ is niet per se hetzelfde als ‘groen’**

Voor de beste bijdrage aan lokale biodiversiteit is het raadzaam om advies in te winnen bij een ecooloog, betreffende te kiezen plantensoorten of de samenstelling van een zaai-mengsel. In verschillende regio’s in Nederland passen verschillende beplantingstypen, dus zorg dat de nieuwe vegetatie daar in past.
- 6. Een innovatief project waarin zoveel systemen voor het eerst met elkaar gecombineerd worden vergt extra aandacht en inzet van de hoofdaannemer en de onderaannemers.**

In het werk moeten veel kleine uitdagingen die men nog niet eerder tegenkwam op praktische wijze opgelost worden. Dat kan alleen door samen te werken. Vingerwijzen en verantwoordelijkheden afschuiven helpt hierin niet.
- 7. Inregelen kost minimaal één jaar na constructie**

Bij het creëren van gebouwen met nieuwe en innovatieve waterbeheersystemen zal het minstens een jaar na de bouw nodig zijn (voor alle seizoenen) om de systemen te optimaliseren en ervaring op te doen met het werkelijk vereiste onderhoud dat in het uiteindelijke onderhoudshandboek moet worden opgenomen. Benoem hierbij duidelijk de verantwoordelijkheid en budgetteer tijd en geld voor dit leerproces.
- 8. Duidelijkheid nodig over waterkwaliteitseisen**

Om het potentieel van dit concept verder te vergroten is duidelijkheid over waterkwaliteitseisen voor gezuiverd grijswater en zijn randvoorwaarden voor veilige toepassing nodig. Bovendien is het noodzakelijk te kijken naar de totale waarde van het gebouw en niet alleen naar Energieprestatienormen, om meer ruimte voor combinaties met ook de andere functies mogelijk te maken.



Omdat planten in de winter niet groeien, verdampen ze ook nauwelijks regenwater dat ook 's winters op de daken opgevangen wordt. Dat stroomt uiteindelijk over naar het regenwaterriool. En dat is jammer, zeker nu is gebleken dat de Nederlandse winters natter en de zomers juist droger worden (KNMI Klimaat Scenario's 2023).

In de winter is het dus ook niet nodig om douchewater te zuiveren tot irrigatiewater, terwijl de filtersystemen wel de capaciteit hebben om dat wel te doen. Twee bronnen van lokaal beschikbaar en bruikbaar water gaan 's winters dus verloren. Omdat douchewater belast is met poepbacteriën kan het voor (kwetsbare) mensen risicovolle ziekteverwekkers bevatten, daarom is verdere toepassing van het gezuiverde douchewater in huis geen goede optie. Wel kansrijk is een combinatie met seizoensberging in de ondergrond zoals al wordt toegepast in Rotterdam (<https://www.urbanwaterbuffer.nl/>). Hiermee kan in gebieden met brak of zout water een voorraad zoet water worden verkregen voor irrigatie van stedelijk groen en grondwaterpeilbeheer in de zomer.

### Samenwerking

De innovatie binnen TKI-project Project Urban PhotoSynthesis (<https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/urban-photosynthesis-drie-functies-op-een-dak/>) kwam tot stand door de intensieve samenwerking van de volgende partijen::

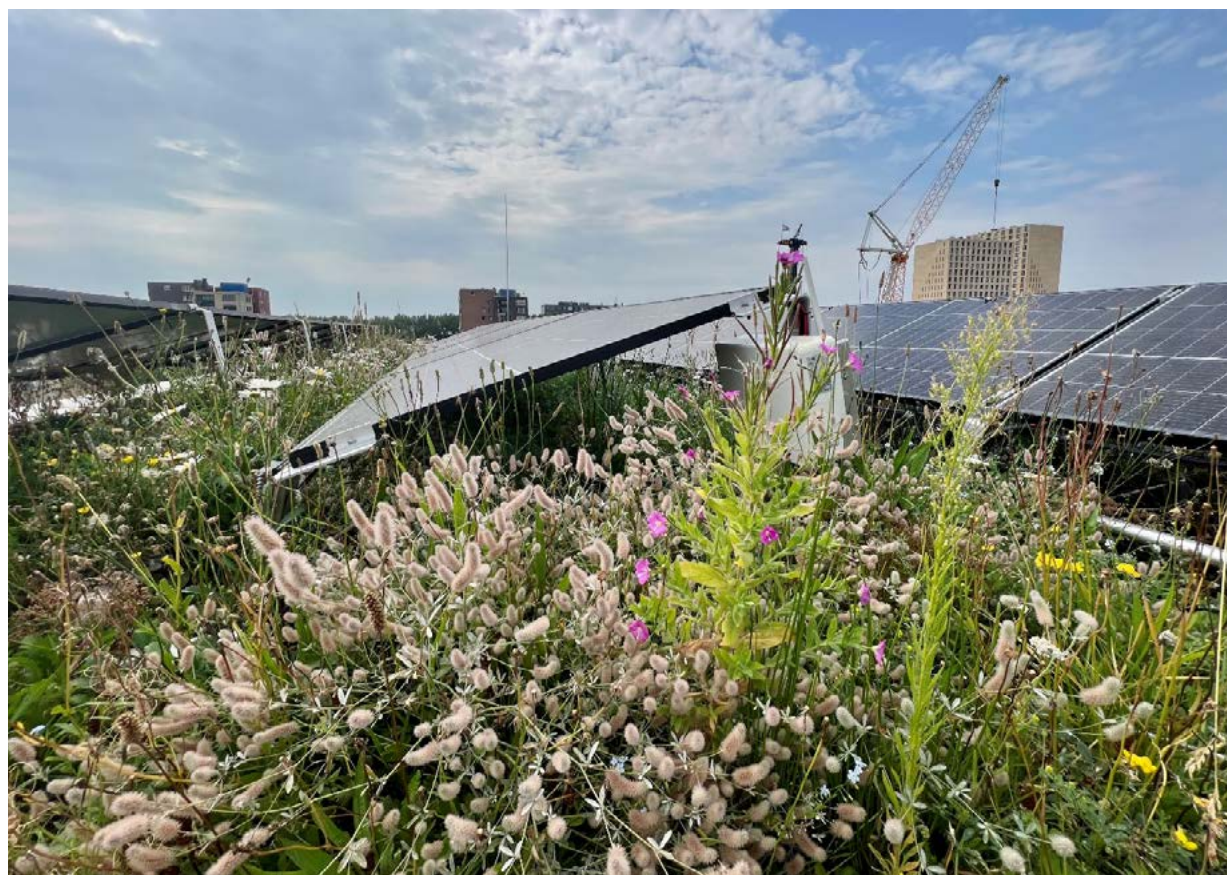
- Belanghebbende Aedes als hoofdinvesteerder;
- Gemeente Amsterdam vanuit de overheid;
- Ondernemingen als Permavoid en ECOFYT die bereid zijn tijd en materialen te investeren voor het innoveren;
- SDR en Techniplan als adviseurs op het gebied van installatietechniek;
- KWR voor de inbreng van onafhankelijke wetenschappelijke kennis en kunde.

TKI Urban PhotoSynthesis is een topvoorbeeld van een innovatieproject op basis van publiek-private samenwerking (PPS) en is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

### Conclusie

Als team is het gelukt om het idee van een watersensitief, natuurinclusief en energiebewust gebouw om te zetten naar een succesvolle werkelijkheid. Ons onderzoek

heeft laten zien dat er een win-win-win situatie ontstaat door water, energie en biodiversiteit te combineren. Het project biedt daarmee een blik op de toekomst van klimaatadaptief bouwen, die hopelijk andere projecten inspireert en laat zien dat er geen keuze hoeft te worden gemaakt tussen (blauw)groen óf zonnepanelen, maar dat de combinatie juist meerwaarde biedt.



**Afbeelding 7:** er zijn geen technische redenen meer te bedenken waarom niet alle daken op nieuwe gebouwen er niet zo uit zouden kunnen zien in Nederland.



# Gemeente Amsterdam



ECOFYT



KWR



techniplan adviseurs bv  
RAADGEVEND INGENIEURSBUREAU

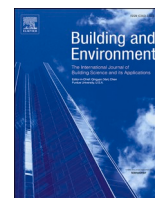
Aedes



### **3 Wetenschappelijk artikel ‘Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development’**

In dit hoofdstuk is het wetenschappelijke artikel waarin de resultaten van het effect van koeling door blauwgroene daken op de opbrengst van pv-panelen zijn gepubliceerd integraal overgenomen:

Van der Roest, E., Voeten, J. G., & Cirkel, D. G. (2023). Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development. *Building and Environment*, 244, 110704.



# Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and nature inclusive urban development

Els van der Roest<sup>a,b,\*</sup>, Joris G.W.F. Voeten<sup>c</sup>, Dirk Gijsbert Cirkel<sup>a</sup>

<sup>a</sup> KWR Water Research Institute, Groningehaven 7, 3430 BB, Nieuwegein, the Netherlands

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Stevinweg 1, 2638 CN, Delft, the Netherlands

<sup>c</sup> Team Climate Resilience, Wageningen Environmental Research, P.O. Box 47, 6700 AA, Wageningen, the Netherlands

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Blue-green roofs  
Photovoltaic (PV)- green roof  
Energy output  
Grey water recycling  
Constructed wetroof  
Evapotranspiration

## ABSTRACT

With an increasing demand for climate resiliency, water sensitivity, nature inclusiveness and energy efficiency in dense urban environments, the call for layered and multifunctional use of rooftops is rising. Vegetated roofs combined with Photo-Voltaic (PV) installations are an example of multifunctional and more effective use of available space, and well-irrigated systems could have an enhanced cooling effect. This research investigated a blue-green capillary irrigated solar roof with grey (shower-) water suppletion, with a constructed wetroof for grey water purification. Two full-scale commercial PV systems on twin rental apartment blocks in Amsterdam were analyzed, on a blue-green roof (BGR) versus a bitumen roof (BiR). The energy output, PV panel temperature, relative humidity and air temperature under the panels were monitored during 5 warmer months (June–October 2022). On average, a solar panel on the BGR is expected to produce 4.4% more energy than a solar panel on the BiR at similar irradiation. A clear difference in panel temperature on the roofs is only seen when the surface temperature of the roofs differs by at least 4.64 °C. Otherwise, other factors such as wind or albedo have probably more influence on the PV panel temperature and thus on PV power output.

## 1. Introduction

Expectations of multifunctionality and functional-layered urban design are rising. Urban environments need to reduce air pollution, adapt to climate change-induced drought, flooding and heat stress, and play a key role in the energy transition. At the same time, urban space is often scarce, and choices have to be made on how to utilize space effectively. Roofs are in general seen as an ideal location for local renewable energy production and on new buildings, PV panels are becoming indispensable to meet energy performance requirements. At the same time, greening roofs is seen as a promising solution for urban heat island mitigation, and stormwater runoff reduction [1,2] as well as reducing energy consumption for cooling, noise- and air pollution, while enhancing biodiversity [3,4]. Would this mean that we have to choose between energy production or the beneficial effects of vegetated roofs?

It is well known that the performance of PV modules decreases with increasing panel temperature, with a temperature coefficient of 0.2–0.4%/°C depending on the type of solar cell [5]. Moreover, there is a clear correlation found between the average daily air temperature under the PV module and the temperature of PV modules [6,7]. With these

facts in mind, it has been shown that green roofs and PV are not necessarily in conflict over the same space, but can be combined on the same surface with possible positive effects for the energy production of solar panels.

Green roofs namely have transpiring plants that cool the air in their surroundings by shifting the distribution of energy from warming up air (sensible heat,  $H$  in  $J m^{-2}$ ) to using energy for the evaporation of water (latent heat,  $LE$  in  $J m^{-2}$ ). If water is abundantly available,  $LE$  on green roofs can become as high as 95% of net incoming radiation,  $R_n$  ( $J m^{-2}$ ) on a long-term annual basis [2]. On a green roof, the evapotranspiration of the plants can thus lead to cooling of the air under the panels, which in turn positively affects the PV efficiency [8,9]. As mentioned, water availability is crucial for evapotranspiration. When water becomes scarce, rooftop plants stop transpiring and the ratio  $H/LE$  can change from below 0.1 to more than 10 [2] resulting in strong heating of air. In this respect, so-called blue-green roofs are an interesting option. These roof systems capture and store rainwater under the vegetation layer, reducing stormwater runoff [10] and provide the vegetation with water, ideally through sub-surface capillary irrigation, for longer periods of time [2,11]. It is interesting to note that Schindler et al. (2018) [12] suggested that regular irrigation of green roofs in Mediterranean

\* Corresponding author. KWR Water Research Institute, Groningehaven 7, 3430 BB, Nieuwegein, the Netherlands.

E-mail addresses: [els.van.der.roest@kwrwater.nl](mailto:els.van.der.roest@kwrwater.nl), [e.vanderroest@tudelft.nl](mailto:e.vanderroest@tudelft.nl) (E. van der Roest).



Nomenclature			
BiR	Bitumen roof	PV	photovoltaic
BGR	Blue-green roof	$Q_H$	sensible heat flux ( $W m^{-2}$ )
$H$	sensible heat ( $J m^{-2}$ )	$R_n$	net radiation ( $J m^{-2}$ )
$h_c$	convective heat transfer coefficient ( $W m^{-2}K^{-1}$ )	$R_s$	incoming short wave radiation ( $J m^{-2}$ )
kWp	kilowattpeak	Irr	Irradiance ( $W m^{-2}$ )
$LE$	latent heat ( $J m^{-2}$ )	$T_{amb}$	Ambient air temperature ( $^{\circ}C$ )
$\eta_{mp}$	the efficiency of a solar cell (%)	$T_a$	Air temperature underneath the solar panel ( $^{\circ}C$ )
$\eta_{mp,STC}$	Efficiency of a solar cell at standard test conditions (%)	$T_c$	Cell temperature ( $^{\circ}C$ )
$\alpha_p$	Solar cell temperature coefficient of power ( $\%/^{\circ}C$ )	$T_p$	Back of panel temperature ( $^{\circ}C$ )
RH	Relative humidity (%)	$T_s$	Roof surface temperature ( $^{\circ}C$ )
P	precipitation (mm)	$v$	Wind velocity ( $ms^{-1}$ )
		W	Watt ( $J/s$ )

climates could enhance the power output of PV-green roofs, and El Helow found water stress of the plants in Toronto causing them to evaporate less [13]. Osmá-Pinto & Ordóñez-Plata [14] state that a green roof will only give a thermal benefit as long as it has a satisfactory moisture level (in tropical climates).

Although still limited, the number of studies quantifying the effect of green roofs on energy production of solar panels is increasing and the results so far are summarized in Table 1. The available studies show a positive effect of green (non-irrigated) roofs on PV performance with between 0.5 and 6% increase in power output (see Table 1). Yet, many studies have a small set-up [8,12,14–16] of only one or a few panels. Moreover, the set-ups of PV systems on green and bitumen/black roofs are often not comparable in height [12,14,17–19], although the height is indicated as a factor that influences solar panel performance [20,21]. Therefore, there is a need for more large-scale systematic research on green roofs with PV systems whereby the height of the panels above the roof is comparable between set-ups [20,21]. Also, the application of a blue-green roof could lead to continuous evapotranspiration of the vegetation during dry (and warm) periods and thus positively affect the PV panel efficiency. Therefore, our research question is:

Is there an increased performance of solar PV above a capillary irrigated, blue-green roof vs a bitumen roof in a temperate maritime climate?

To answer this question, research is performed on two identical rental apartment buildings in Amsterdam (The Netherlands), providing a unique setting for a large scale field study. The novel system set-up combines a blue-green roof with PV, and has additional water supply by transforming grey water from showers to irrigation water with a shallow rooftop version of a horizontal flow constructed wetland, a so-called constructed wetroof [22]. This way we opt to demonstrate the win-win-win situation for future buildings, contributing to energy production, local water reuse, reduction of urban drought and increasing biodiversity while reducing heat stress and flooding as a result of heavy rainfall.

## 2. Material and methods

### 2.1. General experimental setup

PV panels were placed on the rooftops of two identical six-story, 34.4 m high apartment buildings in Amsterdam (latitude 52.35°N, longitude 4.84°E). One building was equipped with a blue-green roof (BGR) and the other with standard bitumen roofing (BiR) (Fig. 1). The climate of the research site is temperate maritime, with an average maximum day temperature of 22.5 °C in July, average global radiation of 393 MJ cm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>, average precipitation of 880 mm yr<sup>-1</sup> and an average Makkink reference crop evapotranspiration [25] of 627 mm yr<sup>-1</sup> (period 1992 until 2022, from weather station Schiphol, located 7 km from the research site). On the roof of the western building, we

installed a blue-green roof equipped with a Permavoid 85s rainwater retention and capillary irrigation system [26] and a substrate layer of 6 cm (see Fig. 2). The maximum water storage level in the Permavoid units was set to 60 mm. An added advantage of the full field surface capillary irrigation system is the fact that water availability for plants underneath and in between the rows of panels is equal. Because ample water is crucial for plant transpiration and thereby for cooling, we provided an additional water supply by transforming grey water from showers in the building on the roof using a shallow rooftop version of a horizontal flow constructed wetland, a so-called constructed wetroof [22]. This way a local source of irrigation water is available for the vegetated roof, even during dry spells, reducing the sewer loading and the use of drinking water for irrigation. The constructed wetroof [22] was integrated into a waterproof-lined section (ca 30 m<sup>2</sup>) of the substrate layer in the blue-green roof, to receive and treat grey water (shower only), coming from a collection, pre-treatment and pump tank in the basement of the building, with an overflow of the treated water into the Permavoid rainwater retention units underneath the substrate layer. Using the treated grey water, the water level in the water storage layer below the vegetation is kept at a minimum of 50 mm, ensuring a sufficient water supply for the vegetation [2]. The initial vegetation consisted of sedum mix blankets from the company Sempergreen. After placement of the sedum mix blankets, 26 plant species native to the Netherlands were sown on the blankets.

The installed Jinko 405 Wp PV panels (see Table 2 for specifications) are facing south (180°) and are fixed at a 20° angle and have a size of 1.03 × 1.86 m in landscape position. The total system capacity on each roof is 23.78 kWp (62 panels per roof) of which 6 panels per roof were chosen for more detailed monitoring (see Fig. 3 and next section). The panels for detailed monitoring were chosen such that the panels on the blue-green and bitumen roofs are as close together as possible, yet the panels closest to the roof edge are excluded from the study as they will be influenced more by i.e. wind effects and less by vegetation. A sunlight study (Fig. 3) has shown that due to adjacent tall buildings, the eastern roof (the black roof) receives quite a lot of shade in the morning hours in spring and autumn. In summer the effect is less pronounced, and in winter shade has a similar impact on both buildings. To be able to correct for shade effects, we installed a pyranometer on both roofs (see next section).

The lower side of the panels were positioned 32 cm above the surface, being either the soil surface or the rooftop surface on both roofs to make sure that the results from both roofs are not influenced by distance between the roof and the panel [20,21] (for details see Fig. 2). Rows are spaced at 73 cm between the high end of a panel in one row and the low end of the panel in the next row. The reduction in electric efficiency due to the warming up of the panels compared to the efficiency at standard test conditions can be calculated as follows:

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,STC} [1 + \alpha_p (T_p - T_{p,STC})] \quad (\text{Eq 1})$$

**Table 1**  
Literature overview of studies focusing on green roofs with PV.

Study	Measured parameters	Location	Measurement design	Minimum panel height above the roof	Angle	Measurement duration/period	Increase in PV power output
Alshayeb & Chang (2018) [6]	Under panel air temperature, roof surface temperature, relative humidity, PV panel temperature, PV output. Weatherstation; wind speed + direction, solar radiation, ambient temperature, relative humidity.	Kansas, USA	9 panels with black roof surface, 9 panels with green roof (sedum) surface.	20 cm	10°	One year	3.3–5.3% extra PV power output with warm weather. Year round 1.4%.
Schindler et al. (2018) [12]	Substrate temperature, air temperature in front of the panel and at under the panel, panel temperature, PV output.	Haifa, Israel	Experimental plots on 4 × 3.8 m wooden frames.	Black: 50 cm Green: 30 cm	20°	18 months	No difference measured
Osma-Pinto & Ordonez-plata (2019) [14]	Solar irradiation, air temperature, air velocity, DC, AC power.	Buramanga, Colombia	Green and black plots constructed on one roof.	25/50/75/100 cm Vegetation decreases space between panel/surface with ca. 20 cm	10°	13 tests lasting for at least one week	1–1.3%
Perez et al. (2012) [15]	Internal building temperature, near surface roof temperature, back-of-module temperature, PV output.	New York City, USA	Very small setup with miniature ‘houses’ (about 0.5 m high).	Unknown	45°	8 months (May–January)	2.42% for PV above a green roof vs. a gravel roof
Chemisana & Lamnatou (2014) [16]	Module temperature on panel, on the surface beneath the panel, in the surface and the air above panel, PV output.	Lleida, Spain	Tiny panels (36.5 × 19.5 cm) in wooden trays (0.9 × 1.30 m <sup>2</sup> ) on a gravel roof. With <i>Sedum</i> and <i>Gazania</i> .	2 cm (because of very small panels).	33°	2 months (June–July)	1.29–3.33% increase in maximum power output on a green vs gravel roof.
Köhler et al. (2007) [17]	PV power output, infrared temperature measurements	Berlin, Germany	Many different designs.	Green: 50 cm Bitumen: 0 cm	8–30°	5 years	6% for panels above green roof compared to bitumen.
Nagengast et al. (2013) [18]	Panel temperature on panel, PV output. Solar irradiance, measured parallel to the PV panel. Weather station on the roof with wind speed, direction, solar radiation, rain, ambient temperature	Pittsburg, USA	Large roof with different solar setups. 60 PV panels on moss green roof, 90 PV panels on black roof.	Black roof: 13 cm Green roof: 51 cm	15°	One year	Max. 0.5%
Alameddine et al. (2021) [19]	Biodiversity, air quality, thermal insulation properties, Stormwater runoff, PV output.	Sydney, Australia	335 panels (395 Wp) on a green roof, North facing, 346 panels (320 Wp) on the bitumen roof, East-West facing)	Not mentioned	15° on green, 5° on bitumen	234 days (8 months)	2.48% increased hourly energy output on green roof vs black roof.
Ogaili (2015) [20]	Temperature of back surface of panel, heat flux, air temperature, and windspeed under panel, surface temperature, DC voltage, DC current, AC power.	Portland, USA	Roof with PV rack with 0.3 m distance between panels, both with white, black and green ( <i>Dianthus</i> ) surface. Sensors were placed at two panels at the same time and conditions (surface/height) were changed over time	18 cm and 24 cm above roof surface	30°	At least 3 sunny days per condition, experiments lasted from July to September.	At 18 cm: 1.2% PV-green roof vs black roof, 0.8% more above a PV-green roof vs white roof. At 24 cm: 1.0% PV-green roof vs. black roof, 0.7% for a PV-green roof vs. white roof.
Osma et al. (2016) [23]	PV output.	Bucaramanga, Colombia	3 panels installed on a green (sedum, 7 cm substrate) roof, vegetation could be removed under a panel to obtain a black surface (black)	50 cm and 75 cm above the roof surface	10°	3 weeks	Lower height increases PV output by 2%, a green roof increases the PV output by ca 1%.
El Helow (2017) [24]	Temperature of back surface of panel, PV output, biomass data, ambient temperature.	Toronto, Canada	40 panels on a white roof, in four rows with green beds (grasses and wildflower species) underneath at different heights.	61 cm and 122 cm above the roof surface	–	About 7 weeks	Larger height increases cooling effect. More biomass growth (18%) with higher distance. WR vs GR – 1.1% higher on GR. GR 122 cm 2.2% higher output than at 61 cm.

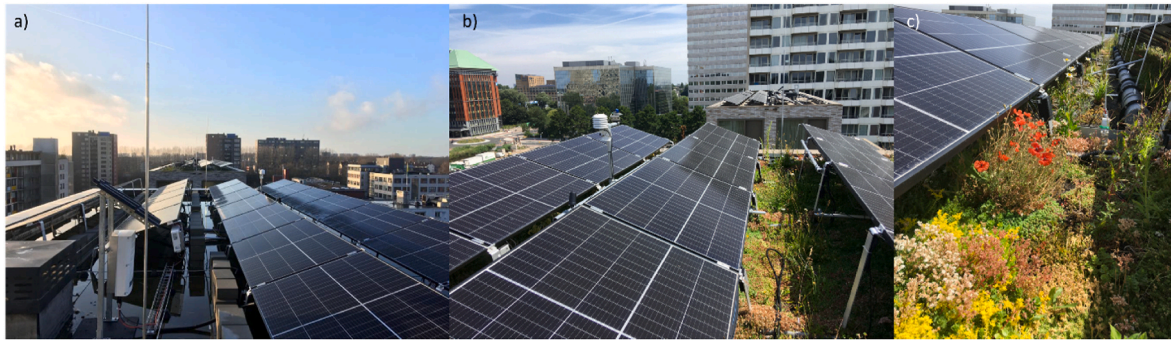


Fig. 1. Overview of (a) the BiR, (b) the BGR (c) the blooming BGR with the integrated constructed wetroof in the background (grey PVC water inlet distribution pipe).

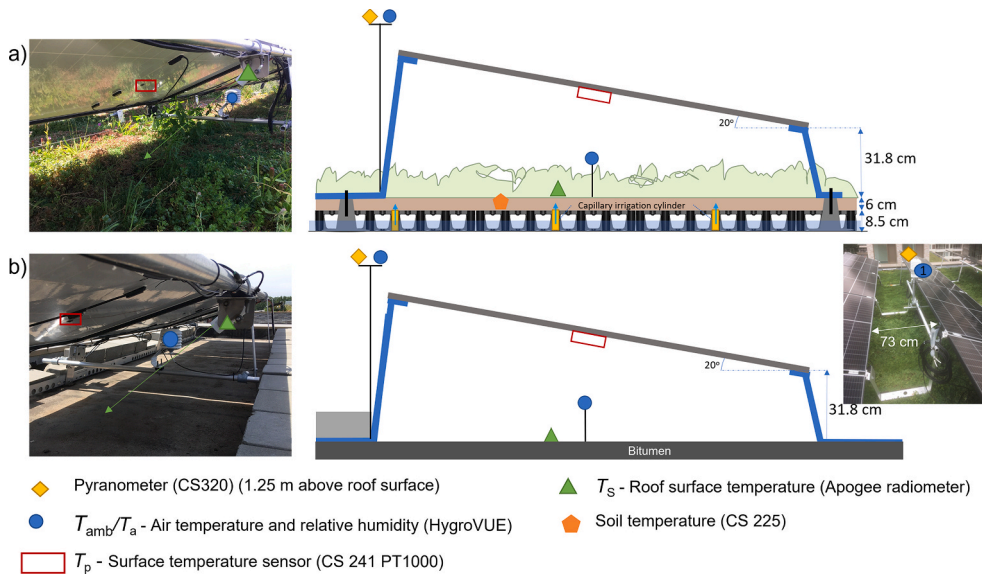


Fig. 2. Overview of sensor types and locations on the blue-green roof BGR (a) and bitumen roof BiR (b), including the design of the blue-green roof with capillary irrigation system below the substrate layer. The Apogee sensor is pointed towards the roof surface and thus measures the roof surface temperature below the panels. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

Table 2  
PV panel characteristics of the Jinko Solar 405Wp panels.

Panel characteristic	Unit	Value
Maximum Power Output at STC	W	385
Module efficiency ( $\eta_{mp,STC}$ )	%	20.17
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	$^{\circ}C$	$45 \pm 2$
Temperature coefficient of $P_{max}$ ( $\alpha_p$ )	$\%/^{\circ}C$	-0.35
Temperature coefficient of Voc	$\%/^{\circ}C$	-0.28
Temperature coefficient of Isc	$\%/^{\circ}C$	-0.048

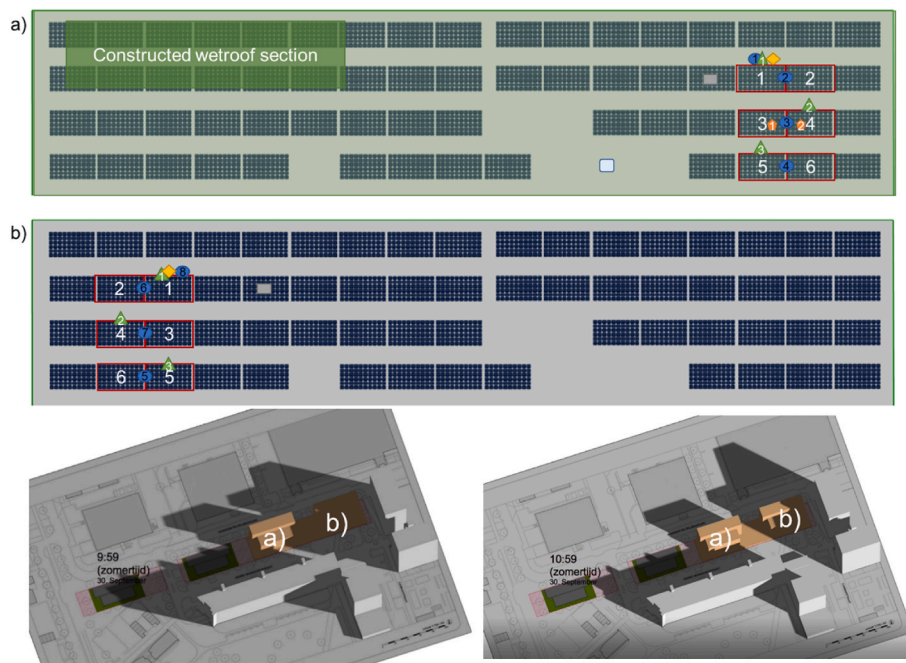
With  $\eta_{mp}$  (%) the efficiency of the solar cell,  $\eta_{mp,STC}$  the efficiency (%) at standard test conditions (STC),  $\alpha_p$  the temperature coefficient of power ( $P_{max}$ ) in  $\%/^{\circ}C$ ,  $T_p$  the panel temperature and  $T_{p,STC}$  the cell temperature at standard test conditions ( $25^{\circ}C$ ). Characteristic values for  $\eta_{mp,STC}$  and  $\alpha_p$  are given in Table 2.

2.2. Data acquisition

On each roof, a section of six panels was equipped with sensors to measure incoming short wave radiation  $R_s$  ( $J m^{-2}$ ), ambient air temperature  $T_{amb}$  ( $^{\circ}C$ ), air temperature below the PV panels  $T_a$  ( $^{\circ}C$ ), relative humidity  $RH$  (%), surface temperature  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ), substrate temperature

$T_{sub}$  ( $^{\circ}C$ ) and back of panel temperature  $T_p$  ( $^{\circ}C$ ) (Fig. 2 & Table 3). Precipitation  $P$  (mm) was measured with a rain gauge (ARG314, EML Ltd.) on the blue-green roof. Incoming shortwave radiation ( $R_s$ ) was measured at 1.25 m above the roof surface using pyranometers (CS320, Campbell Scientific Inc.). Air temperature ( $T_{amb}$  &  $T_a$ ) and relative humidity ( $RH$ ) were measured using a combined element (HygroVUE5, Campbell Scientific Inc.) placed in a radiation shield next to the pyranometer and below each pair of solar panels at a height of 40 cm. The surface temperature ( $T_s$ ) of the vegetation and bitumen was measured, in the shade, below three panels on each roof using infrared radiometers (SI-431-SS, Apogee Instruments). The substrate temperature ( $T_{sub}$ ) was measured at two locations below the panels on the blue-green roof using a temperature sensor string (CS225, Campbell Scientific Inc.). PV panel temperature ( $T_p$ ) was measured at the back of each of the six panels on each roof using back-of-module temperature sensors (CS241, Campbell Scientific Inc.). Measurements were collected at 10 min intervals, aggregated to hourly values, and logged on a datalogger (CR380, Campbell Scientific Inc.). Wind data was obtained from the nearby Schiphol weather station. Besides the detailed measurements the energy output of each panel on the two roofs is logged on an hourly basis. The PV panels are installed with microinverters to avoid string effects, enabling us to measure PV output of each panel at hourly intervals via the SolarEdge data platform.





**Fig. 3.** Schematic overview of the chosen panels for monitoring on the western blue-green roof (a), and the eastern bitumen roof (b). The panels for detailed monitoring are chosen in such a way that the differences in shading are kept to a minimum. The symbols represent sensors and are explained in Fig. 2, the green block on the blue-green roof (a) represents the part of the roof that is designed as a constructed wetroof, the rest of the roof is sedum in combination with 26 native plant species. The shade situation is given for 30 September 9:59 (bitumen roof is still in the shade) and 10:59 (half of the bitumen roof is in the sun). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

**Table 3**

Overview of sensor type, characteristics and location. Sensor locations are shown in Fig. 2.

Sensor	Accuracy	Operating temperature	Amount	Location
HygroVUE5 air temperature and relative humidity (RH)	±0.3–0.4 °C ±1.8–3% (RH)	−40 °C–70 °C	3 per roof/1 per roof	Under panel/ roof/1.25 m above panel
CS320 pyranometer	±2.6%	−50 °C–60 °C	1 per roof	1.25 m above panel
Apogee radiometer SI-431-SS	±0.2 °C	−30 °C–65 °C	3 per roof	Mounted in the middle of the panel
CS 241 PT1000	±(0.15 + 0.002t)°C	−40 °C–150 °C	6 per roof	Placed on the back side of the panel (in the middle)
ARG314 Raingauge	99% up to 120 mm/h	+1 °C–70 °C	1 (on blue-green roof)	Open location on the roof
CS225 Temperature sensor	±0.2 °C	−55 °C–85 °C	2 (on blue-green roof)	In soil under panel (3 cm depth)

### 2.3. Data analysis methods

The presented data are from the measurement period of June up until October 2022. To answer the research question, the performance in terms of solar PV output of both roofs should be compared. Yet, as discussed in the introduction, the PV output is influenced by panel temperature, which is subsequently influenced by air and/or roof temperature. To better understand the relationships between temperature and power output, we have done multiple analyses, and used methods that are commonly applied in similar research on green roofs with PV systems.

#### - 1. Data cleaning

We have only used daytime values (Irradiation >4 Wm<sup>-2</sup>) and removed outliers of PV output. If the average energy output of 6 measured panels was higher than their maximum capacity (385 Wh) or the energy production was very low (<3 Wh) while the irradiation was >100 Wm<sup>-2</sup>, the data were excluded from further analysis.

#### - 2. PV performance analysis

To determine the differences in PV performance under different weather conditions, the data were divided into bins of both temperatures (per 5 °C) as well as irradiation (per 100 Wm<sup>-2</sup>), according to the same method as Nagengast et al. (2013) [18]. Due to differences in shading on both roofs in the early morning hours mostly during autumn and winter (Fig. 3), we have chosen to not compare the roofs at similar moments in time, but at similar irradiance. This was possible because we have placed two irradiance sensors at both roofs in the same area as the measured PV panels. Besides an orderly presentation of data, we performed a linear regression analysis (OLS method) on the daytime dataset for both roofs, to find a relationship between irradiance and solar PV output, with the intercept at 0 (at zero irradiation, there will be no PV output) and a 95% confidence interval, which is a common method in other research on green roofs with PV systems [8,15,18,27].

#### - 3. Multi-linear regression of PV performance with more parameters

To obtain more insights on the factors influencing solar panel performance, a correlation table was made followed by a multi-linear regression analysis for the most important parameters while avoiding collinearity. Similar methods have been applied in earlier research [13, 18]. In the combined dataset, all measurements from both roofs were merged, whereby roof type was added as a parameter (integer, BGR = 1, BiR = 0). A correlation table was obtained for the correlation values between PV performance and roof type, irradiation Irr, relative humidity RH, PV back panel temperature T<sub>p</sub>, roof surface temperature T<sub>s</sub>, air temperature under PV panel T<sub>a</sub>, the ambient air temperature above the roof (1.25 m) T<sub>amb</sub>, and wind (nearly Schiphol weather station).



- 4. Temperature analysis and estimation of sensible heatflux

Besides solar panel output, differences in temperature and sensible heatflux between both roofs provide valuable data as well for comparison and to further explore how differences in solar output can be explained. Therefore, both maximum as well as average differences in temperature of PV back panel temperature  $T_p$ , roof surface temperature  $T_s$ , air temperature under PV panel  $T_a$ , the ambient air temperature above the roof (1.25 m)  $T_{amb}$  were calculated. Segmented linear regression [28] was used to explore relationships between differences in  $T_s$ ,  $T_a$  and  $T_p$ .

The sensible heat flux  $Q_H$  ( $Wm^{-2}$ ) is proportional to the difference between surface temperature and air temperature measured at a certain level times a convective heat transfer coefficient [29].  $Q_H$  was calculated according to:

$$Q_H = h_c \cdot (T_s - T_a) \tag{Eq 2}$$

With  $h_c$  the convective heat transfer coefficient ( $W m^{-2}K^{-1}$ ).  $h_c$  can be approximated using the empirical Jürges formula which is used in urban canopy models [29–31]:

$$h_c = 5.9 + 4.1v \cdot \left( \frac{511 + 294}{511 + T_a} \right) \tag{Eq 3}$$

With  $v$  the wind velocity ( $ms^{-1}$ ). Given the complexity of urban surfaces, it is questionable whether the application of an empirical heat transfer coefficient will provide exact values for  $Q_H$ . Xu & Asawa [31] mention an uncertainty of  $\pm 15\text{--}20\%$  associated with the use of Jürges formula. Calculated values are, however, valuable for comparison between the two roofs and to other applications.

3. Results & discussion

3.1. PV performance

To assess the effect of roof type on PV performance, we present the average difference in PV power output and categorized the data based on both ambient temperature and solar irradiance. Overall, the BGR is constantly performing better than the BiR in all solar irradiance categories (see Table 4). The absolute difference is increasing as well, which is expected as the absolute solar output also increases with higher irradiance. A similar trend is seen for all temperature categories, although there is a significant outlier at the 5–10 °C/100–200  $Wm^{-2}$  category (with only 1.2% of the data). The data thus suggest that for temperatures above 10 °C, regardless of the amount of irradiation, the PV system on the BGR produces more power than the BiR.

Table 4

Average difference in solar PV output of 6 panels on each roof presented as solar output BGR– solar output BiR in kW (kWh/hr) is shown. The data are categorized according to solar irradiance and ambient temperature. Table layout inspired by Nagengast et al. (2013) [18].

Solar Irradiance ( $Wm^{-2}$ ) - Irr	Ambient temperature (°C) - $T_{amb}$										Weighted average BGR – BiR per panel (kW)	% of data
	< -5	-5–0	0–5	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	30–35	>35		
0–100				0.2	2.0	0.1	-0.7	-1.0			0.6	23.9
100–200				-6.3 <sup>a</sup>	4.8	3.3	-0.8	-1.0			1.7	16.7
200–300					8.9	2.0	1.3	0.9	7.3 <sup>a</sup>	-4.7 <sup>a</sup>	2.5	14.0
300–400					14.5	4.8	6.8	-4.1	4.7 <sup>a</sup>	-1.8 <sup>a</sup>	5.2	11.9
400–500					-1.8	9.4	3.8	17.2	19.6 <sup>a</sup>		3.1	11.1
500–600					6.7 <sup>a</sup>	-0.7	11.2	6.4	15.1	10.4 <sup>a</sup>	6.1	7.7
600–700					4.8 <sup>a</sup>	16.7	9.8	2.1	19.0	5.6 <sup>a</sup>	6.1	7.6
700–800						13.2	13.0	16.3	12.3 <sup>a</sup>	-3.5 <sup>a</sup>	9.8	4.9
800–900						19.0 <sup>a</sup>	14.2	10.0			9.0	2.1
900–1000						8.1 <sup>a</sup>					4.1 <sup>a</sup>	0.1
>1000												
Weighted average BGR – BiR (kW)	0	0.0	0.0	-1.1	4.6	5.5	6.0	5.6	13.6	1.2		
% of Data	0	0.0	0.0	1.2	16.7	49.4	24.4	6.8	1.2	0.2		

<sup>a</sup> Value is based on 1–3 datapoints.

To quantify this effect further, we have done a linear regression analysis with all daytime data for both roofs with irradiation versus PV output. The 95% confidence interval is shown in Fig. 4, and the confidence intervals of both regression lines do not overlap, which means the difference in PV output between the two roofs is significant. Based on the regression values (see Table 5), the BGR roof would on average produce 4.4% more electrical energy at similar irradiance.

This result is on the higher side of the range based on available studies (see Table 1), for which we discuss two possible explanations. Firstly, different studies [20,21] pointed out that differences in enhanced solar panel performance between studies are influenced by the height of the panels above the roof. The higher the panels are placed, the larger the cooling effect of the airflow is. This could have influenced the almost insignificant results of Nagengast et al. [18] who conclude that only if the temperature is  $> 25\text{ °C}$ /irradiance  $> 800\text{ }Wm^{-2}$  a green roof would make a difference on PV panel output, otherwise it would not. However, the height of the panels above the green roof was 53 cm, and for the black roof 13 cm, so this could explain the small difference. The study of Alshayeb & Chang [6] could have been influenced by the different heights as well. Here, the sedum is placed under already installed panels which results in less height between the surface and panel on a green roof than with a black surface. The same seems to be true for Schindler et al. [12], although the windy climate could have influenced the results here as well, combined with the low evaporation of plants on the green roof. Our study is one of the few studies with a long-term large-scale set-up that paid attention to comparable heights between PV systems on both roof types. Secondly, our BGR has a continuous water supply and capillary irrigation, and therefore as shown in Cirkel et al. (2018) [2] and Busker et al. (2022) [11] evapotranspiration will not decline due to water limitation during dry periods, as in other studies [12]. An inconvenience of our setup was the difference in shadow effects between the BGR and BiR. Therefore, the BGR is longer exposed to sunlight than the BiR, so even at similar irradiation, the BGR is already receiving sunlight for a longer period and thus the solar panels could already have warmed up slightly, this could have influenced our results. That means that our results could be on the conservative side, so with similar shadow effects, the BGR could possibly perform even better than measured here. Yet, these moments occur only at the beginning of the day with lower irradiation ( $< 200\text{ }Wm^{-2}$  so the bottom left corner of the graph), when the effect is less significant due to low PV output, and where most data points are located (40.6%), thus a possible effect is damped. Furthermore, we know from the temperature data (see section 3.3, 3.4 & 3.5 for a further analysis) that the solar panels on the bitumen roof quickly warm up when receiving irradiation, thus the effect diminishes within about 1 h. Therefore, the influence on the results of the difference in shading on both roofs is minimal.

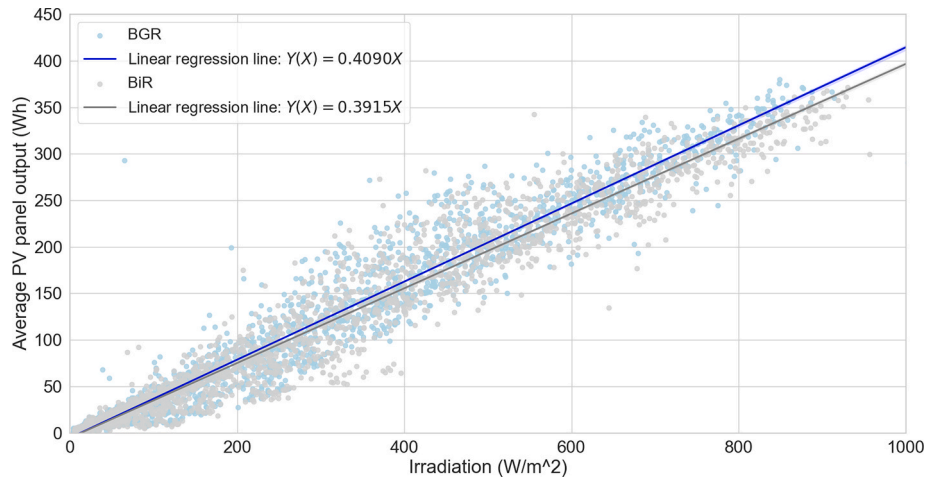


Fig. 4. Linear regression results including a 95% confidence interval for the average PV panel output versus irradiation in  $Wm^{-2}$  for both the BiR) and BiR based on all hourly daytime data, outliers removed.

Table 5

Linear regression results (OLS method) for irradiation vs PV panel output for both roof types.

	Number of observations	Coefficient (irradiation/PV panel output)	t-statistic	P-value	R <sup>2</sup>
BiR	2048	0.3915	291.7	0.000	0.977
BGR	2048	0.4090	294.1	0.000	0.977

3.2. Multi-regression analysis

We have performed a multi-linear regression analysis on the combined dataset of the two roofs to determine if the roof type has a significant effect on the PV panel output, roof type was added to the dataset as a parameter (BGR = 1, BiR = 0).

Then the correlation coefficients of all measured parameters were analyzed (Table 6) to check which parameters influence each other. The roof type has only a small negative correlation with  $T_s$ , meaning that the BGR tends to result in a lower roof surface temperature. On the other parameters, no effect is visible, which means as well that there is no risk of multicollinearity with other parameters. Moreover, we see that  $T_s$  and  $T_{amb}$  are highly correlated and thus should not both be included in the multilinear regression equation. The same line of reasoning is valid for the  $T_s$  and  $T_p$ , and for  $T_{amb}$  and  $T_p$ . Therefore, we have chosen to include the air temperature  $T_{amb}$ , and not  $T_s$  and  $T_p$  in the regression analysis. Furthermore, irradiance ( $Irr$ ) was included as we know it highly affects PV output. To assess the effect of roof type, two analyses were done.

First, we have taken only the irradiation and air temperature into

Table 6

Correlation coefficients for roof type (here interpreted as BG = 1), air temperature above the roof ( $T_{air}$ ), irradiation ( $Irr$ ), relative humidity (RH), PV panel back temperature ( $T_p$ ), roof surface temperature under the panel ( $T_s$ ) and air temperature under a PV panel ( $T_{a,p}$ ) for the combined dataset of the two roofs (day values).

	Roof type	$T_{amb}$	$Irr$	RH	$T_p$	$T_s$	$T_a$
Roof type (1 is BG, 0 is BiR)	1						
$T_{amb}$	-0.02	1					
$Irr$	-0.03	0.47	1				
RH	0.02	-0.74	-0.65	1			
$T_p$	-0.02	0.79	0.87	-0.78	1		
$T_s$	-0.21	0.90	0.61	-0.76	0.87	1	
$T_a$	-0.03	0.99	0.53	-0.76	0.84	0.93	1

account and evaluated how these two parameters explain the variance PV power output. With an  $R^2 = 0.943$  the coefficients were significant ( $P < 0.05$ ) at a 95% confidence interval (Table 7). Secondly, we have added the roof type as a factor in the regression analysis. The roof type proves to be significant as well ( $P < 0.05$ ) and the  $R^2$  for the combined analysis of irradiation, solar panel temperature and roof type was 0.944 (Table 8). Thus, the roof type proves to be a significant factor, although it does not explain the variance in the data significantly more than without the roof type included as a factor.

3.3. Differences in surface temperature  $T_s$ , Air temperature below panels  $T_a$  and back of panel temperature  $T_p$

The daytime roof surface temperature  $T_s$  measured underneath the PV panels was lower on the BGR compared to the BiR.  $\Delta T_s$  (BiR – BGR) increases with higher irradiation and can become as high as 12 °C on a clear summer day (Fig. 5). Mean daytime  $T_s$  were lower on the blue-green roof with a statistically significant difference of 2.39 °C. Although less pronounced, the BiR indicates a measurable, positive effect on the daytime near-roof air temperature  $T_a$  measured below the PV panels. During the measurement period,  $T_a$  was on average 0.19 °C higher on the BiR, this difference was however statistically non-significant. A maximum  $\Delta T_a$  of 2.63 °C was reached on August 14, 2022 at 14:00 p.m. Mean  $T_p$  was almost equal on the BiR and BGR (mean  $\Delta T_p = -0.05$ ). There were several periods where positive  $\Delta T_p$ 's were measured, reaching a maximum  $\Delta T_p$  of 6.63 °C on September 2, 2022.

However, as is also visible in Fig. 5, there are negative spikes in the  $\Delta T_s$ ,  $\Delta T_a$  and especially  $\Delta T_p$  data, indicating a higher  $T_p$  on the BGR compared to the BiR. This is caused by shade from a nearby tall building on the BiR in the morning before 11 a.m. (Fig. 3). Even with the sun at its highest azimuth (around the 21st of June) we still see these shadow effects causing discrepancies in the amount of irradiance on both roofs, resulting in lower temperatures on the BiR. Besides these shading effects, there are also periods with negative  $\Delta T_p$ ,  $\Delta T_a$  (Fig. 5) and

Table 7

Multi-regression analysis results for PV panel output variance explained by air temperature and irradiation.

	Coefficient	Standard Deviation	t-statistic	P-value
Intercept	4.86	1.665	2.93	0.003
$Irr$	0.415	0.002	237	0.000
$T_{air}$	-0.599	0.096	-6.25	0.000
R <sup>2</sup>			0.943	
No. of observations			4210	

**Table 8**

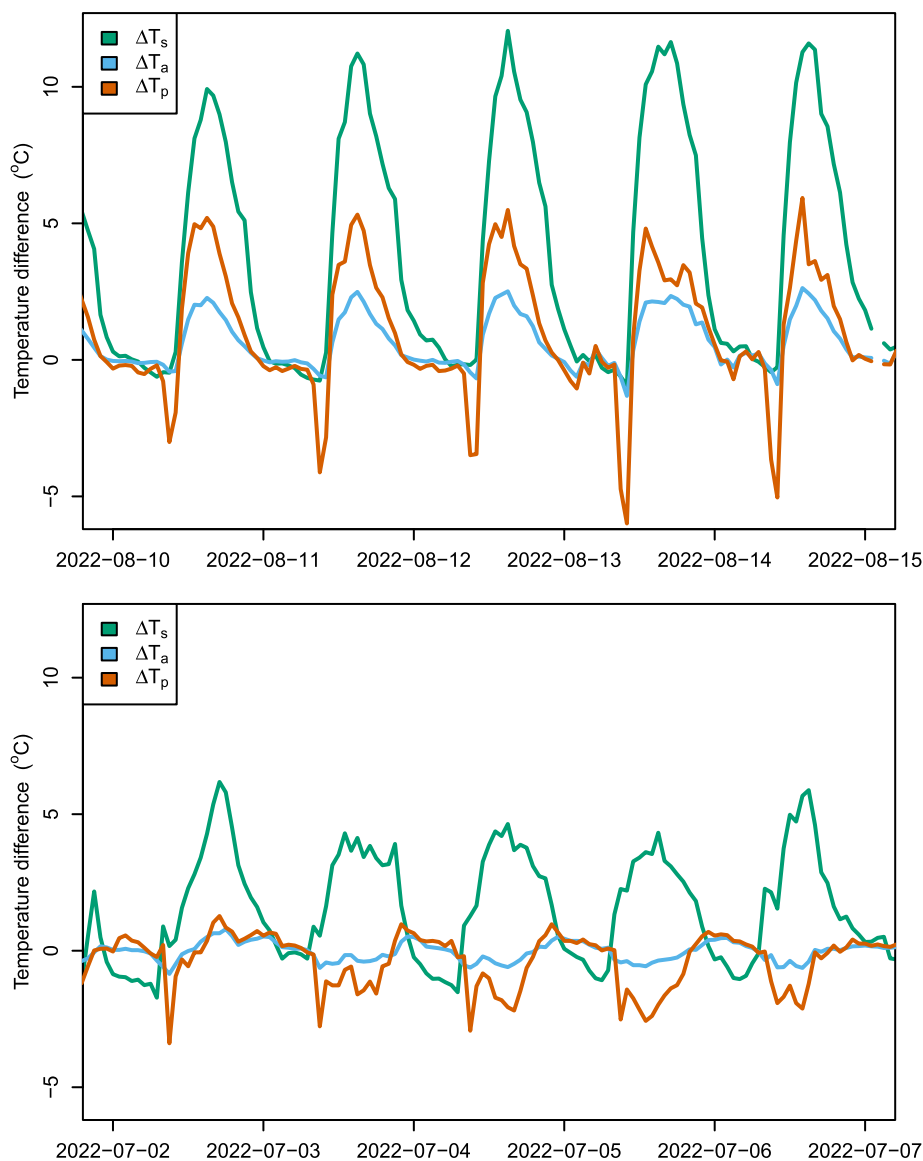
Multi-regression analysis results for PV panel output variance explained by air temperature, irradiation and roof type.

	Coefficient	Standard Deviation	t-statistic	P-value
Intercept	1.943	1.69	1.15	0.25
Irr	0.415	0.002	237	0.000
$T_{\text{air}}$	-0.598	0.095	-6.27	0.000
Roof type	5.50	0.74	7.44	0.000
$R^2$		0.944		
No. of observations		4210		

sometimes even negative  $\Delta T_s$ . So, although the mean surface temperature of the BGR is significantly cooler than the BiR and we saw in Fig. 5 that there seemed to be a smaller but similar effect on  $\Delta T_a$  as well as  $\Delta T_p$ , there are also periods where temperatures measured at the BiR are lower than at the BGR.

### 3.4. Differences in estimated sensible heat flux

Sensible heat flux estimates  $Q_H$ , below the PV panels, were higher at the BiR compared to the BGR with a significant mean difference of  $52.5 \text{ W m}^{-2}$ . During our measuring period estimated  $Q_H$  at the BGR stayed below  $60.0 \text{ W m}^{-2}$  and were often very small, or even negative during daytime (Fig. 6). At the BiR estimated  $Q_H$  was much higher with a mean value of  $50.2 \text{ W m}^{-2}$  and peaks reaching  $291.1 \text{ W m}^{-2}$ . Negative sensible heat flux estimates point to a so-called oasis effect, where energy is transferred from the surrounding air to the plants and used for evapotranspiration. The observed negative daytime  $Q_H$  estimates on the BGR coincide with cooler  $T_a$  and  $T_p$  on the BGR (Fig. 5). Note that the above  $Q_H$  estimates are based on temperature measurements in the shade of PV panels, resulting in relatively low sensible heat flux densities. In literature values for  $Q_H$  reaching up to 280 and  $750 \text{ W m}^{-2}$  were found for respectively green and bitumen roofs without the shade of PV panels in a similar climatic setting [29].



**Fig. 5.** Hourly differences in temperature ( $\Delta T_s$ ,  $\Delta T_a$  and  $\Delta T_p$ ) between the BiR and the BGR during the periods 10–15 August and 2–7 July. A positive value means that the temperature measured at the bitumen roof is higher than at the blue-green roof. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

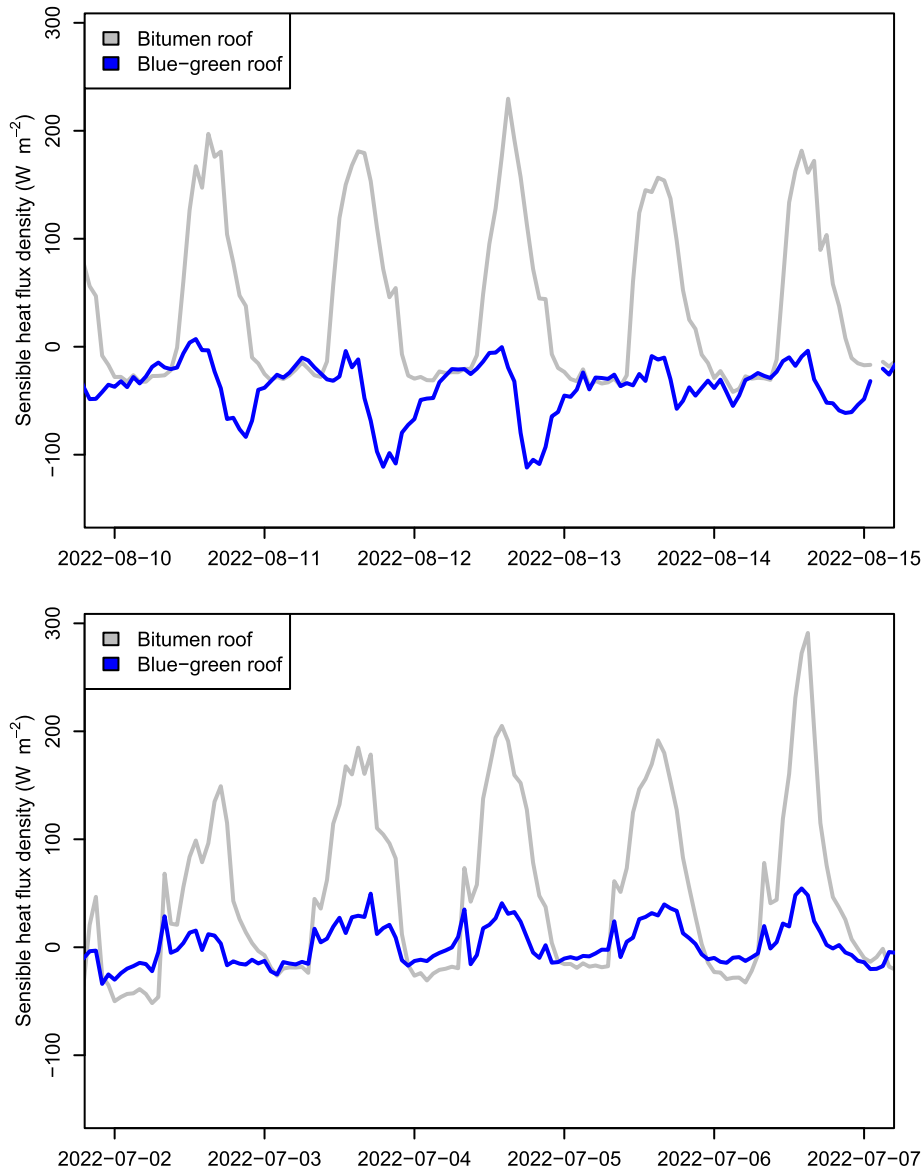


Fig. 6. Estimated sensible heat flux densities  $Q_H$  on both roofs for two periods: 10–15 August and 2–7 July.

### 3.5. Nonlinear relation between $T_s$ , $T_a$ and $T_p$

From earlier studies, we know that a clear temperature effect of green-solar roofs [6,8] versus bitumen roofs is expected. There are several explanations for our more ambiguous results. On the BGR energy is stored in the substrate and water storage layer, buffering temperature fluctuations at the surface. As a result, the cooling rate of the bitumen roof is higher over the course of the night resulting in lower nocturnal  $T_s$  than the green roof [29]. Note that in our setup  $T_s$  is measured in the shade of the solar panels on both roofs, which delays the warming effect of irradiation in the morning. Another explanation can be found in rainfall. After rainfall events, not all rainfall is drained from the BiR immediately and the roof surface stays wet for several hours or even days until the remaining water is evaporated, cooling down the BiR surface during that process. Wind effects can also play a role, mainly in the sense that the cooling effect of wind can overrule the effects of roof temperature. For example, Osma-Pinto & Ordóñez-Plata [14] conclude that the air velocity is more influential than the roof type, at least in warm and tropical climates. Lastly, positive effects of the BGR besides the roof temperature could be the difference in albedo between both roofs [32].

Additional analysis was done to further understand the temperature effects. We found that there is a significant positive non-linear relationship between  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_a$  ( $R^2$ : 0.69) and between  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_p$  ( $R^2$ : 0.43) (Fig. 7). Fitting segmented linear regression models [28] on the data results in two linear sections with different slopes for each relation with an estimated significant breakpoint at  $\Delta T_s = 4.64$  °C (st. err. 0.14 and 0.31). Below this temperature difference there is almost no measurable relation between  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_a$  or  $\Delta T_p$ . The cooling effect of the BGR thus has to result in an at least 4.64 °C lower surface temperature compared to the BiR, before an effect on  $\Delta T_a$  and  $T_p$  becomes measurable.

### 3.6. Reflection on vegetation-PV feedback and interaction

Our results confirm that vegetation has a positive influence on PV performance. From the literature we know there is also an effect of PV on the vegetation; PV systems on green roofs lead to lower evapotranspiration due to the shade effect of the PV panels [27]. In warm climates, the shading of the PV panels can even lead to faster growth of vegetation and 50% lower pigment levels [14]. The type of plant chosen also affects the power output performance [21]. During our measurements,



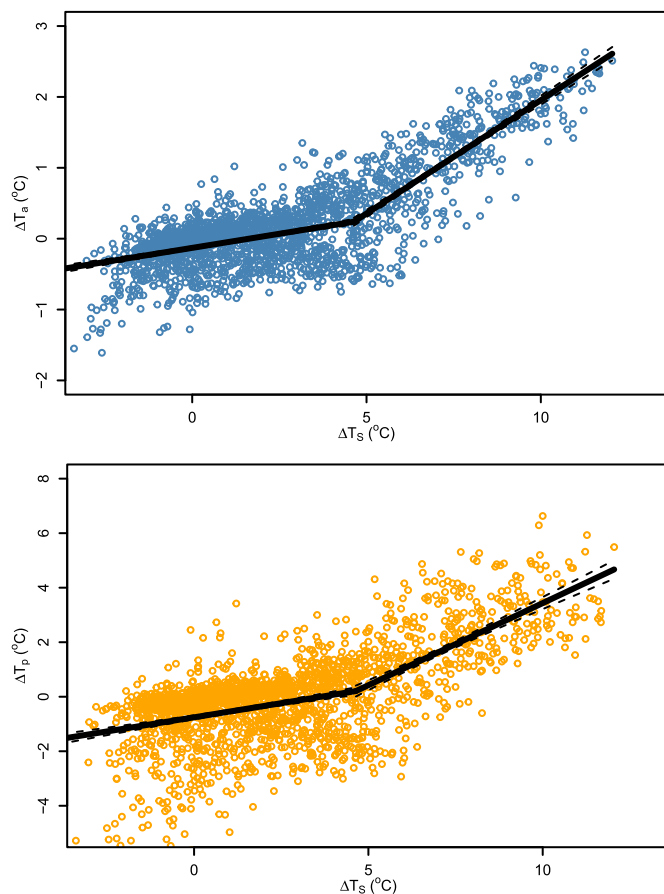


Fig. 7. Relation between  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_a$  and  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_b$  and fitted segmented linear regression lines with 95% confidence intervals.

relatively low sedum species still dominated the vegetation, but (taller) native herbs started to slowly overtake the vegetation and gradients in plant growth became visible between shaded and sunny areas (Fig. 8). Below the panels, plants remained relatively low. In the sunny paths between the panel rows plant growth was more abundant. If succession proceeds to a grass/herbs-dominated vegetation with taller plants, this might also affect air circulation underneath the PV panels. As we discussed in the previous section air velocity can be an important factor in cooling PV panels [14]. Taller vegetation might therefore result in a less positive effect on PV output than observed during our measurement period. Lysimeters and more detailed wind and radiation measurements are needed to further investigate the effects of the solar panels and plant development on wind effects, actual evaporation and energy fluxes. Moreover, fault detection algorithms [33] could possibly assist in the online monitoring of the plant height and potential influence on PV



Fig. 8. Impression of the vegetation in between the PV panels (sunnier area) and under the PV panels (shaded area).

output to know when maintenance of the vegetation would be necessary. On the other hand, algorithms developed for the optimal planning and packing of rooftop PV systems [34,35] could be extended to include the possibility of (blue)-green roofs as well.

### 3.7. Considerations on energy use of the grey water system

The grey water system in the building provided a more continuous water supply for the vegetation and therefore prevented drought stress. As a result, transpiration and the cooling effect of the plants can be considered optimal for the meteorological conditions during the measurement period. However, the abundant supply of water comes at a price. Energy is needed to pump the collected shower water from the basement to the roof. We have calculated that the (multi-05) pump which has to overcome 34 m of height difference can pump about  $1 \text{ m}^3$  per hour at full capacity (900 W). Depending on if the water supply to the roof is only functioning during spring and summer, or during the whole year, this means that between 65 and 160 kWh per year is needed for pumping. The expected extra production of the BGR versus the BiR with 62 panels is about 970 kWh/year (405 Wp panels, based on the 4.4% higher power production). Thus, 7–17% of the expected extra power production is needed for the water supply on the roof, which is significant, yet manageable. Moreover, the water supply is not only influencing (indirectly) the solar panel output, but is used for the vegetation on the balconies and lower roofs as well. Overall, the extra solar power output is expected to more than compensate the pump energy, the water system meanwhile is also enhancing other positive effects of the building such as reducing heat stress, increased urban plant coverage, increased biodiversity and better stormwater management [16,21].

### 3.8. Implications for water- and energy-sensitive buildings

The design and construction of the twin buildings, where we performed our research, required a lot of extra effort from all parties involved because of the non-conventional water system in the building and multifunctional use of the rooftops for energy, vegetation and water management. The most important lessons learned are:

- Sustainability goals like water circularity, stormwater management, biodiversity, energy production and improved liveability for the tenants have to be considered and included in the designs from the start of the process because these goals affect architecture, structural design, rooftop waterproofing systems and water- and power infrastructure from the basement all the way up to the roof.
- Where in the past the roof was considered lost space where for example HVAC, ventilation and other technical infrastructure could be placed where convenient, with the multifunctional approach it now becomes important to minimise the amount of space used for

this infrastructure and cluster it in limited and specific areas on the roof.

- Normally the roof is the ‘final’ stage of waterproofing the building, yet to create a multifunctional rooftop landscape, specialists from different fields (ventilation and HVAC, power, water management, landscaping, solar PV) should be involved in design and construction. This requires understanding, extra cooperation and design, and smart building planning between these specialists, to construct the roof in an efficient manner.
- When creating buildings with novel and innovative water management systems, it will take at least one year after construction (covering all seasons) to optimise the systems and get experience in actual required maintenance to be incorporated in the final maintenance manual. Clearly appoint responsibility and budget time and money for these tasks.

#### 4. Conclusion

We have investigated the performance of a full-scale solar PV system on a bitumen roof and a blue-green capillary irrigated roof on twin buildings in Amsterdam. Based on a 5-month data collection period (June–October 2022) we see a clear positive effect of the BGR on the PV performance. On average, a solar panel on the BGR is expected to produce 4.4% more energy than a solar panel on the BIR at similar irradiation, in a North-West European climate. The positive effect is seen at air temperatures above 10 °C, regardless of irradiation. A clear difference in panel temperature on the roofs is only seen when the surface temperature of the roofs differs by at least 4.64 °C. Otherwise, other factors such as wind or albedo have probably more influence on the PV panel temperature and thus on PV power output. Overall, we have shown that a blue-green PV roof creates a win-win-win situation both for PV production, the local water balance as well as biodiversity. Future research could better investigate wind and albedo effects, different heights of solar panels above the roof and development of the vegetation and the effects of this changing vegetation on PV output.

#### Funding

This publication is a result of the TKI project Urban Photosynthesis and is co-financed with PPS funding from the Topconsortia for Knowledge & Innovation (TKI's) of the Ministry of Economic Affairs and Climate, the Netherlands.

#### Data

The dataset of the sensors and PV output of the measured panels on both roofs that was used for this publication can be accessed via <https://doi.org/10.4121/679c03a2-bcae-46b9-a4f0-91c230708ca5.v1>.

#### CRedit authorship contribution statement

**Els van der Roest:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Joris G.W.F. Voeten:** Writing – review & editing, Visualization, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization. **Dirk Gijsbert Cirkel:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

#### Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Co-author Joris Voeten has been previously employed by Permavoid B.V. until 30th of June 2021.

#### Acknowledgements

We would like to thank Aedes Care BV/Plan 8 Vastgoedontwikkeling BV for facilitating this research by making it possible to perform this full-scale research on their water-sensitive and green building and facilitating the research in all possible ways. We furthermore thank the technical project partners for the fruitful collaboration and technical base underneath the project: Permavoid B.V., ECOFYT, Techniplan Adviseurs BV, and SDR Elektrotechniek BV. We would like to thank Solnet for letting us monitor the solar panels and install sensors on them.

Also, we thank the municipality of Amsterdam for their cooperation on the research concerning the tenants and the outreach/communication. Lastly, Pim Post and Diederik van Hasselt (deceased) are thanked for their help with the statistical analysis.

#### References

- [1] A. Scherba, D.J. Sailor, T.N. Rosenstiel, C.C. Wamser, Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment, *Build. Environ.* 46 (12) (2011) 2542–2551, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.012>, 10.1016/j.buildenv.2011.06.012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.012>.
- [2] D.G. Cirkel, B.R. Voortman, T. van Veen, R.P. Bartholomeus, Evaporation from (Blue-)Green roofs: assessing the benefits of a storage and capillary irrigation system based on measurements and modeling, *Water* 10 (9) (Sep. 2018) 1253, <https://doi.org/10.3390/w10091253> [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2073-4441/10/9/1253>.
- [3] D.B. Rowe, K.L. Getter, The role of extensive green roofs in sustainable development, *Hortscience* 41 (5) (2006) 1276–1285.
- [4] M. Shafique, R. Kim, M. Rafiq, Green roof benefits, opportunities and challenges – a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90 (April) (2018) 757–773, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.
- [5] B.R. Paudyal, A.G. Imenes, Investigation of temperature coefficients of PV modules through field measured data, February, *Sol. Energy* 224 (2021) 425–439, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.013>, 10.1016/j.solener.2021.06.013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.013>.
- [6] M. Alshayeb, J. Chang, Variations of PV panel performance installed over a vegetated roof and a conventional black roof, *Energies* 11 (5) (May 2018) 1110, <https://doi.org/10.3390/en11051110> [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1110>.
- [7] R. Ciriminna, F. Meneguzzo, M. Pecoraino, M. Pagliaro, Solar green roofs: a unified outlook 20 Years on, *Energy Technol.* 7 (6) (2019) 1–7, <https://doi.org/10.1002/ente.201900128>.
- [8] H.H.K. Ogaili, Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in Combined Systems, Portland University, 2015 [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/5dcf/fec3a8c3a99179ab934cb4569182d3885095.pdf>.
- [9] C. Catalano, N. Baumann, Biosolar roofs: a symbiosis between biodiverse green roofs and renewable energy, *City Green* 15 (2017) 42–49 [Online]. Available: [https://www.nparks.gov.sg/-/media/cuge/ebook/citygreen/cg15/cg15\\_05.pdf?la=en&hash=742D039957FCA9CB7640F52498428F81CAAF42A9](https://www.nparks.gov.sg/-/media/cuge/ebook/citygreen/cg15/cg15_05.pdf?la=en&hash=742D039957FCA9CB7640F52498428F81CAAF42A9).
- [10] M. Shafique, R. Kim, D. Lee, The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas, *Nat. Environ. Pollut. Technol.* 15 (2) (2016) 715–718.
- [11] T. Busker, et al., Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes, June 2021, *J. Environ. Manag.* 301 (2022), 113750, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750>, 10.1016/j.jenvman.2021.113750. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750>.
- [12] B.Y. Schindler, L. Blaustein, R. Lotan, H. Shalom, G.J. Kadas, Green roof and photovoltaic panel integration : effects on plant and arthropod diversity and electricity production, *March, J. Environ. Manag.* 225 (2018) 288–299, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>, 10.1016/j.jenvman.2018.08.017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>.
- [13] D. El Helou, Performance of Green Roof Integrated Solar Photovoltaics in Toronto, University of Toronto, 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1807/89540>.
- [14] G. Osma-Pinto, G. Ordóñez-Plata, Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates, *Sol. Energy* 185 (April) (2019) 112–123, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>, 10.1016/j.solener.2019.04.053. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.053>.
- [15] M.J.R. Perez, N.T. Wight, V.M. Fthenakis, C. Ho, Green-roof integrated pv canopies-an empirical study and teaching tool for low income students in the South Bronx, *World Renew. Energy Forum, WREF 2012, Incl. World Renew. Energy Congr. XII Color. Renew. Energy Soc. Annu. Conf.* 5 (1) (2012) 4046–4052.
- [16] D. Chemisana, C. Lamnatou, Photovoltaic-green roofs : an experimental evaluation of system performance, *Appl. Energy* 119 (2014) 246–256, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>, 10.1016/j.apenergy.2013.12.027. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>.
- [17] M. Köhler, W. Wiartalla, R. Feige, Interaction between PV-systems and extensive green roofs, in: *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 2007, pp. 1–16 [Online]. Available: <http://www.worldgreenroof.org/files/pdf/Manfred-KoehlerMinneapolisPV.pdf>.

- [18] A. Nagengast, C. Hendrickson, H. Scott Matthews, H.S. Matthews, Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice, *Energy Build.* 64 (2013) 493–502, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.009>, 10.1016/j.enbuild.2013.05.009. [Online]. Available: .
- [19] H. Alameddine, L. Sharman, P. Irga, R. Fleck, F. Torpy, E. Wooster, Green Roof & Solar Array-Comparative Research Project, 2021 [Online]. Available: <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/150142>.
- [20] H. Ogaili, D.J. Sailor, Measuring the effect of vegetated roofs on the performance of photovoltaic panels in a combined system, *J. Sol. Energy Eng.* 138 (6) (Dec. 2016) 1–8, <https://doi.org/10.1115/1.4034743> [Online]. Available: <https://asmedigitcollection.asme.org/solarenergyengineering/article/doi/10.1115/1.4034743/380622/Measuring-the-Effect-of-Vegetated-Roofs-on-the>.
- [21] M. Shafique, X. Luo, J. Zuo, Photovoltaic-green roofs: a review of benefits, limitations, and trends, October 2019, *Sol. Energy* 202 (2020) 485–497, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.101>, 10.1016/j.solener.2020.02.101. [Online]. Available: .
- [22] M. Zapater-Pereyra, S. Lavrić, F. van Dien, J.J.A. van Bruggen, P.N.L. Lens, Constructed wetroofs: a novel approach for the treatment and reuse of domestic wastewater, *Ecol. Eng.* 94 (2016) 545–554, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.052>.
- [23] G. Osmá, G. Ordóñez, E. Hernández, L. Quintero, M. Torres, The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions, in: *Energy Production and Management in the 21st Century II: the Quest for Sustainable Energy*, vol. 1, 2016, pp. 147–156, <https://doi.org/10.2495/eq160141>.
- [24] D. El Helow, J. Drake, L. Margolis, Testing the potential synergy of green roof-integrated photovoltaics at the university of Toronto green roof innovation testing (GRIT) laboratory, 32nd RCI International Convention and Trade Show no. August (2017) 229–235.
- [25] G.F. Makkink, Testing the penman formula by means of lysimeters, *J. Inst. Water Eng.* 11 (1957) 277–288.
- [26] J. G. W. F. Voeten, L. van de Werken, and A. P. Newman, “Demonstrating the Use of Below-Substrate Water Storage as a Means of Maintaining Green Roofs -Performance Data and a Novel Approach to Achieve Public Understanding,” *World Environmental and Water Resources Congress*. ASCE Library, West Palm Beach, FL, USA, pp. 12–21, Feb. 02, 2016 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/9780784479841.002>.
- [27] A. Jahanfar, J. Drake, B. Gharabaghi, B. Sleep, An experimental and modeling study of evapotranspiration from integrated green roof photovoltaic systems, July 2019, *Ecol. Eng.* 152 (2020), 105767, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105767>, 10.1016/j.ecoleng.2020.105767. [Online]. Available: .
- [28] V.M.R. Muggeo, segmented: an R Package to fit regression models with broken-line relationships, *R. News* 8 (1) (2008) 20–25 [Online]. Available: <https://journal.r-project.org/articles/RN-2008-004/RN-2008-004.pdf>.
- [29] J. Heusinger, S. Weber, Comparative microclimate and dewfall measurements at an urban green roof versus bitumen roof, *Build. Environ.* 92 (2015) 713–723, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.002>, 10.1016/j.buildenv.2015.06.002. [Online]. Available: .
- [30] F. Chen, et al., The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, *Int. J. Climatol.* 31 (2) (2011) 273–288, <https://doi.org/10.1002/joc.2158>.
- [31] X. Xu, T. Asawa, Systematic numerical study on the effect of thermal properties of building surface on its temperature and sensible heat flux, *Build. Environ.* 168 (October 2019) 2020, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106485>.
- [32] M.P. Brennan, A.L. Abrahamse, R.W. Andrews, J.M. Pearce, Effects of spectral albedo on solar photovoltaic devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 124 (2014) 111–116, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.046>, 10.1016/j.solmat.2014.01.046. [Online]. Available: .
- [33] E.A. Sarquis Filho, et al., Practical recommendations for the design of automatic fault detection algorithms based on experiments with field monitoring data, *Sol. Energy* 244 (August) (2022) 227–241, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.022>, 10.1016/j.solener.2022.08.022. [Online]. Available: .
- [34] S. Jung, J. Jeoung, H. Kang, T. Hong, Optimal planning of a rooftop PV system using GIS-based reinforcement learning, June, *Appl. Energy* 298 (2021), 117239, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117239>, 10.1016/j.apenergy.2021.117239. [Online]. Available: .
- [35] H. Ren, Y. Sun, C.F. Norman Tse, C. Fan, Optimal packing and planning for large-scale distributed rooftop photovoltaic systems under complex shading effects and rooftop availabilities, March, *Energy* 274 (2023), 127280, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127280>, 10.1016/j.energy.2023.127280. [Online]. Available: .

## 4 Meetresultaten grijswatersysteem

In dit hoofdstuk zijn integraal passages opgenomen uit het KWR-rapport 2023.104 waarin separaat is gerapporteerd over het doorstroom helofytenfilter voor douchewaterzuivering. Niet opgenomen is de samenvatting. De rapportage is te downloaden via: <https://library.kwrwater.nl/publication/71259482/een-horizontaal-doorstroomd-helofytenfilter-voor-douchewaterzuivering-op-daken/>

### 4.1 Aanleiding en achtergrond

#### 4.1.1 Grijswater voor groen

In vergelijking met conventionele sedum-daken blijken blauw-groene daken een aanzienlijk betere bijdrage te leveren aan het bergen en vertraagd afvoeren van hemelwater, koelen van de lucht en biodiversiteit (Cirkel et al., 2018; Busker et al., 2022). Hoewel in gematigde gebieden in de regel voldoende water beschikbaar is, nemen langdurige droogteperiodes ook daar toe. Daardoor kan de hoeveelheid geborgen hemelwater onvoldoende blijken, juist wanneer de koelende eigenschappen gewenst zijn. Als alternatief wordt in veel gevallen de drinkwaterkraan geopend om aan te vullen en de vegetatie te laten overleven. De beschikbaarheid van drinkwater staat echter ook onder druk en toenemend drinkwaterverbruik is ongewenst, juist in periodes van hitte en droogte. Binnen TKI-project Urban Photosynthesis onderzoeken we het koelende effect van een optimaal verdampende vegetatie op PV-panelen en de mogelijk hogere opbrengst die dit bewerkstelt (Van der Roest et al., 2023). Een altijd optimale watervoorziening is dan cruciaal. Om deze reden en bovenstaande overwegingen is besloten om douchewater te hergebruiken voor irrigatie van de dakvegetatie.

#### 4.1.2 Zuivering van douchewater als onderdeel van het blauwgroene dak

Er is gekozen voor douchewater omdat dit een relatief schone grijswaterstroom is en de kans op calamiteiten kleiner is dan bijvoorbeeld bij water van wasbakken waarin mogelijk ongewenste stoffen in geloosd worden. Desalniettemin moet het douchewater gezuiverd worden voor toepassing als irrigatiewater, temeer omdat het systeem uiteindelijk overstort op het hemelwaterriool. Binnen het TKI-project is besloten om te onderzoeken of het mogelijk is om de grijswaterzuivering te integreren in het blauwgroene dak en daarmee een 'nature-based' oplossing te ontwikkelen. Uiteraard moet het systeem wel minimaal vergelijkbaar zijn met conventionele zuiveringssystemen. Bijkomende uitdaging is het gewicht, een systeem op een dak mag niet te zwaar zijn. Dikke substraatpakketten zijn dan ook niet mogelijk. De twee identieke gebouwen van Mannoury bieden een unieke kans om het nieuwe systeem (horizontaal doorstroomd helofytenfilter, gebouw 3) te vergelijken met een conventioneel systeem (MembraanBioReactor met microfiltratiemembraan, gebouw 4).

Om te onderzoeken hoe de effluentkwaliteit van het filter zich ontwikkelt, is een monitoringscampagne opgezet waarbij primair de samenstelling van het douchewater en het effluent van het helofytenfilter is onderzocht gedurende de periode november 2021- juni-2023 . Ter vergelijking is ook het effluent van de MBR onderzocht en zijn de uitstroompunten naar het hemelwaterriool onderaan het gebouw bemonsterd. Het systeem is primair onderzocht met betrekking tot de waterkwaliteit, er zijn nog geen andere criteria (kosten, energiegebruik, etc.) vergeleken.

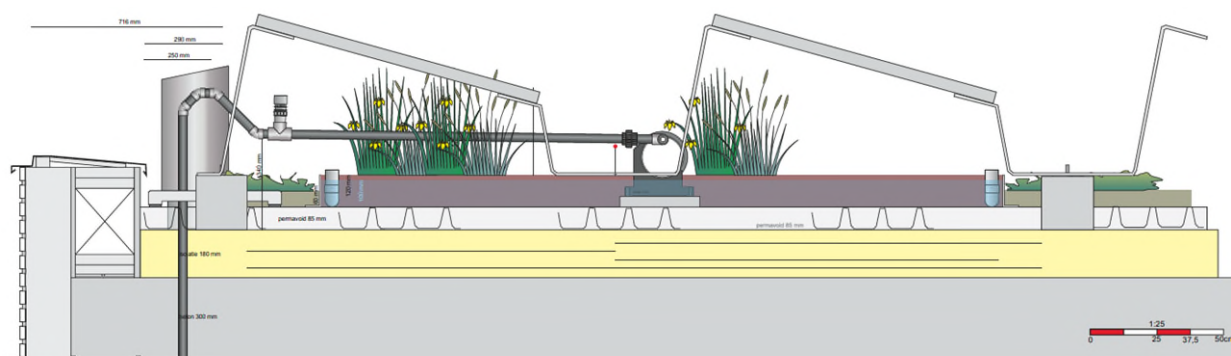


## 4.2 Systeembeschrijving

### 4.2.1 Horizontaal doorstroomd helofytenfilter

Douchewater is een relatief schone afvalwaterstroom. Toch is voor hergebruik zuivering nodig. Binnen dit onderzoek is onderzocht of dit restwater geïntegreerd in een blauw-groen dak gezuiverd kan worden met een zogenaamde nature-based oplossing in de vorm van een horizontaal doorstroomd helofytenfilter. Kenmerkend hiervoor is de relatieve eenvoud van het systeem en de inzet van micro-organismen en planten om het water te zuiveren. Gewicht speelt bij toepassing op daken een grote rol. Om deze reden is gekozen voor een dunne substraatlaag van 120 mm die maximaal tot 100 mm verzadigd. Als substraat is gekozen voor gebroken geëxpandeerde kleikorrels (bekend als 'Leca' of 'argex') Dit is materiaal met een zeer hoge porositeit en groot specifiek oppervlak. Voorafgaand aan het de bouw is een testopstelling gebouwd om de retentietijd en daarmee het benodigde volume en oppervlak te bepalen. Om het benodigde volume te bepalen is tevens een schatting gemaakt van de douchewatersamenstelling. Over de samenstelling van douchewater is echter slechts zeer beperkt informatie beschikbaar. Voor de influent watersamenstelling is op basis van (beperkt) beschikbare literatuur de volgende schatting gemaakt: CZV: 89 mg/l, BZV: 36 mg/l, Kj-N: 1.87 mg/l, NH<sub>4</sub>: 1.56 mg/l, P<sub>tot</sub>: 1.63 mg/l en MBAS: 75 mg/l).

De uiteindelijke pilot op gebouw 3 is ontworpen op een belasting van 1.400 liter/d, resulterend in een retentietijd van 3 dagen, een bedbreedte van 2,50 m en een lengte van 9,78 m. Het bed wordt in het midden gevoed via een verdeelbuis en gedraineerd door twee drains aan weerszijden van het bed (Figuur 4-1). Door de uitstroom via een bypass te knijpen, loopt het bed langzaam leeg. Bij opstart van het systeem bleek minder douchewater dan verwacht de verzameltank te bereiken. Navraag bij de installateur leerde dat slechts de helft van de douches (15 stuks) op het grijswatersysteem is aangesloten omdat "dat wel voldoende zou zijn". Om deze reden zijn de batches naar het helofytenfilter gehalveerd naar een batch van 350 liter in de ochtend en een batch van 350 liter in de avond, resulterend in 700 liter per dag. Deze hoeveelheid bleek voldoende om de zomerdroogte van 2022 te overbruggen.



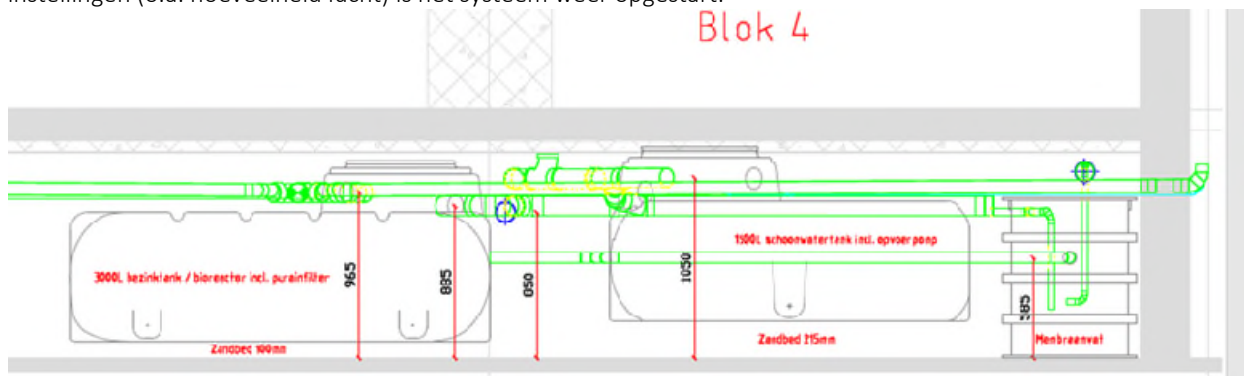
Figuur 4-1 Het door ECOFYT ontworpen lichtgewicht horizontaal doorstroomde helofytenfilter zoals geplaatst op het dak van gebouw 3.



Figuur 4-2 Aanleg van het horizontaal doorstroomde helofytenfilter op het dak van Mannoury gebouw 3

#### 4.2.2 Conventionele membraanbioreactor

Om de resultaten van het horizontaal doorstroomde helofytenfilter te kunnen vergelijken is in de kelder van gebouw 4 een conventionele membraanbioreactor geplaatst die is ontworpen en geleverd door Mijn Waterfabriek. Het ging hierbij om een 3 m<sup>3</sup> bezink/bioreactortank inclusief purainfilter, een 1,5 m<sup>3</sup> schoonwatertank en een los membraanvat met Aqualoop membraanstation. De componenten zijn geleverd door Intewa. Normaliter kan de membraanunit in de bioreactortank worden geplaatst, door lokale omstandigheden was dit hier niet mogelijk. In de membraanunit zijn PE holle vezel membranen toegepast met een poriediameter van 0.1-0.3 µm (nominaal 0.2 µm). Bij plaatsing kon geen vrij verval overstort naar het vuilwaterriool worden gerealiseerd. Als alternatief is een sanibroyeur-installatie geplaatst om overtollig water en vuil af te voeren. Het systeem is hierdoor kwetsbaarder geworden voor storingen. Door stroomuitval is de sanibroyeur uitgevallen geweest en de bioreactortank overgelopen. Als geluk bij een ongeluk kwam hierbij ook een foutaansluiting tussen de bioreactortank en de schoonwatertank aan het licht. Door deze wanverbinding kon er water uit de bioreactor direct overstorten in de schoonwatertank. Na schoonmaak van de tank en verwijdering van de wanverbinding en aanpassing van enkele instellingen (o.a. hoeveelheid lucht) is het systeem weer opgestart.



Figuur 4-3 Doorsnede van het in gebouw 4 geplaatste MBR systeem

## 4.3 Meetresultaten & discussie

### 4.3.1 Douchewaterkwaliteit

Het verzamelde douchewater is afhankelijk van de parameter 4 tot 9 keer bemonsterd. Een overzicht van de gemiddelde samenstelling is opgenomen in Tabel 2 in bijlage IV. Voor enkele stoffen zijn de resultaten visueel weergegeven (Figuur 4-4). De pH en geleidbaarheid varieerden nauwelijks over de meetperiode en waren gemiddeld 7.6 en 831  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectievelijk. Ook de chlorideconcentratie was behoorlijk constant rond een gemiddelde van 86 mg/l. De BZV en CZV bedroegen gemiddeld 51 en 147 mg/l. Dit ligt iets boven de schattingen van Hijnen & Groot-Marcus (2001) die uitgaan van een chemisch zuurstofverbruik van 4.45 g  $\text{O}_2$  pppd in combinatie met een gemiddelde hoeveelheid douchewater per persoon per dag van 46.5 liter (Bakker et al., 2021), wat resulteert in een CZV van 96.3 mg/l en uitgaande van een verhouding CZV:BZV van 7.6:3, in een BZV van 38 mg/l. Het verschil kan waarschijnlijk worden toegewezen aan een, gezien de milieubewustheid van de bewoners, lager waterverbruik per douchebeurt dan het CBS gemiddelde. Daarnaast is er een mogelijke effect van urine in het douchewater op CZV en BZV. Het zuurstofgehalte van het douchewater in de verzamel-tank is laag met gemiddeld 0.14 mg/l. De hoeveelheid wasactieve stoffen is uitgedrukt als mg/l anion actieve detergenten. Hijnen & Groot-Marcus (2001) gaan uit van 0.84 g wasactieve stoffen voor douchen per persoon per dag, resulterend in een douchewaterconcentratie van 18.2 mg/l. De door ons gevonden gemiddelde concentratie bedraagt 4.2 mg/l en is dus aanzienlijk lager. Wel zijn er uitschieters gemeten tot 12 mg/l.

In douchewater zijn altijd nutriënten aanwezig. De gemiddelde concentraties totaal P, totaal N en Kjeldahl-N bedragen bijvoorbeeld respectievelijk 2.34, 24.8 en 26 mg/l. Vooral de hoge stikstofconcentratie is opvallend. Totaal N en Kjeldahl-N zijn nagenoeg gelijk, de verschillen zitten in de meetonzekerheid. De stikstof in het douchewater bestaat hiermee volledig uit organische stikstof, maar vooral ook ammonium (gemiddeld 22.5 mg/l). De meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is de aanwezigheid van urine in het douchewater.

Zink als proxy voor metalen in het douchewater en als actief ingrediënt tegen roos in shampoos heeft een gemiddelde concentratie van 42.4  $\mu\text{g}/\text{l}$  met een enkele uitschieter naar 65  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Waar deze uitschieter door is veroorzaakt, is niet duidelijk. Douchewater bevat hoge aantallen bacteriën. Hijnen & Groot-Marcus (2001) komen op basis van ATP-metingen uit op  $10^7$  bacteriën per ml. Een deel van deze bacteriën is, inherent aan douchen, van fecale oorsprong. In de studie van Hijnen & Groot-Marcus (2001) bedroeg de mediane waarde van thermotolerante bacteriën van de coligroep (indicator voor fecale besmetting)  $1.6 \cdot 10^4$  kve/l in douchewater. De hoeveelheid aangetroffen thermotolerante bacteriën van de coligroep was echter zeer variabel en liep op tot maximaal  $5.0 \cdot 10^6$  kve/l. De door ons in het douchewater aangetroffen concentratie bacteriën van de coligroep is gemiddeld  $3.0 \cdot 10^6$  kve/l oplopend tot maximaal  $9.0 \cdot 10^6$  kve/l. Een deel van deze bacteriën is daadwerkelijk *E. coli*. De concentratie *E. coli* bedroeg gemiddeld  $2.0 \cdot 10^6$  kve/l oplopend tot  $6.0 \cdot 10^6$  kve/l. De fecale belasting zit hiermee aan de hoge kant van de door Hijnen & Groot-Marcus (2001) geschetste range.

De uiteindelijke belasting t.a.v. CZV, BZV en nutriënten blijkt hoger dan vooraf geschat. De concentratie wasactieve stoffen blijkt juist lager te zijn. Doordat ook de hoeveelheid water is gehalveerd bij gelijkblijvend volume substraat was er vertrouwen dat het filter toch voldoende goed zou presteren.

### 4.3.2 Effectiviteit horizontaal doorstroomd helofytenfilter

Door het naar het Blauw-groene dak uitstromende effluent van het horizontaal doorstroomde helofytenfilter te bemonsteren is inzicht verkregen in de werking van dit systeem (middelste kolommen Tabel 2). Het chemisch en biologisch zuurstofverbruik neemt sterk af tot respectievelijk gemiddeld 9.6 en 1.8 mg/l (afname resp. 96.5% en 93.4%). Hiermee wordt ruim voldaan aan de CZV/BZV lozingsgrenswaarden voor IBA klasse IIIb systemen<sup>1</sup> van respectievelijk 200 en 40 mg/l in enig steekmonster (CIW/CUWVO, 1999).

De verwijdering van fosfaat uit het douchewater blijkt zeer effectief. De concentraties orthofosfaat,  $P_{\text{totaal}}$  en  $P_{2\text{O}_5 \text{ totaal}}$  nemen af tot beneden de rapportagegrens van respectievelijk 0.02, 0.05 en 0.12 mg/l (afnames resp. 98.8, 97.9 en 97.5 %). Ook zink wordt goed verwijderd, tot onder de rapportagegrens van 10  $\mu\text{g}/\text{l}$ . De goede verwijdering

<sup>1</sup> Strengste IBA klasse voor lozing op kwetsbare watersystemen

van zink en fosfaat is toe te schrijven aan de hoge sorptiecapaciteit van de in het filter toegepaste gebroken argex korrels. De verwijdering van wasactieve stoffen (anion actieve detergenten) verloopt eveneens zeer effectief met een afname van 98.7 % tot beneden de rapportagegrens van 0.05 mg/l. %. De verwijdering van stikstof uit het water verloopt naar verhouding minder effectief wat is toe te wijzen aan de beperkte omzetting van ammonium. De concentratie  $\text{NH}_4\text{-N}$  neemt met 74.2% af tot gemiddeld 5.8 mg/l. Hieraan gerelateerd neemt  $\text{N}_{\text{tot}}$  af met 70% tot 7.5 mg/l. Hoewel totaal stikstof hiermee voldoet aan de richtlijn, is ammonium iets verhoogd ten opzichte van de lozingsgrenswaarde van 4 mg/l voor IBA IIIb systemen. De verhoogde waarde wordt veroorzaakt door de relatief hoge ammoniumconcentratie in het douchewater en het ontbreken van beluchting in de verzameltank waardoor de oxidatie van ammonium (nitrificatie) traag op gang komt. Na afronden van de meetperiode is daarom een beluchting geplaatst in deze tank om zo de omzetting van ammonium te versnellen. Overigens zal in het traject na het helofytenfilter verdere omzetting en opname van ammonium plaatsvinden. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 3.4.

De verwijdering van fecale bacteriën in het horizontaal doorstroomde filter is beperkt. De concentraties bacteriën van de coligroep en *E.coli* dalen gemiddeld tot respectievelijk  $4.0 \cdot 10^4$  en  $2 \cdot 10^4$  kve/l, een daling van ca. 2 logeenheden. Ten aanzien van *E.coli* voldoet het water hiermee aan de hergebruiksnorm voor irrigatie klasse D en bijna aan klasse C<sup>2</sup>. Naast bacteriën kunnen ook virussen in het water aanwezig zijn en is nagroei van opportunistische pathogenen mogelijk. Zonder aanvullende desinfectie moet directe blootstelling (o.a. bij sproeien/vernevelen) dan ook worden voorkomen (zie ook Hamilton et al., 2018). Voor irrigatie van niet-voedselgewassen via de bodem (bijv. via het capillaire irrigatiesysteem op de blauwgroene daken) voldoet het irrigatiewater aan de minimale eisen.

De continue beschikbaarheid van water en voedingsstoffen in het helofytenfilter maar ook in het aangrenzende blauwgroene dak bleek een goede groeiplaats van harig wilgenroosje (*Epilobium hirsutum*), wat als zaad via de lucht is aangevoerd naar de daken. Hoewel niet ongewenst vanuit ecologisch en zuiveringstechnisch opzicht, kan deze plant relatief hoog worden (tot 1.5 m). Hierdoor ontstond schaduw op de zonnepanelen. Door de jaarlijkse onderhoudsbeurt op deze plant af te stemmen kan dit door snoeien/trekken onder controle worden gehouden.

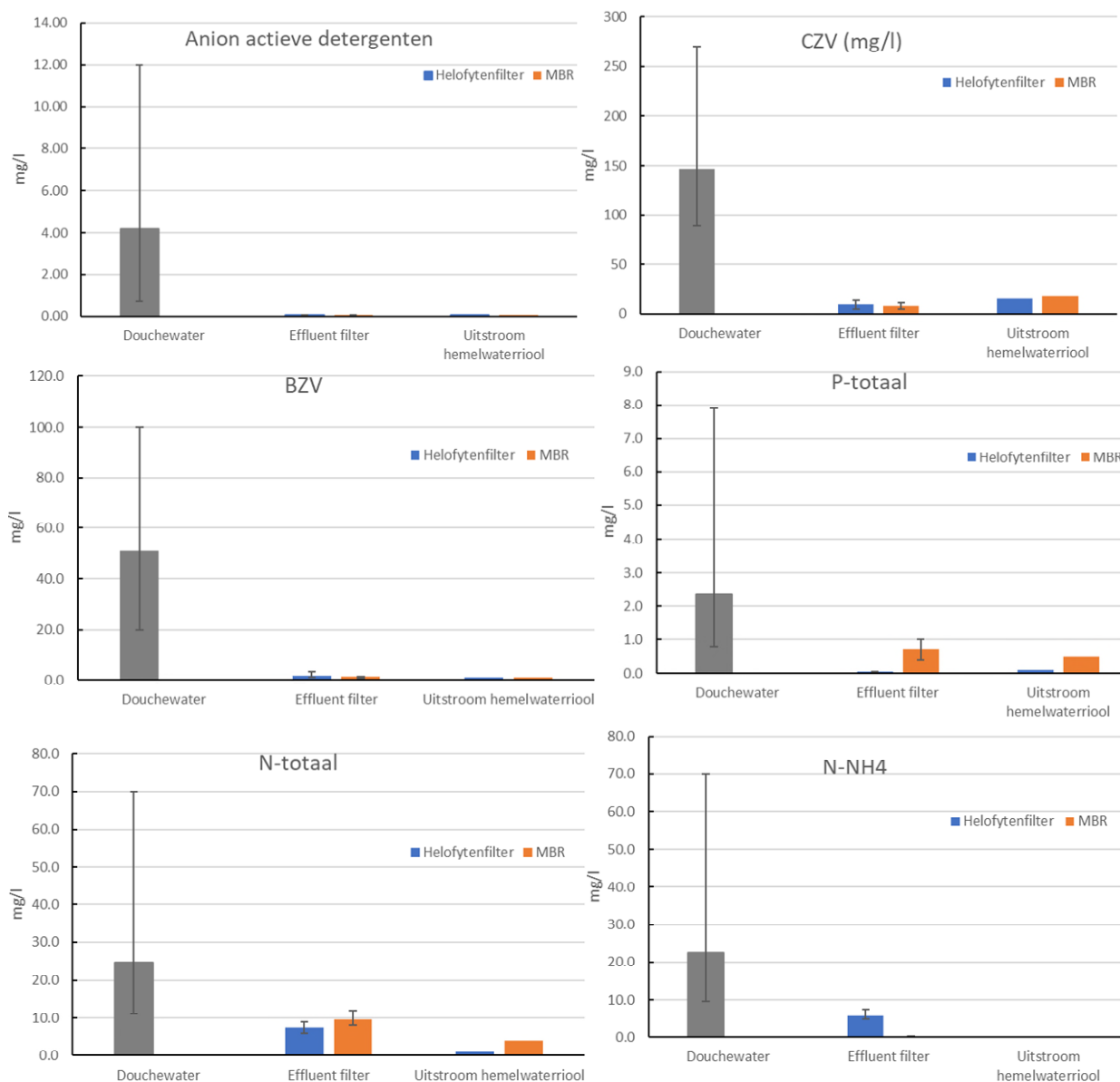
### 4.3.3 Vergelijking met het conventionele MBR systeem

In het aangrenzende gebouw (4) is een conventionele membraanbioreactor (MBR) geplaatst. Omdat het hierbij gaat om een commercieel verkrijgbaar beproefd systeem is de waterkwaliteit minder frequent bemonsterd dan bij het helofytenfilter. (De eerste meting is niet meegenomen in de analyse omdat het systeem op dat moment nog moest herstellen van een foutaansluiting tussen de reactor tank en de schoonwatertank. Onderstaande bevindingen zijn dan ook gebaseerd op 2 monsterrondes). Zoals verwacht mag worden neemt ook bij dit systeem de CZV en BZV fors af tot ruim onder de IBA-lozingsgrenswaarden. De gemiddelde concentraties voor respectievelijk CZV en BZV in het effluent zijn met 9.67 en <2.1 mg/l vergelijkbaar met het horizontaal doorstroomde helofytenfilter. Ten aanzien van fosfaat presteert de MBR minder dan het horizontaal doorstroomde helofytenfilter met een afnames van orthofosfaat,  $\text{P}_{\text{totaal}}$  en  $\text{P}_2\text{O}_5$  totaal tot gemiddeld respectievelijk 0.63, 0.71 en 1.62 mg/l (afnames resp. 61.8, 69.9 en 65.9 %). Ook passeert zink min of meer ongestoord de zuivering. Dit is in de lijn der verwachting omdat er geen of heel beperkt sorptie kan plaatsvinden in het MBR-systeem. De verwijdering van wasactieve stoffen in het MBR is vergelijkbaar met het helofytenfilter. Ten aanzien van stikstof presteert de MBR wel duidelijk beter. Ammonium wordt vrijwel geheel omgezet (gemiddelde in effluent 0.26 mg/l) en voldoet daarmee ruim aan de IBA IIIb lozingsgrenswaarde.  $\text{N}_{\text{tot}}$  in het effluent is met een concentratie van 10 mg/l vergelijkbaar met het effluent van het helofytenfilter en ver onder de norm van 60 mg/l.

Ook de verwijdering van micro-organismen is aanzienlijk hoger. De concentratie bacteriën van de coligroep bedraagt in de schoonwatertank 100 kve/l, tijdens één monsterronde is ook *E.coli* in de schoonwatertank aangetroffen met 100 kve/l. Hiermee kan een verwijdering van 4 logeenheden aan de MBR worden toegekend. Dit is in lijn met de poriediameter van het geïnstalleerde microfiltratie-membraan (0.1-0.3  $\mu\text{m}$ ) wat doorslag van enkele *E.coli*'s (lengte 1-2  $\mu\text{m}$ , diameter 0.25-1  $\mu\text{m}$ ) niet uitsluit. Het water voldoet hiermee aan de minimumeisen

<sup>2</sup> <https://eur-lex.europa.eu/NL/legal-content/summary/minimum-requirements-for-water-reuse.html>

voor klasse C of zelfs B volgens de verordening voor waterhergebruik. Het effluent kan echter nog wel humane virussen bevatten, ook zal biofilmvorming plaatsvinden en mogelijk groei van opportunistische pathogenen. Directe blootstelling en in het bijzonder versproeien/verstuiven van dit water is dan ook nog steeds af te raden zonder aanvullende desinfectie.



Figuur 4-4 Gemiddelde concentraties van in douchewater, helofytenfilter en MBR effluent voor anion actieve detergents, CZV, BZV,  $P_{tot}$ ,  $N_{tot}$  en  $NH_4$ . Met de errorbars zijn de minimale en maximale meetwaarden weergegeven

#### 4.3.4 Uitstroom naar het hemelwaterriool

Zoals al aangegeven cascadeert het effluent van beide systemen door een serie blauwgroene daken en plantenbakken om uiteindelijk uit te stromen naar het regenwaterriool. Tijdens deze cascade wordt het water verder belucht en bijgemengd met regenwater. Daarnaast worden door de beplanting nutriënten uit het water opgenomen. Uit de substraten (hier Optigrün extensief substraat M) kunnen echter ook stoffen uitloggen met het infiltrerende hemelwater en ook worden de daken fecaal belast door vogels en andere dieren. Om een indruk te krijgen van het uiteindelijk uit het systeem stromende water is het uitstroompunt van beide daken bemonsterd. De resultaten hiervan zijn opgenomen in de 3<sup>e</sup> kolom van Tabel 2 en Tabel 2 Gemiddelde samenstelling van het

douchewater, het effluent van het helofytenfilter en het vanuit gebouw 3 naar het hemelwaterriool stromende water

		Douchewater		Effluent helofytenfilter		Uitstroom regenwaterriool	
		n	gemiddelde	n	gemiddelde	n	gemiddelde
pH	-	9	7.64	6	7.31	1	7.19
Geleidbaarheid	mS/cm	8	831	5	674	1	544
BZV	mg/l	9	51.0	6	< 1.80	1	< 1
CZV	mg/l	9	147	6	< 9.60	1	15
Zuurstof	mg/l	7	0.14	5	1.77	1	1.81
Ortho -P (PO4-P)	mg/l	8	1.65	6	< 0.02	1	0.07
Totaal -P	mg/l	8	2.34	6	< 0.05	1	0.1
Totaal -P2O5	mg/l	7	4.74	6	< 0.12	1	0.22
Kj-N	mg/l	9	26.0	6	6.35	1	< 1
NH4-N	mg/l	9	22.5	6	5.80	1	< 0.05
NO3-N	mg/l	9	< 0.18	6	1.50	1	< 0.2
Totaal - N	mg/l	9	24.8	6	7.47	1	< 1
Anion actieve detergenten	mg/l	8	4.20	6	< 0.05	1	< 0.05
Droogrest NEN 6621	mg/l	8	44.2	6	< 4.72	1	< 5
Bez.vol. 1 uur	ml/l	4	< 0.45	2	< 0.10		
Zink	µg/l	7	42.4	6	< 10.0	1	< 10
Chloride	mg/l	5	86	4	86.0	1	50
Bact. Coligroep	cfu/l	5	3.E+06	3	4.E+04		
<i>E.coli</i>	cfu/l	5	2.E+06	3	2.E+04		

< alle metingen beneden detectielimiet; < één of enkele metingen beneden detectielimiet



Tabel 3 in de bijlage IV. Door schade aan één van de daken heeft dit helaas niet gelijktijdig kunnen plaatsvinden. De uitstroom van gebouw 4 bevat om deze reden verhoudingsgewijs meer hemelwater. Door de chlorideconcentraties van het effluent met die van de uitstroom te vergelijken wordt echter een indruk van de verdunning verkregen. Bij gebouw 4 (MBR) is het verschil een factor 7.3. Bij gebouw 3 (horizontaal doorstroomd helofytenfilter) is dit een factor 1.72. Als deze verdunningscorrecties worden toegepast op de gemeten concentraties in de uitstroom naar het hemelwaterriool van beide gebouwen wordt nog steeds voldaan aan de IBA IIIb lozingsgrenswaardes.

### Kwaliteit uitstroom gebouw 3

De, in de uitstroom van gebouw 3, gemeten CZV is met 15 mg/l iets toegenomen ten opzichte van het effluent uit het filter. De BZV (<1 mg/l) is vergelijkbaar of iets lager. Ondanks de (beperkte) verdunning met regenwater is de fosforconcentratie in de uitstroom (orthofosfaat,  $P_{\text{totaal}}$  en  $P_2O_5_{\text{totaal}}$  respectievelijk 0.07, 0.1 en 0.22 mg/l) hoger dan de gemiddelde effluentconcentratie. Deze fosfor is waarschijnlijk afkomstig van langzaam werkende meststoffen in de substraatlaag van de blauw-groene daken. De concentraties blijven hiermee overigens nog ruim beneden de IBA IIIb richtlijn. De stikstofcomponenten zijn wel fors afgenomen in het uitstromende water.  $N_{\text{totaal}}$  is afgenomen tot onder de rapportagegrens van 1 mg/l. De concentratie  $NH_4-N$  is lager dan 0.05 mg/l en voldoet hiermee ruim aan de IBA IIIb lozingsgrenswaarde van 4 mg/l. Door de verdere cascadering en blauwgroene daken en plantenbakken is ammonium dus effectief omgezet en opgenomen. Overigens is het goed om te beseffen dat ammonium in het lokale grondwater van Amsterdam in hoge concentraties (>12 mg/l; Yu et al., 2018) aanwezig is. De ammoniumbijdrage van het hier beschreven systeem is qua stoffluxen dan ook te verwaarlozen ten opzichte van de flux vanuit het grondwater. Overige parameters waren al na passage van het helofytenfilter voldoende laag en worden hier niet nader besproken.

### Kwaliteit uitstroom gebouw 4

Ook bij gebouw 4 is de, in de uitstroom gemeten CZV, met 18 mg/l wat toegenomen ten opzichte van het effluent uit de MBR. De BZV is met 1 mg/l gelijk of iets lager. Ondanks de forse verdunning met regenwater is de concentratie fosfor in de uitstroom (orthofosfaat,  $P_{\text{totaal}}$  en  $P_2O_5_{\text{totaal}}$  respectievelijk 0.48, 0.49 en 1.1 mg/l) maar beperkt afgenomen in verhouding tot de concentratie in het effluent. Net als bij gebouw 3 kan dit worden toegeschreven aan uitspoeling uit de substraatlaag en gezien het moment van monsternamen (eind maart) nog geringe opname door planten. Ook de stikstofconcentraties laten gezien de verdunning slechts een beperkte verlaging zien. De concentratie Kjeldahl-N is zelfs wat hoger dan in het effluent want kan wijzen op extra influx van organische stikstof uit het substraat. Ondanks de geringe verdere daling voldoen bovenstaande concentraties ruim aan de IBA IIIb lozingsgrenswaarden en de minimumeisen voor irrigatiewaterkwaliteit uit EU-verordening 2020/741 inzake minimumeisen voor hergebruik van water. De in de uitstroom gemeten concentratie bacteriën van de coligroep is aanzienlijk toegenomen ( $3.8 \cdot 10^4$  t.o.v. gemiddeld 100 kve/l in het MBR-effluent). Via de groendaken treedt dus herbesmetting van het water op met fecale indicatorbacteriën tot een niveau vergelijkbaar met het effluent van het helofytenfilter. Deze gemeten waarden van ca.  $10^4$  kve/l zijn lager dan de gemiddelde concentratie in afstromend hemelwater (Stowa database afstromend regenwater; Liefting et al, 2020) met een gemiddelde  $10^{7.5}$  kve/l voor thermotolerante bacteriën van de coligroep.

## 4.4 Conclusies & aanbevelingen

### 4.4.1 Conclusies

- Integratie van een 'nature based' zuiveringssysteem (horizontaal doorstroomd helofytenfilter) voor de behandeling van douchewater in groen-blauwe daken blijkt haalbaar qua omvang en belasting.
- Het bemonsterde douchewater heeft een hogere CZV, BZV en vooral een hogere ammoniumconcentratie (en daarmee hogere totaal N en Kjeldahl-N) dan verwacht op basis van (beperkt) beschikbare literatuur. Deze verhoogde concentraties worden waarschijnlijk veroorzaakt door urine in het douchewater. De gemeten concentratie wasactieve stoffen is lager dan de literatuurwaarden.

- Het effluent van het horizontaal doorstroomde helofytenfilter voldoet met uitzondering van ammonium aan de lozingsgrenswaarde voor IBA IIIb systemen. Met de MBR wordt ammonium wel ruim voldoende omgezet. In vergelijking met de MBR is de verwijdering van bacteriën van de coligroep in het helofytenfilter lager (2 log t.o.v. 4 log voor de MBR). De verwijdering van fosfor en zink is juist hoger in het horizontaal doorstroomde helofytenfilter. Het effluent van beide systemen voldoet aan de EU minimum vereisten voor irrigatiewater bij gebruik voor niet-voedselgewassen en irrigatie zonder sproeien (klasse D)
- Tijdens de cascadering langs groen-blauwe daken vindt aanvullende omzetting door bacteriën, opname door planten en verdunning met regenwater plaats waardoor bij de uitstroom van zowel gebouw 3 als 4 ruim wordt voldaan aan de IBA IIIb lozingsgrenswaarden. Wel blijkt er uitspoeling uit de substraatlaag op te treden waardoor de CZV weer wat stijgt en de concentratie fosfor minder ver daalt of zelfs stijgt ten opzichte van de effluent concentratie.
- In het effluent van beide systemen kunnen humaan pathogene virussen aanwezig zijn, daarnaast is gezien de temperatuur van het douchewater (gemiddeld 21.5 °C) groei van opportunistische pathogenen mogelijk. Zonder aanvullende desinfectie is het effluent van beide systemen ongeschikt om te versproeien of te vernevelen. Irrigatie van onderaf via de capillaire cones en substraatlaag of via druppelirrigatie is wel mogelijk.
- Het horizontaal doorstroomde helofytenfilter is technisch eenvoudiger en bleek hierdoor niet gevoelig voor storingen. Het MBR systeem is complexer qua installatietechniek en daarmee gevoeliger voor fouten bij de installatie (foutaansluitingen) en storingen door bijvoorbeeld stroomuitval.

#### 4.4.2 Aanbevelingen

- Het douchewater en het effluent is vooralsnog onderzocht over een beperkte periode van ruim een jaar. Het is aan te bevelen om het helofytenfilter te blijven volgen in de komende jaren. Door budgetbeperkingen is het aantal onderzochte parameters beperkt, in een vervolg kan hierop mogelijk worden uitgebreid.
- In deze studie is de bron van de verhoogde ammoniumconcentraties niet nader onderzocht en aangenomen dat dit afkomstig is van urine. Gezien de mogelijke bijdrage van medicijnresten via urine is nader onderzoek hiernaar gewenst.
- Om de omzetting van ammonium te verbeteren is het aan te bevelen om een beluchting te plaatsen op de verzameltank voor het verpompen naar het helofytenfilter. Deze beluchting is inmiddels geplaatst.
- Bij de MBR is het mogelijk om de membranen te vervangen voor ultrafiltratiemembranen. Hiermee is een aanzienlijk hogere virusverwijdering te verkrijgen (4-5 log). Vraag blijft echter of dit voldoende is bij een virale besmetting.



## 5 Resultaten bewonersonderzoek

### 5.1 Inleiding

Als onderdeel van dit project is onderzoek gedaan naar de afwegingen van bewoners van de Mannoury gebouwen om te kiezen voor een appartement in dit complex en vervolgens is onderzoek gedaan naar hun gedragsaanpassingen ten behoeve van het grijswatersysteem. Hiertoe zijn twee separate vragenlijsten (enquêtes) opgesteld die tot twee keer toe met de bewoners zijn gedeeld met het verzoek de vragen te beantwoorden. Daarnaast heeft de Gemeente Amsterdam buurtonderzoek laten uitvoeren in de wijk waarin de Mannoury gebouwen staan, gericht op het breder onderwerp 'klimaatadaptatie'. Als onderdeel van deze enquête zijn ook specifiek vragen gesteld gerelateerd aan de Mannoury gebouwen. In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het bewoners- en buurtonderzoek kort samengevat.

### 5.2 Bewonersonderzoek Mannoury gebouwen

De vragen en de resultaten van beide bewonersenquêtes zijn opgenomen in de bijlage. Enquête 1 was gericht op het onderzoeken van de klanttevredenheid en de afwegingen die men heeft gemaakt om te kiezen voor een appartement in één van de Mannoury gebouwen. Wat was de invloed van een duurzaam, groen en circulair gebouw op de afwegingen van huurders om al dan niet te kiezen voor een dergelijk appartement? De tweede enquête had betrekking op het gedrag van de bewoners en de benodigde gedragsaanpassingen ten behoeve van het goed kunnen functioneren van het blauw-groen dak en in het bijzonder het grijswatersysteem en membraanbioreactorsysteem voor de zuivering van het douchewater. De enquêtes zijn uitgevoerd in de zomer en herfst van 2023.

Ondanks het feit dat beide enquêtes twee keer zijn aangeboden aan de bewoners is de overall respons teleurstellend. De eerste enquête kende in totaal 13 respondenten waarvan slechts 6 de enquête compleet hebben ingevuld. De tweede enquête kende 8 respondenten waarvan slechts 3 de enquête helemaal hebben ingevuld. Door de geringe respons is geen statistisch analyse mogelijk en zijn onderstaande conclusies slechts indicatief.

Conclusies enquête 1:

- De bewoners ervaren (8 unaniem) geen nadelen gekoppeld aan hun keuze voor een appartement in Mannoury. De helft van de respondenten (4 uit 8) ziet duidelijk voordelen, maar die zijn helaas niet benoemd.
- De bewoners staan gemiddeld licht afwijzend ten opzichte van het betalen van meer servicekosten voor het blauw-groene dak, groene balkons en een neutrale CO<sub>2</sub>-voetafdruk.
- Over watergebruik en waterbesparing in de woning wordt heel verschillende gedacht. Bewoners lijken wel bewust te zijn van klimaatverandering en de mogelijke gevolgen daarvan voor de waterbeschikbaarheid.
- Oude medicijnen blijven liggen in huis (2 uit 6) of verdwijnen in de afvalbak (4 uit 6). Geen van de 6 respondenten noemt hier de optie om die in te leveren bij de apotheek.

Conclusies enquête 2:

- De bewoners vinden het geen probleem om bepaalde verzorgingsproducten niet te gebruiken in verband met het hergebruik van het douchewater.
- Het is belangrijk de gedragsregels te blijven communiceren omdat niet iedereen die al kent of nog niet iedereen zich daar altijd aan houdt.

- Het lijkt belangrijk om bewoners beter te faciliteren bij het maken van de juiste verantwoorde keuze als het gaat om douche- en reinigingsproducten.
- Bewoners lijken wel voldoende interesse te hebben in een duurzamer woonconcept en lijken bereid dit ook uit te dragen.
- Bewoners lijken hun douchegedrag (frequentie/duur) niet te hebben aangepast in hun nieuwe appartement. Het blijkt overigens ook niet dat ze langer douchen omdat ze weten dat het douchewater wordt gebruikt voor bewatering.
- Bewoners willen graag geïnformeerd worden over de opbrengsten van het blauw-groene dak in brede zin.

### 5.3 Onderzoek wijk Westlandgracht uitgevoerd door I&O Research

Door de Gemeente Amsterdam is in het najaar van 2023 opdracht verleend aan I&O Research voor het uitvoeren van buurtonderzoek in de wijk Westlandgracht gericht op klimaatadaptatie. De Gemeente was vooral benieuwd naar de waardering en het handelingsperspectief van inwoners van de wijk als het gaat om klimaatadaptatie. Als onderdeel van dit onderzoek zijn ook vragen gesteld gerelateerd aan de Mannoury woontorens (zie bijlage). De resultaten staan beschreven in het rapport van I&O Research Klimaatadaptatie in Westlandgracht (rapportnummer 2023/16)<sup>3</sup>. Met toestemming van de Gemeente Amsterdam zijn hieronder integraal en onveranderd de resultaten van vragen over de Mannoury woontorens overgenomen inclusief de conclusies van het buurtonderzoek (die breder gaan dan de vragen over de Mannoury-woontorens).

#### 5.3.1 Algemene informatie

De doelgroep van het I&O-onderzoek zijn de omwonenden van de Mannoury woontorens. Deze mensen wonen in de wijk Westlandgracht, postcodegebied 1062KS, Amsterdam. Alle omwonenden in de wijk behoren tot de onderzoekspopulatie. Om de omwonenden in de wijk Westlandgracht te bereiken, ontvingen 6.000 inwoners een uitnodigingsbrief met een link naar de vragenlijst. In totaal hebben 200 omwonenden deelgenomen aan het onderzoek. Dit is onvoldoende om omwonenden goed te kunnen segmenteren. Wel zijn de achtergrondkenmerken leeftijd, geslacht, opleidingsniveau en inkomen meegenomen. Daarnaast is er gekeken naar type eigendom van de woning en het type woning.

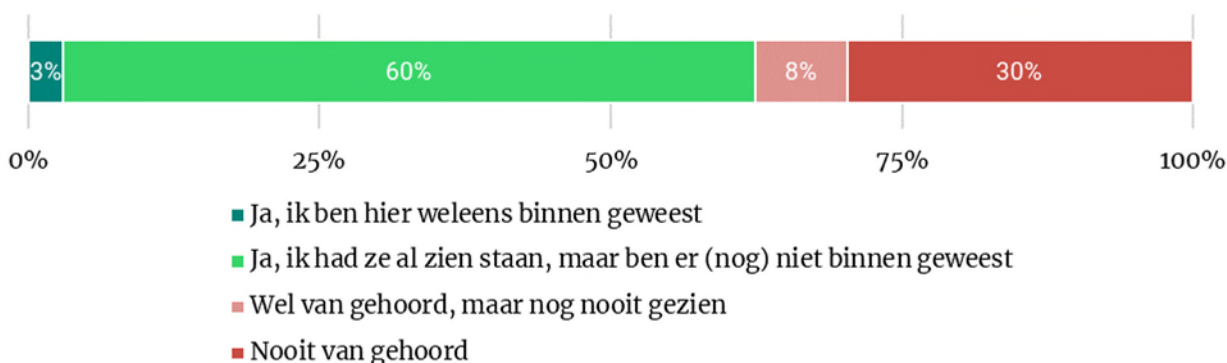
Een belangrijke kanttekening hierbij is dat het aandeel kopers met een vve en hoger opgeleiden oververtegenwoordigd zijn in dit onderzoek. Anderzijds, zijn huurders en lager opgeleiden ondervertegenwoordigd. Dat betekent dat deze resultaten niet representatief zijn voor de hele wijk. Er zijn a priori geen redenen om aan te nemen dat de gevonden resultaten anders zijn dan die voor de hele wijk, maar we kunnen niet met zekerheid stellen dat dit niet zo is. Voor sommige vragen waarbij het wel van belang is om de resultaten te bekijken met de scheve verdeling in koop- en huurwoningen en hoger en lager opgeleiden, zullen we dit in de tekst benoemen.

#### 5.3.2 Mannoury-woontorens bekend van buiten, niet van binnen

Van de omwonenden is ongeveer 63 procent bekend met de Mannoury-woontorens (Figuur 5-1). Van hen is drie procent ook wel eens binnen in de torens geweest, terwijl zestig procent de torens alleen heeft zien staan zonder binnen te zijn geweest. Drie op de tien omwonenden (30%) heeft nog nooit van de Mannoury-woontorens gehoord.

---

<sup>3</sup> Klimaatadaptatie in Westlandgracht. Rapport I&O Research. Rapportnummer 2023/16. December 2023 in opdracht van de Gemeente Amsterdam

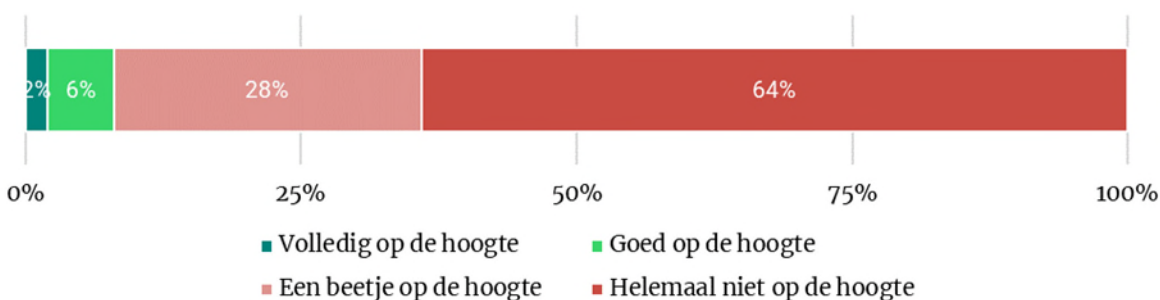


Figuur 5-1 – Bent u bekend met de Mannoury-woontorens? (n = 200)

Van de omwonenden die ten minste ooit al eens van de Mannoury-woontorens hadden gehoord, geeft acht procent aan volledig of goed op de hoogte te zijn van de klimaatadaptieve maatregelen die daarin aanwezig zijn (Figuur 5-2 **Error! Reference source not found.**). Het overgrote deel van de respondenten (64%) zegt helemaal niet op de hoogte te zijn en de overige 28 procent geeft aan een beetje op de hoogte te zijn.

De omwonenden die ten minste een beetje op de hoogte zeggen te zijn van de klimaatadaptieve maatregelen in de Mannoury-woontorens is gevraagd om in een open vraag uit te leggen wat voor klimaatadaptieve maatregelen dit dan zijn. Bijna iedereen van hen weet te noemen dat er veel groen op en om het gebouw aanwezig is. Beplanting op daken, balkons en muren zijn goed zichtbaar voor de omwonenden. Ook de opvang van (regen)water wordt vaker genoemd. Klimaatadaptieve maatregelen en energiebesparende maatregelen in het algemeen worden hierbij nog wel eens door elkaar gehaald. Zo worden zonnepanelen ook vaak genoemd, terwijl dit geen klimaatadaptieve maatregel is. De maatregelen die genoemd worden zijn vaak maatregelen die aan de buitenkant van de torens zichtbaar zijn voor de omwonenden. Over maatregelen die binnen in het gebouw aanwezig zijn is minder bekend. Dit is logisch, aangezien bijna alle omwonenden nog niet eerder binnen in de torens zijn geweest.

Hier moet de kanttekening bij geplaatst worden dat in de uitnodigingsbrief van het onderzoek is genoemd dat het gebouw bijvoorbeeld “groene balkons en het opvangen van regenwater” als maatregelen in het gebouw aanwezig zijn. Het zou kunnen dat respondenten dit als maatregelen hebben genoemd, terwijl zij eigenlijk voor het onderzoek niet wisten dat dit er was. Enkele respondenten hebben dan ook benoemd dat zij deze informatie uit de brief hebben gehaald. Dit lijkt voor de meesten echter niet op te gaan, omdat er vaak slechts één van beide maatregelen wordt genoemd of juist extra maatregelen worden genoemd die niet in de brief staan (zoals zonnepanelen, isolatie, elektrische laadpunten).

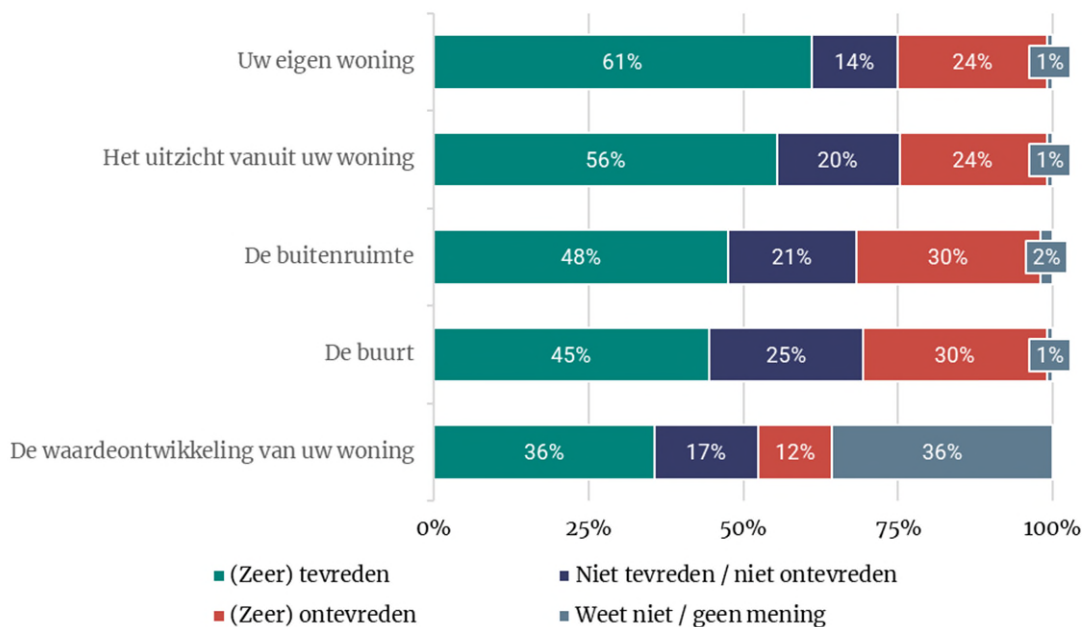


Figuur 5-2 – In hoeverre bent u op de hoogte van de klimaatadaptieve maatregelen in de Mannoury-woontorens? (n=141)

### 5.3.3 Brede interesse en waardering voor Mannoury-woontorens, maar nog geen aanzet tot actie

Over het algemeen zijn de omwonenden redelijk tevreden over hun eigen woning (61%) en het uitzicht vanuit hun woning (56%), maar over de buitenruimte en de buurt is minder dan de helft van de omwonenden tevreden (resp. 48% en 45%) (Figuur 5-3). Mensen in een huurwoning van een corporatie zijn vaker ontevreden over hun eigen

woning dan kopers en huurders in de vrije sector. Ouderen (65+) zijn meer tevreden over hun uitzicht en de buurt dan jongeren. Iets meer dan een derde van de omwonenden (36%) is tevreden over de waardeontwikkeling van hun woning. Een even grote groep weet niet hoe tevreden zij hierover zijn. Omdat huurders over het algemeen minder tevreden zijn over hun woning dan kopers, is het beeld bij deze vraag wellicht te positief omdat huurders ondervertegenwoordigd zijn in dit onderzoek.



Figuur 5-3 – Hoe tevreden bent u over de volgende aspecten van uw woonomgeving? (n=200)

De Mannoury-woontorens genieten een brede interesse en waardering onder de omwonenden. Hoewel nog niet iedereen aanvankelijk van de gebouwen gehoord had en vrijwel niemand wist wat er aan klimaatadaptieve maatregelen in het gebouw aanwezig zijn, lijkt dit niet te komen door desinteresse. Ongeveer acht op de tien omwonenden (79%) geeft aan dat zij benieuwd zijn hoe de bewoners van de woontorens de klimaatadaptieve maatregelen ervaren en 82 procent van hen zou willen dat vergelijkbare maatregelen ook in hun woning aanwezig zouden zijn (Figuur 5-4). Dit zijn vaker jongere bewoners (tot 40 jaar) dan oudere bewoners (40+).

Van de buitenkant vindt ongeveer driekwart van de omwonenden (76%) de groene uitstraling van de woontorens mooi en zeven op de tien omwonenden geeft aan dat ze het gebouw een verrijking vinden voor de buurt. Ook hier vinden jongere bewoners dit vaker dan oudere bewoners. Bewoners in een benedenwoning vinden de woontorens minder vaak een verrijking voor de buurt. Dit kan komen omdat zij zelf vanwege de andere hoogbouw geen direct zicht hebben op de woontorens.

Er zijn geen significante verbanden gevonden tussen hoe tevreden men is over de eigen woonomgeving en of men bekend is met de woontorens en de klimaatadaptieve maatregelen daarin. De omwonenden vinden de woontorens mooi en noemen het een verrijking voor de buurt, maar dit vertaalt zich niet direct in een hogere mate van waardering voor hun (gehele) woonomgeving.

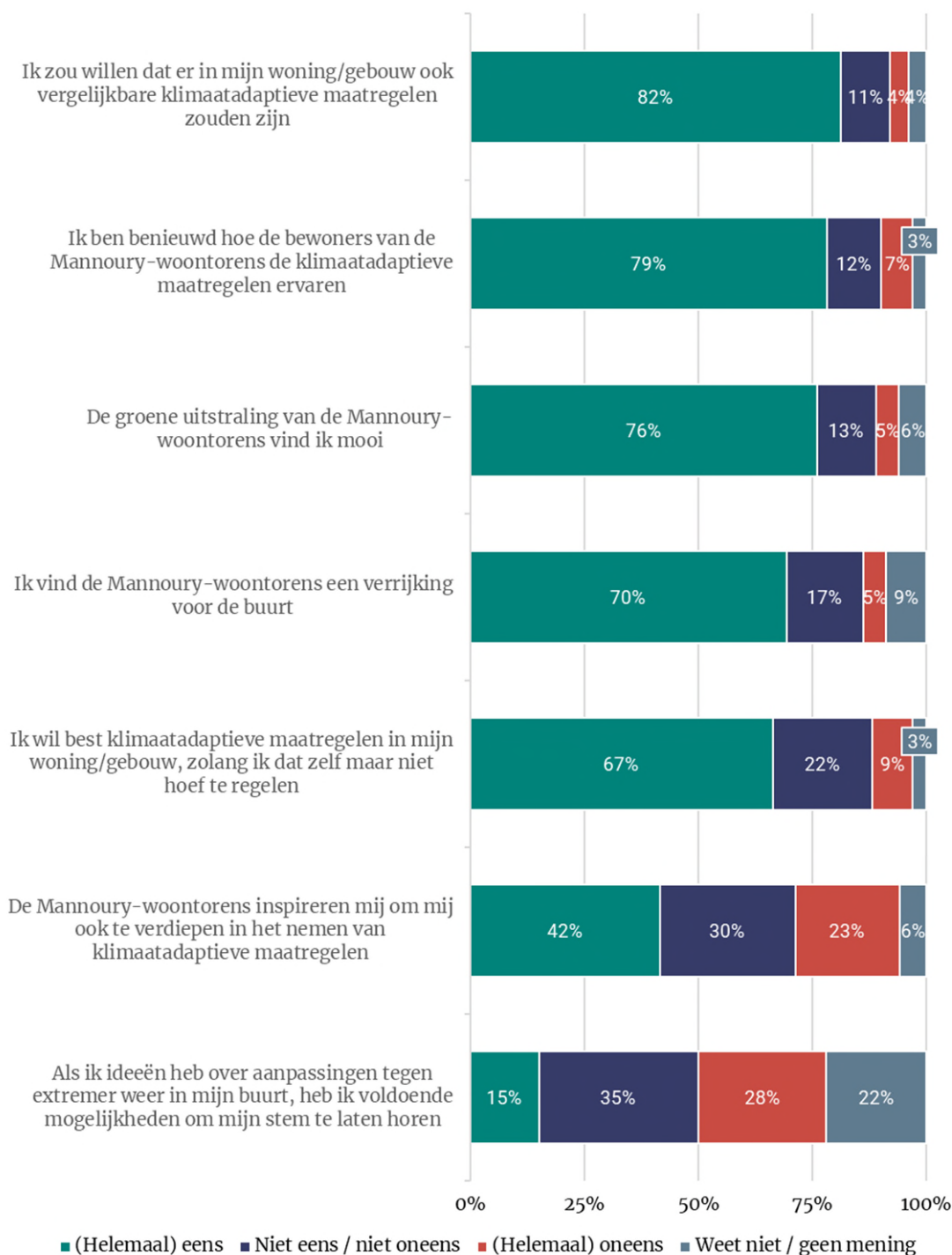
Dat omwonenden graag zouden willen dat de klimaatadaptieve maatregelen in hun eigen woning aanwezig zouden zijn en dat zij graag willen weten hoe de bewoners van de woontorens deze maatregelen ervaren, betekent nog niet dat zij hier zelf ook mee aan de slag willen. Ongeveer vier op de tien (42%) geeft aan dat de torens hen inspireren zelf ook aan de slag te gaan met klimaatadaptieve maatregelen in hun woning. Er is hierbij geen verschil gevonden tussen kopers en huurders.

De voornaamste verklaringen waarom omwonenden wel graag dezelfde maatregelen in hun woning zouden willen als in de Mannoury-woontorens maar in mindere mate geïnspireerd zijn zichzelf hierin te verdiepen, is dat zij dit niet zelf willen doen of niet zelf kunnen doen. Twee derde van de omwonenden (67%) geeft aan dat zij best klimaatadaptieve maatregelen willen in hun woning, zolang ze het maar niet zelf hoeven te regelen. Er kunnen verschillende redenen zijn waarom omwonenden dit niet zelf willen of kunnen regelen, dit kan bijvoorbeeld komen omdat zij zichzelf niet zien als de persoon die dit zou moeten regelen.

Dit blijkt ook uit de stelling of omwonenden vinden dat zij zelf voldoende mogelijkheid hebben om hun stem te laten horen als ze ideeën hebben over aanpassingen tegen extremer weer. Vijftien procent vindt dat zij voldoende ruimte hebben om hun stem te laten horen, 28 procent is het hier mee oneens. De rest van de omwonenden is neutraal of weet het niet. De mogelijkheid om een stem te laten horen kan op verschillende manieren worden geïnterpreteerd. Dit kan geïnterpreteerd worden als de mogelijkheid om richting de overheid/gemeente te communiceren wat ideeën zijn voor de wijk/buurt/stad. Het kan ook geïnterpreteerd worden als de mogelijkheid om als huurder of koper binnen een VvE je stem te kunnen laten horen aan je verhuurder of VvE. Hoewel het op beide manieren geïnterpreteerd kan worden, zijn de resultaten uit de komende hoofdstukken meer in lijn met de tweede interpretatie.

De resultaten suggereren dat de Mannoury-woontorens als positief worden ervaren door de omwonenden en dat zij graag zouden willen dat de klimaatadaptieve maatregelen uit de torens ook in hun woning aanwezig zouden zijn. Het zet ze echter nog niet direct aan tot het zelf nemen van maatregelen. Dit komt doordat omwonenden deze maatregelen niet zelf willen of kunnen nemen en doordat zij het idee hebben hun stem niet voldoende te kunnen laten horen.





Figuur 5-4 – In hoeverre bent u het eens met de onderstaande stellingen? (n=200)

### 5.3.4 Conclusies en aanbevelingen buurtonderzoek

De conclusies van het onderzoek zijn als volgt samengevat:

- Kennis over klimaatadaptatie en klimaatadaptieve maatregelen in de woonomgeving is beperkt. Hoewel veel mensen wel een antwoord kunnen geven over wat zij onder klimaatadaptatie verstaan, weet het merendeel niet wat dit in de praktijk inhoudt. Er is weinig bekendheid over wat de gemeente doet, over wat er al in de woonomgeving gebeurt en over wat mensen zelf in hun eigen woning kunnen doen.

- Ondanks een gebrek aan kennis, staan de meesten wel positief tegenover het nemen van klimaatadaptieve maatregelen. Zij vinden het goed dat de gemeente zich hiermee bezighoudt en hebben er vertrouwen in dat de gemeente de juiste stappen neemt. De klimaatadaptieve maatregelen die in de Mannoury-woontorens aanwezig zijn, spreken aan, en veel omwonenden zouden ook willen dat deze maatregelen ook in hun woning zitten.
- Dit betekent echter niet dat de Mannoury-woontorens omwonenden ook motiveren om zelf klimaatadaptieve maatregelen te nemen. Tot nu toe hebben nog maar weinig omwonenden zelf iets gedaan aan klimaatadaptatie in hun woning. Als zij al iets gedaan hebben, is dit meestal zonwering, om het in de zomer wat koeler te hebben.
- De grootste belemmering om zelf aan de slag te gaan met klimaatadaptieve maatregelen, is dat veel omwonenden een beperkte mate van eigen zeggenschap hebben over de woning. Huurders lopen tegen een verhuurder of wooncorporatie aan die geen maatregelen wil nemen en kopers zitten soms vast binnen een VvE die niet aan de slag wil.
- Ondersteuning bij het aanzetten van een verhuurder of VvE tot het nemen van klimaatadaptieve maatregelen, is dan ook de meest gemiste vorm van ondersteuning. Een financiële prikkel (subsidies) kan helpen, maar dat heeft geen zin als de bewoner zelf niet mag beslissen over zijn/haar woning. Er is veel informatiebehoefte als het gaat om klimaatadaptatie, maar de kanalen die de gemeente Amsterdam hiervoor inzet, worden tot nu toe nauwelijks gevonden.
- Vertrouwen dat de gemeente Amsterdam de juiste stappen neemt voor het klimaatbestendig maken van de stad is hoog, maar vertrouwen in de gemeente als ondersteuner bij het klimaatbestendig maken van de eigen woning is lager. Dit lijkt meer te komen door een gebrek aan kennis over wat voor ondersteuning er mogelijk is, dan door negatieve beelden of ervaringen.

De gemeente Amsterdam kan de inwoners van de wijk Westlandgracht (meer) aanzetten tot het nemen van klimaatadaptieve maatregelen door te focussen op de communicatie en informatieverschaffing. De inwoners zijn in beperkte mate op de hoogte van wat klimaatadaptatie inhoudt en wat zij zelf kunnen doen. De eigendomssituatie van de woning speelt daarbij een belangrijke rol. Mogelijke ondersteuning vanuit de gemeente wordt nu nog nauwelijks gevonden. Met betrekking tot de Mannoury-woontorens wordt de Gemeente aanbevolen om dit soort succesverhalen verder te illustreren. De inwoners van de wijk zijn benieuwd naar de aanpassingen en zouden deze zelf ook in hun woning willen. Hierbij is het van belang er op te letten dat het niet moet lijken als een op zichzelf staand project, maar dat duidelijk gemaakt moet worden dat het overal zo zou kunnen.

## 6 Overzicht project presentaties

In dit hoofdstuk zijn een tweetal presentaties opgenomen waarbij het project is gepresenteerd. Het gaat om een presentatie van Frank van Dien op het door IWA (International Water Association) georganiseerde congres 'Wetland Systems for Water Pollution Control' (ICWS) in Lyon Frankrijk in november 2022. De andere presentatie is gegeven door Joris Voeten als keynote tijdens de TVVL Techniekdag op 9 november 2022. Overige presentaties staan vermeld met een link op de [TKI Watertechnologie website](#).

## **6.1 Constructed WetRoof (CWR) Technology as a new approach to supply and enhance the cooling effect of PV Systems on Green Roofs**

# Constructed WetRoof (CWR) Technology

as a new approach to supply and enhance  
the cooling effect of PV Systems on Green Roofs

Frank van Dien



# Not ECOFYT's first rooftop wetland...



- ▶ In 2009 we were invited to make a plan for a VFCW at an office of 140 people, where the only available space was on top of the adjacent technical building. It was to treat all domestic wastewater (ca. 4,000 litres per day) and the effluent was to be reused at the toilets.



# Not ECOFYT's second roof top wetland..



- ▶ And some of you who know me a bit longer, may remember a presentation given at the conference in Australia (and later in China) about a constructed wetland on top of the roof of a company (2012) with some 60 workers, treating all domestic wastewater.





# Not ECOFYT's second roof...



- ▶ Planted with grass (because a substrate of 9 cm doesn't give room to much more)
- ▶ Doing around 1,000 litres per day
- ▶ And the effluent being reused to flush the toilets



# But ECOFYT's third roof...

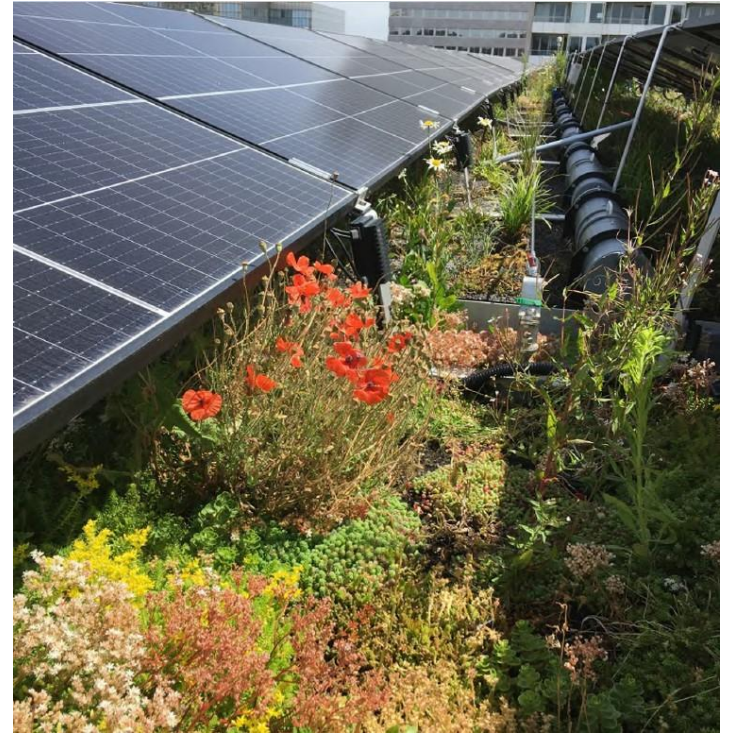


And now we were invited for yet a completely different setup; a project that got the name

-Mannoury-

TKI Urban Photo-Synthesis

in which TKI stands for  
**Top consortia for Knowledge & Innovations**,  
a project sponsored by the Dutch  
Ministry of Economic Affairs and Climate.



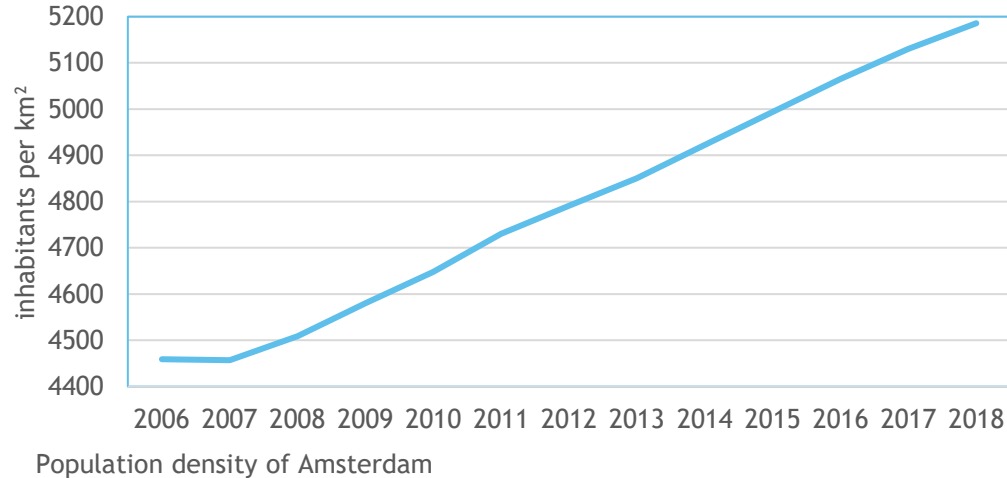




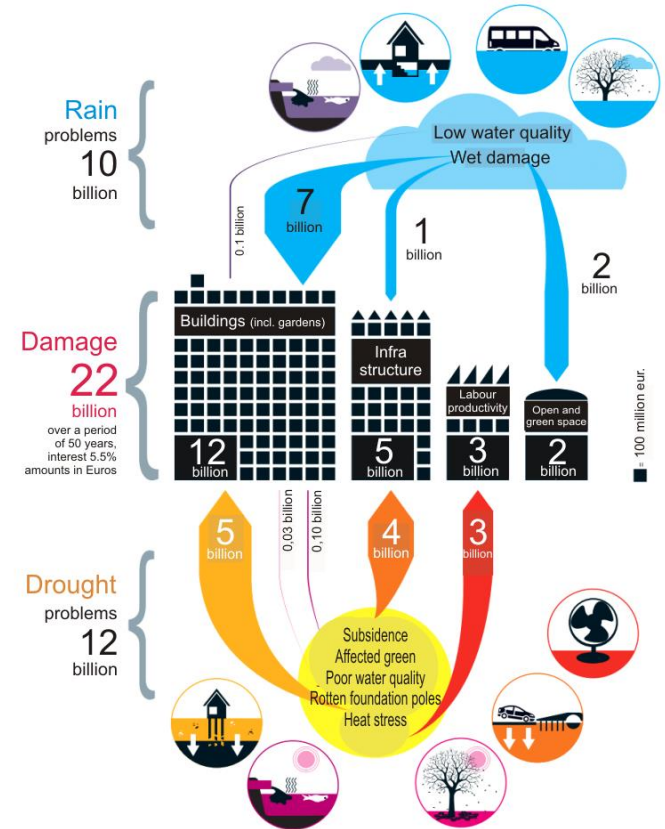


# The Urgency of Climate Adaptation

- Estimated damage in the coming 50 years due to drought, heat and flooding in the built environment: €22 billion
- Densification of cities strengthens these effects

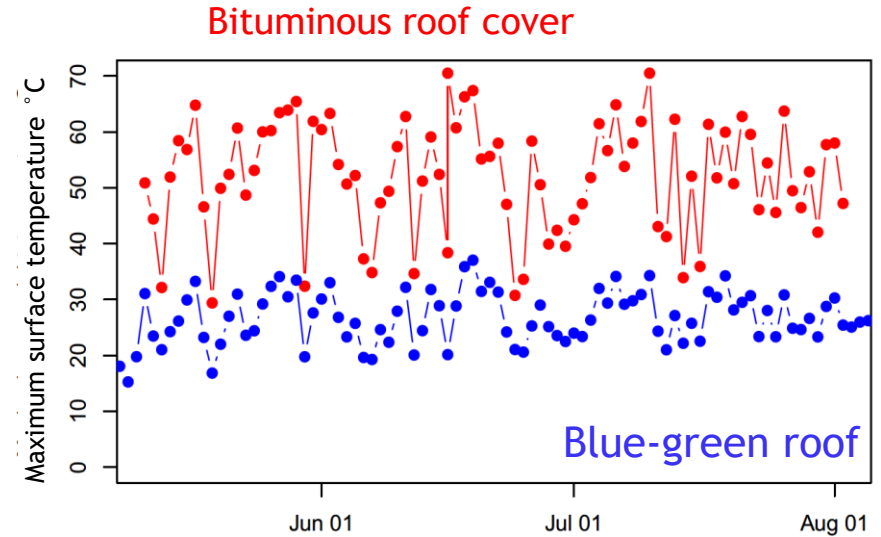
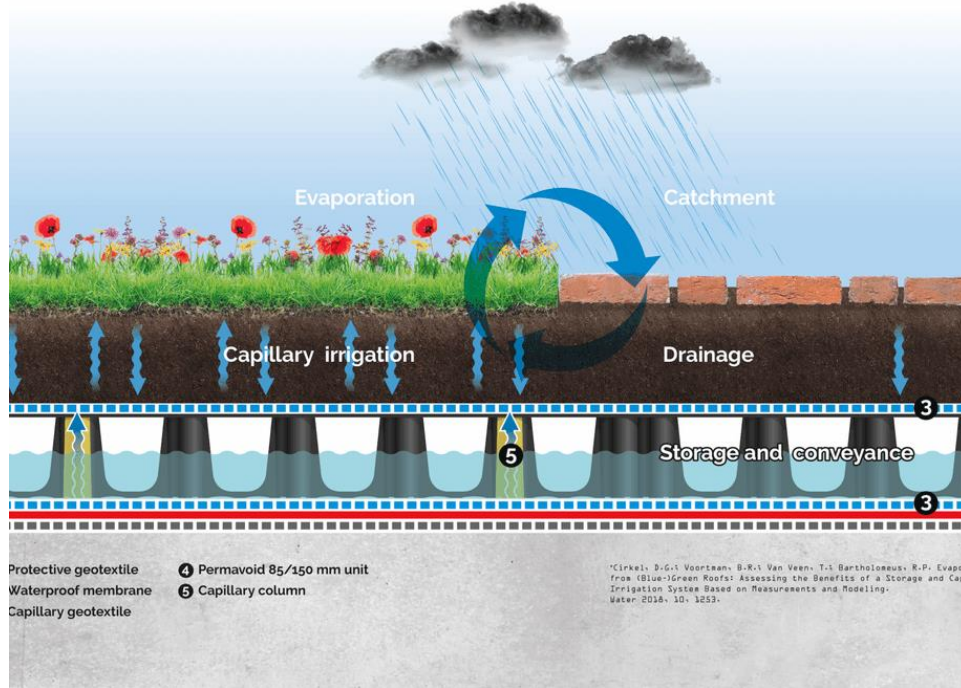


## The Climate-proof city beyond the non-commitment



Deltaplan Spatial Adaptation, 2013

# Cooling through evaporation



Gradients in growing conditions and increasing biodiversity

# A win-win-win situation?



Treated shower water reused on site

Rainwater Management & Irrigation

Renewable energy

Constant water supply, even in dry periods

Cooling panels and increasing yield



# Video time!

Before we did ‘the real thing’ on the roof, we experimented a bit at the KWR terrain.







ECOFYT

FYT  
helofytenfilters





# Time lapse



Time to take a look at the building process on the roof...



# How to upscale?



Well, if you want to be followed after an initiative,  
you can spread the word with a promo:









# And what have we learnt so far?

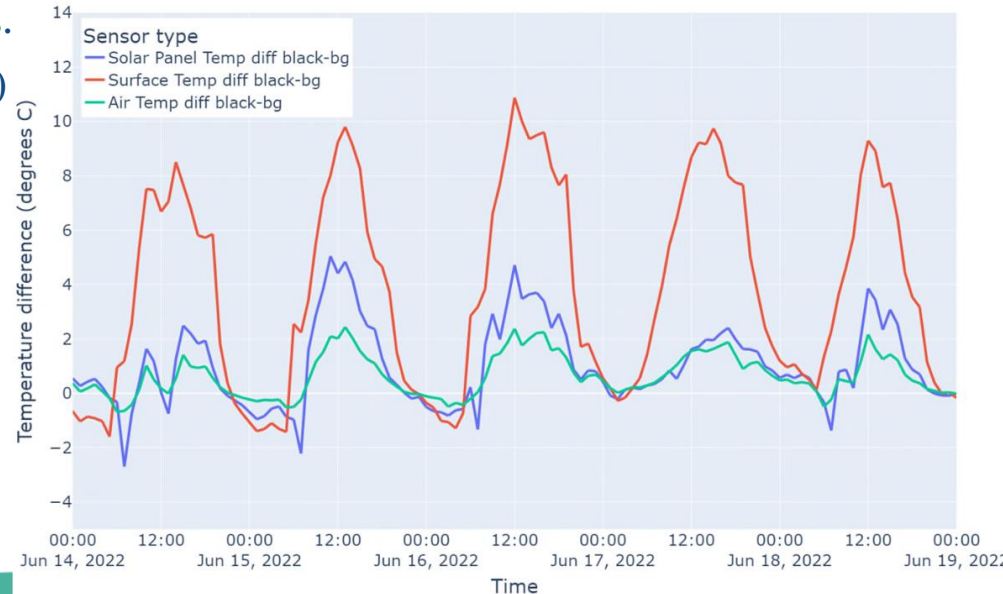


Parameter	Infl. expected	Infl. measured n=4	Effluent n=2	reduction
COD, mg/l	89	113	<5,00	95,6 %
BOD, mg/l	36	42,3	<1,20	97,2 %
N-Kj, mg/l	1,87	24,3	5,80	76,2 %
NH <sup>4</sup> -N, mg/l	1,63	22,0	6,15	72,0 %
Tot. P, mg/l	1,63	2,43	<0,05	97,9 %
Conductivity mS/cm		876	660	24,7 %
O <sub>2</sub>		0,15	0,69	357 % (improvement)
pH	7,0	7,43	7,10	4,47 %
coliforms, CFU/ml	2,6 x 10 <sup>6</sup>	2,3 x 10 <sup>6</sup>	1,6 x 10 <sup>4</sup>	99,3 %
E-coli, CFU/ml	5,6 x 10 <sup>5</sup>	1,4 x 10 <sup>6</sup>	1,2 x 10 <sup>4</sup>	99,1 %
detergents, mg/l	77,3	6,7	0,05	99,3%

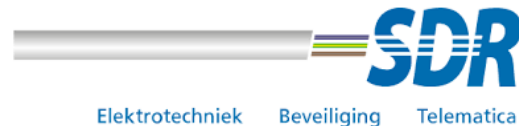


# And what have we learnt so far?

- ▶ What about the higher electrical output?
- ▶ Research has shown that an improved electrical production of 2-6 % is possible
- ▶ Well: there are clear differences in temperature between the two roofs.
- ▶ For the solar panels a **final effect of 2-5 degrees**.
- ▶ Shadow effects blurr the results a bit (<0 values)
- ▶ this complicates a 1 to 1 comparison.
- ▶ The difference between June 1 -July: **ca 2.5%**.
- ▶ Blue Green roof: 124 kWh/panel
- ▶ Black roof: 121 kWh/panel



partners



# references



- ▶ Roest v.d. E, Cirkel, G. [Vorderingen onderzoek Urban PhotoSythesis, 2022](#)
- ▶ Stolp, S. [TKI Urban PhotoSythesis, Creating Mannoury, a living building, 2022](#)
- ▶ Roest v.d. E, Voeten, J, Cirkel, G. [Blue-Green roofs with solar PV – A win-win-win situation, 2022](#)

## 6.2 Green-blue roofs with solar PV – A win-win-win situation



eurac  
research

4th International Conference on

**Smart and Sustainable Planning  
for Cities and Regions 2022**

19-22 July 2022, Bolzano/Bozen (Italy)



**Green-blue roofs with solar PV – A win-win-win situation**

Els van der Roest, KWR Water/TU Delft (The Netherlands)

1

**Project Urban Photosynthesis**



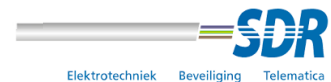
This activity is co-financed with PPS-funding from the Topconsortia for Knowledge & Innovation (TKI's) of the Ministry of Economic Affairs and Climate.



Aedes



permavoid  
the Foundation for our Future



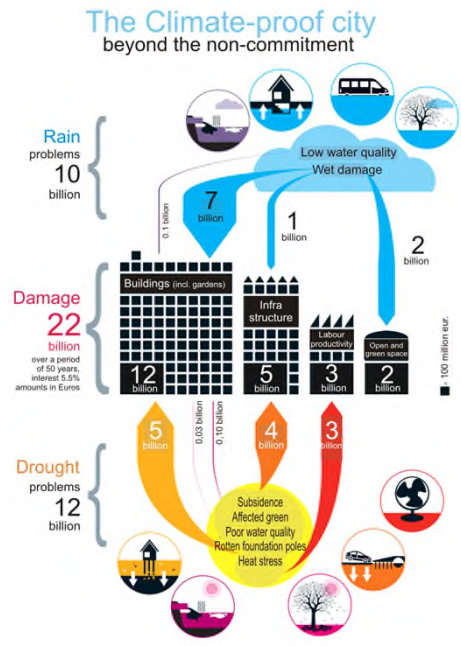
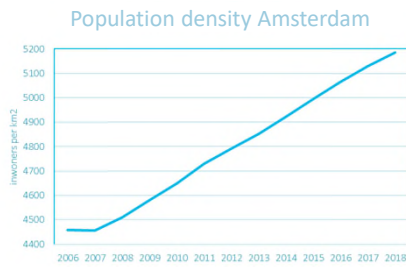
KWR



2

## The Urgency of Climate Adaptation

- Estimated damage in the coming 50 years due to drought, heat and flooding in the built environment: €22 billion
- Damage due to drought > damage due to rain
- Densification of cities strengthens these effects



Deltaplan Spatial Adaptation, 2013

3

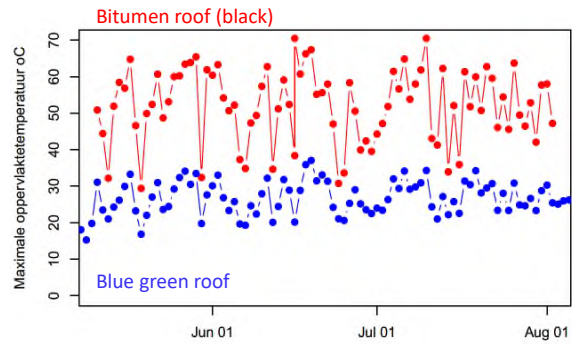
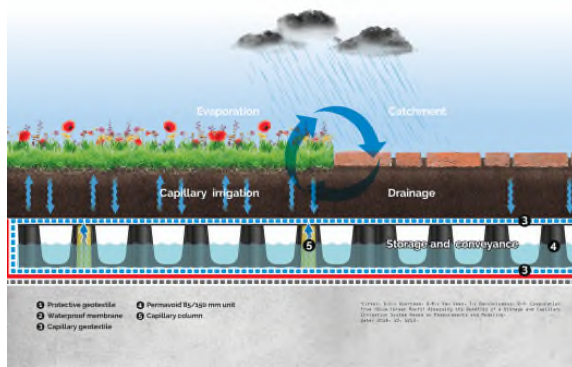
## Previously: Project Smartroof 2.0

- Rainwater storage (Permavoid) led to doubling of evaporation
- No overflow to sewage in the summer
- No drought stress for the roof vegetation



4

## Cooling through evaporation



D. G. Cirkel, B. R. Voortman, T. van Veen, and R. P. Bartholomeus, "Evaporation from (Blue-)Green Roofs: Assessing the benefits of a storage and capillary irrigation system based on measurements and modeling," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, pp. 1–21, 2018, doi: 10.3390/w10091253.

5

## Why a new project?



Densely populated cities, lack of space, many functions required in one location



Lack of rainwater during dry periods -> Solution: use gray water instead of drinking water

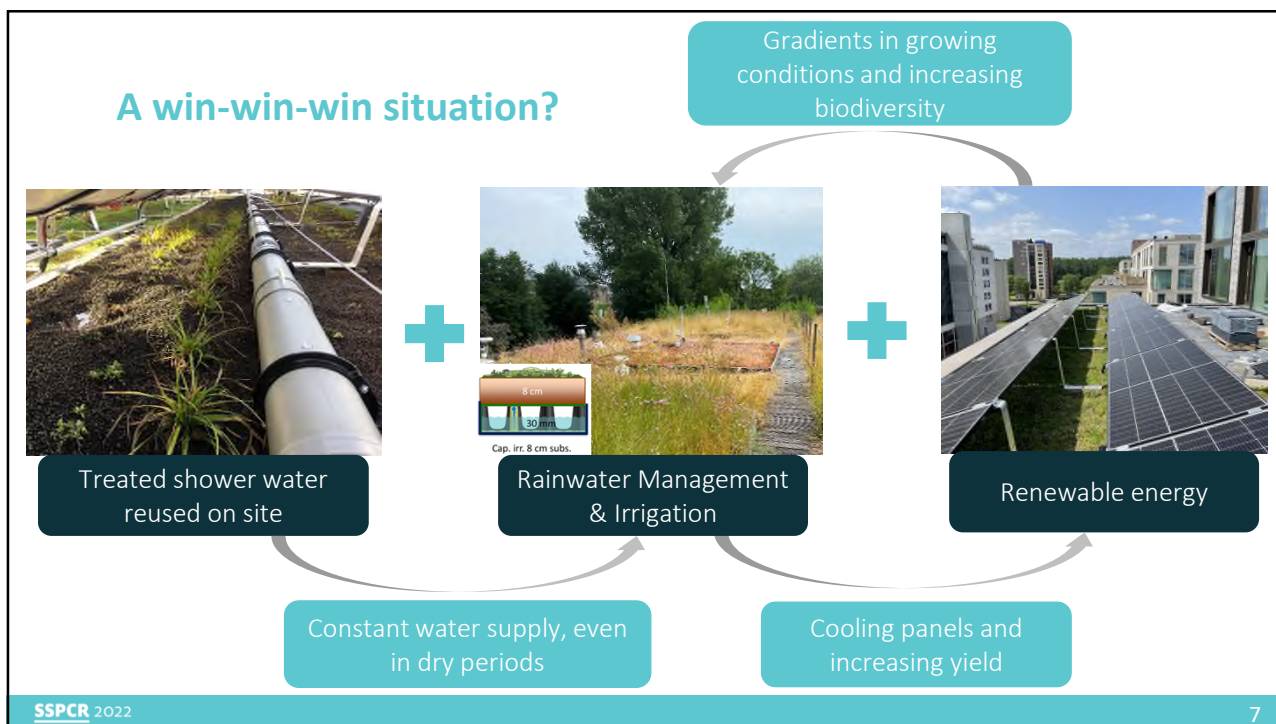


Combining green-blue, shower water & PV; A win-win-win?



Ultimately; integral policy requirements for real estate development?

6



7



8



### Research questions (selection)

How does the Constructed WetRoof system for shower water work? (quantity & quality)

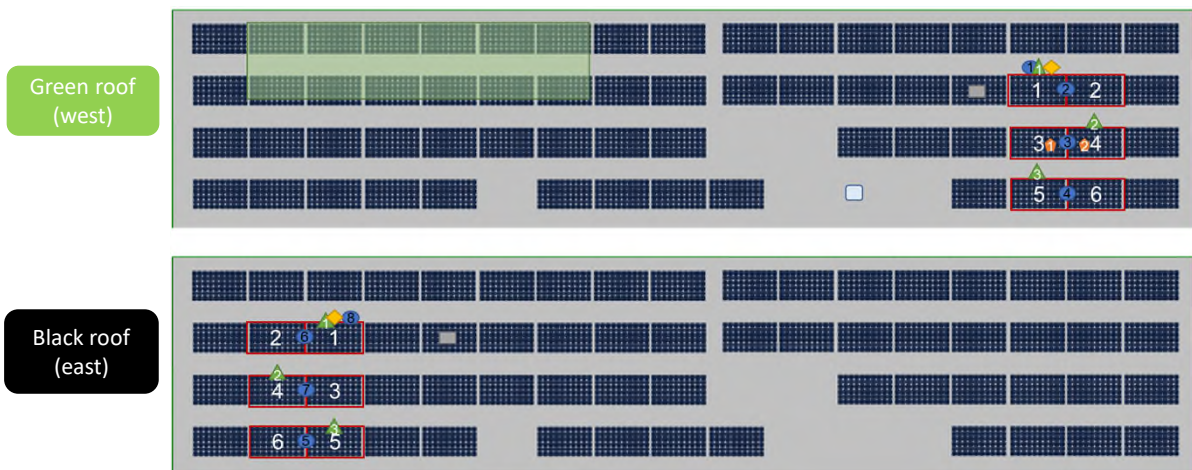
How does the combination blue-green & PV work? Does it increase the output of PV panels?

How can the sustainability contribution of the concept be incorporated into policy?



9

### Research design: Monitoring solar panels

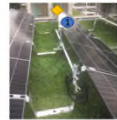
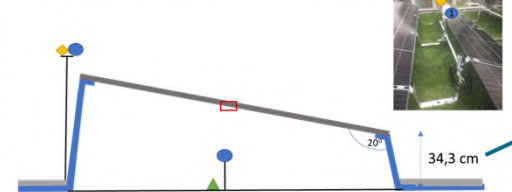
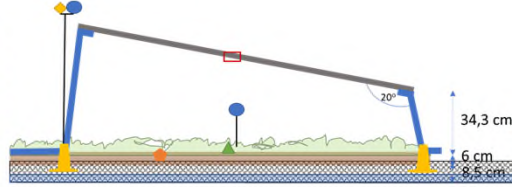


Monitored panels are therefore relatively close to each other

10



## Research design: Monitoring solar panels

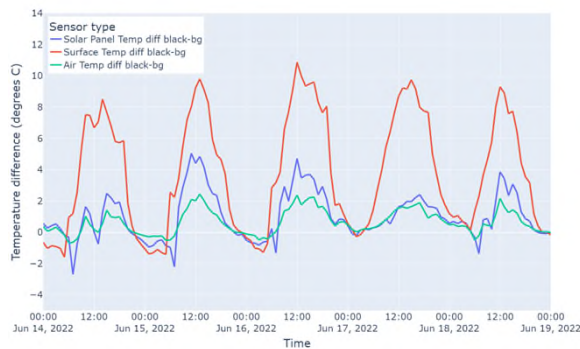


Important!

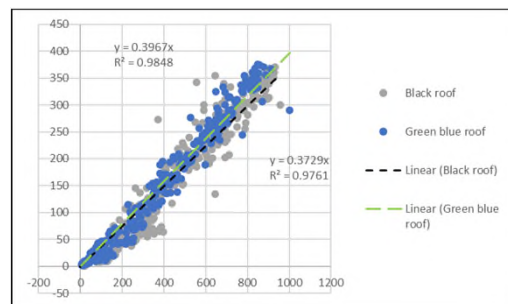
- ◆ Pyranometer (CS320) (1.25 m above roof surface)
- Air temperature and relative humidity (HygroVUE)
- Surface temperature sensor (CS 241 PT1000)
- ▲ Roof surface temperature (Apogee radiometer)
- ◆ Soil temperature (CS 225)

11

## First results (data from June 2022)



Significant temperature differences on black vs green roof



So far around 2% extra energy production on Green-blue roof vs. Black roof. Effect more visible at higher irradiation.

12

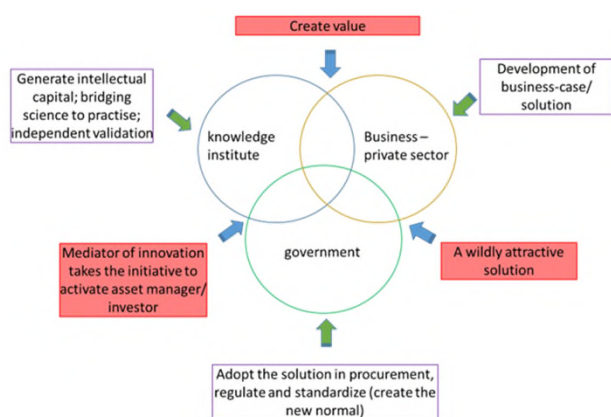
## Next steps

- Measure for at least one year
- Analyse how much shower water is reused
- Water quality sampling before and after constructed wetroof



## Success through collaboration (triple helix - PPS)


- Jointly arriving at implementable solutions (knowledge institution/industry/government)
- Realizing innovations in full-scale situations
- Scientific validation and improvement of market-developed products
- Appealing examples: pilots/living labs
- Translation of scientific knowledge into applicable/reliable solutions/products
- Adoption of knowledge and solutions in policy and regulation



## Contact

Els van der Roest

 KWR Water Research Institute

 Els.van.der.Roest@kwrwater.nl

 <https://www.kwrwater.nl>



Vote for my presentation!

Code #535

**SSPCR** 2022



15

## Two buildings: a reference & a green-blue PV roof

Green balconies, 5<sup>th</sup> floor and parking roof

Blue-green water retention system & irrigation

Same amount of PV panels

On the 7th floors:  
Black roof

Conventional greywater purification, membrane bioreactor

Passive water management



On the 7th floor: Blue-Green roof

Pre-treatment & constructed wetroof for water purification

Cloud water control (active water management)

16

### 6.3 Does nature love technology?



# Does Nature love Technology?

Joris Voeten, Onderzoeker Nature-based Solutions



TVVL KENNISPARTNERS



1

**VOORSTE RAND OP'RIT**

- Pulmonaria Blue Ensign Longhurst
- Geranium 'Rozanne' Dierckx/Janse
- Pilosus sub. 'Emerald' n C. Blue Kuyk/Bla
- Achillea millefolium Fraize vrouwenmarkt
- Asperula fasciculata Kalkbuis

**BORDER MIX MOOIE SIER-GRASSEN WASTE PLANTEN**

- Verbena plicata 'Wanab' Smeekwa
- Pulmonaria Blue Ensign Longhurst
- Geranium 'Rozanne' Colven/Janse
- Pilosus sub. 'Emerald' n C. Blue Kuyk/Bla
- Achillea millefolium Fraize vrouwenmarkt

**PLANTENBANK**



- Asperula fasciculata 'Wanab' Randplantje, blauw/roze
- Composita polymorpha/Agnes Kalkbuis
- Thymus serpyllum Kluisje tje
- Limonium sp. 'Luzula Blue Large Emerald'

TVVL | Tuinierders Vereniging Voor Liefhebbers 3-4-2024

2



uw:



 PLATFORMVOOR MENS EN TECHNIEK 3 3-4-2024

3

### Onze uitdagingen



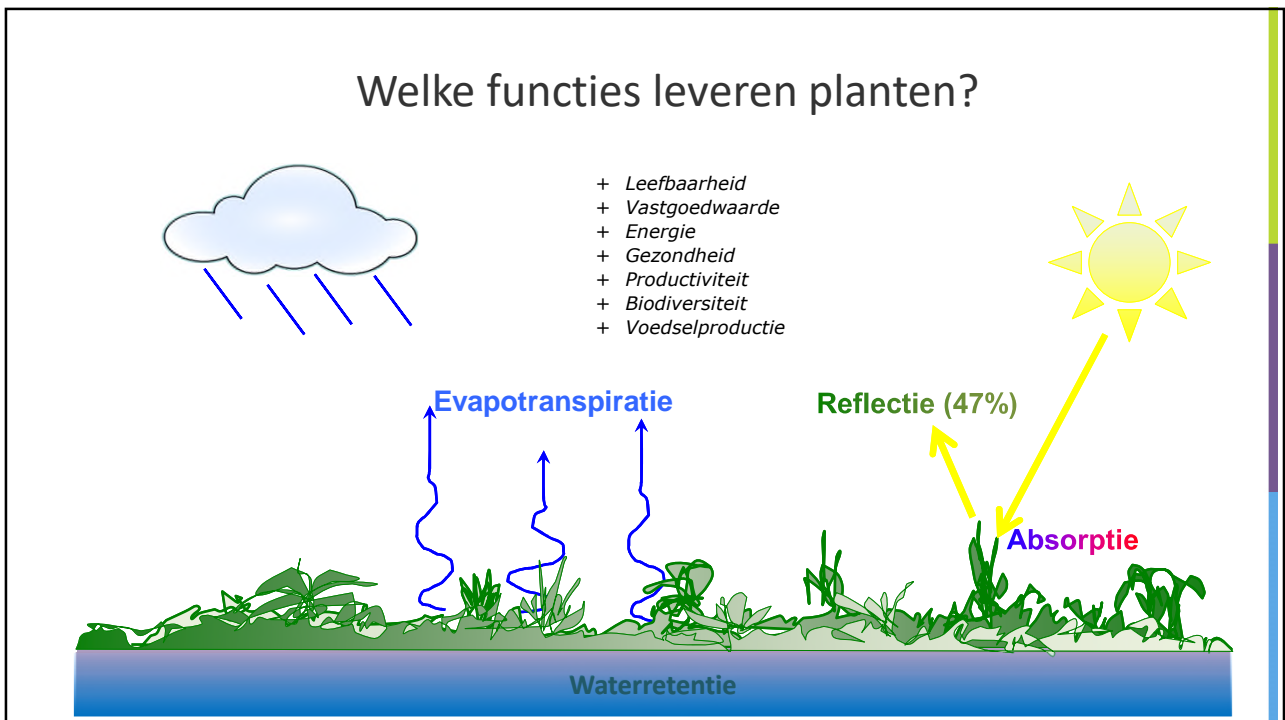
 PLATFORMVOOR MENS EN TECHNIEK 4

4





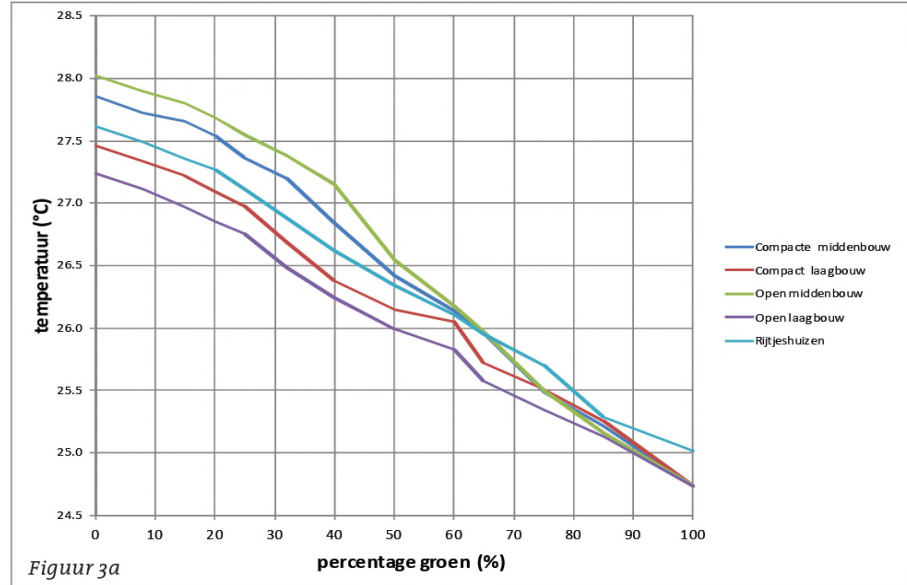
5



6

## Bijdrage van groen tegen UHI is sterk

(Klompmaker, Steeneveld en Groen, 2015)



Figuur 3a

7



8





9

## Opkomst van Groene Architectuur



10





11

### Evolutie van Groen naar Blauw-Groene systemen

15 mm

Conventioneel groendak:  
• **25%** waterretentie

85 mm

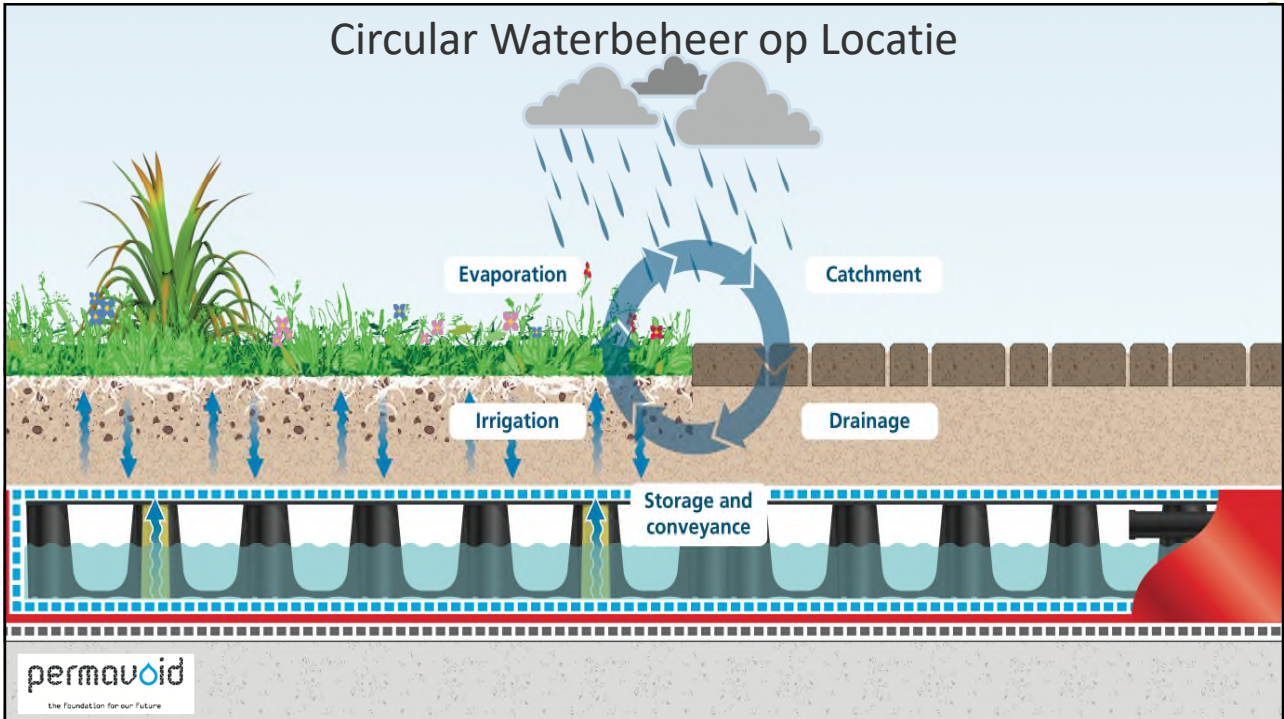
Blauw-Groen dak:  
• **65%** waterretentie

<- Beide 140 kg/m<sup>2</sup> ->

TVVL | PLATFORM VOOR MENS EN TECHNIEK

12





13



14

# ‘Moet ik nou zonnepanelen of een blauw-groen dak?’



15

## Een win-win-win situatie

Gradiënten in groeicondities en verhoging biodiversiteit



Waterhergebruik on-site gezuiverd douchewater



Regenwaterbeheer & irrigatie



Duurzame energie

Constante aanvoer water, ook in droge periodes

Verkoeling panelen en verhoging opbrengst



16



## Onderzoek Blauw-Groene Energiedaken



17

## Video

- <https://vimeo.com/730971056>
- Instellen op autoplay bij start van deze dia.
- Als het goed is krijg ik het originele videobestand vandaag geleverd. Dan stuur ik dat meteen door om IN de presentatie te plaatsen.
- Anders video starten vanaf online source op Vimeo. (link boven)
- Ik ben woensdag zeer op tijd aanwezig om alles te testen

18



## Innovaties die nodig waren



Combinatie Blauw-  
Groen dak met  
ingebouwd Helofyten  
filter



Solnet systeem voor  
verankering PV en  
veiligheidslijn



Online waterbeheersysteem

## Geleerde lessen

## Blauw-Groen Waterbewust Bouwen Begint op dag 1 van het ontwerp





### De volgorde doet ertoe

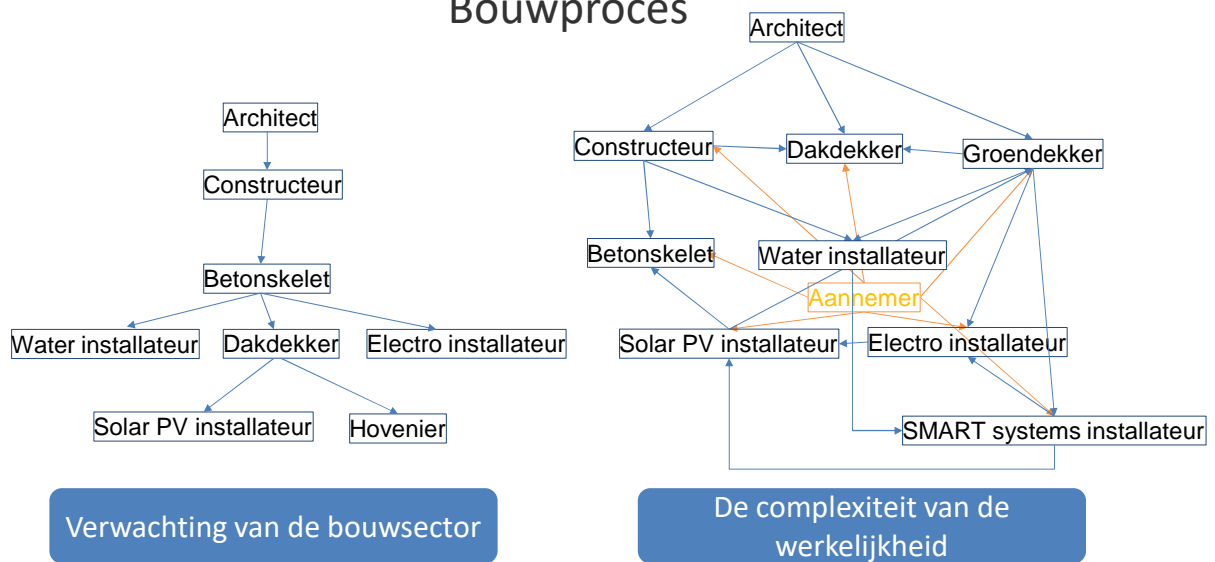




## De praktijk..



## Bouwproces





## Nazorg



27

## Innovatie, wat betekent dat in de bouw?

- **Niet alles doet het meteen**
- **Afschuif-systematiek werkt totaal niet.**
- **Vergt een voortgezette samenwerking.**
- **Monitor de dashboards EN de site op afwijkingen en pak die op**
- **Wijs budget toe (op voorhand) om aanpassingen te doen**
- **Wij een onderhoudsbedrijf aan op voorhand: onderhoud moet uitkristalliseren.**

28


## Resultaat



29

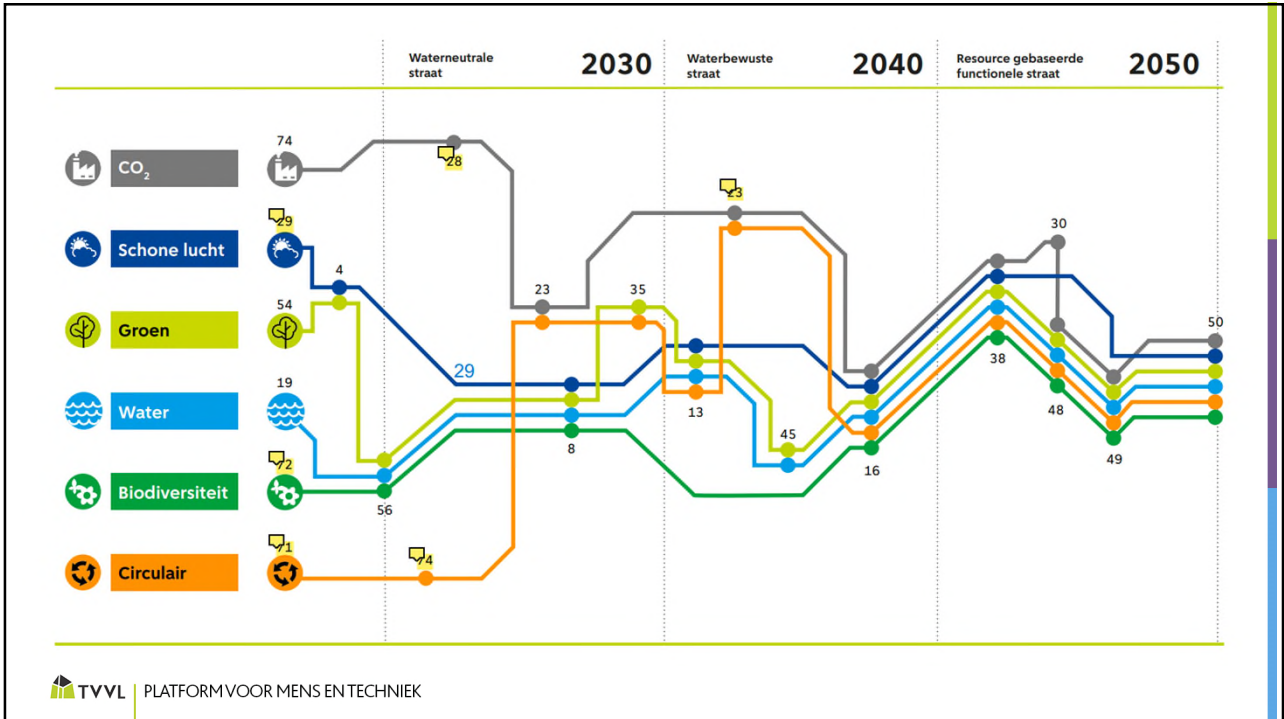
## De Toekomst: Steden die functioneren als Eco-systemen



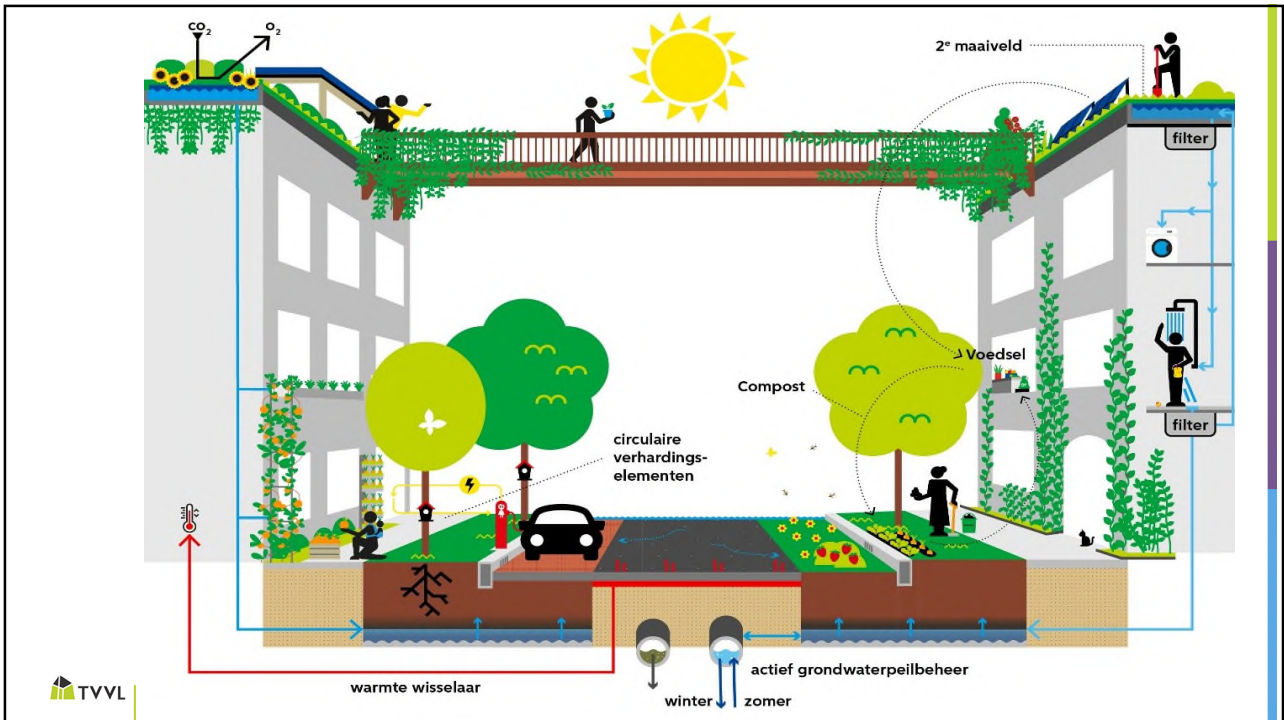
 TVVL | PLATFORMVOOR MENS EN TECHNIEK

30





31



32

## Does Nature love Technology?



PLATFORMVOOR MENS EN TECHNIEK

33

3-4-2024

33

### Noodzaak van Innovatie?

- Innovatie is geen 'optie' of 'keuze'
- In de natuur is dat het verschil tussen overleven of uitsterven
- Dus in samenwerking zullen we de komende jaren in sterk versneld tempo moeten bouwen aan de 'interface' tussen stad en natuur

PLATFORMVOOR MENS EN TECHNIEK

34



Bedankt voor je aandacht.  
*joris.voeten@wur.nl*



# I Bijlage: vragenlijsten enquêtes bewoners Mannoury

## Vragenlijst 1: Klanttevredenheid en afwegingen bij huren appartement

### Welkom

Met het invullen van de vragenlijst helpt u de gemeente Amsterdam inzicht te krijgen in uw beleving en redenen om voor uw huidige woning te kiezen. Er zijn geen goede of foute antwoorden, we zijn benieuwd naar uw mening. Het invullen kost ongeveer 10 minuten.

De antwoorden worden anoniem verwerkt, vertrouwelijk behandeld en niet gebruikt voor commerciële doeleinden. Het onderzoek wordt uitgevoerd door een onafhankelijk onderzoeksinstituut in samenwerking met Aedes en Gemeente Amsterdam.

Hartelijk dank alvast voor het meedoen!

*De volgende twee vragen zijn bedoeld voor de onderzoekers om te kunnen kijken of er verschillen zijn in de antwoorden tussen man/vrouw/anders en in houding ten aanzien van kraanwater.*

### Algemene vragen

- 1) Wat is uw geslacht?
  - a. Man
  - b. Vrouw
  - c. Anders
  - d. Wil ik niet zeggen

De volgende stellingen hebben te maken met uw houding ten aanzien van kraanwater. De stellingen staan bij elkaar in 4 groepen. Lees de 4 groepen met stellingen goed door:

<p style="text-align: center;"><b>Stellingen A</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ik geloof in gezamenlijk werken aan een duurzamere wereld.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven zouden water op een 'groene' en duurzame manier moeten produceren.</li> <li>• Waterhergebruik in en om het huis of via een tweede leidingnet lijkt mij een goed idee.</li> <li>• Ieder individu heeft zijn eigen verantwoordelijkheid duurzaam en zuinig met water om te gaan.</li> <li>• Informatie en inzicht voor individuele burgers leidt tot bewustwording en daarmee mogelijk duurzamer waterverbruik.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Stellingen C</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Het is mijn overtuiging dat water de absolute basis is en voor iedereen gelijk moet zijn.</li> <li>• Het is onwenselijk dat huishoudens tegen extra betaling een betere kwaliteit water of een betere service zouden kunnen inkopen.</li> <li>• Om de voorziening van voldoende kraanwater in de toekomst te garanderen ben ik bereid zuinig om te gaan met mijn water.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven hebben ook een taak in de voorziening van water in ontwikkelingslanden.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Stellingen B</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ik ben bezorgd over mijn gezondheid.</li> <li>• Kraanwater zou zo natuurlijk mogelijk moeten zijn.</li> <li>• Stoffen, ook in concentraties die veel lager zijn dan waarbij er schadelijke effecten zijn, zouden uit mijn kraanwater verwijderd moeten worden.</li> <li>• Ik vind het niet wenselijk dat (maatschappelijke) inspanningen van drinkwaterbedrijven, anders dan het leveren van veilig water, aan mij als consument worden doorberekend.</li> <li>• Soms maak ik mij zorgen over kwaliteit van mijn water in de toekomst, en de effecten daarvan op mijn gezondheid.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Stellingen D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voor mij is gemak en geen gedoe belangrijk.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven zouden zich moeten beperken tot hun kerntaak: het zorgen voor voldoende, gezond kraanwater van hoge kwaliteit op een zo efficiënt mogelijke manier.</li> <li>• Over mijn kraanwater wil ik het liefst zo min mogelijk na hoeven denken.</li> <li>• Ik maak me geen zorgen over mijn kraanwater: ook in de toekomst voorzie ik door technologische vooruitgang geen onoverkomelijke problemen.</li> </ul>

2) Welke groep stellingen geeft het best weer hoe u denkt over kraanwater?

- a. Stellingen A
- b. Stellingen B
- c. Stellingen C
- d. Stellingen D

3) Waren er **voordelen** die u overtuigd hebben om voor uw Mannoury woning te kiezen?

- a. Nee
- b. Ja, namelijk .....

4) Waren er **nadelen** die een rol hebben gespeeld bij uw keuze voor een Mannoury woning?

- a. Nee
- b. Ja, namelijk .....

5) Heeft u suggesties hoe wij toekomstige huurders vooraf nog beter kunnen informeren over de voor- en nadelen van duurzaam, groen en circulair wonen?

6) In hoeverre bent u het eens met de volgende stelling?

Bij de keuze voor een Mannoury woning was ik bereid hogere servicekosten te betalen voor de groene daken en balkons en de neutrale CO<sub>2</sub>-voetafdruk.

- Helemaal mee eens
- Mee eens
- Neutraal
- Mee oneens
- Helemaal mee oneens
- Weet niet

7) Let u beter op welke douche- en reinigingsproducten u gebruikt, omdat u weet dat dit onderzoek de waterkwaliteit van uw douchewater meet?

- a. Nee
- b. Een beetje
- c. Ja, ik denk dat ik wel iets beter oplet door dit onderzoek

**Tot slot een aantal algemene stellingen en vragen over milieu en waterverbruik.**

8) In hoeverre bent u het eens met de volgende stellingen?

- a. Ik wil zo duurzaam mogelijk leven, óók als ik daarvoor moet inleveren op comfort
  - b. Waterbesparing is zinloos als niet iedereen meedoet
  - c. Ik doe mijn best zo min mogelijk water te gebruiken
  - d. De aandacht voor klimaatverandering is sterk overdreven
  - e. Er is genoeg water in Nederland, de komende 25 jaar hoeven we niet zuinig met water te zijn
  - f. Ik zou graag meer informatie willen over hoe ik water kan besparen door thuis anders met water om te gaan
  - g. Ik zou thuis graag (nog) meer kraanwater willen besparen
- Helemaal mee eens
  - Mee eens
  - Neutraal
  - Mee oneens
  - Helemaal mee oneens
  - Weet niet

9) Voor welke soort water denkt u dat in Nederland de kwaliteitseisen hoger liggen: voor kraanwater of voor flessenwater?

- a. Kraanwater
- b. Flessenwater
- c. De kwaliteitseisen liggen gelijk
- d. Weet ik niet

10) Wat heeft u de afgelopen 24 maanden gedaan met uw oude medicijnen? (*als u de afgelopen 24 maanden geen oude medicijnen in huis heeft gehad, geef dan antwoord op de vraag: Wat zou u doen met oude medicijnen?*)

*Meerdere antwoorden mogelijk*

- a. Thuis laten liggen/niks
- b. Ingeleverd bij de apotheek, winkel of recyclingepark
- c. Weggegooid in de vuilnisbak
- d. Doorgespoeld door de gootsteen of de wc

**Vragenlijst 2: Gedragaanpassingen grijswatersysteem**

**Welkom**

Met het invullen van de vragenlijst helpt u de gemeente Amsterdam inzicht te krijgen in uw beleving van het duurzaam wonen in uw Mannoury woning. Er zijn geen goede of foute antwoorden, we zijn benieuwd naar uw mening. Het invullen kost ongeveer 10 minuten.

De antwoorden worden anoniem verwerkt, vertrouwelijk behandeld en niet gebruikt voor commerciële doeleinden. Het onderzoek wordt uitgevoerd door een onafhankelijk onderzoeksinstituut in samenwerking met Aedes en Gemeente Amsterdam.

Hartelijk dank alvast voor het meedoen!



De volgende stellingen hebben te maken met uw houding ten aanzien van kraanwater. De stellingen staan bij elkaar in 4 groepen. Lees de 4 groepen met stellingen goed door:

<p style="text-align: center;"><b>Stellingen A</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ik geloof in gezamenlijk werken aan een duurzamere wereld.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven zouden water op een 'groene' en duurzame manier moeten produceren.</li> <li>• Waterhergebruik in en om het huis of via een tweede leidingnet lijkt mij een goed idee.</li> <li>• Ieder individu heeft zijn eigen verantwoordelijkheid duurzaam en zuinig met water om te gaan.</li> <li>• Informatie en inzicht voor individuele burgers leidt tot bewustwording en daarmee mogelijk duurzamer waterverbruik.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Stellingen C</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Het is mijn overtuiging dat water de absolute basis is en voor iedereen gelijk moet zijn.</li> <li>• Het is onwenselijk dat huishoudens tegen extra betaling een betere kwaliteit water of een betere service zouden kunnen inkopen.</li> <li>• Om de voorziening van voldoende kraanwater in de toekomst te garanderen ben ik bereid zuinig om te gaan met mijn water.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven hebben ook een taak in de voorziening van water in ontwikkelingslanden.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Stellingen B</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ik ben bezorgd over mijn gezondheid.</li> <li>• Kraanwater zou zo natuurlijk mogelijk moeten zijn.</li> <li>• Stoffen, ook in concentraties die veel lager zijn dan waarbij er schadelijke effecten zijn, zouden uit mijn kraanwater verwijderd moeten worden.</li> <li>• Ik vind het niet wenselijk dat (maatschappelijke) inspanningen van drinkwaterbedrijven, anders dan het leveren van veilig water, aan mij als consument worden doorberekend.</li> <li>• Soms maak ik mij zorgen over kwaliteit van mijn water in de toekomst, en de effecten daarvan op mijn gezondheid.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Stellingen D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voor mij is gemak en geen gedoe belangrijk.</li> <li>• Drinkwaterbedrijven zouden zich moeten beperken tot hun kerntaak: het zorgen voor voldoende, gezond kraanwater van hoge kwaliteit op een zo efficiënt mogelijke manier.</li> <li>• Over mijn kraanwater wil ik het liefst zo min mogelijk na hoeven denken.</li> <li>• Ik maak me geen zorgen over mijn kraanwater: ook in de toekomst voorzie ik door technologische vooruitgang geen onoverkomelijke problemen.</li> </ul>

1) Welke groep stellingen geeft het best weer hoe u denkt over kraanwater?

- a. Stellingen A
- b. Stellingen B
- c. Stellingen C
- d. Stellingen D

2) In hoeverre bent u het eens met de volgende stelling?

Ik vind het geen probleem om onder de douche bepaalde verzorgingsproducten niet te gebruiken, om zo het groene dak en de balkons goed te kunnen bewateren.

- Helemaal mee eens
- Mee eens
- Neutraal
- Mee oneens
- Helemaal mee oneens
- Weet niet

3) In hoeverre houdt u zich aan de volgende gedragsregels? Het is belangrijk dat u eerlijk antwoordt. Al uw antwoorden worden anoniem verwerkt en vertrouwelijk behandeld.

- Gebruik alleen biologisch afbreekbare douche- en reinigingsproducten
- U kunt azijn of soda voor de douchereiniging gebruiken
- Gebruik geen anti-kalk, chloor of ontstoppingsproducten
- Frituurvet mag niet door de wc gespoeld worden maar moet ingeleverd worden bij de milieustraat
- Olie, terpentijn/wasbenzine en verfresten moeten ingeleverd worden bij de milieustraat

- Sifon van de doucheput/draingoot moet 1 keer per 2 weken schoongemaakt worden
- Chemische reinigingsproducten voor de balkons zijn niet toegestaan
- In het eerste jaar vragen wij u de balkonplanten water te geven, na een jaar gaat dit automatisch
- U mag zelf geen planten toevoegen aan de plantenbakken, of planten verwijderen

- Dit is mij niet bekend
- Dit is mij bekend, maar ik heb het nog niet zo uitgevoerd
- Dit wil ik graag doen, maar het lukt nog niet altijd
- Dit doe ik

4) Is het wel eens gebeurd dat (per ongeluk) een niet afbreekbaar douche- of reinigingsproduct in het doucheputje is gekomen? Zo ja, welke van de onderstaande situaties waren voor u van toepassing? Uw eerlijke antwoord helpt ons het meest! Antwoorden worden anoniem verwerkt en vertrouwelijk behandeld.

Meerdere antwoorden zijn mogelijk.

- a. Bezoekers maakten gebruik van de douche en wisten niet, of waren vergeten, dat zij deze producten niet konden gebruiken
- b. Ik vergeet het zelf weleens, maar niet vaak
- c. Ik vergeet het zelf regelmatig
- c. Ik ben er later achter gekomen dat dit in mijn huurcontract staat
- d. De doucheafvoer was verstopt en toen heb ik bij hoge uitzondering toch een chemisch ontstoppingsmiddel gebruikt
- e. Mijn kinderen hebben per ongeluk niet afbreekbare douche- of reinigingsproducten gebruikt
- f. Tijdens bezoek of huisfeestje is er weleens per ongeluk frituurvet door de gootsteen/wc/doucheputje gespoeld
- h. Ik kan/kon geen goede biologische alternatieven vinden voor de douche- of reinigingsproducten
- i. Ik had de verpakking van het douche- of reinigingsproduct verkeerd gelezen
- j. Het was mij te veel moeite en ik heb mij er (een tijdje) niet aan gehouden
- e. Anders namelijk .....

5) In hoeverre bent u het eens met de volgende stellingen?

- a. Als mijn buren zich niet aan de regels houden dan ben ik sneller geneigd dat ook niet te doen
- b. Sinds ik in deze woning woon, heb ik meer interesse in hoe ik duurzamer kan leven
- c. Ik vind het leuk om anderen te overtuigen om in de toekomst ook voor dit duurzame woonconcept te kiezen
  - Helemaal mee eens
  - Mee eens
  - Neutraal
  - Mee oneens
  - Helemaal mee oneens
  - Weet niet

6) Sinds ik in deze woning woon, douche ik:

- a. korter
- b. langer
- c. geen verandering
- d. weet ik niet

7) Sinds ik in dit woning woon, douche ik:

- a. minder vaak
- b. vaker
- c. geen verandering
- d. weet ik niet

8) Heeft u weleens vaker of langer de douche gebruikt omdat u het idee had dat het groene dak en balkons te weinig water ontvingen?

- a. Ja
- b. Ja, maar dat was vooral een excuus om vaker en langer te genieten van het douchen
- c. Nee, maar ik zou dat misschien wel doen tijdens bijvoorbeeld een grote hittegolf
- d. Nee, dat is niet nodig

**Tot slot willen we graag weten hoe we u in de toekomst beter kunnen informeren.**

9) De volgende informatie zou ik als prettig ervaren:

- a. Ik zou het leuk vinden om regelmatig foto's of camerabeelden te ontvangen van hoe het dak erbij staat
- b. Ik zou graag inzicht willen hebben in hoeveel de zonnepanelen extra opleveren (in vergelijking met normale zonnepanelen, omdat onze panelen verkoeld worden door het groene daksysteem)
- c. Ik zou graag meer informatie willen ontvangen over welke plant- en diersoorten leven op het dak en de balkons, en wanneer de planten bloeien
- d. Ik vind het prettig om via de app terugkoppeling te krijgen of het douchewater heeft voldaan aan de kwaliteitseisen
- e. Ik wil graag informatie over hoe de gemeente Amsterdam dit concept in andere gebouwen gaat toepassen.
- f. Anders, namelijk .....

## II Bijlage: resultaten enquêtes bewoners Mannoury

Enquete 1 Klanttevredenheid en afwegingen bij huren appartement (taak 6.1)									
		aantal respondenten							
		17							
	respons	11 in compleet							
		6 compleet							
1	Wat is uw geslacht?	13							
	a. Man	46%							
	b. Vrouw	54%							
	c. Anders	0%							
	d. Wil ik niet zeggen	0%							
2	Welke groep stellingen geeft het best weer hoe u denkt over kraanwater?	9							
	a. Stellingen A	0%							
	b. Stellingen B	22%							
	c. Stellingen C	44%							
	d. Stellingen D	33%							
3	Waren er <b>voordelen</b> die u overtuigd hebben om voor uw Mannoury woning te kiezen?	8							
	a. Nee	50%							
	b. Ja, namelijk .....	50%							
4	Waren er <b>nadelen</b> die een rol hebben gespeeld bij uw keuze voor een Mannoury woning?	8							
	a. Nee	100%							
	b. Ja, namelijk .....	0%							
5	Heeft u suggesties hoe wij toekomstige huurders vooraf nog beter kunnen informeren over de voor- en nadelen van duurzaam, groen en circulair wonen?								
6	In hoeverre bent u het eens met de volgende stelling?								
	Bij de keuze voor een Mannoury woning was ik bereid hogere servicekosten te betalen voor de groene daken en balkons en de neutrale CO2-voetafdruk.	7							
	- Helemaal mee eens								
	- Mee eens								
	- Neutraal	57%							
	- Mee oneens	14%							
	- Helemaal mee oneens	29%							
	- Weet niet								
7	Let u beter op welke douche- en reinigingsproducten u gebruikt, omdat u weet dat dit onderzoek de waterkwaliteit van uw douchewater meet?	7							
	a. Nee	14%							
	b. Een beetje	29%							
	c. Ja, ik denk dat ik wel iets beter oplet door dit onderzoek	57%							
8	In hoeverre bent u het eens met de volgende stellingen?	7	helemaal eens	eens	neutraal	oneens	helemaal oneens	weet niet	
	a. Ik wil zo duurzaam mogelijk leven, óók als ik daarvoor moet inleveren op comfort	14%		29%			57%		
	b. Waterbesparing is zinloos als niet iedereen meedoet			43%	14%	14%		29%	
	c. Ik doe mijn best zo min mogelijk water te gebruiken	14%		43%	43%				
	d. De aandacht voor klimaatverandering is sterk overdreven			14%	14%	14%		57%	
	e. Er is genoeg water in Nederland, de komende 25 jaar hoeven we niet zuinig met water te zijn			29%			14%	29%	29%
	f. Ik zou graag meer informatie willen over hoe ik water kan besparen door thuis anders met water om te gaan	29%		29%	29%	14%			
	g. Ik zou thuis graag (nog) meer kraanwater willen besparen	17%	17%		33%	33%			
9	Voor welke soort water denkt u dat in Nederland de kwaliteitseisen hoger liggen: voor kraanwater of voor flessenwater?	6							
	a. Kraanwater	17%							
	b. Flessenwater	33%							
	c. De kwaliteitseisen liggen gelijk	0%							
	d. Weet ik niet	50%							
10	Wat heeft u de afgelopen 24 maanden gedaan met uw oude medicijnen? (als u de afgelopen 24 maanden geen oude medicijnen in huis heeft gehad, geef dan antwoord op de vraag: Wat zou u doen met oude medicijnen?)	6							
	Meerdere antwoorden mogelijk								
	a. Thuis laten liggen/niks	33%							
	b. Ingeleverd bij de apotheek, winkel of recyclingepark	0%							
	c. Weggegooid in de vuilnisbak	67%							
	d. Doorgespoeld door de gootsteen of de wc	0%							



**Open antwoorden enquête 1 (allen van Engelstalige respondenten)**

**Do you have any suggestions on how we can better inform potential tenants in advance about the pros and cons of sustainable, green and circular living?**

1. 4 Geen commentaar

2. I think it can be done via mobile application and also by post

3. To start with, all apartments (including the social ones) should have been provided with floors. The practice of having to lay and remove them yourself is very unenvironmental. I understand that the departing tenants have received offers to sell their floors to incoming tenants, but by making tenants purchase floors (tenants who are expected to leave after 2 years), you cannot expect that they will invest in good quality environmentally sourced wood floors (which are more expensive than cheap laminate, for example).

Enquete 2: Gedragsaanpassingen grijswatersysteem (taak 6.2)		aantal respondenten		
		8		
	respons	5 incompleet		
		3 compleet		
1	Welke groep stellingen geeft het best weer hoe u denkt over kraanwater?	4		
	a. Stellingen A	50%		
	b. Stellingen B	0%		
	c. Stellingen C	25%		
	d. Stellingen D	25%		
2	In hoeverre bent u het eens met de volgende stelling? Ik vind het geen probleem om onder de douche bepaalde verzorgingsproducten niet te gebruiken, om zo het groene dak en de balkons goed te kunnen bewateren.	3		
	- Helemaal mee eens	33%		
	- Mee eens	33%		
	- Neutraal	33%		
	- Mee oneens	0%		
	- Helemaal mee oneens	0%		
	- Weet niet	0%		
3	In hoeverre houdt u zich aan de volgende gedragsregels? Het is belangrijk dat u eerlijk antwoordt. Al uw antwoorden worden anoniem verwerkt en vertrouwelijk behandeld.	3		
	- Gebruik alleen biologisch afbreekbare douche- en reinigingsproducten			
	- U kunt azijn of soda voor de douchereiniging gebruiken			
	- Gebruik geen anti-kalk, chloor of ontstoppingsproducten			
	- Frituurvet mag niet door de wc gespoeld worden maar moet ingeleverd worden bij de milieustraat			
	- Olie, terpentijn/wasbenzine en verfresten moeten ingeleverd worden bij de milieustraat			
	- Sifon van de doucheput/draingoot moet 1 keer per 2 weken schoongemaakt worden			
	- Chemische reinigingsproducten voor de balkons zijn niet toegestaan			
	- In het eerste jaar vragen wij u de balkonplanten water te geven, na een jaar gaat dit automatisch			
	- U mag zelf geen planten toevoegen aan de plantenbakken, of planten verwijderen			
	- Dit is mij niet bekend	33%		
	- Dit is mij bekend, maar ik heb het nog niet zo uitgevoerd	0%		
	- Dit wil ik graag doen, maar het lukt nog niet altijd	33%		
	- Dit doe ik	33%		
4	Is het wel eens gebeurd dat (per ongeluk) een niet afbreekbaar douche- of reinigingsproduct in het doucheputje is gekomen? Zo ja, welke van de onderstaande situaties waren voor u van toepassing? Uw eerlijke antwoord helpt ons het meest! Antwoorden worden anoniem verwerkt en vertrouwelijk behandeld. Meerdere antwoorden zijn mogelijk.	3		
	a. Bezoekers maakten gebruik van de douche en wisten niet, of waren vergeten, dat zij deze producten niet konden gebruiken			
	b. Ik vergeet het zelf weleens, maar niet vaak	2		
	c. Ik vergeet het zelf regelmatig			
	c. Ik ben er later achter gekomen dat dit in mijn huurcontract staat			
	d. De doucheafvoer was verstopt en toen heb ik bij hoge uitzondering toch een chemisch ontstoppingsmiddel gebruikt	1		
	e. Mijn kinderen hebben per ongeluk niet afbreekbare douche- of reinigingsproducten gebruikt			
	f. Tijdens bezoek of huisfeestje is er weleens per ongeluk frituurvet door de gootsteen/wc/doucheputje gespoeld			
	h. Ik kan/kon geen goede biologische alternatieven vinden voor de douche- of reinigingsproducten	1		
	i. Ik had de verpakking van het douche- of reinigingsproduct verkeerd gelezen	1		
	j. Het was mij te veel moeite en ik heb mij er (een tijdje) niet aan gehouden	1		
	e. Anders namelijk .....	1		
5	In hoeverre bent u het eens met de volgende stellingen?	3		
	a. Als mijn buren zich niet aan de regels houden dan ben ik sneller geneigd dat ook niet te doen		2 neutraal	1 mee oneens
	b. Sinds ik in deze woning woon, heb ik meer interesse in hoe ik duurzamer kan leven	2 mee eens	1 neutraal	
	c. Ik vind het leuk om anderen te overtuigen om in de toekomst ook voor dit duurzame woonconcept te kiezen	2 mee eens	1 neutraal	
	- Helemaal mee eens			
	- Mee eens			
	- Neutraal			
	- Mee oneens			
	- Helemaal mee oneens			
	- Weet niet			

6	Sinds ik in deze woning woon, douche ik:	3		
	a. korter	33%		
	b. langer	0%		
	c. geen verandering	67%		
	d. weet ik niet	0%		
7	Sinds ik in dit woning woon, douche ik:	3		
	a. minder vaak	0%		
	b. vaker	0%		
	c. geen verandering	100%		
	d. weet ik niet	0%		
8	Heeft u weleens vaker of langer de douche gebruikt omdat u het idee had dat het groene dak en balkons te weinig water ontvangen?	3		
	a. Ja	0%		
	b. Ja, maar dat was vooral een excuus om vaker en langer te genieten van het douchen	0%		
	c. Nee, maar ik zou dat misschien wel doen tijdens bijvoorbeeld een grote hittegolf	33%		
	d. Nee, dat is niet nodig	67%		
9	De volgende informatie zou ik als prettig ervaren:	3		
	a. Ik zou het leuk vinden om regelmatig foto's of camerabeelden te ontvangen van hoe het dak erbij staat	33%		
	b. Ik zou graag inzicht willen hebben in hoeveel de zonnepanelen extra opleveren (in vergelijking met normale zonnepanelen, omdat onze panelen verkoeld worden door het groene daksysteem)	33%		
	c. Ik zou graag meer informatie willen ontvangen over welke plant- en diersoorten leven op het dak en de balkons, en wanneer de planten bloeien			
	d. Ik vind het prettig om via de app terugkoppeling te krijgen of het douchewater heeft voldaan aan de kwaliteitseisen	33%		
	e. Ik wil graag informatie over hoe de gemeente Amsterdam dit concept in andere gebouwen gaat toepassen.			
	f. Anders, namelijk .....			

### III Bijlage: Vragen gerelateerd aan de Mannoury woontorens als onderdeel van het buurtonderzoek uitgevoerd door I&O research.

#### Klimaatadaptatie in de woonomgeving

5. Hoe tevreden bent u over de volgende aspecten van uw woonomgeving? **Deze kan later gekruist worden met vraag 6 en/of 7 om de invloed van de woontorens te schatten**

Gridvraag met 5 punten (Zeer tevreden – Zeer ontevreden) + weet niet/geen mening

- a. Uw eigen woning
  - b. De buitenruimte
  - c. Het uitzicht vanuit uw woning
  - d. De buurt
  - e. De waardeontwikkeling van uw woning
6. Bent u bekend met de Mannoury-woontorens?
- a. Ja, ik ben hier weleens binnen geweest
  - b. Ja, ik had ze al zien staan, maar ben er (nog) niet binnen geweest
  - c. Wel van gehoord, maar nog nooit gezien
  - d. Nooit van gehoord

*Alleen stellen als 6 = a, b of c*

7. In hoeverre bent u op de hoogte van de klimaatadaptieve maatregelen in de Mannoury-woontorens?
- a. Volledig op de hoogte
  - b. Goed op de hoogte
  - c. Een beetje op de hoogte
  - d. Helemaal niet op de hoogte

*Alleen stellen als 7 = a, b of c*

8. Welke klimaatadaptieve maatregelen kunt u noemen die in de Mannoury-woontorens aanwezig zijn? (open vraag)

*Mannoury woontorens is een uniek appartementengebouw. Met zijn groene daken en balkons helpt het gebouw de stad te koelen. Regenwater wordt opgevangen. Dit vermindert de kans op wateroverlast tijdens heftige regenbuien. Douchewater wordt gezuiverd. Het opgevangen regenwater en het gezuiverde douchewater worden gebruikt om de planten op en rond het gebouw water te geven.*

9. In hoeverre bent u het eens met de volgende stellingen:

Gridvraag met 5 punten (Helemaal eens – Helemaal oneens) + weet niet/geen mening

- a. Ik ben benieuwd hoe de inwoners van de Mannoury-woontorens de klimaatadaptieve maatregelen ervaren
- b. Ik zou willen dat er in mijn woning/gebouw ook vergelijkbare klimaatadaptieve maatregelen zouden zijn
- c. De Mannoury-woontorens inspireren mij om mij ook te verdiepen in het nemen van klimaatadaptieve maatregelen



- d. Ik wil best klimaatadaptieve maatregelen in mijn woning/gebouw, zolang ik dat zelf maar niet hoeft te regelen
- e. Ik vind de Mannoury-woontorens een verrijking voor de buurt
- f. De groene uitstraling van de Mannoury-woontorens vind ik mooi
- g. Als ik ideeën heb over aanpassingen tegen extremer weer in mijn buurt, heb ik voldoende mogelijkheden om mijn stem te laten horen



## IV Bijlage: analyseresultaten douchewater, effluent zuiveringen en hemelwaterafvoer

Tabel 2 Gemiddelde samenstelling van het douchewater, het effluent van het helofytenfilter en het vanuit gebouw 3 naar het hemelwaterriool stromende water

		Douchewater		Effluent helofytenfilter		Uitstroom regenwaterriool	
		n	gemiddelde	n	gemiddelde	n	gemiddelde
pH	-	9	7.64	6	7.31	1	7.19
Geleidbaarheid	mS/cm	8	831	5	674	1	544
BZV	mg/l	9	51.0	6	< 1.80	1	< 1
CZV	mg/l	9	147	6	< 9.60	1	15
Zuurstof	mg/l	7	0.14	5	1.77	1	1.81
Ortho -P (PO4-P)	mg/l	8	1.65	6	< 0.02	1	0.07
Totaal -P	mg/l	8	2.34	6	< 0.05	1	0.1
Totaal -P2O5	mg/l	7	4.74	6	< 0.12	1	0.22
Kj-N	mg/l	9	26.0	6	6.35	1	< 1
NH4-N	mg/l	9	22.5	6	5.80	1	< 0.05
NO3-N	mg/l	9	< 0.18	6	1.50	1	< 0.2
Totaal - N	mg/l	9	24.8	6	7.47	1	< 1
Anion actieve detergenten	mg/l	8	4.20	6	< 0.05	1	< 0.05
Droogrest NEN 6621	mg/l	8	44.2	6	< 4.72	1	< 5
Bez.vol. 1 uur	ml/l	4	< 0.45	2	< 0.10		
Zink	µg/l	7	42.4	6	< 10.0	1	< 10
Chloride	mg/l	5	86	4	86.0	1	50
Bact. Coligroep	cfu/l	5	3.E+06	3	4.E+04		
<i>E.coli</i>	cfu/l	5	2.E+06	3	2.E+04		

< alle metingen beneden detectielimiet; < één of enkele metingen beneden detectielimiet

Tabel 3 Gemiddelde samenstelling van het water in de bioreactortank, het effluent van de MBR en het vanuit gebouw 4 naar het hemelwaterriool stromende water. De eerste meting in de MBR is niet meegenomen in de analyse omdat er nog effect zichtbaar was van een foutaansluiting

		Bioreactortank		Effluent membraanbioreactor		Uitstroom regenwaterriool	
		n	gemiddelde	n	gemiddelde	n	gemiddelde
pH	-	2	7.62	2	7.42	1	7.94
Geleidbaarheid	mS/cm	2	696.5	2	698.5	1	270
BZV	mg/l	2	9.65	2	< 1.25	1	1
CZV	mg/l	2	46	2	8	1	18
zuurstof	mg/l	2	4.27	2	3.175	1	8.14
Ortho -P (PO4-P)	mg/l	2	0.32	2	0.63	1	0.48
Totaal -P	mg/l	2	0.865	2	0.705	1	0.49
Totaal -P2O5	mg/l	2	1.95	2	1.615	1	1.1
Kj-N	mg/l	2	3.25	2	< 1.05	1	5.2
NH4-N	mg/l	2	< 0.112	2	0.26	1	0.093
NO3-N	mg/l	2	8.8	2	9.3	1	3.7
Totaal - N	mg/l	2	10.1	2	10	1	4
Anion actieve detergenten	mg/l	2	< 0.05	2	< 0.05	1	< 0.05
droogrest NEN 6621	mg/l	2	21	2	< 3.5	1	< 5
bez.vol. 1 uur	ml/l	1	0.8	1	< 0.1	0	
zink	µg/l	2	56	2	54.5	1	40
chloride	mg/l	1	81	1	80	1	11
<i>Bact. Coligroep</i>	cfu/l	1	8.E+04	1	1.E+02	1	4.E+04
<i>E.coli</i>	cfu/l	1	< 1.E+04	1	1.E+02	1	< 1.E+03

< alle metingen beneden detectielimiet; < één of enkele metingen beneden detectielimiet