

# TKI project Eco-System-Stad



Een kosteneffectieve optimalisatie tool voor de verdeling van blauw-groene infrastructuur ter mitigatie van het hitte-eiland effect.

Een afstudeeronderzoek in de I.r. J.P. van Muijlwijkstraat, Arnhem

Door Loudon Kremer MSc, onder begeleiding van Alessio Belmondo Bianchi Di Lavagna MSc & Joris G. W. F. Voeten MSc

# Colofon

**Titel:** Een kosteneffectieve optimalisatie tool voor de verdeling blauw-groene infrastructuur ter mitigatie van het hitte-eiland effect.

Proefgebied: J.p. I.r. Van Muijwijkstraat, Arnhem

Vertaling/samenvatting afstudeeronderzoek Louden Kremer

**Datum: 29 mei 2024**

**Auteur:**

Louden Kremer - Wageningen Environmental Research

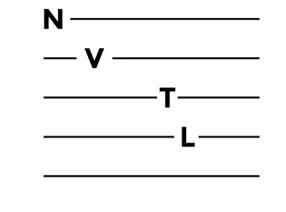
Onder begeleiding van:

Alessio Belmondo Bianchi Di Lavagna - WUR (ETE)

Joris G. W. F. Voeten - Wageningen Environmental Research

Volg het project op:

[www.ecosysteemstad.nl](http://www.ecosysteemstad.nl)





# Inhoudsopgave

<b>1. Inleiding</b>	<b>4</b>
TKI Eco-Systeem-Stad en Wageningen University & Research	4
Planning support tool	4
Proefgebied	4
Doel van het onderzoek	4
<b>2. Aanpak</b>	<b>5</b>
Top-down benadering	5
Keuzevariabelen	5
Energiebalans	6
Randvoorwaarden, aannames en klimaatparameters	6
Scenario's	6
Microklimaatsimulatie	7
<b>3. Resultaten</b>	<b>7</b>
Investeringen en de optimale verdeling blauw-groene infrastructuur	7
Mitigatie van een 1/30 jaar regenbui	9
Monetarisering en berekening van optima	9
ENVI-met simulatie	10
<b>4. Conclusies</b>	<b>12</b>
<b>5. Aanbevelingen</b>	<b>13</b>
<b>6. Limitaties</b>	<b>13</b>
<b>7. Bronnen</b>	<b>15</b>

## Bijlagen:

A: Inputparameters	18
B: Conceptueel raamwerk	19
C: Opbouw van verkoelend effect, monetarisering en kosten	20
D: Randvoorwaarden	21
E: Aannames	22

# 1. Inleiding

De frequentie en omvang van weersextremen zoals droogte, wateroverlast en hitte, nemen toe ten gevolge van klimaatverandering (Muhammad Adnan et al., 2021). Daar bovenop is urbanisatie een trend die de negatieve gevolgen van extreme weersomstandigheden katalyseert door meer mensen bloot te stellen aan de verhoogde klimaatkwetsbaarheid van de stedelijke structuur. In onaangepaste stedelijke gebieden neemt bijvoorbeeld het thermisch comfort af, resulterend in verhoogde ziekte- of zelfs sterftcijfers waardoor de leefbaarheid in de stad onder druk komt te staan (Ebi et al., 2021). Om een gezonde stedelijke leefomgeving te waarborgen moeten steden zich aanpassen aan het veranderende klimaat. Het implementeren van functioneel groen, dat onder andere zorgt voor waterretentie en verkoeling, is een veelbelovende methode om de stad veerkrachtiger te maken tegen klimaatverandering.

## TKI Eco-Systeem-Stad en Wageningen University & Research

vanuit het Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI) in het project Ecosysteem-stad is de vraag ontstaan hoe groene infrastructuur door een integrale benadering met blauwe infrastructuur kan bijdragen aan een klimaatbestendige en natuur inclusieve stad. Hierbij dient gekeken te worden naar de synergieën tussen waterbeschikbaarheid en functioneel groen en wordt rekening gehouden met geografie, soorteigenschappen, kosten en (financiële) baten en technische inpasbaarheid. Naar aanleiding van deze vraag is dit onderzoek geformuleerd. Dit is een op hoofdlijnen vertaald onderzoek dat is uitgevoerd als afstudeerthesis bij de vakgroep Environmental Technology van Wageningen University (Alessio Belmondo Bianchi Di Lavagna, MSc) waarin de begeleiding gedeeld werd met Wageningen Environmental Research (Joris G. W. F. Voeten MSc). Hartelijk dank voor hun bijdragen aan dit onderzoek.

## Planning support tool

Het maken van een keuze die rekening houdt met bovenstaande eigenschappen van Blauw-Groene Infrastructuren (BGI) is vaak te complex om optimaal te doen zonder systematische aanpak. Een Planning Support System (PSS) is een dergelijke methode die helpt bij het maken van objectieve keuzes door het kwantificeren van beoordelingscriteria. Het gebruik van een PSS om de optimale verdeling van BGI te bepalen, kan de totale positieve effecten van BGI verbeteren. Echter, volgens Jayasooriya et al. (2020) is dit niet de manier waarop de planning van BGI hedendaags wordt uitgevoerd: *“In de huidige*

*praktijk wordt de optimale selectie van groene infrastructuur (...) uitgevoerd op basis van expert judgement. Er zijn momenteel geen systematische methodes beschikbaar voor dit proces”* (Jayasooriya et al., 2020). Dit betekent dat de planning van BGI op een niet optimale manier gebeurt en dat er een expert-bias aanwezig is. Een PSS, dat rekening houdt met door de TKI-Ecosysteemstad gedefinieerde eigenschappen, kan de expert-bias wegfilteren zodat er een betere en meer objectieve keuze gemaakt kan worden.

## Proefgebied

De Ingenieur J.P. van Muijlwijkstraat in Arnhem is één van de proefgebieden die deelneemt aan het TKI-Ecosysteemstad project. De straat, die zich in het stadscentrum bevindt en Arnhem Centraal verbindt met het oosten, bestond voor de ontwikkelingen voornamelijk uit een niet waterdoorlatende verharding. Hierdoor was de straat kwetsbaar voor klimaatextremen zoals hitte, terwijl er veel ouderen gehuisvest zijn die hierdoor relatief snel gezondheidsproblemen kunnen ondervinden (Hsu et al., 2021). De Ingenieur J.P. van Muijlwijkstraat wordt daarom klimaatadaptief ontwikkeld met veel aandacht voor blauwgroene infrastructuur met als hoofddoel de hitte-extremen te beperken.

## Doel van het onderzoek

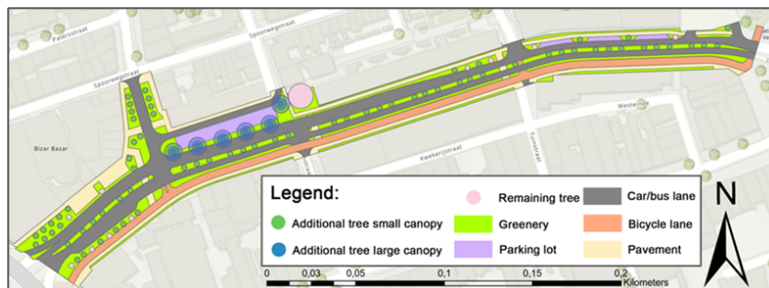
Dit onderzoek is gericht op het creëren en analyseren van een planning support system (PSS) voor de optimale verdeling van verschillende typen blauwgroene infrastructuren (BGI). Dit wordt gedaan op basis van BGI-specifieke eigenschappen, met als doel het verkoelend effect te maximaliseren op straatniveau. Om aan te sluiten met de projectdefinitie vanuit het TKI-ecosysteemstad project wordt er aanvullend rekening gehouden met waterretentie, de kosten en baten, de technische inpasbaarheid en bodemeigenschappen. Het hoofddoel van deze PSS is om de expert bias te verwijderen en zo bij te dragen aan de implementatie van BGI om het stedelijk klimaat te verbeteren en daarmee de stedelijke leefbaarheid te vergroten.

## 2. Aanpak

De PSS gaat uit van een lineaire optimalisatie, een techniek om de optimale oplossing te vinden in een systeem bestaande uit lineaire relaties, waarin rekening gehouden kan worden met gedefinieerde kaders. In dit geval is het optimalisatieprobleem uitgevoerd met behulp van de Anaconda Python-distributie en opgelost met behulp van de Gurobi optimisation solver. Het optimalisatieprobleem kan worden onderverdeeld in drie hoofdcomponenten: de optimalisatie-doelstelling (het verminderen van het hitte-eiland effect), de keuzevariabelen en de kaders (ruimtelijke-, kosten- en beleidskaders). Tot slot zijn de resultaten geëvalueerd in een microklimaat-simulatieprogramma ENVI-met ter validatie. Onderstaand staat de methodiek beknopt beschreven. In bijlage B is het conceptueel raamwerk schematisch weergegeven.

### Top-down benadering

De Ingenieur J.P. van Muijlwijkstraat wordt van bovenaf benaderd waarin verschillende type groen en verharding gedefinieerd zijn. Door de top-down benadering worden bijvoorbeeld bomen bekeken vanuit de oppervlakte van de boomkroon. Het uitgangspunt is het ontwerp 'concept C' waardoor bepaald kan worden hoeveel m<sup>2</sup> er aangewezen is voor de verschillende functies (Figuur 1). Zo is er een vaste hoeveelheid m<sup>2</sup> aangewezen voor groen. Elke functie heeft per m<sup>2</sup> unieke eigenschappen zoals; emissiviteit, reflectiviteit, en verdampingswaarde maar ook waterdoorlatendheid en installatie- en onderhoudskosten. Deze data zijn vergaard door een literatuurstudie en expertinterviews. Door de ontwikkelingsmogelijkheden (zie: Randvoorwaarden, aannames en klimaatparameters) te combineren met het optredende verkoelings-effect, is per investeringshoogte te bepalen wat de beste kosteneffectieve verdeling is van BGI met als doel een zo hoog mogelijke verkoeling te realiseren.



Figuur 1: Concept C ontwerp van I.r. J.P. van Muijlwijkstraat in Arnhem

### Keuzevariabelen

De geselecteerde keuzevariabelen op gebied van groen zijn onderstaand weergegeven (Figuur 2). Er zijn natuurlijk meer keuzemogelijkheden in type groene infrastructuur denkbaar, maar omdat dit een verkennend onderzoek is naar de toepasbaarheid van deze methode is deze selectie beperkt gehouden.



Figuur 2: De keuzevariabelen voor groene infrastructuur (Braun, n.d.; cruythoek, n.d.; Hobbyprof, n.d.; James, n.d.; Natuurlijk-rijk, n.d.)

De verharding in de straat is essentieel om mee te nemen in de methode omdat wijzigingen in de groene infrastructuur invloed hebben op de verharding en vice-versa. Volgens de top-down benadering wordt bijvoorbeeld aangenomen dat veranderingen in de wortelzone onder de gehele boomkroon worden geïmplementeerd, wat ook onder de verharding kan zijn. Op deze wijze worden ook de biofysische eigenschappen meegenomen in de optimalisatie om tot een realistischere benadering van de werkelijkheid te komen. De onderstaande landgebruiken met type verharding kunnen gecombineerd worden met een aanpassing in de fundering.

Tabel 1 Het type landgebruik met type verharding waaronder funderingsaanpassingen

Landgebruik	Autobaan	Fietspad	Parkeerplaats	Parkeerplaats	Stoep
Type verharding	Asfalt	Tegels	Asfalt	Halfverharding	Tegels

Door rekening te houden met de fundering van groene infrastructuur is het mogelijk om de vegetatie op een gezonde wijze te laten groeien in een stedelijke omgeving. Hierdoor zijn de planten klimaat robuuster en kunnen ze voor een langere tijd meer ecosysteemdiensten leveren. Dit wordt op twee manieren meegenomen in de optimalisatie. Ten eerste kan er doorwortelbare ruimte worden aangelegd door een speciale grondsoort te gebruiken. Dit waarborgt de porositeit, wat voor een gezonde ondergrond zorgt voor boomwortels. Dit wordt aangegeven door “+ RZ” (root zone) toe te voegen aan het type landgebruik. Ten tweede kan er extra water retentie capaciteit aangelegd worden zodat de planten ook in de extreem droge periodes op een gezonde manier kunnen overleven. In deze berekening wordt dat gedaan door middel van het Permavoid systeem. Door middel van ondergrondse kratjes wordt een systeem gevormd voor waterretentie in stedelijke omgevingen. Dit wordt gedaan door neerslag in kisten onder de grond op te slaan en dit via capillaire werking beschikbaar te stellen aan de boven groeiende vegetatie. Op deze wijze hebben de planten ook in extreem droge periodes toegang tot water en kunnen ze daardoor bijna tot hun volledige vermogen koelen (Permavoid, 2023). De toevoeging van waterretentieruimte wordt aangegeven door “+ RET” toe te voegen aan het type landgebruik. Alle bovenste keuzevariabelen (groene- en grijze infrastructuur) kunnen gecombineerd worden met de extra doorwortelbare ruimte of het Permavoid water retentiesysteem (bijlage A: Inputparameters).

## Energiebalans

Het verkoelende effect van BGI is in deze tool gedefinieerd volgens de energiebalans van een straat (Taha, 1997; J. K. N. Tan et al., 2021). Dit concept beschrijft dat het implementeren van groen invloed heeft op: 1) Instraling – de vermindering van straling dat het oppervlak raakt door het creëren van een schaduw, 2) Emissiviteit – het verschil in emissiviteit van het oppervlak naar de atmosfeer door de albedo-waarde te veranderen, en 3) Evapotranspiratie- de hoeveelheid water dat verdampt en daarmee de warmte onttrekt uit de omgeving. De thermische geleidbaarheid, die ook invloed heeft op de energiebalans, is achterwege gelaten van wege de vaste hoeveelheid groen. Door elke m<sup>2</sup> te observeren en deze onderdelen van de energiebalans uit te drukken in W/m<sup>2</sup>, is het mogelijk om het koelpotentieel van de groene infrastructuur te kwantificeren. De parameters m.b.t. de kosten (€/m<sup>2</sup>) en het verkoelende effect (W/m<sup>2</sup>) zijn vergaard door middel van een literatuurstudie en expertinterviews en zijn te vinden in bijlage A. De exacte wijze van bepaling van verkoelend vermogen is te vinden in bijlage C.

## Randvoorwaarden, aannames en klimaatparameters

Randvoorwaarden zijn bindende voorwaarden waaraan het optimalisatiemodel voor elk resultaat moet voldoen. Ze kunnen worden onderverdeeld in drie soorten: fysieke randvoorwaarden, beleidsmatige randvoorwaarden en waterretentie-randvoorwaarden. Niet alle randvoorwaarden gelden bij alle scenario's (Tabel 2). De tijd van het jaar waarin de klimaatparameters zijn gekozen is een droge en hete zomerdag, waarin planten geen toegang hebben tot het grondwater en daarom ook niets zullen verdampen tenzij daarvoor maatregelen getroffen worden. Er is voor deze dag gekozen omdat tijdens weersextremen de meest negatieve gezondheidseffecten optreden als gevolg van het UHI-effect, zoals een verhoogd sterfte- en ziektecijfer (Ebi et al., 2021). De exacte klimaatparameters die in dit proefschrift zijn gebruikt, zijn te vinden in bijlage A. Bijlage D en E geven de randvoorwaarden en de aannames.

## Scenario's

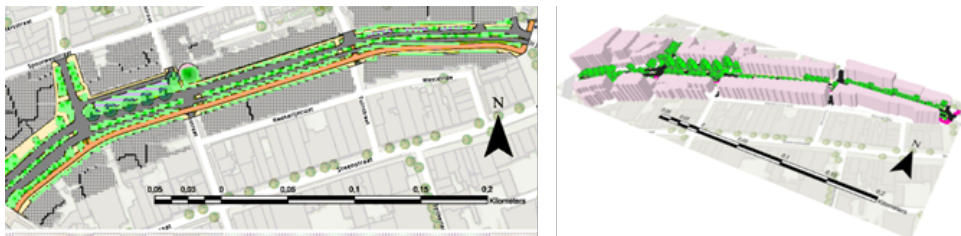
De optimalisatie is meerdere malen uitgevoerd met andere optimalisatiedoelstellingen, aannames en randvoorwaarden om te zien hoe de tool zou werken in verschillende scenario's. De definitie van vier scenario's is schematisch weergegeven in Tabel 2. Het doel in de scenario's 1-3 is het maximaliseren van het koelpotentieel voor een bepaalde investering. Respectievelijk houden deze scenario's ook rekening met een lagere evapotranspiratie, het bevinden van het wortelstelsel in een verzadigde grondwaterzone en tot slot het creëren van ten minste een bepaalde hoeveelheid waterretentie in de vorm van de waterretentiekragen om een 1/30 jaar regenbui te bergen. De opname van een factor voor evapotranspiratie wordt meegenomen om de veranderingen in de scenario's te kunnen analyseren wanneer de evapotranspiratie afneemt. De reden hierachter is dat evapotranspiratie een zeer significante bijdrage levert aan de het koelpotentieel in deze methode, terwijl de gekozen kerngetallen een aanzienlijke mate van onzekerheid hebben. In dit geval wordt een vermenigvuldigingsfactor van 0.5 toegepast. De doelstelling van scenario 4 is het maximaliseren van netto baten over een bepaalde tijdsperiode. De baten omvatten een gemonetariseerde som van het gezondheidsvoordeel door de verkoeling en de bespaarde waterzuiveringskosten door waterretentie. De kosten omvatten de aanschaf-, installatie- en onderhoudskosten.

Tabel 2: schematische weergave van de scenario's

Scenario	Maximaal koelpotentieel	Maximaal netto baten	Verzadigde grondwaterzone	Water retentie	Gevoeligheidsanalyse evapotranspiratie
1.1	✓				
1.2	✓				✓
2	✓		✓		
3	✓			✓	
4		✓			

## Microklimaatsimulatie

Er is een microklimaatsimulatie uitgevoerd om inzicht te krijgen in de validiteit van de invoergegevens en de aannames en de praktische toepasbaarheid van de tool. Dit is gedaan door de straat te simuleren in ENVI-met 4.0, een 3D-microklimaatsimulatiETOOL die het effect van stedelijk groen op de omgeving kan simuleren (Figuur 3). ENVI-met kan de lokale klimaatparameters zoals windsnelheid/-temperatuur en-richting, luchtvochtigheid, bodemtype, grondwaterverzadiging, luchttemperatuur en zonnestraling voor de omgeving van Arnhem inladen om op deze wijze het effect van de uitkomsten van het optimalisatiemodel in Arnhem te genereren. Dit wordt gedaan op basis van de temperatuurflux (de warmte/energie die de vegetatie onttrekt uit de omgeving) en verdampingsflux (de verdamping van de vegetatie) voor scenario 1.1 en scenario 2. In scenario 2 wordt er uitgegaan van een verzadigde grondwaterzone waardoor er geen investeringen in ondergrondse waterretentie nodig zijn om een maximale verkoeling te laten optreden volgens het evapotranspiratiepotentieel. De I.r. J.P. van Muijwijkstraat ligt niet in een verzadigde grondwaterzone waardoor dit een onrealistisch scenario is in deze case study area. De reden dat dit toch wordt gesimuleerd is om te evalueren hoe belangrijk het is om de ondergrondse waterretentiekraTjes mee te nemen in een kosteneffectieve afweging wanneer het doel is om een zo groot mogelijk verkoelend vermogen te creëren



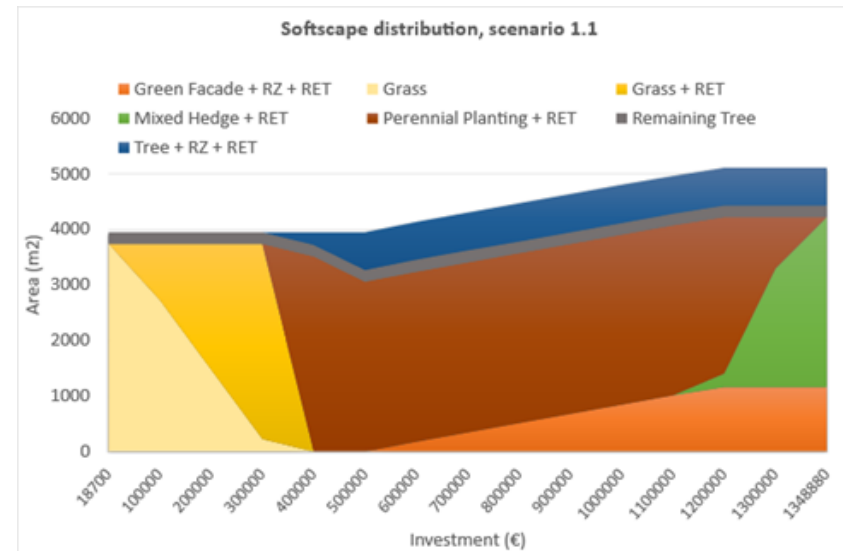
Figuur 3: Illustratie van de I.r.J.P. van Muijwijkstraat in Arnhem in het microsimulatieprogramma ENVI-met 4.0.

## 3. Resultaten

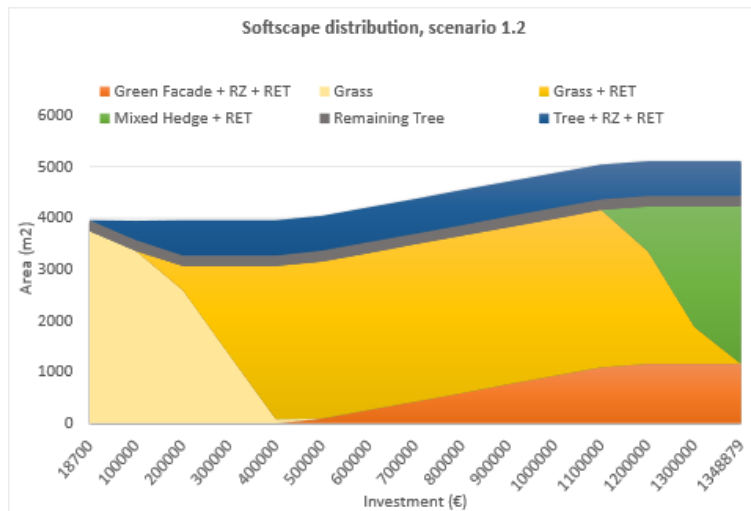
Door de klimaateigenschappen van het onderzoeksgebied toe te passen op het model, met de scenario definities als kaders en uitgangspunten, berekent de optimalisatie tool de volgende resultaten.

### Investeringen en de optimale verdeling blauw-groene infrastructuur

Scenario 1 beschrijft de optimale verdeling van infrastructuur per investering om het hoogste koelpotentieel te bereiken. Scenario 1.1 is het basisscenario. Scenario 1.2 houdt rekening met een factor x0,5 voor de evapotranspiratie, om de veranderingen in de verdeling van het landgebruik voor een lagere evapotranspiratie te genereren. De optimale verdeling van BGI volgens scenario 1.1 en 1.2 per investeringshoogte is te zien in Figuur 4 en Figuur 5.



Figuur 4: De optimale verdeling van groene infrastructuur per investering voor scenario 1.1

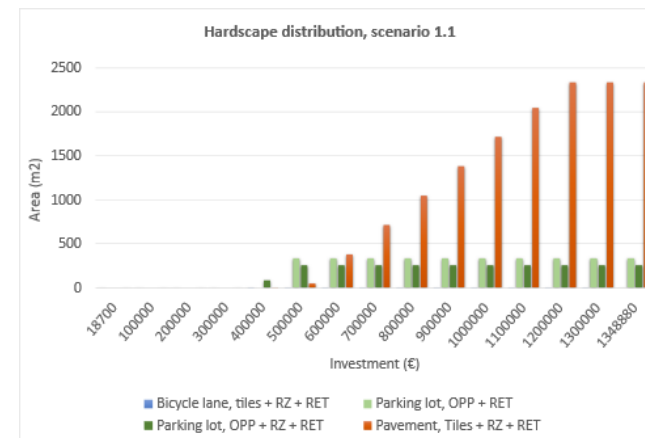


Figuur 5: De optimale verdeling van groene infrastructuur per investering voor scenario 1.2

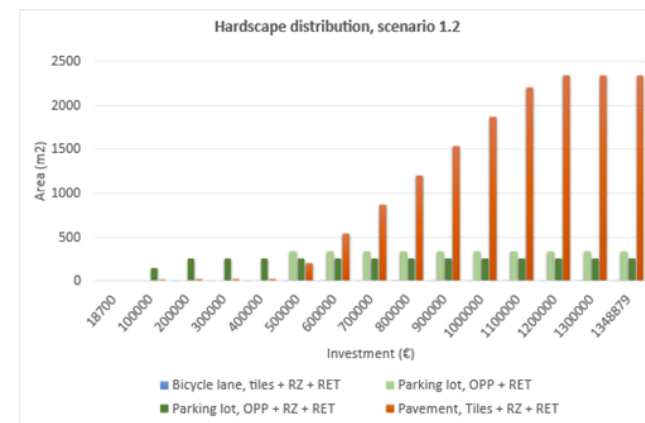
Opvallend is dat de integratie van de waterretentiekraften zeer dominant is in scenario 1. De minimale investering is €18.700,- en de hoogste investeringen zijn €1.348.880,-. Wanneer er meer geld beschikbaar is, worden andere vormen van BGI haalbaar. Dit leidt tot de volgende veranderingen in BGI naarmate de investeringen toenemen; in scenario 1.1: Gras, Gras + RET, Vaste beplanting + RET, Bomen + RZ + RET, Groene gevels + RZ + RET en tot slot Gemengde haag + RET. In scenario 1.2 wordt de evapotranspiratie minder dominant door een evapotranspiratiefactor. De dominantie van evapotranspiratie kan worden afgeleid uit bijlage A: Inputparameters, waarin de fractie koeling door evapotranspiratie ten opzichte van het totale koelingseffect wordt getoond. Over het algemeen is het resultaat van de optimale verdeling van landgebruik vergelijkbaar met scenario 1.1, maar er zijn kleine veranderingen. In dit scenario krijgt gras + RET de voorkeur boven meerjarige beplanting + RET (scenario 1.1) omdat de emissiviteit van gras lager is door zijn relatief hogere albedo, wat compenseert voor het afnemende koelende vermogen uit de verdamping. Bovendien is gras + RET ook een goedkopere optie, wat resulteert in de mogelijkheid om vanaf het begin te investeren in andere vergroening zoals de integratie van bomen + RET + RZ, zelfs vóór de investering in gras + RET.

Figuur 6 en Figuur 7 tonen de veranderingen in de verharding per investering (respectievelijk scenario 1.1, 1.2). In scenario 1.1 treden de eerste veranderingen in de verharding bij €400.000,-, waarbij parkeerplaatsen van asphalt worden vervangen door groene parkeerplaatsen met halfverharding met doorwortelbare zone (+RZ) en ondergrondse

waterretentie (+RET). Deze reden voor de doorwortelbare ruimte (RZ) is om de toegevoegde omliggende bomen op een gezonde wijze te laten groeien. Vanaf €500.000,- is er geen extra RZ meer nodig vanwege het bereiken van de limiet op bomen. Vanaf deze grens wordt er geïnvesteerd in groene parkeerplaatsen + RET. Tot slot, wanneer de investering hoger is dan €500.000,-, moet de aangrenzende bestrating van de groene gevels ook een geschikte fundering hebben, wat leidt tot de implementatie van een betegelde stoep + RET + RZ. In scenario 1.2 zijn de beste investeringen wanneer er een relatief laag budget is, minder duur dan in scenario 1.1, waardoor er ruimte overblijft voor andere investeringen (Figuur 7). Dit resulteert in een snellere investering in groene parkeerplaatsen + RET, + RZ.



Figuur 6: de verdeling van verharding per investering voor scenario 1.1

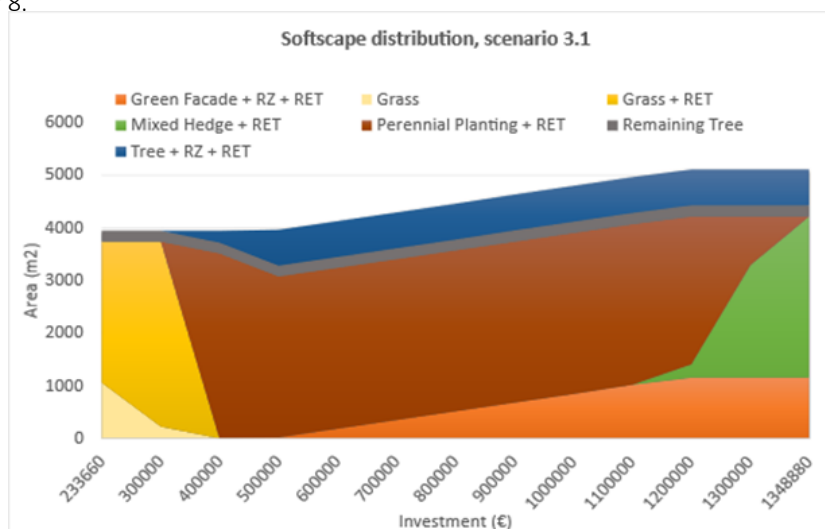


Figuur 7: de verdeling van verharding per investering voor scenario 1.2



## Mitigatie van een 1/30 jaar regenbui

In scenario 3 wordt het koelpotentieel geoptimaliseerd, wordt gekeken naar de beste verdeling van blauwgroene infrastructuren en wordt een minimale hoeveelheid aan waterretentie geëist om voldoende water op te vangen om wateroverlast te voorkomen bij een hevige stortbui. Hierin worden de richtlijnen van het Permavoid-systeem (+ RET) gebruikt om de neerslag van een 1/30-jaar hevige regenbui te beperken. Er wordt aanbevolen om 293 m3 opslag/ha niet-doorlatend (100% afvoeisnelheid) gebied te hebben (Polypipe, 2016). In de I.r. J.P. van Muijwijkstraat komt dit overeen met minimaal 2687 m2 met daarin het Permavoid systeem. De uitkomst van dit scenario is te zien in Figuur 8.



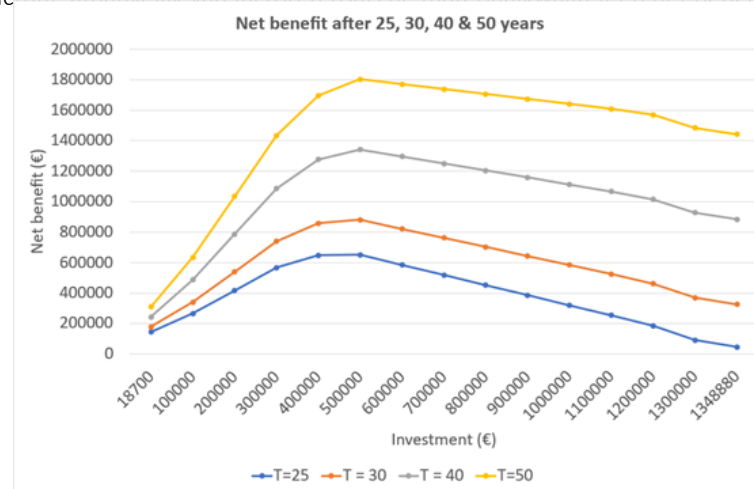
Figuur 8: De optimale verdeling van blauwgroene infrastructuur per investering voor scenario 3

Het valt op dat de configuratie van BGI in scenario 3, een naar rechts verschoven versie is van scenario 1.1. Dit resulteert uit dat de eerste investeringen in scenario 1.1 gericht zijn op het creëren van extra waterretentie door het groot verkoelende effect van evapotranspiratie. Hierdoor voldoet scenario 1.1 vanaf een investering van €233.660,-, automatisch aan de eisen van scenario 3. Dit verklaart waarom de initiële investeringsprijs van scenario 3 hoger is dan scenario 1. De veranderingen aan verharding zijn identiek aan scenario 1.

## Monetarisering en berekening van optima

Scenario 4 bepaalt de optimale verdeling van het BGI om de hoogste netto-opbrengst te behalen. De opbrengst is gedefinieerd als de gemonetariseerde gezondheidsvoordelen door het koelingseffect plus het water wat in de bodem geïnfilteerd kan worden en niet

gereinigd hoeft te worden in een waterzuivering (Jerzy et al., 2020, Fema, 2022). In bijlage C wordt dieper ingegaan op deze berekening. De kosten bestaan uit de investeringskosten (aanleg- en installatie) en de onderhoudskosten. Figuur 9 toont de netto-opbrengsten die verwacht kunnen worden in 25, 30, 40 of 50 jaar. Deze tijdsintervallen zijn gekozen vanwege de levensduur voor de gekozen funderingstoepassing en type (blauw-)groene infrastructuur, afhankelijk van factoren zoals de materiaalkwaliteit en het beheerplan.

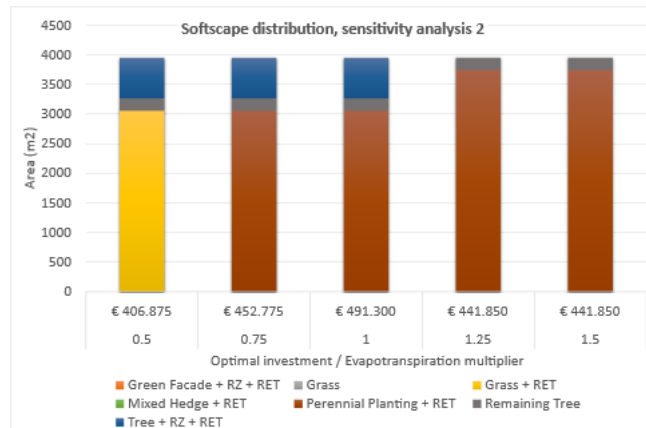


Figuur 9: De maximale netto-opbrengsten per investering voor verschillende tijdsintervallen.

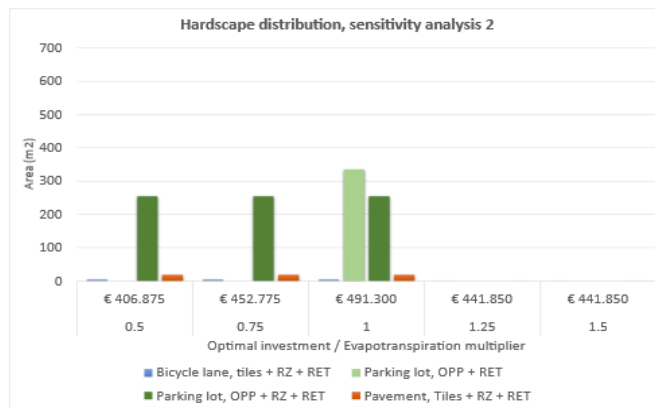
Vanuit Figuur 9 kunnen drie punten opgemerkt worden. Ten eerste is het opvallend dat een hogere initiële investering (aankoop + installatie) niet altijd leidt tot een grotere netto-opbrengst. Als de investeringskosten hoger worden, kunnen in sommige gevallen de baten niet compenseren voor de kosten gedurende de levensduur van de infrastructuur. Ten tweede kan worden opgemerkt dat een hogere vervangingstijd ook leidt tot een verlengde tijd dat er voordelige effecten optreden wat resulteert in significant hogere netto-opbrengst. Dit betekent dat investeren in duurzamere materialen of duurzame onderhoudsplannen de netto-opbrengsten na verloop van tijd aanzienlijk kunnen verhogen. Tot slot is te zien dat er een gedeelde investering is (€493.100,-) waarbij de verschillende vervangingsmomenten een gedeeld optimum hebben als netto-opbrengst. Bij deze investering is de terugverdientijd ongeveer 11 jaar.

Wanneer er een simpele gevoeligheidsanalyse m.b.t. de evapotranspiratie van de groene infrastructuur wordt toegepast op het optimum onder een vervangingstijd van 25 jaar, 9

veranderd de verdeling van BGI volgens Figuur 10 en Figuur 11. Het optimum loop van een investering van €406.875,- wanneer de evapotranspiratie half zo veel meetelt voor de verkoeling naar €491.300,- wanneer uitgegaan wordt van de exacte input gegevens. Hierin worden ook andere keuzes gemaakt om tot de optimale netto-opbrengst te komen. Zo wordt er in het minst dure scenario geïnvesteerd in gras + RET maar wordt dit vervangen door meerjarige grassen/kruiden + RET wanneer de evapotranspiratie leidt tot meer verkoeling. Daarnaast valt op dat het oppervlakte vergroende parkeerplaatsen veranderd en dat wanneer evapotranspiratie leidt tot meer verkoeling dan aangenomen, dat stedelijke bomen minder relevant worden geacht voor de netto-opbrengsten.



Figuur 10: De verdeling in type BGI om de maximale netto-opbrengsten te genereren voor verschillende evapotranspiratiefactoren bij een vervangingstijd van 25 jaar.



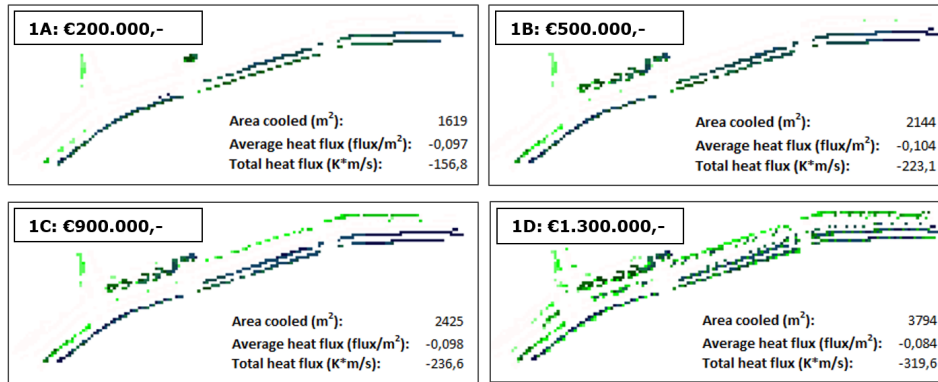
Figuur 11: De verdeling in type BGI om de maximale netto-opbrengsten te genereren voor verschillende evapotranspiratiefactoren bij een vervangingstijd van 25 jaar.

## ENVI-met simulatie

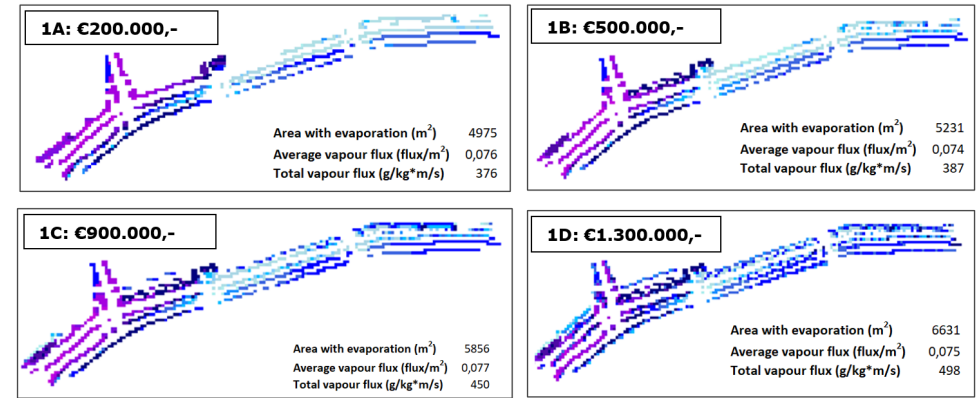
Van scenario 1.1 en scenario 2 zijn de verdelingen (blauwgroene) infrastructuur bij de investeringen €200.000,-, €500.000,-, €900.000,- en €1.300.000,- nagebouwd in ENVI-met en vervolgens gesimuleerd en vergeleken om te kunnen zien of; evapotranspiratie een significant aandeel heeft in de verkoeling, of het nodig is om de aanleg van ondergrondse waterretentie mee te nemen in de optimalisatie en om te zien of een hogere investering leidt tot meer koeling ter validatie.

De resultaten van de temperatuur flux simulatie zijn te zien in Figuur 12 en Figuur 13. Deze bovenaanzichten van de straat laten de negatieve temperatuur flux zien, oftewel, hoeveel en hoe snel de warmte er uit de omgeving onttrokken wordt. Ten eerste is er te zien dat de uitkomsten van scenario 1 leiden tot een verkoelend effect dat ongeveer twee tot drie keer groter is dan eenzelfde investering wanneer de aanleg van extra waterretentie genegeerd wordt in scenario 2. Zo is de temperatuurflux bij een investering van €200.000,- in scenario 1A ongeveer 157 K\*m/s en bij scenario 2A slechts 80 K\*m/s. Daarnaast is de bovengrondse groene infrastructuur bij investeringen scenario 1B (€500.000,-) en scenario 2A (€200.000,-) gelijk, waardoor het effect van de extra waterbeschikbaarheid ook gesimuleerd kan worden. De simulatie laat zien dat de groene infrastructuur, wanneer er voldoende water beschikbaar is voor verdamping, bijna drie keer zo veel verkoelt als eenzelfde verdeling van groene infrastructuur zonder waterbeschikbaarheid (ongeveer 223 K\*m/s t.o.v. 87 K\*m/s).

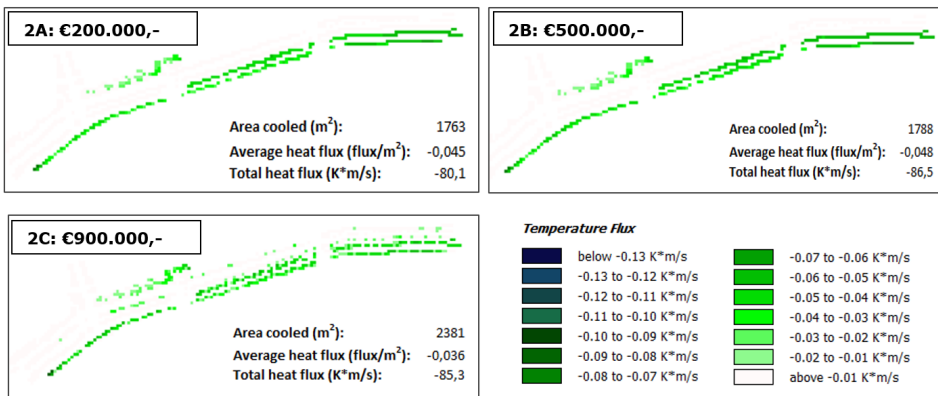
Ten tweede, aangezien de tool de optie met het hoogste beschikbare koelpotentieel per investering kiest, wordt verwacht dat hoe hoger de investering is, hoe groter het optredend verkoelend effect is en hoe marginaler de relatief toenemende verkoeling is. De simulatie laat zien dat deze hypothese grotendeels in lijn ligt met de uitkomsten van de simulatie. Een hogere investering leidt namelijk volgens de simulatie in alle gevallen ook tot een hoger optredende totale temperatuur flux. Echter, de toename in heatflux bij scenario 1 bij de investering van €500.000,- naar €900.000,- is slechts 13.5 K\*m/s terwijl de toename tussen €900.000,- en €1.300.000,- 83 K\*m/s bedraagt. Dit laat zien dat volgens de simulatie een toevoeging van gemengde hagen een grotere invloed heeft op de temperatuur flux dan de toevoeging van groene gevels, wat afwijkt van de uitkomst van de tool.



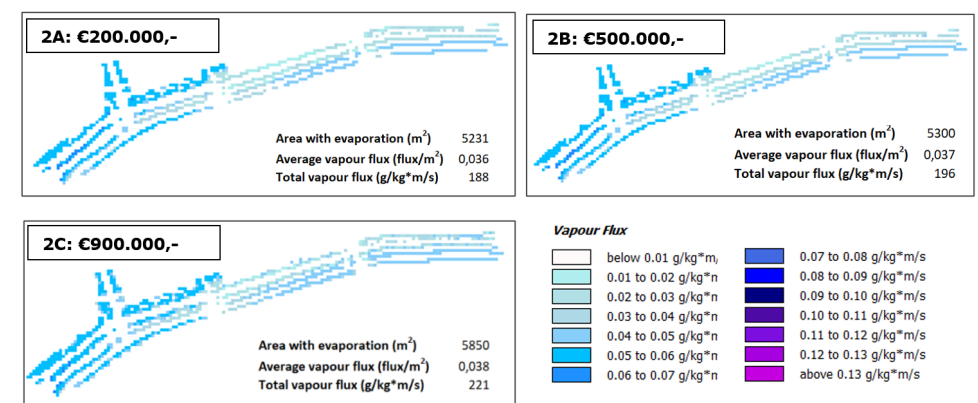
Figuur 12: Bovenanzichten van de temperatuurflux simulaties scenario 1.1 voor vier verschillende investeringen



Figuur 14: Bovenanzichten de verdampingsflux simulaties van scenario 1.1 voor vier verschillende investeringen



Figuur 13: Bovenanzichten van de temperatuurflux simulaties scenario 2 voor 3 verschillende investeringen



Figuur 15: Bovenanzichten van de verdampingsflux simulaties scenario 2 voor drie verschillende investeringen

De resultaten van de verdampingsflux, die laten zien hoeveel water er verdampt van de vegetatie naar de atmosfeer, zijn te zien in Figuur 14 en Figuur 15 en zijn in lijn met de verwachtingen. Een hogere investering leidt in alle gevallen tot een hogere totale verdampingsflux. Het is echter opvallend dat hoewel de toename in temperatuurflux bij een investering van €500.000,- naar €900.000,- relatief minimaal is, dat de toename van de verdamping juist het grootst is. Dit suggereert dat de toevoeging van een groene gevel weliswaar resulteert in een grote toename van de evapotranspiratie, maar naar alle waarschijnlijkheid door de verticale oriëntatie, het verkoelend effect minimaal is. Tot slot laten de resultaten de significant hogere verdampingsflux zien in scenario 1 ten opzichte van scenario 2. Dit is ook te verwachten kijkend naar het significante aandeel dat de evapotranspiratie heeft in de totale verkoeling.

## 4. Conclusies

Het doel van dit onderzoek was om op een innovatieve wijze de kosten en baten van blauwgroene infrastructuur te kwantificeren en te optimaliseren als planning support system, om bij te dragen aan de onderbouwing van keuzes voor het realiseren van een leefbaar stedelijk klimaat. In de tool zijn verschillende scenario's gedefinieerd waarin lokale parameters en randvoorwaarden zijn meegenomen om de tool gedetailleerd en universeel toepasbaar te maken op andere locaties. Onderstaand zijn de belangrijkste conclusies samengevat.

### **1. Een lineaire optimalisatie kan dienen als keuzetool voor bepaling van blauwgroene infrastructuur**

De ontwikkelde tool kan op een systematische manier, door middel van een kwantificatie van de kosten en baten, bijdragen om het vooroordeel van experts te verminderen bij de bepaling van type blauwgroene infrastructuur op straatniveau. Een hogere investering lijdt in alle gevallen tot een andere verdeling van blauwgroene infrastructuur en tot een groter verkoelende werking, zoals ook door de simulatie bevestigd wordt. Wel is het belangrijk om te beseffen dat er altijd vooroordelen zitten in de keuzes qua type inputdata, zoals wat er meegenomen wordt in de kosten-baten functie en wat er gekozen wordt als optimalisatiedoel. Daarnaast laat de tool zien wat de te verwachten winst is wat kan zorgen voor draagvlak en kan dienen als onderbouwing voor keuzes.

### **2. Een groen design voor een leefbaardere stedelijke omgeving vergt een blauwe aanpak**

Zowel uit de tool als de simulatie blijkt dat het cruciaal is om waterbeschikbaarheid mee te nemen in de keuze voor vergroening wanneer het doel is om een verkoelend effect te genereren. Waterbeschikbaarheid is niet alleen belangrijk voor de gezondheid van de vegetatie, maar speelt ook een grote rol in het verkoelende effect dat het kan hebben op haar omgeving. De simulatie suggereert dat investeren in waterbeschikbaarheid een groter effect heeft dan investeren in vegetatie met een groter koelend potentie. Volgens de tool is het creëren van ondergrondse waterbeschikbaarheid is een kosteneffectieve keuze voor dit doel.

### **3. Het aanleggen van waterretentie voor verkoeling en het beperken van wateroverlast gaan hand in hand.**

Een investering in ondergrondse waterretentie voor waterbeschikbaarheid in droge periodes resulteert ook in een mogelijkheid voor het bergen van water in tijden van wateroverlast. Uit de optimalisatie blijkt dat de optimale verdeling van blauwgroene infrastructuur voor de beperking van hitte, slechts minimaal veranderd wanneer daarnaast als eis gesteld wordt dat een 1/30 jaar regenbui tevens lokaal opgevangen moet worden. Verdamping, en daarmee waterbeschikbaarheid, is een dermate significante factor in het totale verkoelende effect dat het resulteert in dit bijkomende voordeel. Echter wanneer je hevigere regenbuien wil mitigeren dan een 1/30 jaar regenbui zal er meer waterretentie aangelegd moeten worden. Dit is niet geactualiseerd voor de 2023 klimaatscenario's van het KNMI.

### **4. De tool heeft potentie als communicatiemethode.**

De tool is gepresenteerd aan de gemeente Arnhem, die meerwaarde zien in de communicatieve mogelijkheden van de tool. Aan de hand van de netto-opbrengst grafiek is bijvoorbeeld te onderbouwen waarom er gekozen kan worden voor een bepaalde investering. De moneterisering maakt het tastbaar wat de verwachte opbrengsten zijn. De meeste meerwaarde zit in de interne communicatiemogelijkheden omdat het met name gebruikt kan worden als startpunt van discussie in plaats van in een gevorderde fase verder in het ontwerpproces. Daarnaast is de vorm van communicatie te complex om te communiceren naar buiten toe, hoewel de boodschap wel waardevol zou zijn om transparant naar het publiek o.a. ontwerp afwegingen uit te kunnen leggen.

### **5. Levensduur van groen heeft een significante invloed op de netto-opbrengsten.**

Uit de analyse blijkt dat het vergroten van de levensduur een grote invloed heeft op de totaal netto-opbrengsten dat de blauwgroene infrastructuur heeft op de omgeving. De levensduur kan verlengd worden door betere kwaliteit of gezonder groen aan te leggen. Dit kan bijvoorbeeld door voldoende wortelruimte te creëren of door een afgestemd management plan te gebruiken waardoor de straat minimaal opengedoken hoeft te worden voor onderhoud. Ook is te zien dat een hogere investering niet altijd lijdt tot meer netto-opbrengsten maar dat hier een limiet in zit met een optimum, dat voor alle tijdsintervallen identiek is. Dit optimum kan goed dienen als startpunt van een discussie/ ontwerp of als communicatiemiddel ter onderbouwing van keuzes.

## 5. Aanbevelingen

Vanuit de conclusies zijn een aantal aanbevelingen getrokken hoe deze tool gebruikt of verder ontwikkeld zou kunnen worden.

### 1. Gebruik kwantificatie als startpunt van de discussie of om kaders te schetsen

Volgens gemeente Arnhem kan deze kwantificatie een toegevoegde waarde hebben als ondersteuning van ontwerpkeuzes. Het is deels gevalideerd door de simulatie en getest op verschillende scenario's. Omdat de tool slechts kijkt naar verkoelend vermogen en waterbeschikbaarheid en daarom niet alle belangen vertegenwoordigd zou deze tool gezien moeten worden als een startpunt van discussie in plaats van een bindend advies.

### 2. Werk aan een passende externe communicatiemethode

Deze vorm van kwantificatie is slechts helder te begrijpen voor interne discussies onder experts terwijl het ook waarde heeft voor externe communicatie, zoals het onderbouwen waarom bepaalde ontwerpkeuzes zijn gemaakt. Deze informatie is onvoldoende begrijpelijk voor het publiek in de huidige vorm volgens de gemeente Arnhem. Er is daarom een vraag om de externe communicatie te verbeteren om met name de monetaarisering begrijpelijk te presenteren.

### 3. Zorg voor een integraal design voor de meeste voordelen

Zoals conclusie 2 aangeeft is het cruciaal om waterbeschikbaarheid mee te nemen in het design om te optimaliseren voor het verkoelende effect. Evapotranspiratie speelt een grote rol in het verkoelende vermogen van groen en zonder waterbeschikbaarheid is er geen evapotranspiratie mogelijk. Een manier die volgens deze tool kosteneffectief werkt is het aanleggen van ondergrondse retentiekraats met capillaire irrigatie, wat als positieve bijkomstigheid ook deels rekening houdt met wateroverlast. Daarnaast valt uit de kosten-baten functie op dat het verlengen van de levensduur van het groen een groot effect heeft op de totale netto-opbrengsten. Advies is om hiervoor een operationeel onderhoudsplan op te stellen inclusief periodieke inspectie gecombineerd onderhoud met andere ondergrondse infrastructuur (M. Wang & Yin, 2022). Investeer daarnaast in kwaliteit en duurzame materialen zodat de groene infrastructuur op een gezonde manier kan groeien.

### 4. Doe een verdieping naar kerngetallen en meer keuzevariabelen.

Om de optimalisatie te verbeteren zullen de kerngetallen herzien moeten worden. Veel kerngetallen zijn uit literatuur afkomstig en uit een vergelijkbaar klimaat. Echter, om deze kerngetallen dichterbij de realiteit van Nederland te krijgen zal er aanvullend onderzoek nodig zijn in het Nederlandse klimaat. Ook blijkt de geformuleerde methode niet te gelden voor groene façades, aangezien hier een hoge verdamping leidt tot slechts een marginaal verkoelend effect, en heeft een gemengde haag juist een groter verkoelend effect te hebben dan aangenomen. Daarnaast kan de monetaarisering aangevuld worden met meer voordelen van ecosysteemdiensten zoals biodiversiteit en is er slechts naar een kleine selectie van type blauwgroene infrastructuur gekeken.

## 6. Limitaties

1. Het model gaat uit van een lineair verband tussen de verkoelende eigenschappen per type groen en het daadwerkelijke verkoelend effect. In werkelijkheid zit hier een omgekeerd evenredig verband in, wat zeggen dat de een extra Watt verkoeling bij een lage investering meer effect heeft dan een extra Watt verkoeling bij een hoge investering (Peng et al., 2020). Dit verband is nog een kennishiaat.
2. De methode biedt slechts een verdeling van blauwgroene infrastructuur maar verbindt dit niet aan een locatie. Wel is er per locatie beschreven wat voor groene infrastructuur er geplaatst kan worden of niet.
3. De tool geeft slechts de optimale uitkomst voor verkoeling op een extreem hete en droge dag. De beste verdeling voor de jaarlijks gemiddelde verkoeling kan potentieel afwijken.
4. Het model gaat slechts uit van een vaste hoeveelheid groen. Een variatie op deze tool waarin de hoeveelheid groen variabel is kan een interessante aanvulling zijn.
5. Slechts een hele beperkte selectie aan keuzevariabelen zijn gekozen. Voor een uitkomst die de realiteit beter benadert zullen meer keuze variabelen moeten geïntegreerd worden zoals heesters.
6. De input data is gebaseerd op literatuur, expertreviews, of vergelijkingen. Hierbij zijn aannames gemaakt waar aanvullend onderzoek naar nodig is om de onzekerheid te verminderen.

# Over Eco-Systeem-Stad (ecosysteemstad.nl)

Het klimaat verandert. Het weer laat steeds meer extremen zien. Steeds kortere, maar heftige regenbuien, afgewisseld met steeds warmere en langere droge perioden in het voorjaar en de zomer. Om hitte het hoofd te bieden is er steeds meer behoefte aan Functioneel Groen voor schaduw en verkoeling. Echter heeft dat stedelijk groen in het groeiseizoen behoefte aan (extra) water terwijl water op dat moment juist schaars kan zijn.

Het TKI project Eco-Systeem-Stad richt zich op de vraag hoe er een balans gecreëerd kan worden in de waterbehoefte van functioneel groen en de beschikbaarheid van water in de klimaatbestendige en natuurinclusieve stad. Hierbij houden we rekening met de geografie van de ondergrond, specifieke soorteigenschappen gerelateerd aan droogteresistentie en wegen we kosten en baten van passende en effectieve (technologische) oplossingen zorgvuldig af.

Over de naam, Eco-Systeem-Stad: Natuur in de stad, in de vorm van parken, tuinen, bomen in straten, berm, sportvelden en (blauw-)groene daken, levert een veelvoud aan essentiële functies in de stad. Denk daarbij aan verkoeling door schaduw en verdamping, regenwater-afvang, luchtkwaliteitsverbetering, ruimte voor biodiversiteit en een verbetering van menselijk welzijn. Voor het optimaal functioneren van die Ecosysteemdiensten is het belangrijk dat natuur als een geïntegreerd functioneel Systeem in de stad ontworpen, gerealiseerd en onderhouden wordt. Gefundeerde afwegingen in plantsoortkeuze, multifunctionaliteit, waterbeschikbaarheid, circulariteit, en kosten/baten afwegingen van de toegepaste Nature-based Solutions liggen daaraan ten grondslag.



# Bronnen

Bhandari Pritha. (2023). *Triangulation in Research | Guide, Types, Examples*. <https://www.scribbr.com/methodology/triangulation/>

Boomzorg.nl. (n.d.). *Bomen duur? Echt niet! Of toch? Retrieved May 29, 2023, from https://www.boomzorg.nl/upload/artikelen/bz316column.pdf*

Braun, Z. (n.d.). *Groene gevel*. Retrieved from <https://archello.com/story/26680/attachments/photos-videos/1>

Chuvieco, E. (2007). *Integration of linear programming and GIS for land-use modelling*. <http://Dx.Doi.Org/10.1080/02693799308901940>, 7(1), 71–83. <https://doi.org/10.1080/02693799308901940>

Climate Adapt. (2021). *National circumstances relevant to adaptation actions*. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/netherlands>

Climate-Data. (2021). *Klimaat Arnhem*. <https://nl.climate-data.org/europa/koninkrijk-der-nederlanden/gelderland/arnhem-912/>

Crawford, A. J., McLachlan, D. H., Hetherington, A. M., & Franklin, K. A. (2012). *High temperature exposure increases plant cooling capacity*. *Current Biology*, 22(10), R396–R397. <https://doi.org/10.1016/J.CUB.2012.03.044>

cruydhoeck. (n.d.). *Gemengde haag*. Retrieved from <https://www.cruydhoeck.nl/gemengde-biodiversiteitsheg-voor-zwaardere-gronden-25-planten-voor-5-strekkende-meter-heg>

Datt, P. (2011). *Latent heat of vaporization/condensation*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Part 3*, 703. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_327/COVER](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_327/COVER)

Davies, C., & Laforteza, R. (2019). *Transitional path to the adoption of nature-based solutions*. *Land Use Policy*, 80, 406–409. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.09.020>

Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). *Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure*. *Water Research*, 124, 280–289. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2017.07.038>

Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Jay, O. (2021). *Hot weather and heat extremes: health risks*. *The Lancet*, 398(10301), 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3)

Expert interview - Consultant managing public space, municipality of Amsterdam. (2022).

Expert interview - Senior advisor, New Urban Standard (Permavoid). (2022).

Fema. (2022). *FEMA Economic Benefit Values for Green Infrastructure*. [https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema\\_economic-benefit-values-green-infrastructure.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_economic-benefit-values-green-infrastructure.pdf)

Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J., & Rodríguez Sánchez, J. P. (2022). *Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review*. *Science of The Total Environment*, 806, 150447. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150447>

Gevelrenovatie. (n.d.). *Planten gevelbekleding*. Retrieved April 29, 2023, from <https://gevelrenovatiegids.be/groengevel-planten/>

Ghofrani, Z., Sposito, V., & Faggian, R. (2017). *A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts*. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1), 15–36. [www.sciencetarget.com](http://www.sciencetarget.com)

Hobbyprof. (n.d.). *Gras*. Retrieved from <https://www.hobbyprof.nl/vn08410-scatter-material-light-green-42g>

Homedeaal. (n.d.). *Hovenier prijzen*. Retrieved April 29, 2023, from <https://www.homedeaal.nl/tuinonderhoud/hovenier-prijzen/>

Hop, M. (2011). *Vaste planten in openbaar groen*. [www.tuinbouw.nl](http://www.tuinbouw.nl)

Hovenierwebsite. (n.d.). *Bomen planten kosten*. Retrieved April 29, 2023, from <https://hovenier.website/>

Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T., & Many, D. (2021). *Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities*. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>

Huang, B. (n.d.). *Turfgrass Water Requirements and Factors Affecting Water Usage*. Retrieved April 29, 2023, from <https://www.usga.org/content/dam/usga/pdf/Water%20Resource%20Center/turfgrass-water-requirements.pdf>

James, Z. (n.d.). *Stedelijke boom*. Retrieved from <https://www.ice.org.uk/news-insight/news-and-blogs/ice-blogs/the-civil-engineer-blog/why-should-successful-urban-tree-planting-matter-to-engineers>

Jayasooriya, V. M., Ng, A. W. M., Muthukumar, S., & Perera, C. B. J. (2020). *Optimization of green infrastructure practices in industrial areas for runoff management: A review on issues, challenges and opportunities*. In *Water (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/W12041024>

Jerzy, Z., Łukasz, S., Anna, Z., Kornelia, K., & Maksym, B. (2020). *Water Retention in Nature-Based Solutions—Assessment of Potential Economic Effects for Local Social Groups*. *Water* 2020, Vol. 12, Page 3347, 12(12), 3347. <https://doi.org/10.3390/W12123347>

Kabisch, N. (2016). *Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action*. *Ecology and Society*. <https://www.jstor.org/stable/pdf/26270403.pdf>

Kennisportaal Klimaatadaptatie. (2021). *Policy and programmes - Spatial adaptation*. <https://klimaatadaptatienederland.nl/en/policy-programmes/>

KNMI. (n.d.). *Zonnestraling in Nederland*. Thieme. Retrieved May 29, 2023, from [https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmi/DIV/Zonnestraling\\_in\\_Nederland.pdf](https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmi/DIV/Zonnestraling_in_Nederland.pdf)

KNMI. (2023). *Klimaat van Nederland*. <https://www.knmi.nl/klimaat>

Kunapo, J., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Ladson, A. R., & Cunningham, L. (2017). *A Web-GIS Based Integrated Climate Adaptation Model (ICAM): Exemplification from the City of Melbourne, Australia*.

Macro, K., Matott, L. S., Rabideau, A., Ghodsi, S. H., & Zhu, Z. (2019). *OSTRICH-SWMM: A new multi-objective optimization tool for green infrastructure planning with SWMM*. *Environmental Modelling and Software*, 113, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.004>

Marando, F., Salvatori, E., Sebastiani, A., Fusaro, L., & Manes, F. (2019). *Regulating Ecosystem Services and Green Infrastructure: assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy*. *Ecological Modelling*, 392, 92–102. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2018.11.011>

Meteoblue. (2021). *Gesimuleerde historische klimaat- en weergegevens voor Arnhem*. [https://www.meteoblue.com/nl/weer/historyclimate/climatemodellied/arnhem\\_nederland\\_2759661](https://www.meteoblue.com/nl/weer/historyclimate/climatemodellied/arnhem_nederland_2759661)

Milani, M., Marzo, A., Toscano, A., Consoli, S., Cirelli, G. L., Ventura, D., & Barbagallo, S. (2019). *Evapotranspiration from Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with Different Perennial Plant Species*. *Water* 2019, Vol. 11, Page 2159, 11(10), 2159. <https://doi.org/10.3390/W11102159>

Miller, J. N., VanLoocke, A., Gomez-Casanovas, N., & Bernacchi, C. J. (2016). *Candidate perennial bioenergy grasses have a higher albedo than annual row crops*. *GCB Bioenergy*, 8(4), 818–825. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12291>

Muhammad Adnan, Wafae Badi, Claudine Dereczynski, Alejandro Di Luca, Subimal Ghosh, Iskhag Iskandar, James Kossin, Friederike Otto, Izidine Pinto Masaki Satoh, Sergio M. Vicente-Serrano, Michael Wehner, & Botao Zhou. (2021). *IPCC chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>

Natuurlijk-rijk. (n.d.). *Meerjarige grassen/kruiden*. Retrieved from <https://www.natuurlijk-rijk.be/deel-2-op-bezoek-bij-piet-oudolf-in-hummelo/>

- Nika, C. E., Gusmaroli, L., Ghafourian, M., Atanasova, N., Buttiglieri, G., & Katsou, E. (2020). Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: A review on assessment methodologies, tools and indicators. *Water Research*, 183, 3. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115988>
- Ouyang, Z., Sciusco, P., Jiao, T., Feron, S., Lei, C., Li, F., John, R., Fan, P., Li, X., Williams, C. A., Chen, G., Wang, C., & Chen, J. (2022). Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 13(1), 3800. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31558-z>
- Peng, Y., Wang, Q., & Bai, L. (2020). Identification of the key landscape metrics indicating regional temperature at different spatial scales and vegetation transpiration. *Ecological Indicators*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106066>
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Permavoid. (2023). Permavoid 150 | New Urban Standard. <https://newurbanstandard.nl/producten/permavoid-units/permavoid-150/>
- Polypipe. (2016). Planning, design, specification and installation guide Permavoid System Technical Manual. [https://www.polypipe.com/sites/default/files/WEB\\_PCL\\_14\\_234\\_Permavoid\\_Technical\\_Manual\\_2015\\_4.pdf](https://www.polypipe.com/sites/default/files/WEB_PCL_14_234_Permavoid_Technical_Manual_2015_4.pdf)
- Reiss, J., & Sprenger, J. (2014). Scientific Objectivity. <http://www.laeuferpaar.de.1>
- Rijkswaterstaat. (2019). Water management in the Netherlands. [https://www.researchgate.net/publication/337022404\\_Water\\_management\\_in\\_the\\_Netherlands\\_The\\_Kreekraksluizen\\_in\\_Schelde-Rijnkanaal](https://www.researchgate.net/publication/337022404_Water_management_in_the_Netherlands_The_Kreekraksluizen_in_Schelde-Rijnkanaal)
- Shojaeizadeh, A., Geza, M., & Hogue, T. S. (2021). GIP-SWMM: A new Green Infrastructure Placement Tool coupled with SWMM. *Journal of Environmental Management*, 277, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111409>
- Siepmann, S. (2020). Drought in the Netherlands and its impact on groundwater resources | International Groundwater Resources Assessment Centre. <https://www.un-igrac.org/stories/drought-netherlands-and-its-impact-groundwater-resources>
- Slätmo, E., Nilsson, K., & Turunen, E. (2019). Implementing Green Infrastructure in Spatial Planning in Europe. *Land* 2019, Vol. 8, Page 62, 8(4), 62. <https://doi.org/10.3390/LAND8040062>
- Su, Y., Wu, J., Zhang, C., Wu, X., Li, Q., Liu, L., Bi, C., Zhang, H., Laforteza, R., & Chen, X. (2022). Estimating the cooling effect magnitude of urban vegetation in different climate zones using multi-source remote sensing. *Urban Climate*, 43, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101155>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. In *Energy and Buildings* (Vol. 25).
- Tan, C. L., Wong, N. H., Jusuf, S. K., & Chiam, Z. Q. (2015). Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Building and Environment*, 94(P1), 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.001>
- Tan, J. K. N., Belcher, R. N., Tan, H. T. W., Menz, S., & Schroepfer, T. (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127128. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127128>
- Torres, M. N., Fontecha, J. E., Walteros, J. L., Zhu, Z., Ahmed, Z., Rodríguez, J. P., & Rabideau, A. J. (2021). City-scale optimal location planning of Green Infrastructure using piece-wise linear interpolation and exact optimization methods. *Journal of Hydrology*, 601, 126540. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126540>
- Tuinweb. (2019). Prijs gazon aanleggen. <https://www.tuinweb.nl/prijs-gazon-aanleggen/>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2018, May 16). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs. United Nations - Department of Economics and Social Affairs. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Urbanbluegrids. (2021). Waterdoorlatende verharding | Effecten | Kennisbank | Groenblauwe netwerken. <https://nl.urbangreenbluegrids.com/kennisbank/effecten/waterdoorlatende-verharding-waterpasserende-verharding-halfverharding-en-doorgroeibare-verharding/>
- Vale, B., & Vale, R. (2009). Is the high-density city the only option? Designing High-Density Cities for Social and Environmental Sustainability, 19–26. <https://doi.org/10.4324/9781849774444>
- Voeten, J. (2022). Expert interview - Researcher Nature based Solutions, Wageningen Environmental Research.
- Wang, M., & Yin, X. (2022). Construction and maintenance of urban underground infrastructure with digital technologies. *Automation in Construction*, 141, 104464. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104464>
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>
- Werkspot. (2019). Gemiddelde kosten gras leggen of zaaïen. <https://www.werkspot.nl/tuinieren-buiten/prijzen-kosten/gras-leggen-zaaien>
- Zhirui, H., & Zuoma, L. (2022). Relationship between vegetation types and surface runoff coefficient in... | Download Scientific Diagram. <https://doi.org/10.3390/land11122143>
- Zhou, C., & Wu, Y. (2020). A planning support tool for layout integral optimization of urban blue-green infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su12041613>
- Zou, Z., Yang, Y., & Qiu, G. Y. (2019). Quantifying the Evapotranspiration Rate and Its Cooling Effects of Urban Hedges Based on Three-Temperature Model and Infrared Remote Sensing. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 202, 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/RS11020202>
- Nika, C. E., Gusmaroli, L., Ghafourian, M., Atanasova, N., Buttiglieri, G., & Katsou, E. (2020). Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: A review on assessment methodologies, tools and indicators. *Water Research*, 183, 3. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115988>
- Ouyang, Z., Sciusco, P., Jiao, T., Feron, S., Lei, C., Li, F., John, R., Fan, P., Li, X., Williams, C. A., Chen, G., Wang, C., & Chen, J. (2022). Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 13(1), 3800. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31558-z>
- Peng, Y., Wang, Q., & Bai, L. (2020). Identification of the key landscape metrics indicating regional temperature at different spatial scales and vegetation transpiration. *Ecological Indicators*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106066>
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Permavoid. (2023). Permavoid 150 | New Urban Standard. <https://newurbanstandard.nl/producten/permavoid-units/permavoid-150/>
- Polypipe. (2016). Planning, design, specification and installation guide Permavoid System Technical Manual. [https://www.polypipe.com/sites/default/files/WEB\\_PCL\\_14\\_234\\_Permavoid\\_Technical\\_Manual\\_2015\\_4.pdf](https://www.polypipe.com/sites/default/files/WEB_PCL_14_234_Permavoid_Technical_Manual_2015_4.pdf)
- Reiss, J., & Sprenger, J. (2014). Scientific Objectivity. <http://www.laeuferpaar.de.1>
- Rijkswaterstaat. (2019). Water management in the Netherlands. [https://www.researchgate.net/publication/337022404\\_Water\\_management\\_in\\_the\\_Netherlands\\_The\\_Kreekraksluizen\\_in\\_Schelde-Rijnkanaal](https://www.researchgate.net/publication/337022404_Water_management_in_the_Netherlands_The_Kreekraksluizen_in_Schelde-Rijnkanaal)
- Shojaeizadeh, A., Geza, M., & Hogue, T. S. (2021). GIP-SWMM: A new Green Infrastructure Placement Tool coupled with SWMM. *Journal of Environmental Management*, 277, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111409>
- Siepmann, S. (2020). Drought in the Netherlands and its impact on groundwater resources | International Groundwater Resources Assessment Centre. <https://www.un-igrac.org/stories/drought-netherlands-and-its-impact-groundwater-resources>
- Slätmo, E., Nilsson, K., & Turunen, E. (2019). Implementing Green Infrastructure in Spatial Planning in Europe. *Land* 2019, Vol. 8, Page 62, 8(4), 62. <https://doi.org/10.3390/LAND8040062>



Su, Y., Wu, J., Zhang, C., Wu, X., Li, Q., Liu, L., Bi, C., Zhang, H., Laforteza, R., & Chen, X. (2022). Estimating the cooling effect magnitude of urban vegetation in different climate zones using multi-source remote sensing. *Urban Climate*, 43, 101155. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101155>

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. In *Energy and Buildings* (Vol. 25).

Tan, C. L., Wong, N. H., Jusuf, S. K., & Chiam, Z. Q. (2015). Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Building and Environment*, 94(P1), 206–217. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.08.001>

Tan, J. K. N., Belcher, R. N., Tan, H. T. W., Menz, S., & Schroepfer, T. (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127128. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2021.127128>

Torres, M. N., Fontecha, J. E., Walteros, J. L., Zhu, Z., Ahmed, Z., Rodríguez, J. P., & Rabideau, A. J. (2021). City-scale optimal location planning of Green Infrastructure using piece-wise linear interpolation and exact optimization methods. *Journal of Hydrology*, 601, 126540. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126540>

Tuinweb. (2019). Prijs gazon aanleggen. <https://www.tuinweb.nl/prijs-gazon-aanleggen/>

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2018, May 16). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs. United Nations - Department of Economics and Social Affairs. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

Urbanbluegrids. (2021). Waterdoorlatende verharding | Effecten | Kennisbank | Groenblauwe netwerken. <https://nl.urbangreenbluegrids.com/kennisbank/effecten/waterdoorlatende-verharding-waterpasserende-verharding-halfverharding-en-doorgroeibare-verharding/>

Vale, B., & Vale, R. (2009). Is the high-density city the only option? *Designing High-Density Cities for Social and Environmental Sustainability*, 19–26. <https://doi.org/10.4324/9781849774444>

Voeten, J. (2022). Expert interview - Researcher Nature based Solutions, Wageningen Environmental Research.

Wang, M., & Yin, X. (2022). Construction and maintenance of urban underground infrastructure with digital technologies. *Automation in Construction*, 141, 104464. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104464>

Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2–19. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.06.046>

Werkspot. (2019). Gemiddelde kosten gras leggen of zaaien. <https://www.werkspot.nl/tuinieren-buiten/prijzen-kosten/gras-leggen-zaaien>

Zhirui, H., & Zuoma, L. (2022). Relationship between vegetation types and surface runoff coefficient in... | Download Scientific Diagram. <https://doi.org/10.3390/land11122143>

Zhou, C., & Wu, Y. (2020). A planning support tool for layout integral optimization of urban blue-green infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su12041613>

Zou, Z., Yang, Y., & Qiu, G. Y. (2019). Quantifying the Evapotranspiration Rate and Its Cooling Effects of Urban Hedges Based on Three-Temperature Model and Infrared Remote Sensing. *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 202, 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/RS11020202>

# Bijlage A: Inputparameters

Tabel: Input parameters green infrastructure

Type of softscape	Acquisition + installation costs (€/m <sup>2</sup> )	Maintenance costs (€/m <sup>2</sup> /y)	Evapotranspiration potential (W/m <sup>2</sup> )	Emissivity (Shading) (W/m <sup>2</sup> )	Radiation (Albedo) (W/m <sup>2</sup> )	Combined cooling potential (W/m <sup>2</sup> )	Runoff coefficient
Grass	5 <sup>3</sup>	1 <sup>4</sup>	170 <sup>5</sup>	0	40 <sup>6</sup>	210	0.3 <sup>7</sup>
Perennial planting	20 <sup>8</sup>	0.88 <sup>9</sup>	209 <sup>10</sup>	0	21 <sup>11</sup>	230	0.08 <sup>12</sup>
Mixed hedge	73 <sup>13</sup>	0.88 <sup>14</sup>	188 <sup>15</sup>	0	45 <sup>16</sup>	233	0.048 <sup>17</sup>
Urban tree	62 <sup>18</sup>	2.12 <sup>19</sup>	175* <sup>20</sup>	125* <sup>21</sup>	23* <sup>22</sup>	323*	0.3 <sup>23</sup>
OPP	135 <sup>24</sup>	0.22 <sup>25</sup>	85 <sup>26</sup>	0	20 <sup>27</sup>	105	0.60 <sup>28</sup>
Green façade	400** <sup>29</sup>	2.81 <sup>30</sup>	188 <sup>31</sup>	0	45 <sup>32</sup>	233	1
<b>Sources:</b>	3 (Tuinweb, 2019) 8 (Werkspot, 2019) 13 (Homedeal, n.d.) 18 (Hovenierwebsite, n.d.) 24 (Urbanbluegrids, 2021) 29 (Gevelrenovatie, n.d.)	4 (Hop, 2011) 9 (Hop, 2011) 14 (Hop, 2011) 19 (Boomzorg.nl, n.d.) 25 (Urbanbluegrids, 2021) 30 (Perini & Rosasco, 2013) same as mixed hedge	5 (Huang, n.d.) centipedegrass 10 (Milani et al., 2019) Chrysopogon zizanioides (perennial bunchgrass) 15 (Zou et al., 2019) H. littoralis hedge on a sunny day during the spring 20 (Y. Wang et al., 2016) 26 (Voeten, 2022) Half of grass 31 (Zou et al., 2019)	21 (KNMI, n.d.; Y. Wang et al., 2016)	6 (KNMI, n.d.) 11 (Miller et al., 2016) switchgrass in july 16 (C. L. Tan et al., 2015) 22 (KNMI, n.d.) 27 (Voeten, 2022) Half of grass 32 (Voeten, 2022) Same as mixed hedge		7 (Hsu et al., 2021) 12 (Zhirui & Zuoma, 2022) 17 (Zhirui & Zuoma, 2022) 23 (Hsu et al., 2021) 28 (Hsu et al., 2021)

\*Because the canopy of the tree also covers other land uses outside of the green area, a multiplier of 1.41 has been used (based on average tree coverage, GIS-data)

\*\* Combining the green façade with XY uses 400 in the cost function because the change in other infrastructures is calculated in the model

Input parameters per type of hardscape : (Expert Interview - Consultant Managing Public Space, Municipality of Amsterdam, 2022)

Land use	Type of hardscape	Costs (€/m <sup>2</sup> /y)	Relative costs (€/m <sup>2</sup> /y)**
Car/bus lane*	Asphalt	70	0
Bicycle lane*	Red asphalt	50	0
Bicycle lane	Tiles	20	-30
Parking lot*	Asphalt	35	0
Parking lot	Open paving patterns	70	35
Pavement*	Tiles	20	0

\*Default option

\*\*The relative costs are the cost difference regarding the default option

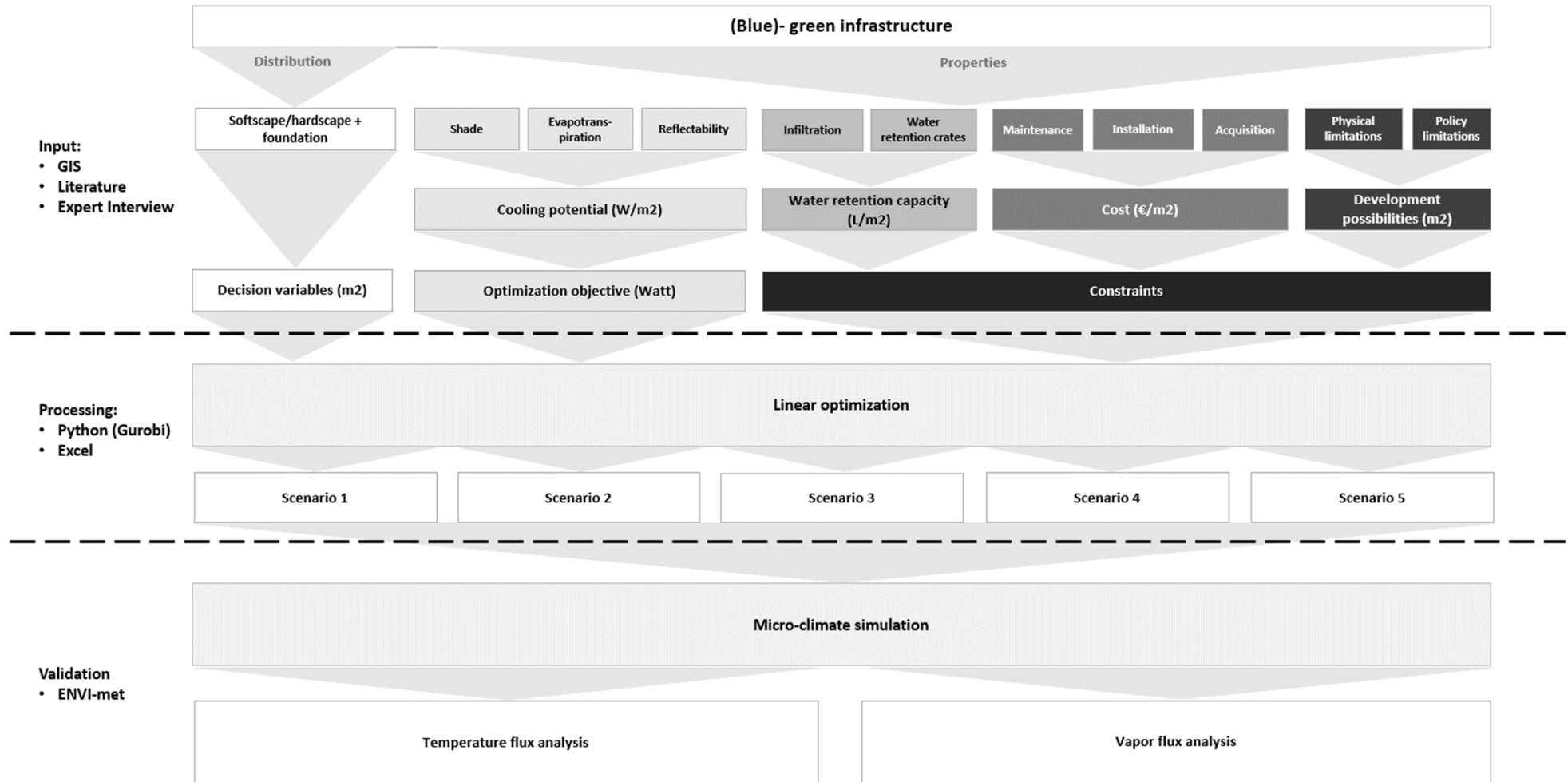
Tabel: Input data of the cost of water retention (+RET) and rooting zone (+RZ) (Expert Interview - Senior Advisor, New Urban Standard (Permavoid), 2022)

Foundation type	Costs (€/m <sup>2</sup> )
+ RET	80
+ RZ	65
+ RET + RZ	100

Input parameters klimaat Arnhem (Meteoblue, 2021).

Soil type	Soil moisture	Date	Wind speed (km/h)	Wind direction	Temperature (°C)	Relative humidity	Clouds	Solar radiation
Sandy	95% / 30%	01-08-2022	15	Southwest	32	50%	No	Average at a given date

# Bijlage B: Conceptueel raamwerk



## Bijlage C: Opbouw van verkoelend effect, monetaisering en kosten

### Total cooling effect:

The total cooling effect ( $E_{tot}$ ) is the sum of the combined cooling potential per  $m^2$  ( $E_{com}$ ) for the whole area of the street (expressed in  $W/m^2$ ). The combined cooling potential is defined as the sum of the emissivity ( $\Delta E$ ), the radiation ( $\Delta Rn$ ) and evapotranspiration ( $E_{evap}$ ) per  $m^2$ . This is based on the surface energy balance (Taha, 1997; J. K. N. Tan et al., 2021). All these components are discussed below.

$$E_{tot} = \Sigma E_{com}$$

$$E_{com} = \Delta E + \Delta Rn + E_{evap}$$

#### 1. Emissivity:

The influence of GI on emissivity relies on the albedo characteristics of different GI measures compared to the current asphalt used in the Netherlands (0.09) (KNMI, n.d.). Subsequently, this impact is quantified in terms of extreme irradiation in Arnhem. The summer of 2022 recorded the highest irradiation ( $Rn$ ) since the beginning of measurements, averaging  $238 W/m^2$  (KNMI, 2023). Emissivity is defined as:

$$\Delta E = Rn * (1 - \alpha, 0) - Rn * (1 - \alpha, GI)$$

Where:

$\Delta E$  - The difference in emissivity when applying GI compared to asphalt [ $W/m^2$ ]  
 $Rn$  - The net radiation at the height of GI [ $W/m^2$ ]  
 $\alpha, 0$  - albedo black asphalt [0.09] (KNMI, n.d.)  
 $\alpha, GI$  - Albedo new green infrastructure

#### 2. Radiation

The intercepted energy is defined as the amount of absorbed radiation energy minus the reflected energy (emissivity) based on the albedo and irradiation (Y. Wang et al., 2016). The absorbed radiation energy by the tree ( $Rn_{tree}$ ) is equal to:

$$\Delta Rn = \lambda * Rn - (Rn * (1 - \alpha, GI))$$

Where:

$\Delta Rn$  - The net radiation intercepted by a single tree canopy [ $W/m^2$ ]  
 $Rn$  - The net radiation at the height of GI [ $W/m^2$ ]  
 $\lambda$  - the absorption constant [0.5] (Y. Wang et al., 2016)  
 $\alpha, GI$  - Albedo of new green infrastructure

#### 3. Evapotranspiration

Evapotranspiration depends on radiation, vapour pressure, temperature, and wind speed, which is included in the evaporation rate and dependent on the species' type (Y. Wang et al., 2016). Since the input data is based on literature, these factors were used when making comparisons to a similar climate of Arnhem during a hot/dry summer day. Furthermore, because a dry climate is chosen, GI will not be able to evaporate any water unless additional water retention is created. The evapotranspiration of plants in (L/s) is quantified by the heat of vaporisation to express it in  $W/m^2$ .

$$E_{evap} = ETo * \Delta H$$

Where:

$E_{evap}$  - The energy used to evaporate [ $W/m^2$ ]  
 $ETo$  - Evapotranspiration rate [mm/day]  
 $\Delta H$  - Heat of vaporisation [2260kJ/L] (Datt, 2011).

### (Net-)Benefits

The total (net-)benefits are based on a quantification of the benefits (and costs) over a certain time frame (25-50 years). This will be done by monetising the water retention capacity and the cooling effect benefits and adding this up to the total costs. This includes the application, installation and maintenance costs over multiple timeframes.

The benefit function is as follows:

$$B_{tot} = T * (0.047 * E_{tot} + 0.503 * V)$$

Where:

$B_{tot}$  - Total benefits of applying urban BGI [€]  
 $T$  - Time [years]  
 $E_{tot}$  - The total cooling effect produced in the street [ $W/year$ ]  
 $V$  - The total amount of water infiltrated in all of the infrastructures per year [ $m^3/year$ ]<sup>1</sup>

When also including the costs over a timeframe, the Net benefit function is as follows:

$$B_{net} = T * (0.047 E_{tot} + 0.503 V - C_m) - C_i$$

Where:

$B_{net}$  - The total net benefits of applying urban BGI [€]  
 $C_m$  - Total amount of maintenance costs in the street [€/year]  
 $C_i$  - Investment costs [€]

#### 1. Water retention

The monetisation of water retention will be done by looking at how much water can annually infiltrate the ground, calculated using the GI-specific runoff coefficient. The total annual precipitation of the street is used (824 mm/year) (Climate-Data, 2021). According to concept C, the hardscape area is slightly sloped to the greenery. Therefore, it is assumed that the total amount of precipitation in the street comes in contact with the greenery and infiltrates according to the runoff coefficient. The runoff coefficients are based on sandy soil under a minimal slope (<3%).

The monetisation is based on the volume of water that green infrastructure prevents from entering the sewage system and therefore does not need to be cleaned by a waste water treatment plant. Other positive externalities such as risk minimisation are not included.  $1 m^3$  of water prevented from entering the sewage system equals €0.503 (Jerzy et al., 2020). A time interval of 25 years is chosen because this is the replacement time of certain infrastructures. This is a conservative estimation.

#### 2. Total cooling effect

In a previous study, the cooling effect in eight urban settings in the United States was determined by assessing the associated mortality and morbidity risks that increase with higher temperatures. By comparing this effect to input data, a monetisation value of €0.047 per year per watt of cooling is obtained (Fema, 2022). This parameter holds significance for the I.r. J.P. van Muijlwijkstraat street, as its population primarily comprises of elderly who are particularly susceptible to heat stress.

#### 3. Costs

The costs consist of two one-time investments (acquisition and installation) and one periodic costs element (maintenance). The cost data is gathered from expert interviews with a consultant managing public space at the municipality of Amsterdam and a senior advisor at New Urban Standard which works closely with Permavoid. This is supplemented with literature research. The timeframes chosen for the periodic costs are 25 to 50 years.

## Bijlage D: Randvoorwaarden

### Code definitions:

Softscape type:	Grass	Mixed hedge	Perennial planting	Remaining tree	Urban tree	Green facade	Open paving patterns
Code:	A	B	C	D	E	F	K

Land use:	Car lane	Bicycle lane	Parking lot	Parking lot	Pavement
Hardscape type:	Asphalt	Tiles	Asphalt	Open paving patterns	Tiles
Code:	H	I	J	K	L

Foundation type:	Code:
+ RZ	X
+ RET	Y

### Physical/policy constraints

The physical and policy limitations are expressed in constraints 1-10 (described below). The physical constraints limit the amount of area that can be assigned to a certain decision variable. These areas are determined by looking at the areas assigned to greenery, car/bus lanes, bicycle lanes, parking lots and the pavement in development plan concept C (Table 5). The area assigned per category is fixed by the constraints, but the distribution of the decision variables is flexible. Furthermore, the area assigned to additional urban trees cannot exceed the maximum area available for the trees (680 m<sup>2</sup>). This is because the distance between two trees should be at least twice the radius of its canopy and the distance between a tree and a façade should be minimal one time the radius of the canopy. Trees with larger canopies should not interfere with the bus lines. Whenever the canopy of a tree covers another land use, this land-use type should also be made suitable for supporting the tree by adding RZ and/or RET in its foundation. There is one exception, the foundation of the car/bus lane cannot support trees due to the pressure, making the soil less permeable resulting in difficulties for the root system. This area should therefore be compensated underneath other land uses the canopy covers to the same ratio. This is calculated based on the average distribution (1 m<sup>2</sup> of trees in green needs support of 0.006 m<sup>2</sup> bicycle lane, 0.375 m<sup>2</sup> of parking lot and 0.028 m<sup>2</sup> pavement). This is shown in constraint 10.

Furthermore, there is a fixed area suitable for green facades which has a height of 3 meters (max area of 1159 m<sup>2</sup>). Because the green façade is located vertically, it is assumed that if it is implemented with + RET it requires the same horizontal area adjacent to be made suitable, which is 1 m<sup>2</sup> of greenery followed by 2 m<sup>2</sup> of pavement for every 3 m<sup>2</sup> of green facades (constraint 9,10c). Finally, the model assumes that only a single decision variable can be assigned per m<sup>2</sup>. Table 5 shows the area per soft/hardscape type which will be assigned to the decision variables. The policy states that all of the existing trees that fit in concept C will remain in the design (208 m<sup>2</sup>). Furthermore, road users should not experience any hinder to the placement of trees in terms of eyesight.

Table X: The total amount of area that the land uses will be assigned to

Land use type:	Greenery	Car lane	Bicycle lane	Parking lot	Pavement
Area (m <sup>2</sup> )	3948	5080	1750	590	2400

- All the green area needs to be filled with green (excluding green facade, potential OPP (m<sup>2</sup>)).  
(A + AY + B + BY + C + CY + D + EX + EXY == 3948)
- Parking lot area cannot exceed max available area (m<sup>2</sup>).  
(JX + K + KX + KY + KXY <= 590)
- Bicycle lane area cannot exceed max available area (m<sup>2</sup>).  
(IX + IXY <= 1750)
- Pavement area cannot exceed max area (m<sup>2</sup>).  
(LX + LXI <= 2400)
- The low vegetation added up cannot exceed their maximum available area (m<sup>2</sup>)

$$(A + AY + B + BY + C + CY <= 3740)$$

- All additional trees should not exceed max area available in the green area (m<sup>2</sup>)  
(EX + EXY <= 680)
- All existing trees that fit in concept C will remain (m<sup>2</sup>)  
(D == 208)
- The green facade cannot exceed the max available area (m<sup>2</sup>)  
(F + FXY <= 1159)
- Greenery adjacent to the green facade needs to have RET when using FXY (m<sup>2</sup>)  
(3\*(AY + BY + CY) >= FXY)
- To cover for the additional costs of changing the foundation when applying trees (m<sup>2</sup>)
  - Bicycle lane  
IXY == EXY\*0.006  
(IX == EX\*0.006)
  - Parking lot  
(KXY == EXY\*0.375)  
((KX + JX) == EX\*0.375)
  - Pavement (including suitability for green façade)  
(LXY == EXY\*0.028 + 2\*FXY)  
(LX == EX\*0.028 + 2\*F)

### Indicator defining constraints

The indicator-defining constraints provide insight into how the indicators are calculated using the input parameters (see chapter 3.1, Case study setup). Constraint 11-13 quantifies the amount of area assigned per decision variable with its parameters in terms of cooling potential (W/m<sup>2</sup>). When it is assumed that all roots are in a saturated zone and therefore vegetation will always have excess to groundwater (scenario 2), E<sub>evap</sub> is always included even without the implementation of + RET. This results in a change in the numbers shown in these constraints. Within the total cooling potential (E<sub>tot</sub>, constraint 13) the evapotranspiration factor is isolated from the emissivity + radiation factor, so a multiplier (m) can be added (scenarios 1.2, 4.2 and the sensitivity analyses) to analyse the effect of the evapotranspiration on the land-use distribution.

The total capacity of the RET systems is calculated in constraint 14. The Permavoid 150 model is considered in this model which has a volume of 150L which should be quantified by the volume void factor of 0.95. (Permavoid, 2023; Polypipe, 2016). The total annual water infiltration (V) is calculated by multiplying the annual precipitation (0.824m) with 1 minus the runoff coefficient for each m<sup>2</sup> and adding the total values up for all the m<sup>2</sup> (Climate-Data, 2021). The runoff coefficient is dependent on the land use and can be found in chapter 3.1: Case study setup. The numbers used in constraint 15 have included the runoff coefficients.

- Definition of the total cooling effect of emissivity + radiation (W) (ΔE + ΔR<sub>n</sub>)  
(ER<sub>n</sub> == 45\*F + 45\*FXY + 40\*A + 40\*AY + 45\*B + 45\*BY + 21\*C + 21\*CY + 89\*D + 149\*EX + 200\*EXY + 0\*IX + 0\*IXY + 0\*JX + 20\*K + 20\*KX + 20\*KY + 20\*KXY + 0\*LX + 0\*LXY)
- Definition of the total cooling effect of evapotranspiration (W) (E<sub>evap</sub>)  
(E<sub>evap</sub> == 0\*F + 188\*FXY + 0\*A + 170\*AY + 0\*B + 188\*BY + 0\*C + 209\*CY + 124\*D + 0\*EX + 124\*EXY + 0\*IX + 0\*IXY + 0\*JX + 0\*K + 0\*KX + 85\*KY + 85\*KXY + 0\*LX + 0\*LXY)
- Definition of the total cooling effect in the street (under multiplier (m)) (W) (E<sub>tot</sub>)  
(E<sub>tot</sub> == ER<sub>n</sub> + (m) \* E<sub>evap</sub>)
- Definition of the total capacity of RET systems (L)  
(RET == 150\*0.95\*(AY + BY + CY + EXY + IXY + KY + KXY + LXI))
- Definition of the total annual volume of water infiltrated (L/Y) (V)  
(V == (0\*FXY + 0\*F + 580\*AY + 580\*A + 780\*BY + 780\*B + 760\*CY + 760\*C + 1130\*D + 1130\*EX + 1130\*EXY + 330\*KY + 330\*K + 330\*KX + 330\*KXY))

### Financial constraints

The financial constraints define the method of cost calculation as well as a financial limit on the investment. Constraint 16 and 17 show how the total acquisition plus installation costs and the maintenance costs per year are calculated. This is done by multiplying the costs/m<sup>2</sup> by the amount of m<sup>2</sup> assigned to specific land uses. The input parameters are dependent on the type of land use and can be found in chapter 3.1. Constraint 18 is used in all scenarios to be able to maximise the cooling effect while keeping the acquisition and installation costs under a fixed amount. The variable "N" describes the financial limit which cannot be exceeded. Fixed intervals for "N" have been chosen to be able to analyse the optimal distribution of land uses, for reaching the optimisation objective under multiple investments. Constraint 19 is solely used in scenario 5 and the sensitivity analyses and incorporates maintenance costs over a time period. Constraint 20 and 21 define how the cooling effect and water infiltration is monetised, followed by constraint 22 which quantifies the total benefits after a certain amount of years. Constraint 23 is used in scenario 5 and the sensitivity analyses and defines the net benefits.

16. Definition of the total acquisition + installation cost (€)  
(Ci == 400\*F + 400\*FX + 5\*A + 85\*AY + 73\*B + 153\*BY + 20\*C + 100\*CV + 0\*D + 127\*EX + 162\*EXY + 45\*IX + 70\*IXY + 65\*JX + 35\*K + 100\*KX + 115\*KY + 135\*KXY + 80\*LX + 100\*LXY)
17. Definition of the total annual maintenance costs (€/year)  
(Cm == 2.81\*F + 2.81\*FX + 1\*A + 1\*AY + 0.88\*B + 0.88\*BY + 0.88\*C + 0.88\*CV + 0\*D + 2.12\*EX + 2.12\*EXY + 0.22\*K + 0.22\*KX + 0.22\*KY + 0.22\*KXY)
18. The investment costs (acquisition + installation) cannot exceed a certain amount (€)  
(Ci == N)
19. Total costs over a certain amount of years (€)  
(Ctot == Ci + T\*Cm)
20. Monetisation of health benefits by cooling effect (€/year)  
(BE == (Etot\*0.047))
21. Monetisation of decreasing the load on the sewage system (€/year)  
(BV == (V)/1000\*0.503)
22. Total benefits after a certain amount of years (€)  
(Btot == (BE + BV)\*T)
23. Net benefits after a certain amount of years (€)  
(Bnet == Btot - Ctot)

### Water retention constraints

The water retention constraints solely apply to scenario 3. Constraint 24 limits the minimal amount of RET systems that need to be applied at all times to mitigate a 1/30-year heavy rainfall event in scenario 3.1. Constraint 25 states that at all times, the minimal infiltration in the ground should be 25% of the annual precipitation that falls in the street. Constraint 25 is applied in scenario 3.2.

24. At least 2687 m<sup>2</sup> needs to contain (+RET) to mitigate a 1/30 year heavy rainfall event  
(TotalRet == AY + BY + CV + EXY + IXY + KY + LX)  
(TotalRet >= 2687)
25. Stormwater infiltration volume needs to be at least 25 % of annual precipitation  
(V >= 0.25\*11345000)

## Bijlage E: Aannames

Assumptions are made and considered in the model, which are translated to either the input parameters or the constraints. The remaining assumptions which have not been discussed in the methodology chapter are:

1. The precipitation that falls on 1 m<sup>2</sup> is enough to supply 1 m<sup>2</sup> of vegetation throughout the year, not considering the type of permeable surface.
2. A green façade is 3 meters high and uses as much water throughout the year as annually precipitates on an area equal to the area it covers vertically. In this area, additional RET needs to be created in the case of FX. There is no need to create additional RZ in the foundation of the greenery.
3. There are no costs regarding the foundation of the street when it is untouched.
4. The pressure of the cars on the foundation makes the soil less permeable and creates difficulties for the root system to make its way through it. Therefore, there is no room for RET and RZ under the asphalt on the car/bus lanes. When the canopy of an added tree covers this type of land use, the additional RET and RZ need to be compromised in foundations underneath other land uses. This is calculated using an average, based on the ratio of land uses underneath the trees (constraint 10).
5. In the calculation for hardscape changes, the costs are defined as the difference between the current choice and the potential new options (Chapter 3.1: Case study setup).
6. The cooling effect of open paving patterns is the same as 0.5 times the properties of grass per m<sup>2</sup> (Voeten, 2022).
7. Only trees have a shading effect and thus cooling based on radiation.
8. Existing trees do not need extra infrastructure to work to their full potential.