

KLIMAATADAPTIEF VASTHOUDEN, BERGEN EN AFVOEREN VAN HEMELWATER IN ARNHEM NOORD



30 juni 2016

BSc-opdracht rapport

Daniëlle van Middendorp

s1447149

University of Twente

Waterschap Rijn & IJssel

UNIVERSITY OF TWENTE.

Waterschap  Rijn en IJssel

WATERBEHEER: VEILIG EN OP MAAT

BACHELOROPDRACHT

Naam: D.C. (Daniëlle) van Middendorp
Studie: Civiele Techniek
Studentnummer: s1447149
Mail: d.c.vanmiddendorp@student.utwente.nl

Universiteit Twente: dr. Ir. D.C.M. (Denie) Augustijn
ir. J.G. (Annet) de Kiewit de Kiewit (tweede beoordelaar)

Waterschap Rijn en IJssel: dr. ir. R.M. (Rianne) Bredenhoff-Bijlsma

Afbeelding titelpagina:
De Vree, Waterschap Rijn en IJssel

VOORWOORD

Voor u ligt de Bachelor Eindopdracht die gedurende tien weken is uitgevoerd in het kader van het afsluiten van mijn driejarige bachelor studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Tijdens deze eindopdracht heb ik een deel van de opgedane kennis tijdens mijn opleiding in de praktijk mogen brengen en veel nieuwe kennis opgedaan. Dit deed ik bij de afdelingen Waterbeheer en Kennis & Advies van Waterschap Rijn en IJssel te Doetinchem. Hier heb ik gewerkt aan een studie naar vasthouden, bergen en afvoeren van hemelwater in Arnhem Noord. De toenemende waterproblematiek in de stad was uitgangspunt van mijn opdracht en werd tijdens mijn opdracht ook nog goed duidelijk gemaakt. De hevige buien in de week van 30 mei in het studiegebied Arnhem Noord en de rest van Nederland hebben het probleem ook tijdens mijn opdracht goed laten zien.

Tijdens mijn stage heb ik kennis gemaakt met het werken binnen een waterschap. Ik heb mogen ervaren hoe er binnen de verschillende afdelingen gewerkt wordt en hoe de verschillende taken van een waterschap worden uitgevoerd. Ik wil Waterschap Rijn en IJssel daarom ook bedanken voor de mogelijkheid om hier mijn eindopdracht uit te voeren. In het bijzonder gaat mijn dank uit naar mijn Rianne Bredenhoff-Bijlsma, Marga Limbeek, Ilmar Kelderman en Twan Rosmalen. De begeleiding, input en feedback die ik van hen heb gekregen, hield mij scherp en heeft er voor gezorgd dat ik de opdracht met plezier kon uitvoeren. Ook wil ik Hans Kampschreur bedanken voor zijn enthousiasme waarmee hij mij het gebied heeft laten leren kennen.

Ten slotte werd ik vanuit de Universiteit Twente begeleid door Denie Augustijn. Hem wil ik bedanken voor de betrokkenheid en de leerzame en nuttige feedback die ik van hem mocht ontvangen. Zowel bij mijn voorverslag als het uiteindelijke rapport dat nu voor u ligt.

Doetinchem, 30 juni 2016

Daniëlle van Middendorp

SAMENVATTING

In stedelijk gebied heeft mede door de toenemende verharding en de klimaatveranderingen steeds vaker te maken met wateroverlast. Om dit te voorkomen wil Waterschap Rijn en IJssel inzicht in maatregelen om hemelwater vast te houden, te bergen en af te voeren, zoals Commissie Waterbeheer 21^e eeuw als strategie heeft voorgeschreven. De verschillende mogelijkheden van maatregelen zijn in dit onderzoek onderzocht en Daarnaast is het stroomgebied van de Beek op de Paasberg onderzoek gedaan naar passende maatregelen en de effectiviteit van deze concepten op systeemniveau: hoe zich dit vertaalt naar het verminderen van de overlast.

Het doel van het onderzoek is om te komen met aanbevelingen voor klimaatadaptieve maatregelen om wateroverlast als gevolg van hevige buien in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg te verminderen. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *Hoe kunnen klimaatadaptieve maatregelen van vasthouden, bergen en afvoeren van hemelwater worden toegepast in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg om het stroomgebied bestendig te maken tegen extreme neerslag?* Klimaatadaptief wil zeggen dat ook gekeken wordt welke negatieve gevolgen van de klimaatsverandering naast wateroverlast worden aangepakt.

Om een antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvraag zijn de verschillende mogelijkheden van maatregelen zijn in dit onderzoek onderzocht. Daarnaast is het stroomgebied van de Beek op de Paasberg onderzoek gedaan naar passende maatregelen en de effectiviteit van deze concepten op systeemniveau: hoe zich dit vertaalt naar het verminderen van de overlast. Hiervoor is een waterbalans van het gebied opgesteld. Uit de resultaten van de waterbalans bleek dat de kleine maatregelen die in de wijken kunnen worden toegepast niet genoeg effect hebben het totale tekort aan capaciteit om het water vast te houden, te bergen of af te voeren te verwerken.

Op basis hiervan wordt aanbevolen om bestaande groene gebieden in te richten op een manier dat er tijdelijke berging mogelijk is als er extreem hevige buien vallen. Dit zal hand in hand moeten gaan met maatregelen om het water hier naartoe te geleiden. Vanuit het oogpunt om naast de wateroverlast ook andere gevolgen van de klimaatsverandering aan te pakken en de kwaliteit van leefomgeving in de stad te vergroten, is de aanbeveling voor het waterschap om ook te investeren in het faciliteren van en meewerken in burgerinitiatieven.

INHOUD

VOORWOORD.....	II
SAMENVATTING	IV
INHOUD.....	VI
1 INLEIDING.....	1
1.1 Aanleiding.....	1
1.2 Doel en onderzoeksvragen.....	3
1.3 Leeswijzer	4
2 MAATREGELEN VASTHOUDEN-BERGEN-AFVOEREN	5
2.1 Karakteristieken maatregelen	5
2.2 Categorisering.....	8
3 KARAKTERISTIEKEN STROOMGEBIED.....	9
3.1 Het probleem.....	10
3.2 Systeembeschrijving.....	10
3.2.1 Achtergrond	10
3.2.2 Stroomgebied.....	11
3.2.3 Factoren toepasbaarheid maatregelen.....	12
3.2.4 Initiatieven.....	16
3.2.5 Samenvatting.....	17
3.3 Waterbalans	18
3.3.1 Bebouwing.....	20
3.3.2 Groen.....	20
3.3.3 Wegen	21
3.3.4 Nat.....	21
3.3.5 Hemelwaterriool	22
3.3.6 Overzicht modelinvoer	23
4 EFFECTEN VAN DE MAATREGELEN	24
4.1 Resultaten waterbalans.....	24
4.1.1 Capaciteitstekort	24
4.2 Maatregelen	26
4.2.1 Vasthouden-bergen-afvoeren	26
4.2.2 Maatregelen.....	28
Groene daken.....	28
Groene tuin	29
Open verharding.....	29
4.3 Kansencarta.....	31
5 DISCUSSIE EN VERDER ONDERZOEK.....	32
6 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	33
BIBLIOGRAFIE	35

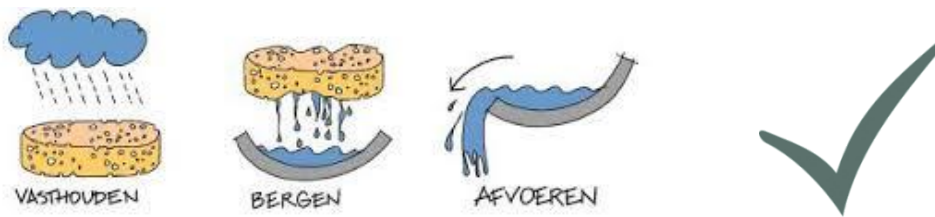
BIJLAGE A: MAATREGELEN VASTHOUDEN-BERGEN-AFVOEREN.....	40
BIJLAGE B: BODEMSOORT	41
BIJLAGE C: WATERBALANS	42
BIJLAGE D: SCRIPT MODEL WATERBALANS.....	43
BIJLAGE E: RESULTATEN WATERBALANS	49

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Wereldwijd verandert het klimaat en dit zal ook blijven veranderen. Een van de gevolgen, waar ook Nederland mee te maken heeft, is het extreme weer. Nederland heeft tegenwoordig bijna twee keer zo vaak te maken met extreme regenval (>50 mm/dag) vergeleken met vijftig jaar geleden[1]. Dit veroorzaakt, vooral in stedelijk gebied, veel problemen. De toenemende verharding in de stad zorgt ervoor dat de bodem het water niet meer kan absorberen. In plaats daarvan wordt het water via onder andere goten en het riool, die niet op deze extreme regenval zijn ontworpen, afgevoerd. Bijvoorbeeld in Kopenhagen zorgde dit in 2011 voor grote waterschade toen er in twee uur tijd 150 mm water was gevallen. De regenstorm zorgde ervoor dat grote delen van Kopenhagen onder water kwamen te staan. De infrastructuur was beschadigd en zelfs een ziekenhuis stond op het punt geëvacueerd te worden. De totale schade is geschat op bijna een miljard euro [2].

Commissie Waterbeheer in de 21^e eeuw heeft, als reactie op de toenemende waterproblematiek, een drie-trapsstrategie opgesteld om deze problemen aan te pakken. Het gaat hier om het principe van vasthouden-bergen-afvoeren [3]. Als dit niet voldoende blijkt, kan hieraan een vierde stap worden toegekend, namelijk accepteren [4].



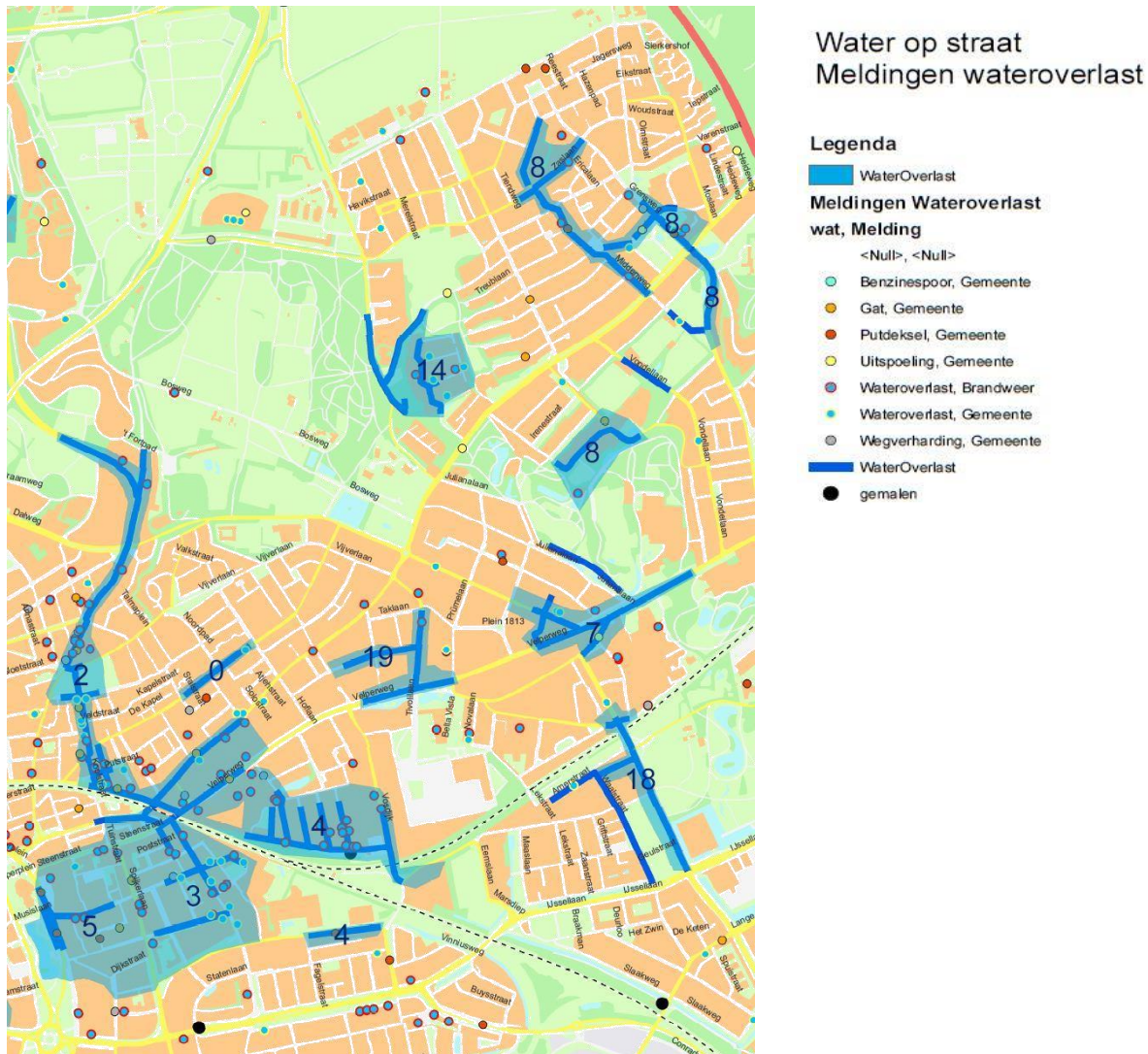
FIGUUR 1: VASTHOUDEN-BERGEN-AFVOEREN [5] EN ACCEPTEREN

Maandag 28 juli 2014 had Arnhem te maken met een hevige regenbui. Binnen 2 ½ uur is tussen de 80 en 120 millimeter neerslag gevallen. Deze bui heeft voor veel overlast en schade gezorgd [6]. De overlastlocaties van deze bui staan in Figuur 2. Dit was niet de enige hevige bui waar Arnhem de afgelopen jaren mee te maken heeft gehad. Onder andere zijn er ook in april en augustus van hetzelfde jaar hevige buien geweest [7]. Zelfs tijdens dit onderzoek op 30 mei 2016 hadden grote delen van Nederland en ook Arnhem te maken met extreme neerslag en wateroverlast.

De bui van 28 juli was uitzonderlijk qua hoeveelheid en intensiteit van de neerslag en is ook uitvoerig geanalyseerd. Deze regenbui is een voorbeeld van een mogelijk gevolg van klimaatsverandering. Daarom wordt deze bui als uitgangspunt van het probleem gezien.

Door de gemeente Arnhem en Waterschap Rijn & IJssel wordt gekeken naar vasthouden en bergen van hemelwater om deze wateroverlast te verminderen. Dit kan onder andere door maatregelen in de particuliere en openbare ruimte te nemen om ook in de toekomst buien in stedelijk gebied zo goed en slim mogelijk op te vangen met zo min mogelijk negatieve effecten. Zo wordt Arnhem een klimaatbestendige en –robuuste stad en kan Arnhem de effecten van de klimaatverandering opvangen [8]. Dat betekent dat we ons bewust zijn van mogelijke gevolgen van klimaatverandering, deze leren accepteren en er in de inrichting van stedelijke gebieden rekening mee houden[9]. In dit onderzoek wordt het verminderen van de wateroverlast als uitgangspunt gezien.

Het verminderen van hitte en droogte, die ook een grote rol spelen in het klimaatbestendig maken, worden als positieve bijeffecten genoemd.



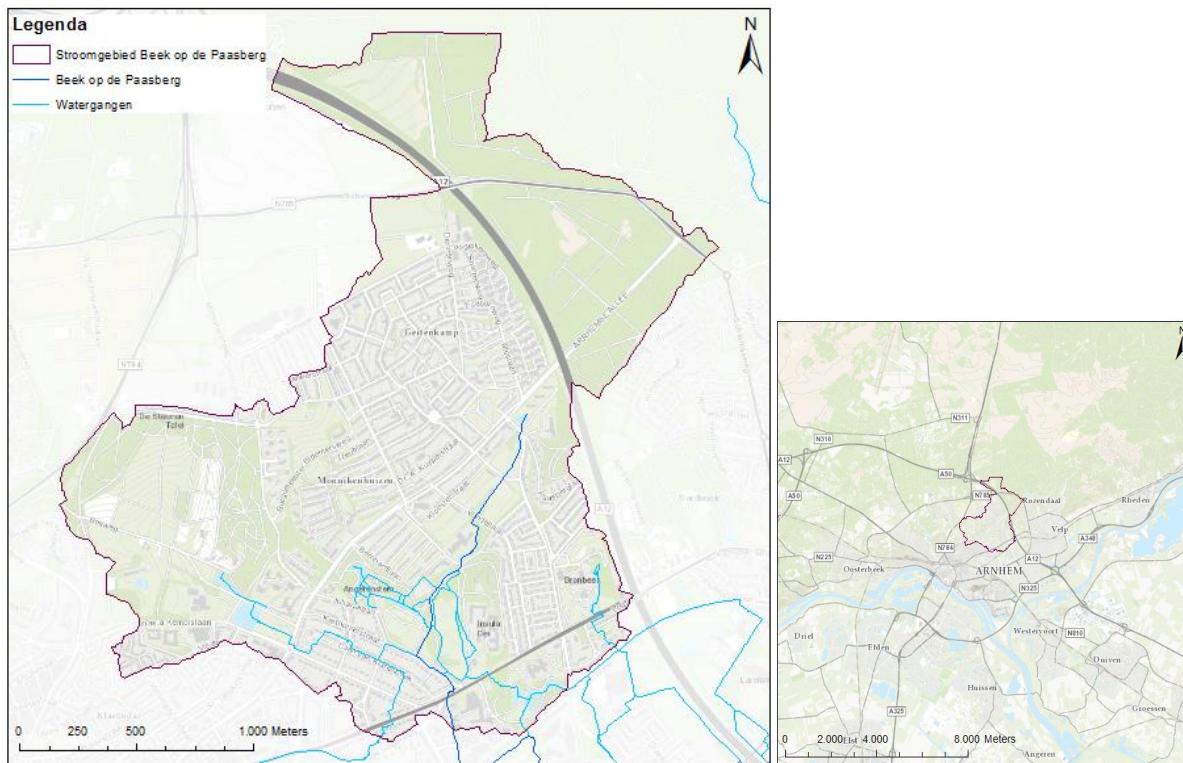
FIGUUR 2: OVERLASTLOCATIES 28 JULI 2014 IN ARNHEM NOORD[5]

In dit onderzoek worden de mogelijkheden van maatregelen voor vasthouden en bergen van hemelwater onderzocht. Daarnaast zal in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg (Figuur 3) onderzoek gedaan worden naar passende maatregelen en de effectiviteit van deze concepten op systeemniveau: hoe zich dit vertaalt naar vertraging van de afvoer.

Voor dit onderzoek is voor het stroomgebied van de Beek op de Paasberg gekozen om een aantal redenen. Allereerst omdat hier onder andere in juli 2014 veel wateroverlast is geweest. Daarnaast omdat het extreme hoogteverschillen kent, waardoor er een snelle afvoer is en het rioleringsstelsel overstortgevoelig is. Verder is het een verstedelijkt gebied met veel verharding, wat leidt tot snelle afvoeren.

Het stroomgebied van de Beek op de Paasberg zoals weergegeven in Figuur 3 is gebaseerd op de hoogtecijfers van de Actueel Hoogtebestand Nederland². Er is geen rekening gehouden met kunstmatige aanpassingen aan de

waterlopen. Het wil dus niet zeggen dat alles wat in dit gebied valt ook daadwerkelijk door de Beek op de Paasberg wordt afgevoerd, maar het geeft wel een indicatie.



FIGUUR 3: STROOMGEBIED VAN DE BEEK OP DE PAASBERG EN OMLIGGENDE WATERGANGEN IN ARNHEM NOORD

1.2 Doel en onderzoeksvragen

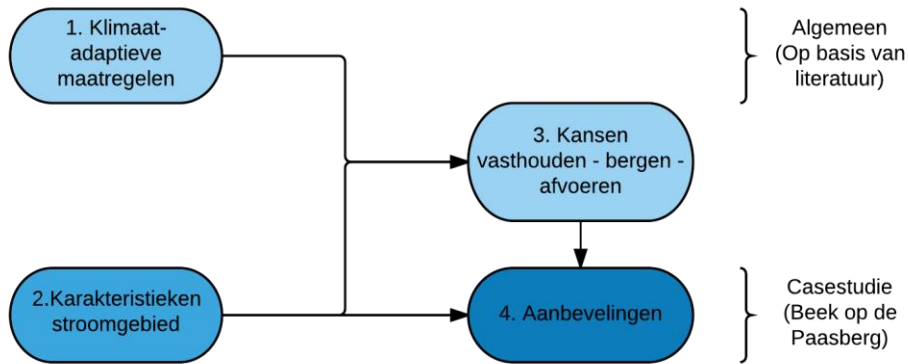
Het doel van het onderzoek is om te komen met aanbevelingen voor klimaatadaptieve maatregelen om wateroverlast als gevolg van hevige buien in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg te verminderen. De onderzoeksvraag, die in dit onderzoek beantwoordt wordt, is daarom als volgt:

Hoe kunnen klimaatadaptieve maatregelen van vasthouden, bergen en afvoeren van hemelwater worden toegepast in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg om het stroomgebied bestendig te maken tegen extreme neerslag?

Om goed antwoord te krijgen op de hoofdvraag is deze onderverdeeld in de volgende sub-vragen:

- (1) *Welke klimaatadaptieve maatregelen om hemelwater vast te houden en bergen worden genoemd in de literatuur?*
- (2) *Wat zijn de karakteristieken van het stroomgebied van de Beek op de Paasberg?*
- (3) *Welke principes in de trits vasthouden-bergen-afvoeren zijn het meest kansrijk in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg?*
- (4) *Hoe zouden klimaatadaptieve maatregelen om hemelwater vast te houden en te bergen moeten worden toegepast in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg?*

In Figuur 4 zijn de relaties tussen de verschillende onderzoeksvragen geschematiseerd.



FIGUUR 4: RELATIES TUSSEN ONDERZOEKSVRAGEN

De eerste deelvraag is beantwoord aan de hand van beschikbare literatuur. Dit is nog niet gebied specifiek. Bij deelvraag twee wordt het systeem van het stroomgebied van de Beek op de Paasberg omschreven aan de hand van factoren bepaald uit de literatuur. De verschillende kansen combineren de literatuur en de karakteristieken van het stroomgebied. De aanbevelingen die daaruit volgen zijn gebiedsafhankelijk.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft antwoord op de eerste deelvraag met de presentatie van tabellen met maatregelen. Hoofdstuk 3 beschrijft het gebied en de waterbalans die is gemaakt om de kansen te kunnen vaststellen. In hoofdstuk 4 komen de effecten van verschillende maatregelen en principes aan bod. Het proces en de resultaten vormen de basis voor discussie in hoofdstuk 5. In dit hoofdstuk worden ook suggesties voor verder onderzoek gedaan. Ten slotte worden in Hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen gegeven.

In het verslag is gebruik gemaakt van bronvermelding door middel van nummering, hier is voor gekozen omdat op deze manier de bronvermelding in de tabellen in Hoofdstuk 2 het meest overzichtelijk is.

2 MAATREGELN VASTHOUDEN-BERGEN-AFVOEREN

In onderzoek naar klimaatadaptieve maatregelen van vasthouden en bergen van hemelwater in Arnhem Noord is allereerst een lijst samengesteld met mogelijke maatregelen. Deze lijst is gekwalificeerd op basis van de positieve externe effecten van de maatregelen. Ook zijn de maatregelen gecategoriseerd.

2.1 Karakteristieken maatregelen

In Figuur 5 is de lijst van maatregelen, opgesteld aan de hand van websites, boeken, artikelen en foldermateriaal, weergegeven. Deze lijst is aangevuld met kwalitatieve scores op verschillende functies en de kosten van de maatregelen. De betekenis van de verschillende functies zijn hieronder uitgewerkt.

Waterkwantiteit

Allereerst is gekeken naar waterkwantiteit. Alle maatregelen dragen bij aan het vertragen of verminderen van de afvoer van het water. Dit kan door vasthouden, bergen en (geleidend) afvoeren [5].

Positieve externe effecten

Naast het effect op het vertragen of verminderen van de afvoer van het water hebben de maatregelen ook nog andere gevolgen. Deze positieve externe effecten dragen bij aan het realiseren van een klimaatbestendige en -robuuste stad en het verhogen van de leefbaarheid van de stad en zijn hieronder verder uitgewerkt.

Waterkwaliteit

Door het infiltreren van water in de bodem, wordt het water op een natuurlijke manier gezuiverd [10]. Ook gaat door het afkoppelen van water schoon water niet onnodig naar het riool. Dit vermindert de kans op overstorten en is gunstig voor het zuiveringsrendement van de RWZI. Toch zegt deze kwalitatieve waarde nog niet alles. De maatregelen zouden echter ook een negatief effect op de waterkwaliteit kunnen hebben, langdurig stilstaand water, in bijvoorbeeld een verkeerd gedimensioneerde wadi, moet vermeden worden. Dit is niet meegenomen in de lijst, maar heeft wel aandacht nodig bij de uitvoering van de maatregelen [11].

Hitte/koeling

Verstedelijking, verdichting en verharding van het grondoppervlak hebben niet alleen gevolgen voor de wateropgaven, maar leiden ook tot verhoging van de temperaturen. Hogere temperaturen hebben negatieve invloed op de gezondheid, het welzijn en de productiviteit [12].

In een natuurlijke omgeving met begroeide oppervlakken en bomen zorgt begroeiing voor schaduw en een lagere oppervlakte- en luchttemperatuur. Daarnaast hebben bebouwing en andere verharde oppervlakken een geringere verdamping uit de grond en door planten tot gevolg. Verdampingsprocessen hebben een koelend effect op luchttemperatuur en oppervlaktetemperatuur [11].

Ook hangt de stedelijke opwarming samen met de waterkwaliteit. Regenwater dat op hete zomerse dagen van opgewarmde daken en wegen afstroomt, kan van enkele graden tot wel zeventien graden warmer worden. Het oppervlaktewater waar het vervolgens instroomt zal daardoor opwarmen. Alle processen in het water worden beïnvloed door de watertemperatuur. De ongewenste algenpopulatie neemt door de opwarming toe en kan leiden tot vissterfte en botulisme [12].

Ecologische waarde

De ecologische waarde van een maatregel heeft te maken met de bijdrage aan de biodiversiteit: de variatie aan levensvormen in een ecologisch systeem. Ecosystemen zijn belangrijk voor recreatie en geven identiteit aan een

plek [13]. In de stad is er meer natuur en biodiversiteit dan veel mensen verwachten. Natuur in de stad is geen tweederangs natuur vergeleken met de natuur van agrarisch gebied [14]. Integendeel, stadnatuur is vaak meer divers dan het cultuurlandschap en vooral ook dichterbij.

Luchtkwaliteit

De kwaliteit van de stedelijke lucht is slechter dan de gemiddelde kwaliteit van de lucht in Nederland. Beplanting heeft invloed op het verwijderen van luchtvervuiling. De effecten hiervan op lokale fijnstof vuilconcentraties zijn echter klein. Een indirect gevolg van beplanting op de luchtvervuiling is groter. Dit heeft te maken met de hitte/koeling. Hierdoor kan smogvorming boven de stad beperkt worden, waardoor meer luchtuitwisseling met relatief schonere lucht tussen omringende gebieden en de stad kan plaatsvinden. Strategisch aangeplant groen en groene open beplante gedeelten kunnen een functie hebben voor de stadsventilatie [15].

Kwaliteit leefomgeving

De laatste jaren wordt er steeds meer bekend over de voordelen van groen in de stad. De meeste mensen wonen graag in een groene wijk en ook de huizenprijzen in groene wijken, langs water of groengebieden zijn verhoudingsgewijs hoger.

Groen is goed voor de gezondheid, het helpt mee om sneller te genezen en verbetert de kwaliteit van leven voor patiënten en burgers. Parken en groengebieden zijn plekken waar mensen recreëren en kunnen sporten of juist rust zoeken. Ook dit komt de gezondheid ten goede en verlaagt het stressniveau. Voor kinderen zijn creatieve speelmogelijkheden in de natuur erg goed. Dit verhoogt hun sociale vaardigheden en concentratievermogen [16]. De onderzoeken die naar de gezondheid zijn uitgevoerd, zijn vooral op parken gericht en niet op kleine groenoppervlakken. De effectiviteit van kleine groenoppervlakken is nog onbekend [17].

Multifunctioneel ruimtegebruik

Een andere functie is het multifunctioneel ruimtegebruik. Wanneer maatregelen ook een ander doel dienen, kunnen kosten en ruimte gespaard worden. Bijvoorbeeld speelterrein op een waterbergingsgebied.

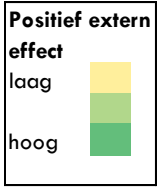
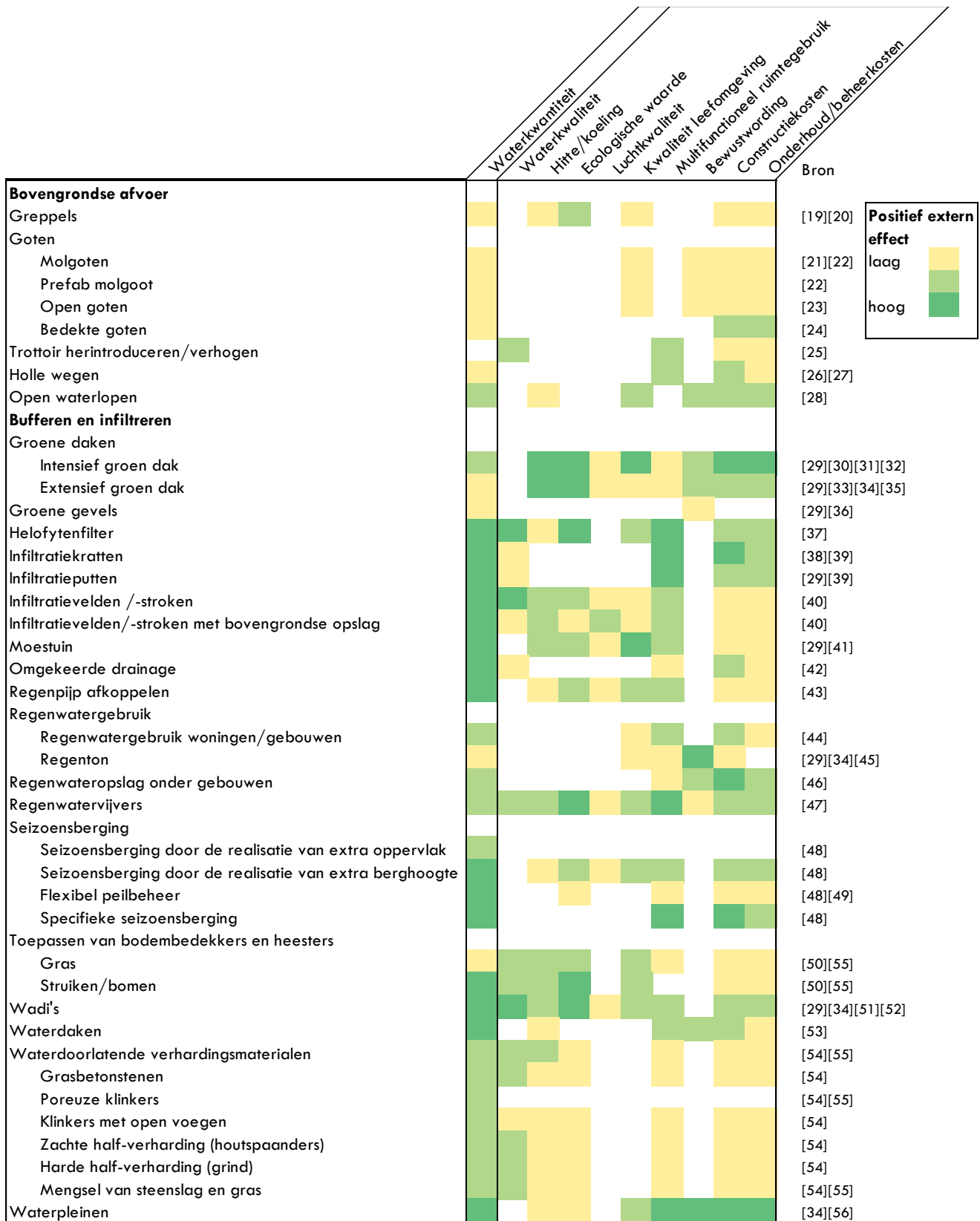
Bewustwording

Lang werd gedacht dat water niet thuishoort in het straatbeeld van de stad. Tenzij er sprake was van overlast hadden de bewoners weinig tot geen bemoeienis met water. Stedelijk water riep negatieve associaties op. Inzichten van de laatste jaren leren ons dat water onlosmakelijk deel uit maakt van de stedelijke leefomgeving. Door het water weer te laten zien en daarmee de burgers bewust laten worden van het water in de stad, wordt de relatie tussen water en burgers weer hersteld. Dit maakt het mogelijk om een combinatie van private en openbare maatregelen toe te passen [18].

Ook zal als vasthouden-bergen-afvoeren alleen niet voldoende blijken, waardoor om acceptatie gevraagd wordt, bewustwording een belangrijke rol spelen. Hier ligt een opgave bij bijvoorbeeld de vormgeving en het betrekken van burgers.

Constructiekosten en onderhoud-/beheerkosten

Ten slotte zullen ook alle maatregelen geld en arbeid vereisen. Dit kan vaak bepalen in de afweging van de maatregelen.



FIGUUR 5: MAATREGELEN OM REGENWATER VAST TE HOUDEN OF TE BERGEN MET BIJKOMENDE FUNCTIES EN SCORES

2.2 Categorisering

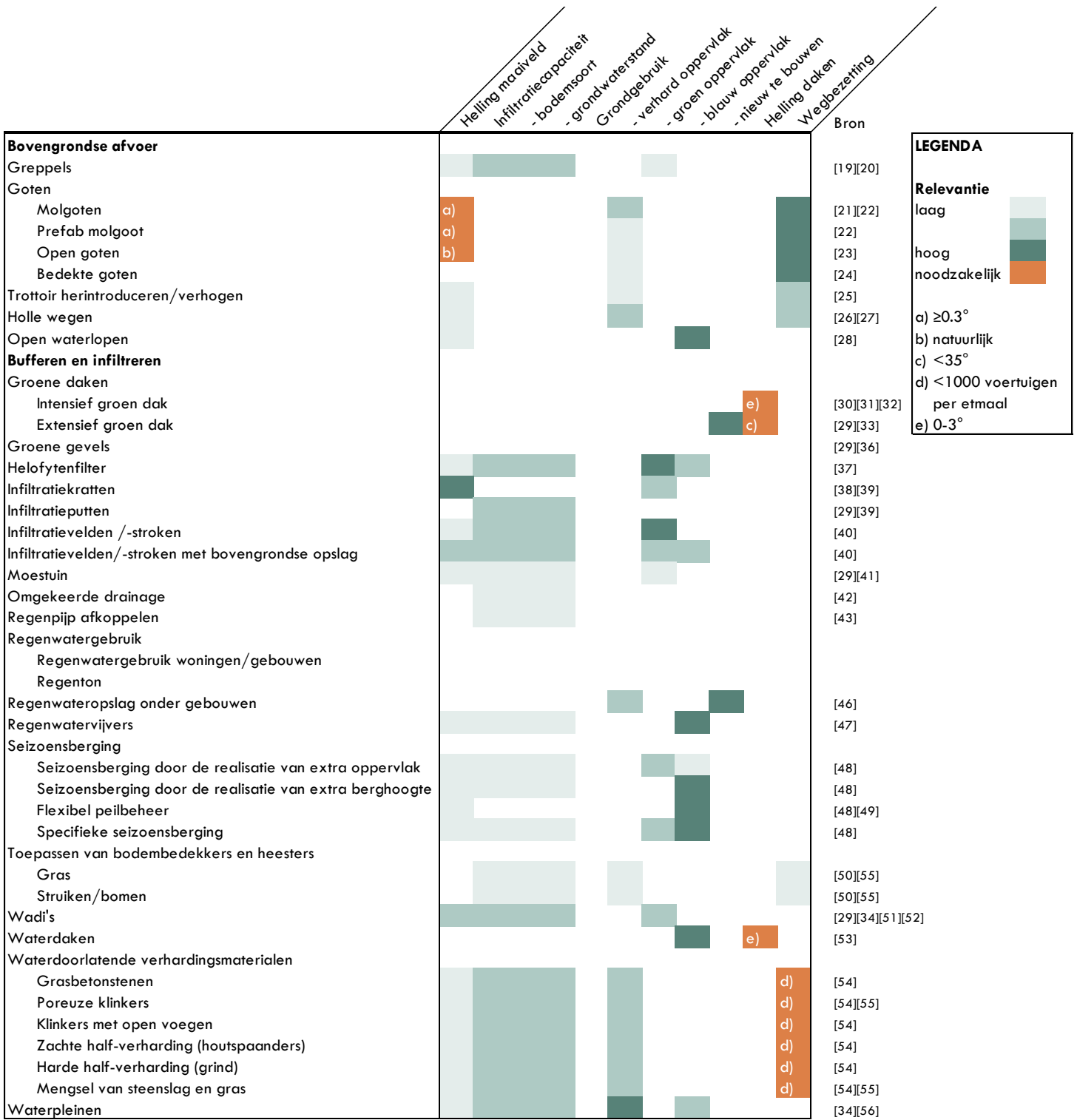
De maatregelen die in Figuur 5 te zien zijn, staan gecategoriseerd in Figuur 6. De categorisering is gedaan aan de hand van het soort maatregel in de trits vasthouden-bergen-afvoeren en naar kenmerkend uiterlijk: vegetatie, water, materiaal en overig. In het onderzoek dat volgt, wordt uitgezocht welke concepten in de trits het meest effectief zijn. Om geschikte maatregelen te vinden kan dat gecombineerd worden met deze tabel. Het kenmerkend uiterlijk heeft onder andere met voorkeuren van bewoners en gebiedskarakteristieken te maken.

		Vasthouden		Bergen		Afvoeren		Overig	
Vegetatie	Moestuin Infiltratievelden / -stroken Toepassen van bodembedekkers Gras Struiken/bomen	Groene daken Intensief groen dak Extensief groen dak Wadfs Groene gevels							
		Greppels Infiltratievelden met bovengrondse opslag							
Water	Helofytenfilter		Regenwatervijvers Waterpleinen Waterdaken Regenwateropslag onder gebouwen			Open waterlopen			
		Seizoensberging Realisatie van extra oppervlak Realisatie van extra berghoogte Flexibel peilbeheer Specifieke seizoensberging				Goten Molgoten Perforab molgoot Open goten Bedeekte goten			
Materiaal	Waterdoorlatende verhardingsmaterialen Grasbetonstenen Poreuze klinkers Klinkers met open voegen Zachte half-verharding Harde half-verharding Mengsel van steenslag en gras					Holle wegen Trottoir herintroduceren/verhoggen			
	Regenpijp aftappalen Omgekeerde drainage	Infiltratieputten Infiltratiekratten						Regenwatergebruik Regenwatergebruik gebouwen Regenton	

FIGUUR 6: CATEGORISERING VAN DE MAATREGELN

3 KARAKTERISTIEKEN STROOMGEBIED

Om te beslissen welke maatregelen toepasbaar zijn op het stroomgebied van de Beek op de Paasberg, is onderzocht welke factoren hierbij van belang zijn. Hiervan is een overzicht te zien in Figuur 7. Dit overzicht is het uitgangspunt geweest van de systeembeschrijving, die daarop volgt.



FIGUUR 7: FACTOREN DIE EEN ROL SPELEN BIJ HET TOEPASSEN VAN EEN MAATREGEL

3.1 Het probleem

De gevolgen van de bui op 28 juli 2014 in Arnhem Noord zijn aanleiding voor de klimaatadaptieve maatregelen (zie paragraaf 1.1). Binnen 2 ½ uur is op deze dag tussen de 80 en 120 millimeter neerslag gevallen [6]. De herhalingstijd van een dergelijke bui in Arnhem Noord is 2000 tot 5000 jaar [61]. Ervaringen vanuit Waterschap Rijn & IJssel en Gemeente Arnhem zijn dat juist de korte hevige buien voor wateroverlast zorgen [62].

De oorzaak van wateroverlast (van de korte hevige buien) is in twee groepen te splitsen; overlast die veroorzaakt wordt door over de straten afstromend water en overlast die ontstaat door terugstromend rioolwater de woningen in.

Oppervlakkig afstromend water

Over de gehele stad is het overtollige water over de straat afgestroomd naar lagere delen. Veel overlast van afstromend hemelwater is opgetreden in de vooroorlogse wijken. Vooral de grote hoeveelheden verhard oppervlak, en dus maar weinig ruimtes waar water kan infiltreren, zijn oorzaak van de grote hoeveelheden afstromend hemelwater[63]. De helling in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg verstrekt dit effect. Tijdens het afstromen van overtollig water vanuit de hoger gelegen wijken is in de meeste gevallen weinig ruimte om het water onderweg af te buigen naar grote groenvoorzieningen en het daar te bufferen. De parken Sonsbeek-Zypendaal en Angerenstein hebben nog wel grote hoeveelheden water tijdelijk geborgen. In Figuur 2 zijn de overlastlocaties in het stroomgebied te zien.

Terugstromend rioolwater

Terugstromend rioolwater komt vooral voor in laaggelegen ruimtes zoals souterrains, kelders en verdiept aangelegde garages. In wijken met een gemengd rioolstelsel is dit probleem het grootst [63].

3.2 Systeembeschrijving

In de systeembeschrijving van de Beek op de Paasberg wordt een beeld van de Beek op de Paasberg en haar stroomgebied geschetst.

3.2.1 Achtergrond

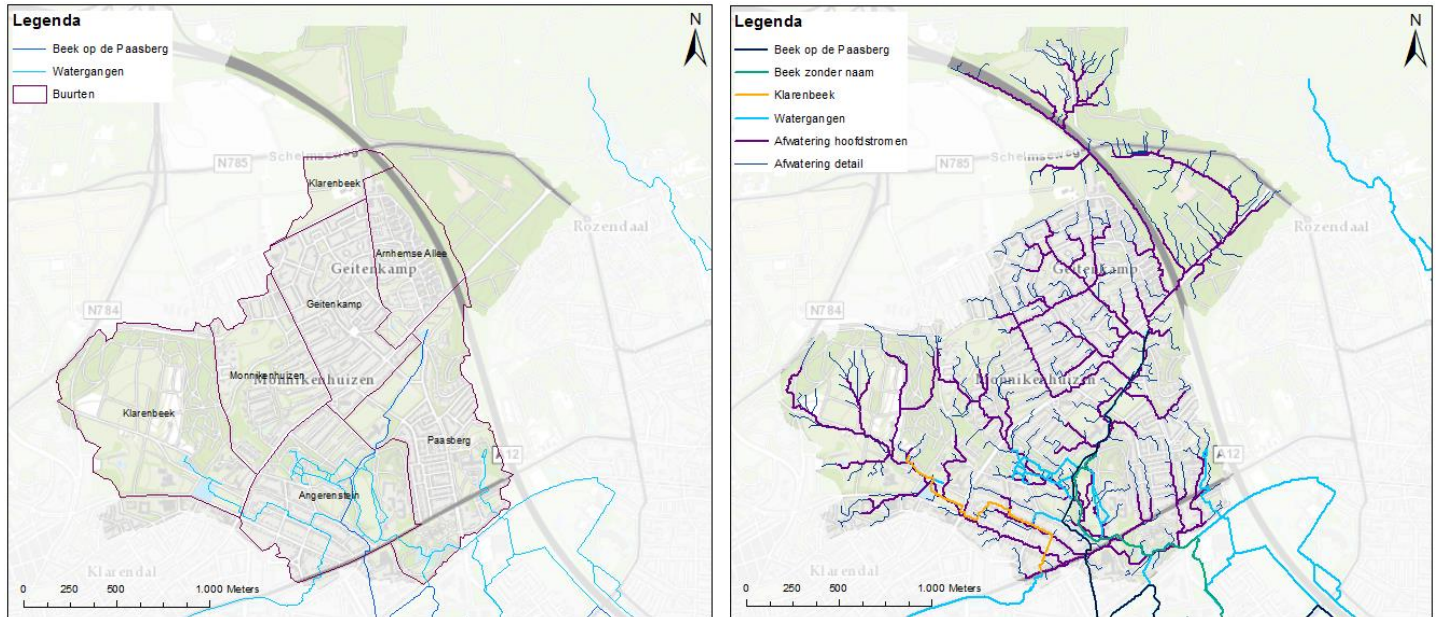
Het ontstaan van de beken is geen natuurlijk proces geweest. Zonder menselijk ingrijpen waren het vooral droge dalen. Het grondwater dat nodig is om de beken te voeden, ligt op de stuwwal in Arnhem Noord namelijk te diep om vanzelf aan de oppervlakte te komen. Door de unieke ontstaansgeschiedenis van dit landschap bevindt het grondwater zich echter op een aantal plaatsen op de helling van de stuwwal dicht onder het maaiveld. In het verleden heeft men op de stuwwal gegraven en daar waar men op het grondwater stuitte, kon een beek ontspringen. De beken beginnen dan ook in een kuil of kom, de zogenoemde sprengkoppen. De beken in Arnhem zijn erg bijzonder en waardevol, omdat dit in Nederland nauwelijks voorkomt [64].

Ook provincie Gelderland deelt de mening dat de beken waardevol zijn voor de stad Arnhem en ook voor Gelderland. In het provinciale Waterhuishoudingsplan heeft onder andere de Beek op de Paasberg een speciale bescherming als SED-beken gekregen. Dit betekent dat de beken een specifieke ecologische doelstelling (SED) hebben gekregen. Niet alleen de beek zelf wordt beschermd, maar ook de ondergrondse waterstromen [64][65].

De Beek op de Paasberg stroomt voor het grootste gedeelte boven het oppervlak waardoor de beleving van de beek groot is. Daarnaast speelt de beek een belangrijke rol als drager van ecologie in de natuurzone tussen de A12 (park Rosendaal-Veluwezoo) en het park Angerenstein [64].

3.2.2 Stroomgebied

Aan de hand van de hoogteverschillen in het gebied (AHN 5 m grid) is de afwatering rondom de Paasbeek bepaald. Figuur 8a toont het stroomgebied van de Beek op de Paasberg vanaf de sprengkop tot het spoor, waar al het water samen komt. Ook tijdens de wateroverlast van 28 juli 2014 is gebleken dat het spoor een barrière was voor het water. De calculatie houdt geen rekening met infiltratie of watergangen en is daarom bedoeld als inzicht over hoe het water zou stromen.



FIGUUR 8: STROOMGEBIED (LINKS) EN DE AFWATERING VAN HET STROOMGEBIED(RECHTS) VAN DE BEEK OP DE PAASBERG

In Figuur 8 valt een aantal dingen op. Allereerst is het stroomgebied op basis van hoogte groter dan verwacht. De Beek op de Paasberg van 1,65 km lang heeft een stroomgebied van 433 ha. Verder stroomt het water, op basis van hoogteverschillen, allemaal af bij het spoor ter hoogte van het park Sacre Coeur (bij de Intratuin) en niet via de officiële gang van de Beek op de Paasberg. De officiële watergang is met duikers aangelegd, dit wordt niet in de afwatering op basis van hoogteverschillen meegenomen.

Het stroomgebied bestaat uit verschillende buurten (Figuur 8a). De dichtbebouwde Geitenkamp is in de jaren twintig opgezet als een tuindorp. Geitenkamp heeft een bijzondere architectuur en structuur en heeft daardoor de status van beschermd stadsgezicht [67].

De Arnhemse Allee, is gebouwd rond 1975 nadat noodwoningen vanuit de oorlog waren afgebroken. Opvallend is de hoeveelheid groen in deze wijk met een vloeiende overgang naar het aangrenzende bosgebied [67].

De buurt Monnikenhuisen, ten Zuidwesten van de Geitenkamp, is rond 1960-1970 gebouwd en is ook ruim van opzet met relatief veel groen in de wijk [67].

De buurt Paasberg ligt op een stuwwal, de Paasberg. De wijk is van na de Eerste Wereldoorlog. Toen kwam de tuinstadfilosofie op: wijken bouwen voor middenstanders waar het aangenaam wonen is. De wijk is dus ruim opgezet met relatief veel openbaar groen [69].

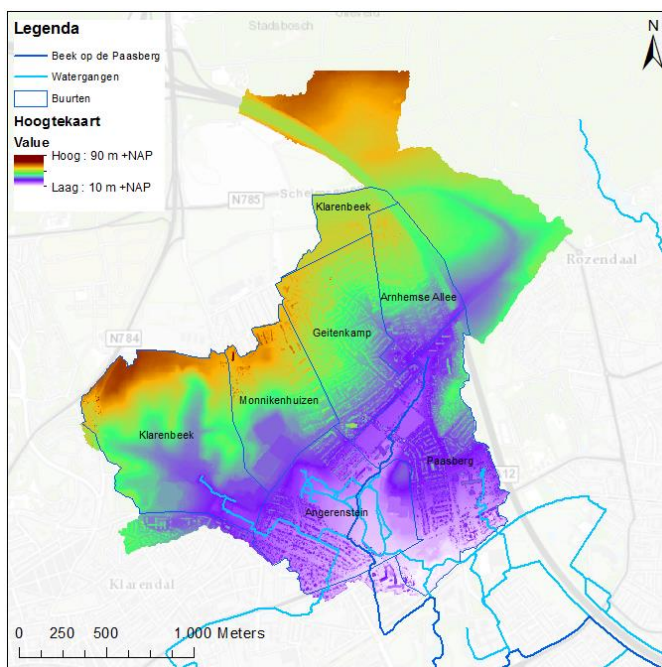
De buurten Angerenstein en Klarenbeek hebben een rijk verleden en zijn gebouwd op de gelijknamige landgoederen Klarenbeek en Angerenstein. Park Angerenstein en park Klarenbeek bestaan nog steeds, maar rond 1935 heeft de gemeente er ook een woonwijk gerealiseerd [70].

3.2.3 Factoren toepasbaarheid maatregelen

De toepasbaarheid van de verschillende maatregelen uit paragraaf 2.1 kan worden getoetst aan de hand van verschillende factoren weergegeven in Figuur 7. Hieronder is een beschrijving gegeven van deze factoren in het stroomgebied.

HELLING MAAIVELD

Zoals te zien is in Figuur 9, zijn de hoogteverschillen in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg erg groot. Vooral in de wijk de Geitenkamp is de helling van de weg vaak erg groot. Hierover stroomt het water bij hevige buien hard af naar lagergelegen gebieden, waaronder de Beek op de Paasberg.



FIGUUR 9: HOOGTEKAART STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG

INFILTRATIECAPACITEIT

De infiltratiecapaciteit van de bodem is voornamelijk afhankelijk van de bodemsoort en de grondwaterstanden.

Bodemsoort

Arnhem bestaat uit scheef gestelde lagen van afwisselend zand, klei en leem [65]. Er is veel heterogeniteit, daarom is het zonder metingen op de exacte locatie lastig te voorspellen welke lithoklasse de grond heeft op een bepaalde plaats. Toch bestaat Arnhem Noord voornamelijk uit grof zandige grond. Zoals te zien is in de figuren in Bijlage B[71].

De doorlatendheid is per grondsoort verschillend [72][73]. De waarden in verschillende literatuur lopen nogal uiteen. Een grof zandige grond heeft een doorlatendheid van ongeveer 30 millimeter per uur. Maar uit sommige

bronnen blijkt dat dit zelfs 1250 mm per uur zou kunnen zijn [72]. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een doorlatendheid van 30 millimeter per uur.

Grondwaterstanden

Op de stuwwal zijn scheef gestelde leem en kleilagen aanwezig die zorgen voor korte afstandsvariabiliteit in grondwaterstanden. Mede hierdoor kunnen de beken ontstaan. In Figuur 10 zijn meetpunten van de grondwaterstand te zien. Op deze meetpunten is geen hogere grondwaterstand dan 207 cm beneden het maaiveld gemeten (metingen vanaf 1950 en 1990) en geen lagere grondwaterstand dan 417 cm ten opzichte van het maaiveld.



FIGUUR 10: MEETPUNTEN GRONDWATERSTAND [71]

De vier meetpunten geven aan dat de grondwaterstand relatief hoog is voor dit soort stuwwallen. Dit zijn mogelijk schijngrondwaterspiegels door de leemlagen die zich in dit gebied bevinden. Er is een aantal locaties met kwel in het gebied, waaronder in ieder geval de sprengkoppen, waar de grondwaterstand zeker hoger ligt door de leemlagen. Het zuidelijke gedeelte van het stroomgebied van de Beek op de Paasberg valt ook binnen het bestemmingsplan Leemlagen van de gemeente Arnhem. Dit is een bestemmingsplan voor de ondergrond van het gebied, zo mag je zonde vergunning niet meer dan anderhalve meter diep graven. In Figuur 11 is het gebied binnen het stroomgebied waar dit bestemmingsplan geldig te zien, daar worden ook de leemlagen in het gebied verwacht. Hoger op de stuwwal, bij de wijk Geitenkamp, is het grondwater pas op ongeveer 20 meter onder maaiveld te vinden.

Bij een grondwaterstand van meer dan één meter onder maaiveld, is de infiltratiecapaciteit van de bodem even groot als de doorlatendheid, dit is dus in het hele stroomgebied van toepassing [74].

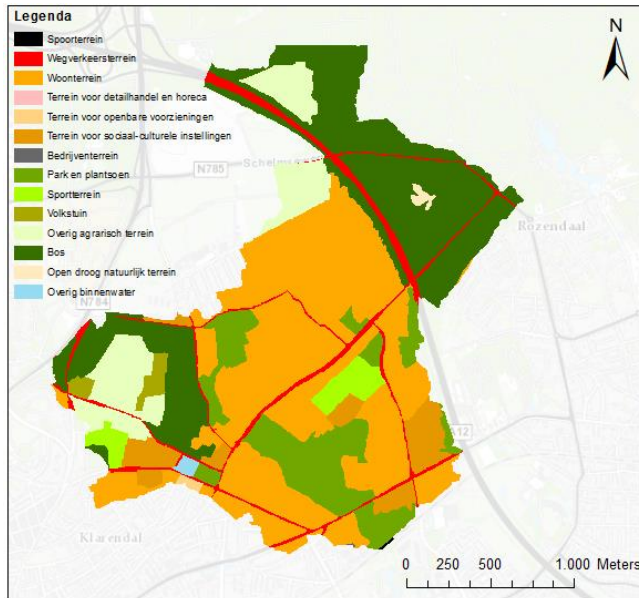


FIGUUR 11: BESTEMMINGSPLAN LEEMPLAGEN (VERWACHTTE LEEMPLAGEN BIJ GROEN GESTREEPT GEBIED)[65]

GRONDGEBRUIK

Om te bepalen waar de maatregelen kunnen komen, maar ook om de huidige situatie goed in beeld te krijgen is het in kaart brengen van het grondgebruik essentieel.

In Figuur 12 is te zien dat het stroomgebied van de Beek op de Paasberg voornamelijk uit woonterrein of groenvoorzieningen bestaat. Het stroomgebied dat in Arnhem ligt is vergeleken met andere steden relatief groen en is te zien op de luchtfoto in Figuur 13. Dit komt omdat Arnhem een aantal grote parken heeft in de stad. Het bebouwd gebied zelf is helemaal niet groen [62].



FIGUUR 12: BODEMGEBRUIK IN STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG 2012



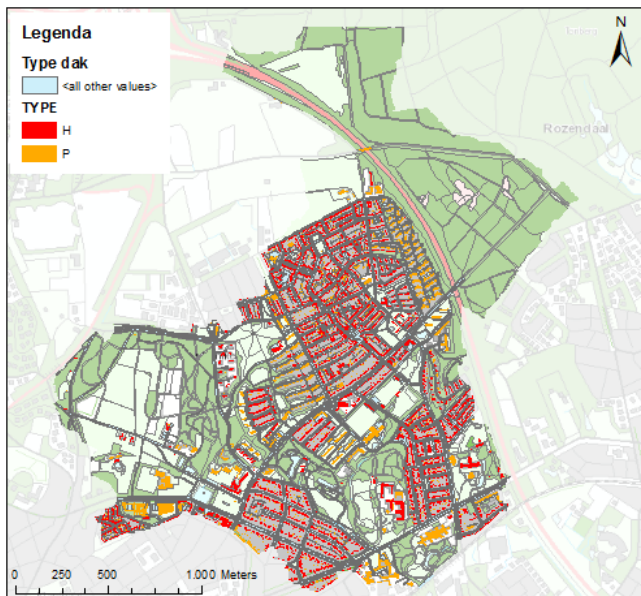
FIGUUR 13: LUCHTFOTO STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG APRIL-MEI 2015

Nieuw te bouwen

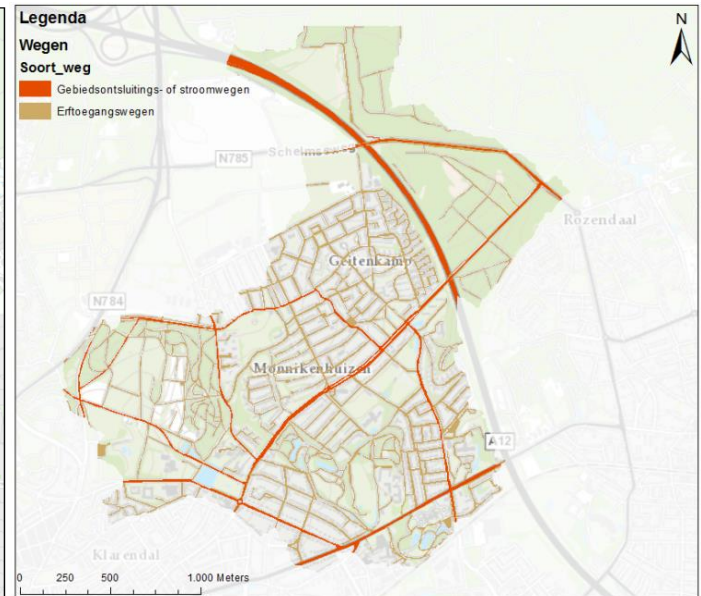
In het stroomgebied van de Beek op de Paasberg zijn momenteel geen plannen om nieuwe wijken te bouwen. [75]. Uitbreiden is ook niet meer mogelijk, alles is ingedeeld als woongebied, bedrijventerrein of natuurgebied. Als er nieuw gebouw moet worden, zullen dit inbreidingsprojecten of renovaties zijn [62].

HELLING DAKEN

In Figuur 14 is de verdeling tussen platte daken en hellende daken te zien. In het gehele gebied is gemiddeld 30% van het totale dakoppervlak een plat dak. Dit zijn voornamelijk flats of bedrijfspanden. In de meest dichtbebouwde gebieden als Geitenkamp en een gedeelte van de Paasberg, zijn relatief minder platte daken.



FIGUUR 14: BEBOUWING STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG (H = HELLEND, P = PLAT)



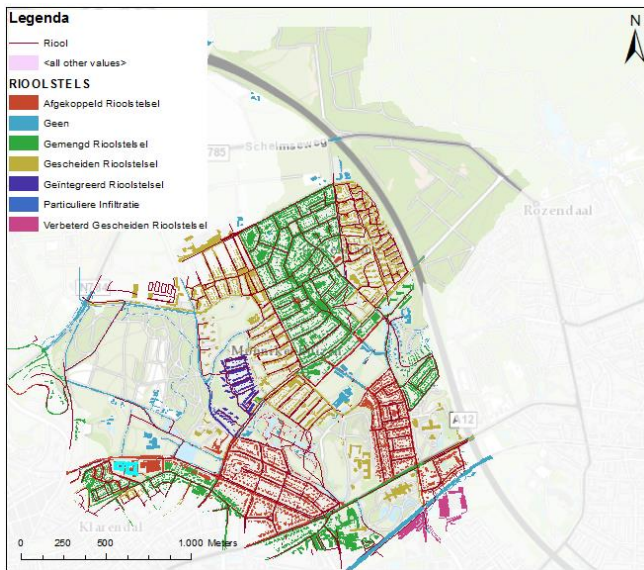
FIGUUR 15: WEGEN IN HET STROOMGEBIED VAN DE BEEK OP DE PAASBERG

WEGBEZETTING

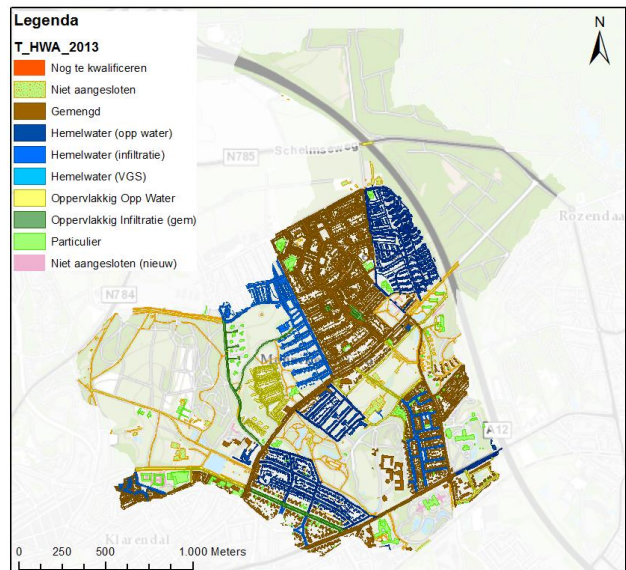
Over de exacte wegbezetting in het gebied is weinig bekend buiten de A12. Daarom is niet gekozen om 1000 voertuigen per dag te gebruiken als maat voor de maatregelen, zoals in Figuur 7, maar het type weg (Figuur 15). Op erftoegangswegen mogen de maatregelen wel toegepast worden, op gebiedsontsluitings- en stroomwegen niet. Ook de gemeente deelt deze mening.

RIOLERING

In het stroomgebied van de Beek op de Paasberg zijn verschillende rioleringsstelsels aanwezig. Dit is te zien in Figuur 16. Geitenkamp bestaat voor een groot gedeelte nog uit een gemengd rioolstelsel. Gemeente Arnhem heeft concrete plannen om dit te veranderen naar een afgekoppeld rioolstelsel [62]. De hemelwaterafvoer voert af op open water waaronder de Beek op de Paasberg of Klarenbeek of leidt het water naar infiltratievoorzieningen (Figuur 15).



FIGUUR 16: RIOOLSTELSELS STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG



FIGUUR 17: HEMELWATERAFVOER STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG

3.2.4 Initiatieven

Arnhem is in 2009 gekozen als groenste stad van Nederland. Er zijn veel stads-, wijk- en buurtinitiatieven om Arnhem nog groener en klimaatbestendig te maken.

De initiatieven die in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg van toepassing zijn en wellicht samen kunnen werken bij een eventueel project om Arnhem klimaatadaptief te maken, staan in Tabel 1.

TABEL 1: INITIATIEVEN STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG

Initiatief	Doel
Geitenkampnet	“De informatiebron voor inwoners van de Arnhemse wijken Geitenkamp, Arnhemse Allee, Monnikenhuizen, Nieuw-Monnikenhuizen en Sachsen-Weimar.” [67]
Bloei! in Arnhem	“Bloei! in Arnhem informeert en inspireert, met als doel onze mooie stad nog groener, duurzamer en socialer te maken. Samen maken we de stad.”[76]
De Arnhemse uitdaging	“Arnhemse bedrijven voelen zich betrokken bij de stad. Zij vormen het kloppende hart van de Arnhemse Uitdaging. Vele bedrijven en hun medewerkers zijn op vrijwillige basis actief betrokken bij het tot stand komen van matches via Matchgroepen en andere projecten van de Arnhemse Uitdaging. Zij worden bij hun werkzaamheden ondersteund door een operationeel team.”[77]
De Groene Vos	“Stichting De Groene Vos motiveert en inspireert mensen en organisaties tot een duurzame leefstijl.” [78]

Gemeente Arnhem – Van wijken weten	“Minder gemeente, meer wijk, anders doen. Dat is samengevat het motto van dit programma. (...) Meer participatie en een groter zelforganiserend vermogen van Arnhemmers door het toepassen van wijksturing als nieuw sturingsprincipe en een radicale herordening van veel gemeentelijke taken en budgetten van centraal niveau naar wijkniveau.” [79]
Groenarnhem.nl / Arnhem klimaatbestendig	“Groen Arnhem ondersteunt groene initiatieven in de stad door deze met elkaar te verbinden en kennis, middelen en mankracht te delen. Groen Arnhem is een stads breed netwerk waar iedereen zich bij aan kan sluiten; bewoners, organisaties, kennisinstellingen en overheid. Samen maken we Arnhem nog groener, mooier en gezonder!” [9]
CAN (Climate Active Neighborhoods)	CO ₂ -reductie in combinatie met klimaatbestendig maken. [80]
CASA & Le Far West	CASA is het Centrum voor Architectuur en Stedenbouw Arnhem en Le Far West is een bureau voor landschapsarchitectuur. Beide streven zij naar het zichtbaar, ervaarbaar en bediscussieerbaar maken van architectuur, stedenbouw en landschapsarchitectuur, waardoor het publiek wordt gemotiveerd en geïnspireerd. [81]

3.2.5 Samenvatting

In de systeembeschrijving zijn de verschillende factoren die belangrijk zijn om te bepalen welke maatregelen toepasbaar en effectief zijn in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg. De helling van het maaiveld is ongunstig voor infiltreren, maar biedt kansen voor bergingsmogelijkheden. De doorlaatbaarheid van de bodem is gunstig. De zandige grond in het gebied is gunstig voor infiltratie.

Het grondgebruik in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg is geïnventariseerd en dit zal van grote invloed zijn op het watersysteem. De groene gebieden in het stroomgebied brengen kansen mee, maar geven ook een vertekent beeld van de wijken: de wijken lijken groener dan ze zijn.

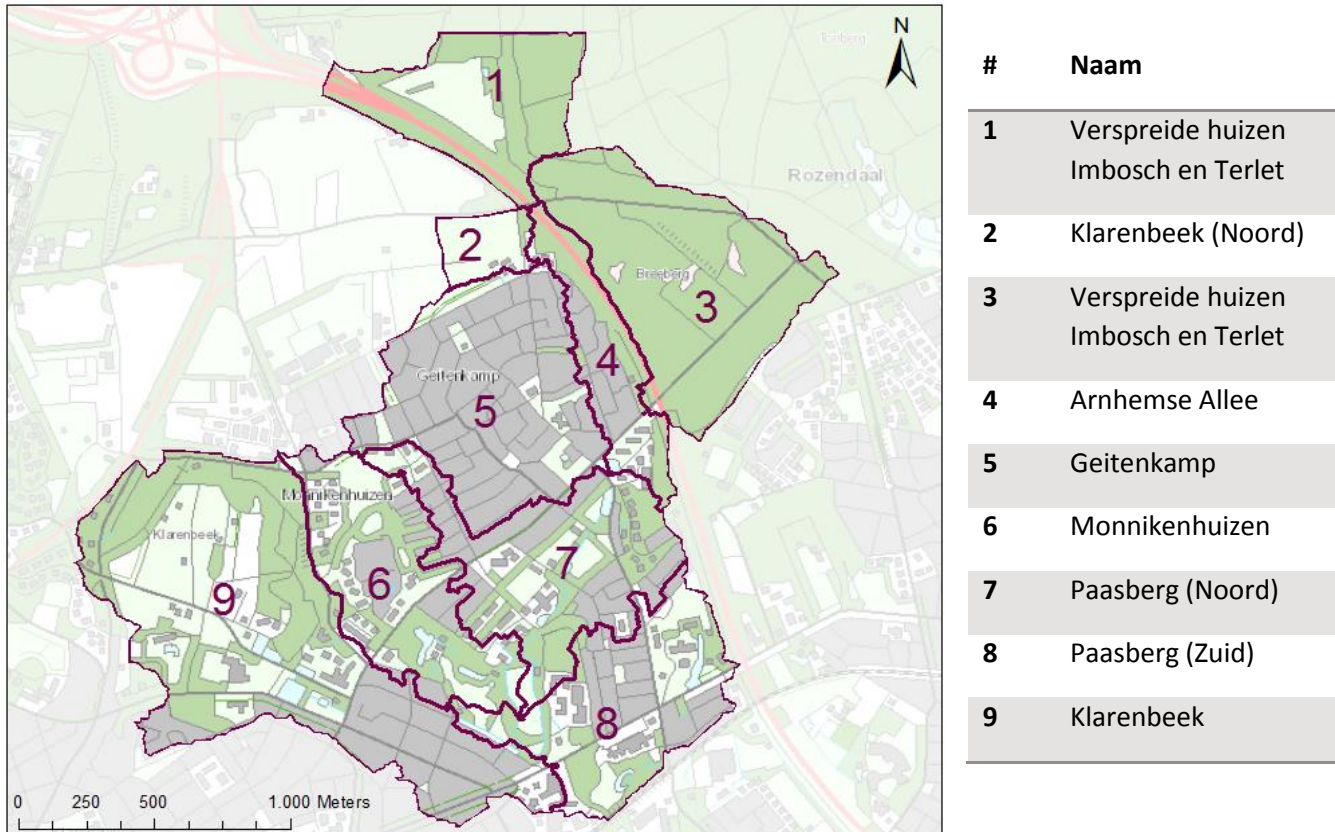
In de meest volgebouwde gebieden, zijn de daken veelal hellen. Toch is ongeveer 30 % van het totaal dakoppervlak plat, wat kansen biedt voor maatregelen op het dak.

Naast de verschillende factoren om te beoordelen wat toepasbaar en effectief is, zijn ook verschillende initiatieven in Arnhem beschreven. Dit betreft organisaties die zich inzetten om Arnhem groener en klimaatbestendiger te maken, in het toepassen van maatregelen zal samenwerken met een of meerdere van deze initiatieven tot betere uitvoering en betrokkenheid leiden.

3.3 Waterbalans

Om de effecten van de maatregelen kwantitatief te kunnen beoordelen, en daarmee te inventariseren welk principe uit de trits vasthouden – bergen – afvoeren (Figuur 1) en welke maatregelen het meest kansrijk zijn in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg, is een waterbalans gemaakt van het gebied.

De waterbalans is per sub stroomgebied van de Beek op de Paasberg berekend (Figuur 18). De gebieden 1, 3 en 9 zijn hierbij niet mee genomen. Gebied 1 en 3 omdat dit geen stedelijk gebied is. De aanname is dat al het water dat daar valt infiltreert in die grond of daar tijdelijke berging plaatsvindt. Sub stroomgebied 9 wordt niet meegenomen omdat dit meer het stroomgebied van de Klarenbeek is, dan van de Beek op de Paasberg.

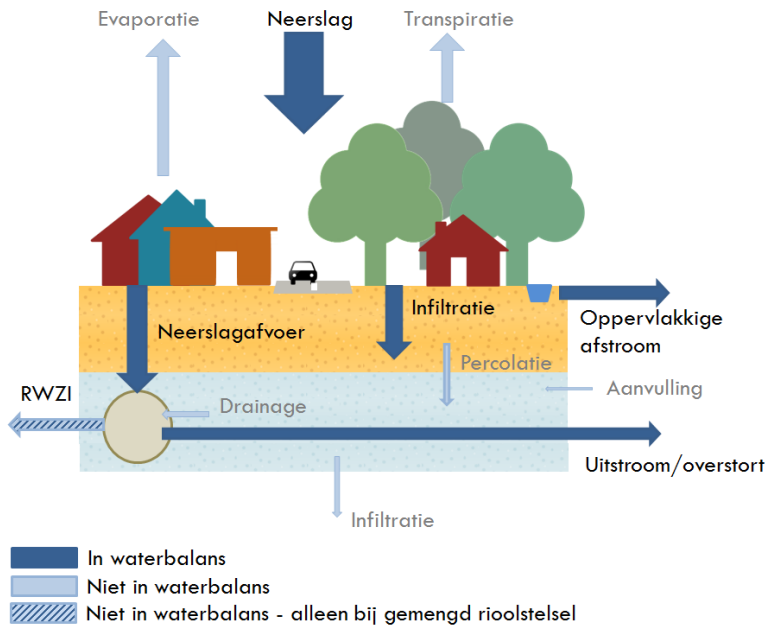


FIGUUR 18: SUBSTROOMGEBIEDEN BEEK OP DE PAASBERG

In Figuur 19 is het schema van een waterbalans te zien. In dit schema is te zien dat in dit onderzoek niet alle parameters van een waterbalans zijn meegenomen. De donkerblauwe pijlen in de figuur zijn voldoende voor dit onderzoek.

In de waterbalans hebben vasthouden, bergen en afvoeren de volgende betekenissen:

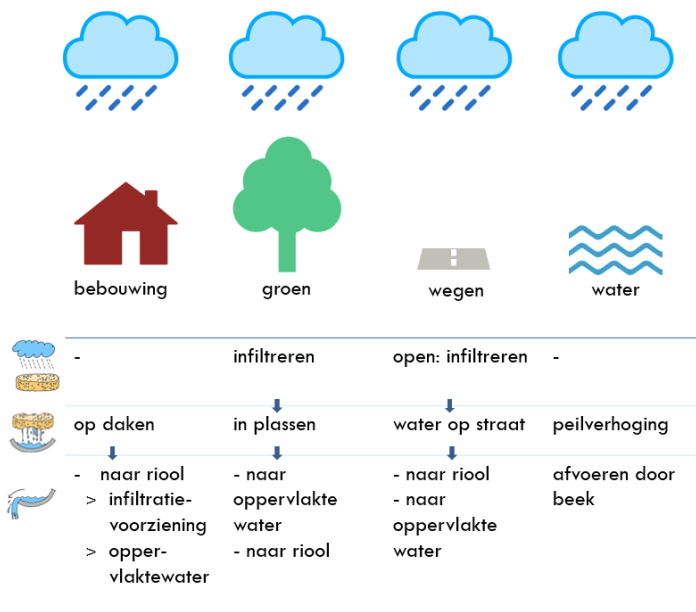
- Vasthouden:** Ter plaatse infiltreren in de bodem
- Bergen:** Bergen op het maaiveld of op oppervlaktewater ter plaatse
- Afvoeren:** Afvoeren via de Beek op de Paasberg



FIGUUR 19: SCHEMA WATERBALANS [82]

De waterbalans is gemaakt aan de hand van Figuur 20. Hier wordt schematisch weergegeven wat er gebeurt met het hemelwater dat valt in de stad. Het water zal vallen op bebouwing, groen, verharding of water. Hier kan het water infiltreren en/of geborgen en afgevoerd worden naar hemelwaterriolering of oppervlaktewater. Is de capaciteit van deze principes niet groot genoeg, dan zal hinder van het water worden ondervonden. Als het capaciteitstekort erg groot wordt, zal de hinder overgaan in wateroverlast met schade.

De waterbalans en de aannames die daarvoor gedaan zijn zullen hierna stap voor stap aan de hand van Figuur 20 worden besproken.



FIGUUR 20: WATERBALANS PRINCIPES

3.3.1 Bebouwing



In een stad werken en wonen mensen allemaal in gebouwen. De neerslag die valt op de daken van deze gebouwen en in de verharde delen van de tuinen hoort in het model tot de categorie ‘bebouwing’. Water dat op bebouwing valt kan niet worden vastgehouden. Bergen en afvoeren is beide wel een optie.

Bergen

Bergen op daken is alleen mogelijk op platte daken. Deze daken kunnen 4 mm water bergen over het gehele oppervlakte van het dak [83]. In het model kunnen hellende daken en de verharding in de tuin geen water bergen.



Het oppervlakte van de verharding in de tuinen is aangenomen als 60% van het oppervlakte van alle tuinen. De zestig procent is gebaseerd op een onderzoek van Rioned in Amersfoort, op basis van de karakteristieken van de wijken is een inschatting gemaakt van de verharding in Arnhem [84].

Afvoeren

Alles wat niet kan bergen, wordt afgevoerd. Bij afgekoppelde huizen gaat dat rechtstreeks naar de groenstroken of het water in de nabije omgeving. De overige huizen voeren het water af op het hemelwaterriool. In de waterbalans is hier geen onderscheid in gemaakt. De afvoer capaciteit van het hemelwaterriool wordt meestal gedimensioneerd op 25 mm/h op het verharde oppervlak[84]. Naast de bebouwing horen ook de wegen, uit paragraaf 2.1, bij het verharde oppervlak. In paragraaf 3.3.5 is te lezen wat er met het water in het hemelwaterriool gebeurt.



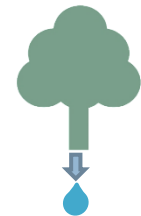
3.3.2 Groen



De neerslag die valt in parken, op groenstroken langs de weg en op het onverharde deel van tuinen (40%), valt onder de categorie ‘groen’. Hier kan water infiltreren en geborgen worden.

Vasthouden

Infiltreren in groen is afhankelijk van de doorlatendheid, de grondwaterstanden en de helling van het gebied. De infiltratiecapaciteit van 30 mm/h (zie paragraaf 3.1) op de ondergronden kan niet volledig worden benut, door de helling in het gebied. Per vlak is berekend welk deel van 30 mm/h zal infiltreren. Deze ratio is gebaseerd op de gemiddelde helling van dat vlak (zie Tabel 2). Het gemiddelde per sub stroomgebied als gewogen gemiddelde van de ratio's effectieve infiltratie is weergegeven in Tabel 3.



TABEL 2: INFILTRATIERATIO PER HELLINGSCATEGORIE [86]

Helling	Deel effectief
0° - 2,3 °	1
2,3° - 4,6°	0,8
4,6° - 6,8°	0,6
6,8°-9,1°	0,4
>9,1°	0,25

TABEL 3: RATIO EFFECTIEVE INFILTRATIE PER SUB STROOMGEBIED

Sub stroomgebied	Deel effectief
2	0,68
4	0,51
5	0,67
6	0,64
7	0,63
8	0,75

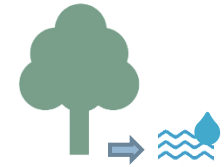
Bergen

Op groene oppervlakken kan over het algemeen ook water geboren worden. Hoeveel dit precies is, is sterk locatieafhankelijk. Het is niet mogelijk om aan de hand van hoogtekaarten hier een inschatting van te maken omdat het ook sterk verandert. Aangenomen, op basis van inschatting van ervaring, is een gemiddelde berging op groen oppervlak van 15 millimeter, maar dit is erg onzeker.



Afvoeren

Als er meer neerslag valt dan door het groene oppervlak geïnfiltreerd of geborgen kan worden, zal afgevoerd worden. Dit kan naar oppervlaktewater of eventueel via de wegen naar het hemelwaterriool.



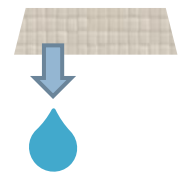
3.3.3 Wegen



De categorie verharding bestaat uit alle wegen, zowel open (klinkerpad, schelpenpad, stoep met tegels) en gesloten (asfalt).

Vasthouden

Tussen open en gesloten verharding is onderscheid gemaakt in het infiltrerend vermogen van de weg. Bij een open verharding op een helling van minder dan 2,9° kan op 10 procent van het oppervlak geïnfiltreerd worden. Bij gesloten verharding of open verharding onder een helling groter dan 2,9° infiltreert niets [55]



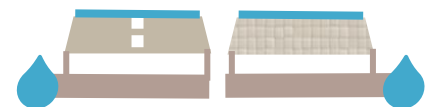
Bergen

Bergen op verharding kan als er water op straat blijft staan. Door de helling in het gebied is dit, zonder overlast te veroorzaken, minimaal. Daarom is voor de gemiddelde berging op wegen 10 mm aangehouden [84].



Afvoeren

Als er meer neerslag valt dan door de weg geïnfiltreerd of op de weg geborgen kan worden, zal afgevoerd moeten worden. Dit zal via het riool of via groene oppervlakken naar oppervlaktewater gaan, tussen dit verschil is in de waterbalans geen onderscheid gemaakt. In paragraaf 3.3.5 is te lezen wat er met het water in het hemelwaterriool gebeurt.



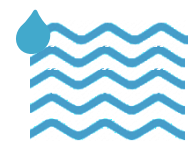
3.3.4 Nat



Al het hemelwater dat op water terecht komt, hoort bij de categorie nat. Dit kan zijn de Beek op de Paasberg, een van de andere watergangen die door het gebied loopt of op vijvers. Infiltreren in het water is niet mogelijk.

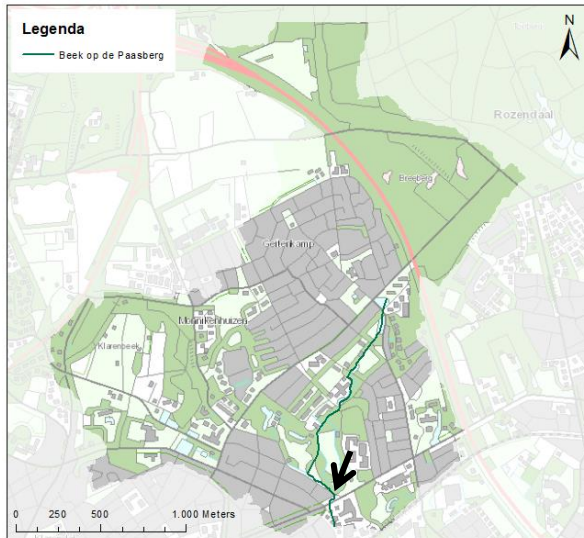
Bergen

Watergangen en vijvers kunnen relatief veel water bergen. In de waterbalans is een gemiddelde maximale peilverhoging van 15 cm (150 mm) aangehouden. Dit is een onzeker getal en is gebaseerd op inschatting na bezoek aan de Beek op de Paasberg.



Afvoeren

In het model gaat het afvoeren met twee keer het maximaal gemeten debiet. Het grootste debiet van de Beek op de Paasberg (gemeten ter hoogte van de Velperweg, zie Figuur 21) is $0,034 \text{ m}^3/\text{s}$ [87]. Dit komt neer op een afvoer van $0,054 \text{ mm/h}$ verdeeld over het hele gebied. Er is niet gemeten tijdens extreme buien, naar verwachting zal het debiet dan minimaal kunnen verdubbelen. Wat neerkomt op $0,11 \text{ mm/h}$ water dat de beek kan afvoeren.



FIGUUR 21: LOCATIE DEBIETMETING BEEK OP DE PAASBERG

3.3.5 Hemelwaterriool

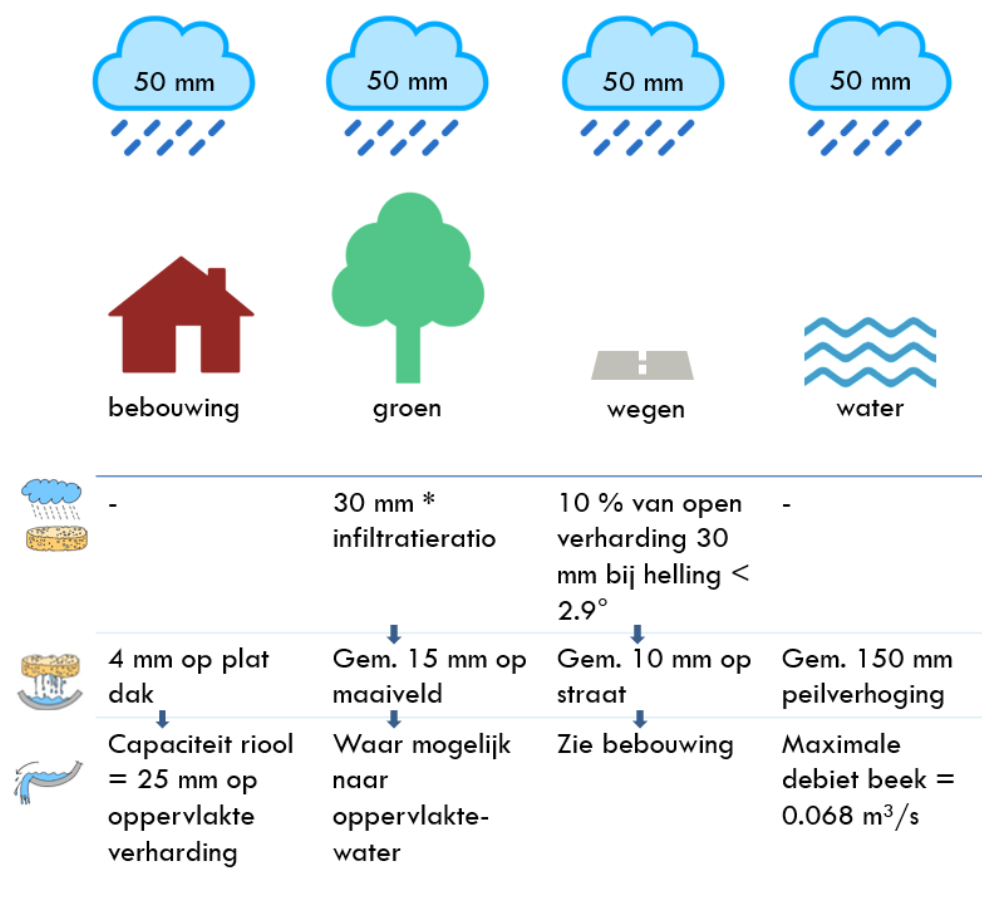
Het water dat in het hemelwaterriool terecht komt, gaat niet zomaar uit het systeem, maar zal ook weer aan het oppervlak komen. Zoals te zien is in Figuur 17, zal het water wat in de Arnhemse Allee (sub stroomgebied 2) valt allemaal naar de beek afgevoerd worden. Van sub stroomgebieden 6 en 8 gaat ook een klein gedeelte naar de beek. De overige hemelwaterrioleringen zijn aangesloten op infiltratievoorzieningen.

Waar het hemelwater door het hemelwaterriool wordt afgevoerd naar de beek zal daar bergen of afvoeren. Waar het hemelwaterriool is aangesloten op infiltratievoorzieningen, zal dit infiltreren. De aanname is dat de infiltratievoorzieningen op dezelfde capaciteit zijn gedimensioneerd als het hemelwaterriool.



3.3.6 Overzicht modelinvoer

Het model is tenzij anders aangegeven gebaseerd op een bui van 50 millimeter in een uur met tijdsduur één uur. Dit komt overeen met de bui die in 2014 is gevallen van ongeveer 120 mm in 2 ½ uur (zie paragraaf 3.1), alleen dan ingekort tot één uur. Een bui van 50 mm per uur heeft statistisch een herhalingstijd van 200 jaar [88]. In Figuur 22 is een overzicht van de invoer van de waterbalans te zien, de parameters in het model en het script van het model zijn bijgevoegd in respectievelijk Bijlage C en Bijlage D.



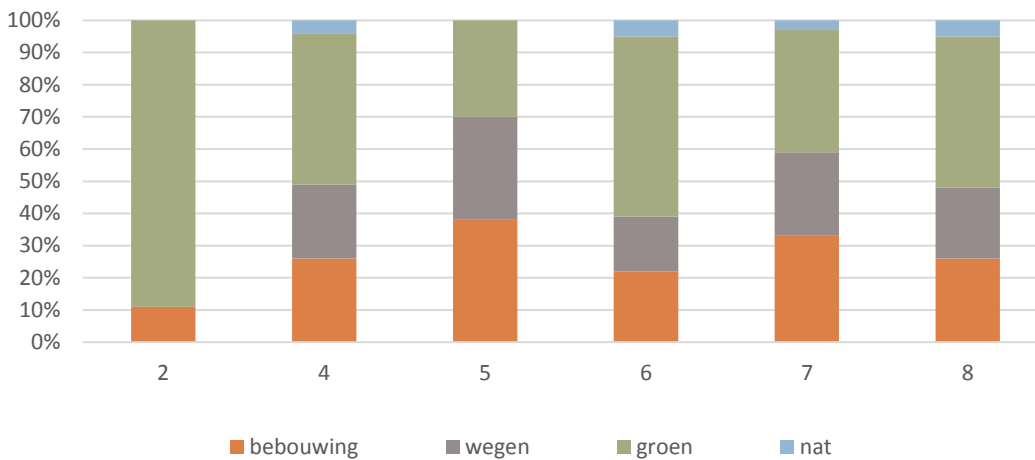
FIGUUR 22: OVERZICHT WATERBALANS PER UUR

4 EFFECTEN VAN DE MAATREGELLEN

De waterbalans, zoals omschreven in paragraaf 3.3 geeft het capaciteitstekort van het stroomgebied om een hevige bui op te vangen. In dit hoofdstuk zullen allereerst deze resultaten getoond worden. Daarna worden de kansen in het vasthouden, bergen en afvoeren benoemd. Ten slotte worden de effecten op het capaciteitstekort van verschillende maatregelen uit paragraaf 2.1 uitgewerkt. Op basis van de kansen en uitwerkingen van de maatregelen is een kansenkaart gemaakt.

4.1 Resultaten waterbalans

De hoeveelheid water die niet opgevangen kan worden door het systeem tijdens een hevige bui is per sub stroomgebied verschillend. Het grondgebruik en de helling van het maaiveld zijn daarin de grootste factoren. In Figuur 23 is te zien hoe het grondgebruik procentueel verschilt per sub stroomgebied. De gemiddelde hellingpercentages zijn te zien in Bijlage C.



FIGUUR 23: PERCENTAGES GRONDGEBRUIK SUBSTROOMGEBIEDEN

4.1.1 Capaciteitstekort

Ieder sub stroomgebied heeft een bepaalde capaciteit om water vast te houden, te bergen en af te voeren, wat verdeeld is over bodemgebruik verharding (bebouwing en wegen), groen en nat (zie Figuur 24). Ook riool heeft een plaats gekregen in deze figuur. Dit is een gedeelte van het hemelwater dat op verharding is gevallen.

Vasthouden

Het vasthouden in het systeem kan op drie verschillende manieren: infiltreren door open verharding, infiltreren op groene oppervlakken en door middel van het hemelwaterriool in infiltratievoorzieningen. Infiltreren door open verharding is een erg klein getal, waardoor dit in Figuur 24 niet te zien is.

Bergen

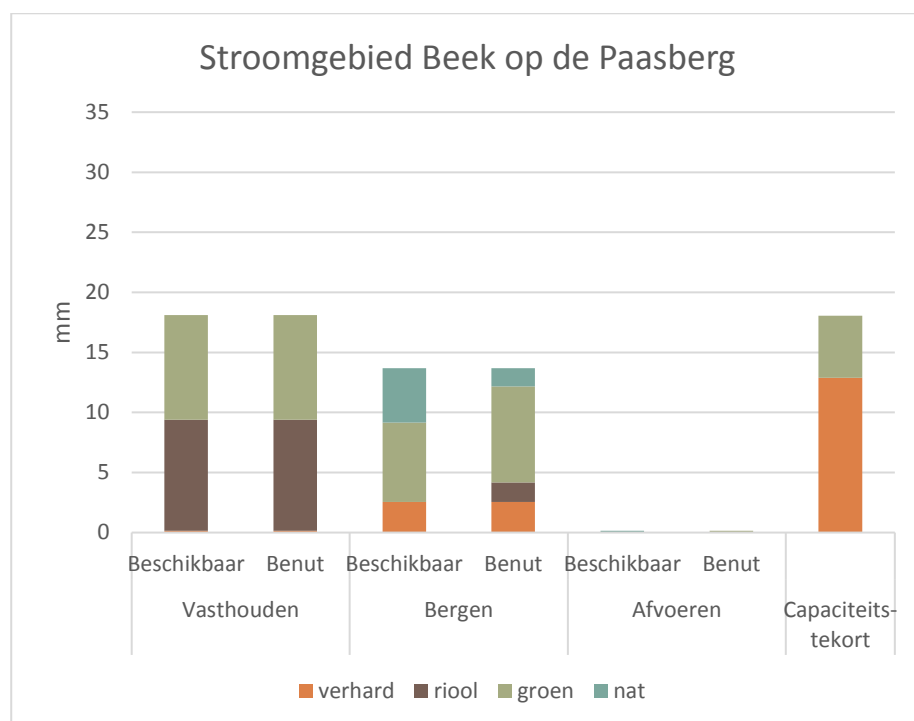
Bergen in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg kan op vier manieren. Allereerst op platte daken, daarnaast op het maaiveld op groene oppervlakken, ten derde op de wegen en ten slotte op het oppervlaktewater. Zoals in Figuur 24 te zien is, wordt de berging op het oppervlaktewater (150 mm) niet volledig benut door hemelwater dat op open water valt (50 mm). Dit wordt aangevuld door afwateren van hemelwaterrioleringen op open water en water dat vanaf groene gebieden naar het oppervlaktewater afstroomt.

Afvoeren

In het stroomgebied van de Beek op de Paasberg is afvoeren naar buiten het systeem alleen mogelijk via de Beek op de Paasberg. Dit is echter zo weinig dat deze waarde (nauwelijks) is te zien in Figuur 24. In de praktijk zal ook een deel van het capaciteitstekort naar andere (sub) stroomgebieden afgevoerd worden over de wegen of via het groene oppervlak.

Capaciteitstekort

In het stroomgebied van de Beek op de Paasberg is niet genoeg capaciteit beschikbaar om een bui van 50 mm in een uur te verwerken. In totaal is in het vasthouden, bergen en afvoeren 32 mm aan capaciteit beschikbaar. Gemiddeld kan 18 mm van de bui dus niet verwerkt worden. Zoals te zien is in Figuur 24 is hiervan 13 mm afkomstig van verhard oppervlak en 5 mm van groen oppervlak.



FIGUUR 24: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITEITSTEKORT. BUI: 50 MM/H. CAPACITEITSTEKORT = 18 MM.

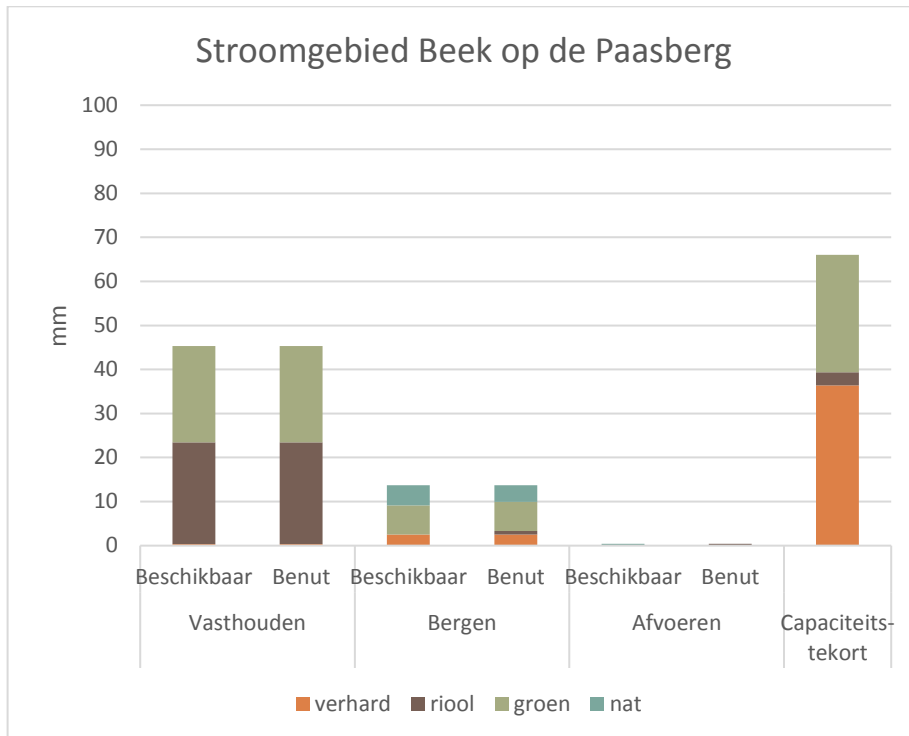
De verschillen in capaciteitstekorten per sub stroomgebied zijn weergegeven in Tabel 4 en in Bijlage E. Hierin is te zien dat vooral sub stroomgebied 4, van de Arnhemse Allee, een relatief hoog tekort in capaciteit heeft. Sub stroomgebied 8, zuidelijk Paasberg, heeft een relatief klein capaciteitstekort. Het hoge getal in de Arnhemse Allee is te verklaren doordat de afwatering van het hemelwaterriool op de Beek op de Paasberg, en niet in infiltratievoorzieningen is. Hierdoor is de afvoer hoger. De beek kan de hevige bui niet aan.

TABEL 4: CAPACITEITSTEKORT PER SUB STROOMGEBIED

Sub stroomgebied	2 Klarenbeek	4 Arnhemse Allee	5 Geitenkamp	6 Monnikenhuisen	7 Paasberg (Noord)	8 Paasberg (Zuid)	Totaal
Capaciteitstekort (mm)	16.2	26.5	20.6	15.1	18.8	13.1	18.2

Als Tabel 4 vergeleken wordt met de overlastlocaties in Figuur 2 lijkt dit niet overeen te komen. Dit komt waarschijnlijk door de helling in het gebied, die ervoor zorgt dat het water naar lage gebieden geleidt. Pas op de vlakkere en lagere gebieden komt dan de meeste overlast voor.

Figuur 25 laat het capaciteitstekort van een bui van 2,5 uur zien in plaats van de bui van één uur in Figuur 25. Te zien is dat de bergingscapaciteit niet veranderd. Op een plek waar het al is geborgen, is er niet nog meer ruimte voor extra water. Aangezien de bodem ook bij een hevige bui wel water kan blijven opnemen, wordt er wel meer water vastgehouden. Het capaciteitstekort na 2,5 uur is 66 mm.



FIGUUR 25: CAPACITEIT VAN HET SYSTEEM TEN OPZICHTE VAN MODELUITKOMST BIJ EEN BUI VAN 50 MM/UUR GEDURENDE 2,5 UUR

4.2 Maatregelen

Om het capaciteitstekort te verminderen zal de capaciteit van vasthouden en/of bergen en/of afvoeren vergroot moeten worden. Dit kan met de verschillende maatregelen die beschreven staan in paragraaf 2.1. Allereerst zullen de kansen in de verschillende principes van vasthouden-bergen-afvoeren genoemd worden. Daarna zullen de effecten van een aantal maatregelen uit Figuur 5 worden getoond.

4.2.1 Vasthouden-bergen-afvoeren

Vasthouden

De capaciteit vergroten van het 'bakje' vasthouden, kan alleen door meer te laten infiltreren in de bodem. De doorlatendheid van de zandige bodem van het stroomgebied van de Beek op de Paasberg is 30 mm/h. Theoretisch is dit de maximale capaciteit van het vasthouden. In de praktijk ligt het echter anders. Door infiltratievoorzieningen zou de infiltratiecapaciteit eventueel verhoogd kunnen worden en door het hellende gebied, is de infiltratiecapaciteit juist lager. In de initiële waterbalans wordt in totaal 18 mm vastgehouden. Daar zou theoretisch dus 12 mm winst te behalen zijn en met verbeterde infiltratievoorzieningen nog meer.

In Tabel 5 is te zien hoeveel hectare grond als infiltratiegrond moet worden ingericht, om het gehele capaciteitstekort te verwerken. Hierin is onderscheid gemaakt tussen hellend oppervlak en vlak oppervlak. Bij 'helling' is gerekend met de effectieve infiltratiecapaciteit door de helling. Bij 'vlak' is gerekend met een infiltratiecapaciteit van 30 mm/h.

Bergen

De capaciteit van bergen heeft een minder duidelijke bovengrens dan de capaciteit van het vasthouden. Bij het vergroten van de bergingscapaciteit moet in de gaten gehouden worden of het water dat van andere types grondgebruik of van een andere locatie, naar deze bergingsvoorziening kunnen komen. Geleiding van water is hierbij dus ook van groot belang. Om 18 mm extra te bergen zou dus over het gehele stroomgebied gemiddeld de berging met 18 mm moeten stijgen. Als de extra berging alleen op groen oppervlakken zou plaats mogen vinden, zal er gemiddeld 41 mm extra berging moeten zijn, wat een gemiddelde bergingscapaciteit van 56 mm op alle hectares groene oppervlakken zou betekenen.

In Tabel 5 is te zien hoeveel hectare als bergingsgebied moet worden ingericht, als er gemiddeld een halve meter geborgen kan worden.

Afvoeren

De capaciteit van het afvoeren de afvoercapaciteit van de Beek op de Paasberg is erg laag. De beek (en daarbij de afvoercapaciteit hiervan) vergroten heeft een erg klein effect op de afvoercapaciteit. De afvoercapaciteit van de beek met factor 10 vergroten levert een capaciteitsvergroting van de totale afvoer van 1,4 mm op. In Tabel 5 is per sub stroomgebied te zien hoeveel maal de afvoer van de beek moet worden vergroot om het capaciteitstekort te verwerken.

De maatregelen om het capaciteitstekort te verminderen zullen dus in de categorieën vasthouden en bergen gezocht worden. Toch zegt dit niet dat de maatregelen in Figuur 6 in de categorie 'afvoeren' direct overbodig zijn in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg. Afvoeren in de waterbalans betekent dat het water het stroomgebied uit gaat, maar afvoeren in de maatregelen is ook het geleiden van water. Een maatregel om te bergen zal (bijna) altijd in combinatie met een afvoer/geleidingsmaatregel moeten worden gerealiseerd, om het water naar de bergingsvoorziening te geleiden.

TABEL 5: CAPACITEITSTEKORT EN OPLOSSINGSPRINCIPES

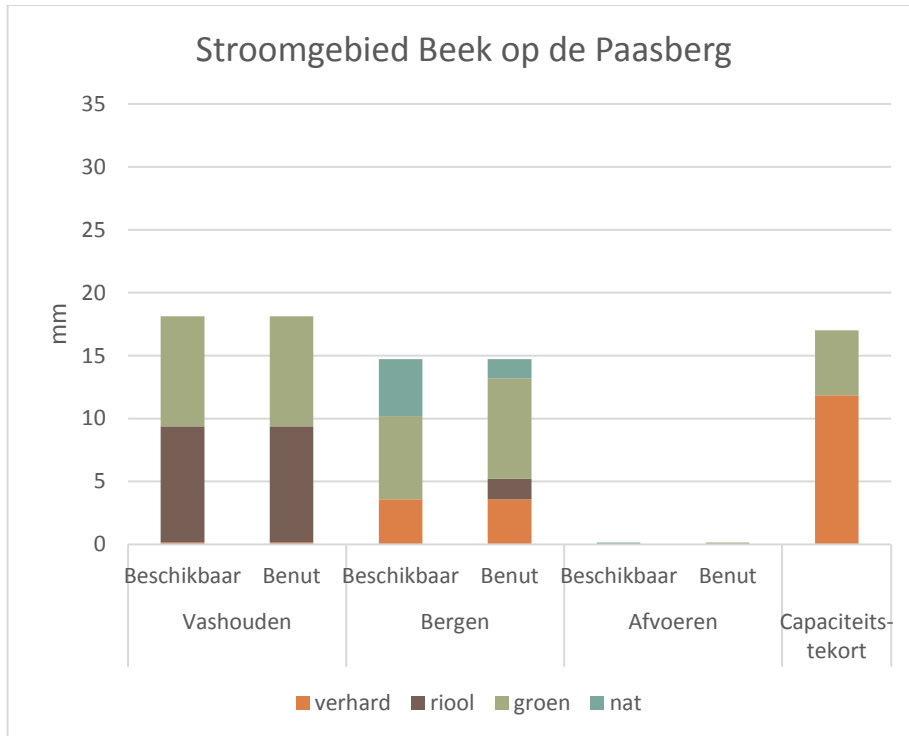
Sub stroom gebied	Opper vlakte in ha	Capaciteits-tekort in mm	Capaciteits-tekort in m ³	Vasthouden (helling) in ha	Vasthouden (vlak) in ha	Bergen 0.5m in ha	Afvoeren (x afvoer beek)
2	8.2	16.2	1300	6.5	4.4	0.3	-
4	21.4	26.5	5700	37.1	18.9	1.1	1700
5	59.2	20.6	12200	60.7	40.7	2.4	-
6	43.6	15.1	6600	34.3	21.9	1.3	320
7	49.9	18.8	9400	49.6	31.3	1.9	400
8	44.8	13.1	5900	26.1	19.6	1.2	280

4.2.2 Maatregelen

De effecten van verschillende maatregelen komen in deze paragraaf aan bod. Er is gekozen om groene daken, het groener maken van tuinen en waterdoorlatende verharding als maatregelen te presenteren. Deze maatregelen worden vaak aangehaald als oplossing van de wateroverlast. Het effect van alleen berging is te zien in Tabel 5.

Groene daken

Waar platte daken normaal gesproken 4 mm water kunnen bergen, kunnen extensieve groene daken 25 mm water bergen. Als alle platte daken in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg groen worden, zal de bergingscapaciteit met gemiddeld 1 mm stijgen en daarmee de afvoer 1 mm dalen (Figuur 26).



FIGUUR 26: VERSCHIL IN CAPACITEIT VAN HET SYSTEEM EN MODELUITKOMST ALS ALLE PLATTE DAKEN GROENE DAKEN WORDEN. CAPACITEITSTEKORT VERMINDERD MET 1.0 MM. BUI 50 MM/H

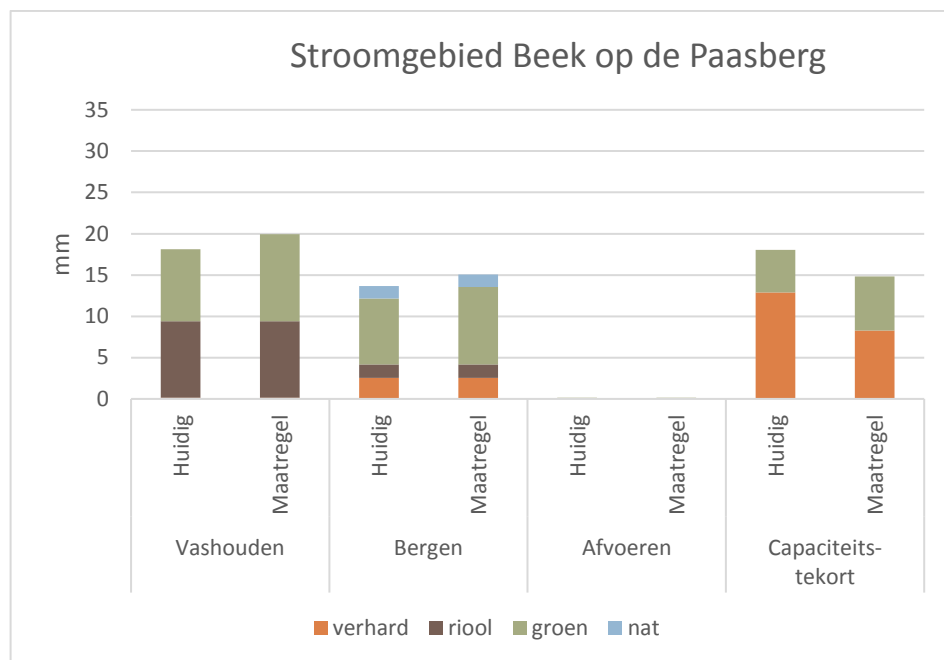
Per sub stroomgebied verschillen de effecten van de maatregel zoals te zien is in Tabel 6. Hieruit blijkt dat in de Arnhemse Allee, waar relatief veel huizen een plat dak hebben, de maatregel het meeste effect heeft.

TABEL 6: AFVOERVERLAGING PER SUB STROOMGEBIED ALS ALLE PLATTE DAKEN GROENE DAKEN WORDEN

Sub stroomgebied	2 Klaren beek	4 Arnhemse Allee	5 Geitenkamp	6 Monnikenhuizen	7 Paasberg (Noord)	8 Paasberg (Zuid)	Totaal
Capaciteitsvergroting (mm)	0.7	2.3	0.9	0.9	1.0	0.8	1.0
Capaciteitstekort (mm)	15.5	24.1	19.7	14.2	17.8	12.3	17.2
Percentage afvoerverlaging	4%	9%	4%	6%	5%	6%	5%

Groene tuin

De tuinen in het stroomgebied op de Paasberg zijn gemiddeld voor 60% verhard. Als dit verminderd wordt naar 20% verharding, dus 80% groen, zal het capaciteitstekort gemiddeld met 3.4 mm (Figuur 27). Per sub stroomgebied verschillen de effecten van de maatregel zoals te zien is in Tabel 6. Hieruit blijkt dat in de wijk de Paasberg het effect het grootst is. Dit komt voornamelijk door de helling in het gebied en het oppervlakte tuin. Met de realisatie van vlakke tuinen, zal het effect ook in de wijken met meer hoogteverschil groter worden.



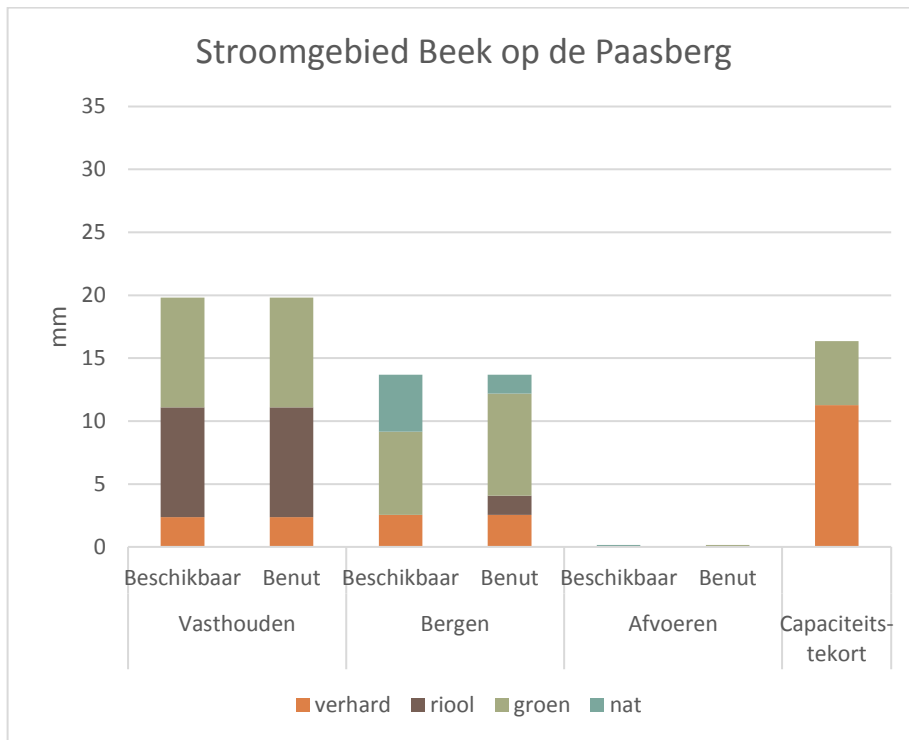
FIGUUR 27: VERSCHIL IN CAPACITEIT VAN HET SYSTEEM EN MODELUITKOMST ALS ALLE TUINEN 80% GROEN Zouden ZIJN CAPACITEITSTEKORT VERMINDERD MET 3.2 MM. BUI 50 MM/H

TABEL 7: AFVOERVERLAGING PER SUB STROOMGEBIED ALS ALLE TUINEN 80% GROEN Zouden ZIJN

Sub stroomgebied	2 Klaren beek	4 Arnhemse Allee	5 Geitenkamp	6 Monnikenhuizen	7 Paasberg (Noord)	8 Paasberg (Zuid)	Totaal
Capaciteitsvergroting (mm)	0.9	2.6	3.4	2.6	4.1	3.2	3.4
Capaciteitstekort (mm)	15.3	23.8	17.2	12.5	14.7	9.9	14.8
Percentage afvoerverlaging	5%	10%	17%	17%	22%	24%	18%

Open verharding

Aangezien alleen op wegen met een helling kleiner dan 2.9° geïnfiltreerd kan worden, heeft open verharding in hellende gebieden weinig effect. In de initiële situatie van de waterbalans is aangenomen dat de open verharding in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg 10% open is. Als dit door waterdoorlatende verhardingsmaterialen verhoogd wordt tot 80% voegaandeel en het oppervlakte effectieve waterdoorlatende verharding verdubbeld, is het effect op de afvoer gemiddeld 1.8 mm (Figuur 28).



FIGUUR 28: VERSCHIL IN CAPACITEIT VAN HET SYSTEEM EN MODELUITKOMST ALS OPEN VERHARDING 80% OPEN ZOU ZIJN EN HET OPPERVLAKTE VERDUBBELD CAPACITEITSTEKORT VERMINDERD MET 1.7 MM. BUI 50 MM/H

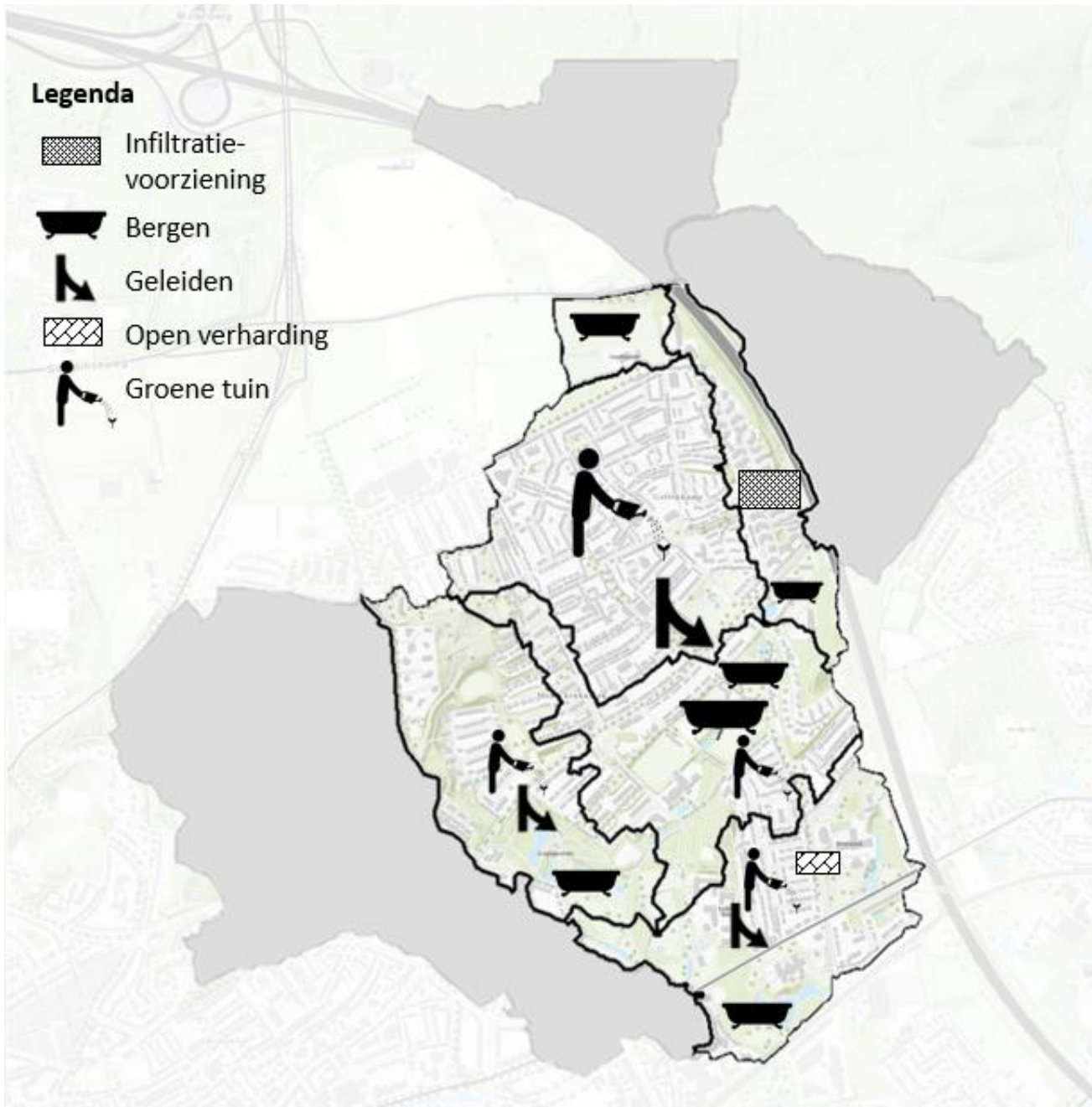
Per sub stroomgebied verschillen de effecten van de maatregel zoals te zien is in Tabel 6. Ook hier is te merken dat het effect in de gebieden met minder hoogteverschil het effect het grootst is.

TABEL 8: AFVOERVERLAGING PER SUB STROOMGEBIED ALS OPEN VERHARDING 80% OPEN ZOU ZIJN EN HET OPPERVLAKTE VERDUBBELD

Sub stroomgebied	2	4	5	6	7	8	Totaal
	Klaren beek	Arnhemse Allee	Geitenkamp	Monnikenhuizen	Paasberg (Noord)	Paasberg (Zuid)	
Capaciteitsvergroting (mm)	0	2.5	1.6	2	1.4	1.9	1.8
Capaciteitstekort (mm)	16.2	23.9	19.0	13.1	17.4	11.2	16.4
Percentage afvoerverlaging	0%	9%	8%	13%	7%	15%	9%

4.3 Kansenskaart

Aan de hand van de effecten van de maatregelen en gebiedskarakteristieken zijn de grootste kansen voor hemelwater vasthouden, bergen en afvoeren om wateroverlast van hevige buien te verminderen in kaart gebracht. Dit is te zien in Figuur 29.



FIGUUR 29: KANSENKAART STROOMGEBIED BEEK OP DE PAASBERG GEBASEERD OP EFFECTEN VAN DE MAATREGELEN EN GEBIEDSKARAKTERISTIEKEN

5 DISCUSSIE EN VERDER ONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek geëvalueerd. De resultaten zullen verder geïnterpreteerd worden en er zal aandacht worden besteed aan zaken en veronderstellingen die de uitkomst beïnvloeden.

SYSTEEMBESCHRIJVING

De systeembeschrijving gaat in op verschillende aspecten van het stroomgebied van de Beek op de Paasberg. Dit is grotendeels gedaan aan de hand van geo-informatiedata. Vooral de analyse van het stroomgebied op basis van de hoogte is met een grove grid (5 meter grid) gedaan. Ook houdt deze analyse geen rekening met watergangen, infiltratie of kleine drempels die het stroomgebied al een heel andere vorm kan geven. De effecten hiervan zijn echter klein op de uitkomst van de waterbalans. Bij individuele maatregelen moet hier wel rekening mee worden gehouden.

De aanwezigheid van leemlagen in het gebied is bekend, maar waar deze precies zitten is onbekend. Ook het effect van de leemlagen op de grondwaterstanden is onbekend. De leemlagen zouden er voor kunnen zorgen dat aanvulling van grondwater kan leiden tot ongewenste kwel in nabijgelegen gebieden. Hier zou verder onderzoek naar moeten worden gedaan als er infiltratiemaatregelen in het stroomgebied worden toegepast in het gebied van Bestemmingsplan Leemlagen, maar ook hoger gelegen waar het grondwater richting dit gebied stroomt.

- Onderzoek: Effect van leemlagen in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg op de maatregelen

WATERBALANS

De waterbalans die is gebruikt in de studie is een erg versimpelde versie van wat er in de werkelijkheid gebeurt. Bij de korte hevige bui, waarmee bij deze studie gerekend is, geeft dit een relatief betrouwbaar beeld. Effecten op buien die langer duren en lange termijn effecten zijn hierdoor echter minder betrouwbaar.

- Onderzoek: Uitgebreidere waterbalans voor lange termijn effecten en effect op langere buien
- Onderzoek: Resultaten met andere buien en klimaatscenario's

Daarnaast is de waterbalans gebaseerd op het vasthouden, bergen en afvoeren van water. Aan deze trits zou zoals in de aanleiding aangegeven ook accepteren bijgevoegd kunnen worden. Het gehele capaciteitstekort hoeft waarschijnlijk niet verwerkt te worden om geen overlast meer te krijgen.

- Visie: Visie opstellen met tot hoe ver wateroverlast/hinder kan en moet worden geaccepteerd.

INTERPRETEREN RESULTATEN

De resultaten van de waterbalans geven aan hoeveel het capaciteitstekort verminderd door een maatregel. Echter moet een maatregel niet alleen op basis hiervan worden gekozen. Ook de positieve externe effecten zoals weergegeven in paragraaf 2.1 zullen moeten worden meegenomen in de besluitvorming. Om hiermee een weloverwogen keuze te maken is het uitvoeren van een multicriteria-analyse een goede vervolgstap van dit onderzoek.

- Vervolg: Multicriteria-analyse maatregelen inclusief positieve externe effecten.

EXPERTS

De analyse die is gedaan in het onderzoek is grotendeels gebaseerd op de waterbalans die is gemaakt. Hier komen de verschillende kansen in infiltratie, bergen en afvoeren naar voren. In de beslissing van de maatregelen is het zinvol om de onzekere waarden in de waterbalans verder te onderzoeken. Hierbij moet niet vergeten worden dat de waterbalans een model van de werkelijkheid blijft, en er altijd aannames gedaan blijven worden. De mening van de experts in het gebied is minstens net zo belangrijk. Zij weten als geen ander hoe het gebied reageert op veranderingen.

- Resultaten onderzoek aan gebiedsexpert voorleggen en hun visie meenemen in de besluitvorming

6 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

In dit onderzoek is toegewerkt naar een antwoord op de onderzoeksvraag:

Hoe kunnen klimaatadaptieve maatregelen van vasthouden, bergen en afvoeren van hemelwater worden toegepast in het stroomgebied van de Beek op de Paasberg om het stroomgebied bestendig te maken tegen extreme neerslag?

Uit onderzoek dat is gedaan naar de verschillende maatregelen en naar het stroomgebied blijkt dat er niet één goed antwoord op de vraag gegeven kan worden. Er zijn verschillende maatregelen die toegepast kunnen en moeten worden om het stroomgebied van de Beek op Paasberg bestendig te maken tegen extreme neerslag. Eén maatregel zal nooit voldoende zijn om een extreme (korte hevige) bui op te vangen, dus moet er gezocht worden naar een combinatie van verschillende maatregelen.

Om een bui van 50 mm in een uur te kunnen verwerken zal gemiddeld 18.2 mm extra vastgehouden of geborgen moeten worden. In Tabel 9 zijn de tekorten in millimeter en kubieke meter weergegeven.

TABEL 9: CAPACITEITSTEKORT IN DE VERSCHILLENDE STROOMGEBIEDEN

Sub stroomgebied	2	4	5	6	7	8	Totaal
	Klaren beek	Arnhemse Allee	Geiten-kamp	Monniken-huizen	Paasberg (Noord)	Paasberg (Zuid)	
Capaciteitstekort (mm)	16.2	26.5	20.6	15.1	18.8	13.1	18.2
Capaciteitstekort m ³	1300	5600	12200	6600	9400	5900	41000

Alleen infiltratievoorzieningen zullen nooit toereikend zijn, omdat de doorlatendheid van de zandige bodem (30 mm/h) in het gebied lager is dan de hevige buien (50 mm/h) die kunnen vallen. Ook zorgt de helling in het gebied ervoor dat de doorlatendheid van de bodem niet volledig benut kan worden. De grootste kansen voor infiltratie liggen in de bebouwde gebieden, door de tuinen te ontharden en/of infiltratiekratten aan te leggen.

Een grote kans in het gebied ligt bij het bergen van water. Waar de helling in het gebied een groot nadeel is om te infiltreren, geeft het goede kansen voor het bergen van water. Door slim om te gaan met de (natuurlijke) hoogteverschillen kunnen gebieden waar water weinig tot geen schade aanricht als tijdelijke berging dienen. Om dit op een goede manier te doen, ligt er een grote uitdaging bij het geleiden van water. Het water moet geleid worden naar de plaatsen waar het water geborgen wordt.

De analyse heeft ook laten zien dat extra afvoer van het water via de Beek op de Paasberg zelf geen realistische optie is. Ten eerste kan het water dat valt niet in korte tijd allemaal de beek bereiken en ten tweede zou de afvoer van de beek vele malen vergroot moeten worden, wat niet haalbaar is.

Naast vasthouden, bergen en geleiden van water moet ook accepteren worden genoemd als oplossing. Het helemaal weghalen van het capaciteitstekort en dus nooit meer waterhinder of wateroverlast te hebben bij een bui van 50 millimeter in een uur (T = 200), lijkt een niet haalbaar doel. De burger zal water op straat dus moeten leren accepteren en zelf aan de slag moeten gaan met het klimaatbestendig maken.

Deze studie heeft zich vooral gericht op efficiënte maatregelen om een korte hevige bui te kunnen verwerken. De verschillende maatregelen die inwoners zelf kunnen nemen, hebben daarin een bescheiden bijdrage. Dat neemt echter niet weg dat juist deze maatregelen bij minder extreme buien van grotere betekenis zijn uit het oogpunt van de positieve externe effecten. Daarom is de aanbeveling om als waterschap, eventueel in samenwerking met de gemeente, te investeren in het faciliteren van en meewerken in (burger)initiatieven, zoals omschreven in paragraaf 3.2.4.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Lenderink, G., Oldenborgh, G., Mijgaard, E. v., en Attema, J. (2011), 'Intensiteit van extreme neerslag in een veranderend klimaat', *Meteorologica*, nr 2, 17-20.
- [2] The City of Copenhagen (2012), *Cloudburst Management Plan 2012*, København, The City of Copenhagen.
- [3] WB21 (2000) Advies van de Commissie *Waterbeleid 21^e eeuw*, Commissie Waterbeheer 21^e eeuw.
- [4] Limbeek (2016), *BSc opdracht Arnhem*, (gesprek), 11 april 2016, 11:00, Waterschap Rijn & IJssel.
- [5] Ruimte met toekomst. (2013) Waterbeweging als denkraam, Ruimte x Milieu, website bezocht: (23 maart 2016), beschikbaar: <http://www.ruimtexmilieu.nl/wiki/oude-doos/watersysteembenadering>
- [6] Gemeente Arnhem (2014) *Actieplan Wateroverlast Stap 1*, Arnhem, Gemeente Arnhem.
- [7] Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2016) Dagwaarden neerslagstations, KNMI, website bezocht: (13 mei 2016), beschikbaar: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen#Z>
- [8] Bredenhoff-Bijlsma, R. en Limbeek, M. (2016) *Vasthouden en bergen van hemelwater in Arnhem Noord*, Doetinchem, Waterschap Rijn & IJssel.
- [9] Groen Arnhem (2016) *Groene Kennis*, website bezocht: (20 april 2016), beschikbaar: <http://groenarnhem.nl/groene-kennis/>
- [10] Mossevelde, T. van, Schipper, P.N.M, Bogaard, F.C. (2005) *Kwaliteitsaspecten infiltreren stedelijk water beter bekeken*, Utrecht, STOWA.
- [11] Limbeek, M.C.E., Hagens, J.E., Hattum, T. van, Massop, H.T.L., Kemenade, M.J.J.M. van (2015) *Op weg naar een klimaatactieve regio: een verkenning van knelpunten en kansen voor een klimaatactief Arnhem, Lochem en Zutphen*, Wageningen, Alterra Wageningen UR.
- [12] Groenblauwe Netwerken (2016) *Hitte*, website bezocht: (3 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/heat/>
- [13] Groenblauwe Netwerken (2016) *Biodiversiteit*, website bezocht: (3 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/biodiversity/>
- [14] Beterams (2014) *De verrassende biodiversiteit van steden*, website bezocht: (8 mei 2016), beschikbaar: <https://downtoearthmagazine.nl/de-verrassende-biodiversiteit-van-steden/>
- [15] Groenblauwe Netwerken (2016) *Luchtkwaliteit*, website bezocht: (3 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/air/>
- [16] Michel, A., Golen, B. van, Wieberdink, J., Root, M., Schuttelaar & Partners (2007) *Groene stad, leefbare stad?*, Groningen, Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit.
- [17] Groenblauwe Netwerken (2016) *Sociaal-maatschappelijke en economische waarde van groen en blauw*, website bezocht: (3 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/social/>
- [18] Groenblauwe Netwerken (2016) *Wateropgave*, website bezocht: (3 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/water/>
- [19] Amsterdam Rainproof (2016) *Greppels*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/greppels>

- [20] Groenblauwe Netwerken (2016) *Greppels*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/ditches/>
- [21] Groenblauwe Netwerken (2016) *Molgoten*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/fluted-gutters/>
- [22] Groenblauwe Netwerken (2016) *Prefab molgoot*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/prefab-fluted-gutters/>
- [23] Groenblauwe Netwerken (2016) *Open goten*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/open-gutters/>
- [24] Groenblauwe Netwerken (2016) *Bedekte goten*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/covered-gutters/>
- [25] Amsterdam Rainproof (2016) *Herinstructie van het trottoir*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/herinstructie-van-het-trottoir>
- [26] Amsterdam Rainproof (2016) *Holle weg*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/holle-weg>
- [27] Groenblauwe Netwerken (2016) *Holle wegen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/hollow-roads/>
- [28] Groenblauwe Netwerken (2016) *Open waterlopen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/gutters/open-water-channels/>
- [29] Kennisportaal Ruimtelijke Adaptatie (2013) Zwolle klimaatbestendig, website bezocht: (23 maart 2016), beschikbaar: <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/praktijkvoorbeeld-ruimtelijke-adaptatie/73/Zwolle-klimaatbestendig>
- [30] Amsterdam Rainproof (2016) *Intensieve groene daken*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/intensieve-groene-daken>
- [31] Amsterdam Rainproof (2016) *Retentiedak/polderdak*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/retentiedakpolderdak>
- [32] Amsterdam Rainproof (2016) *Verblijfsdak/tuindak*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/retentiedak-tuindak>
- [33] Getter, K. L., and Rowe, D. B. (2006), 'The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development', *HortScience*, 41(5): 1276 - 1285.
- [34] Rotterdam Climate Initiative - Climate Proof. (2014) Een sterke en aantrekkelijke stadsregio Rotterdam, bezocht: (03 maart 2016), beschikbaar: <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/praktijkvoorbeeld-ruimtelijke-adaptatie/11/Een-sterke-en-aantrekkelijke-stadsregio-Rotterdam>
- [35] Amsterdam Rainproof (2016) *Extensieve groene daken*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/extensieve-groene-daken>
- [36] Groenblauwe Netwerken (2016) *Groene gevel*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/green-facades/>

- [37] Groenblauwe Netwerken (2016) *Verticaal helofytenfilter*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/vertical-helophyte-filters/>
- [38] Amsterdam Rainproof (2016) *Infiltratiekratten*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/infiltratiekratten>
- [39] Groenblauwe Netwerken (2016) *Infiltratiekratten en infiltratieputten*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/infiltration-boxes-and-infiltration-drainswells/>
- [40] Amsterdam Rainproof (2016) *Infiltratiestroken met bovengrondse opslag*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/infiltratiestroken-met-bovengrondse-opslag>
- [41] Groenblauwe Netwerken (2016) *Moestuïn*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/private-or-communal-initiatives/vegetable-gardens/>
- [42] Amsterdam Rainproof (2016) *Omgekeerde drainage*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/omgekeerde-drainage>
- [43] Amsterdam Rainproof (2016) *Regenpijp afkoppelen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/regenpijp=afkoppelen>
- [44] Amsterdam Rainproof (2016) *Regenwatergebruik woningen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/regenwatergebruik-bij-woningen>
- [45] Amsterdam Rainproof (2016) *Regenton*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/regenton>
- [46] Amsterdam Rainproof (2016) *Regenwateropslag onder gebouwen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/regenwateropslag-onder-gebouwen>
- [47] Amsterdam Rainproof (2016) *Regenwatervijvers*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/regenwatervijvers>
- [48] Amsterdam Rainproof (2016) *Seizoensberging*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/seizoensberging>
- [49] Amsterdam Rainproof (2016) *Flexibel peilbeheer*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/flexibel-peilbeheer>
- [50] Amsterdam Rainproof (2016) *Beplanting*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/beplanting>
- [51] Jong Posthumus, E. de, (2014) *Praktijkgericht onderzoek naar het hydraulisch functioneren van wadisystemen in Haren en Groningen*, Groningen, Hanzehogeschool Groningen
- [52] Amsterdam Rainproof (2016) *Wadi's*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/wadis>
- [53] Amsterdam Rainproof (2016) *Waterdaken*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/waterdaken>

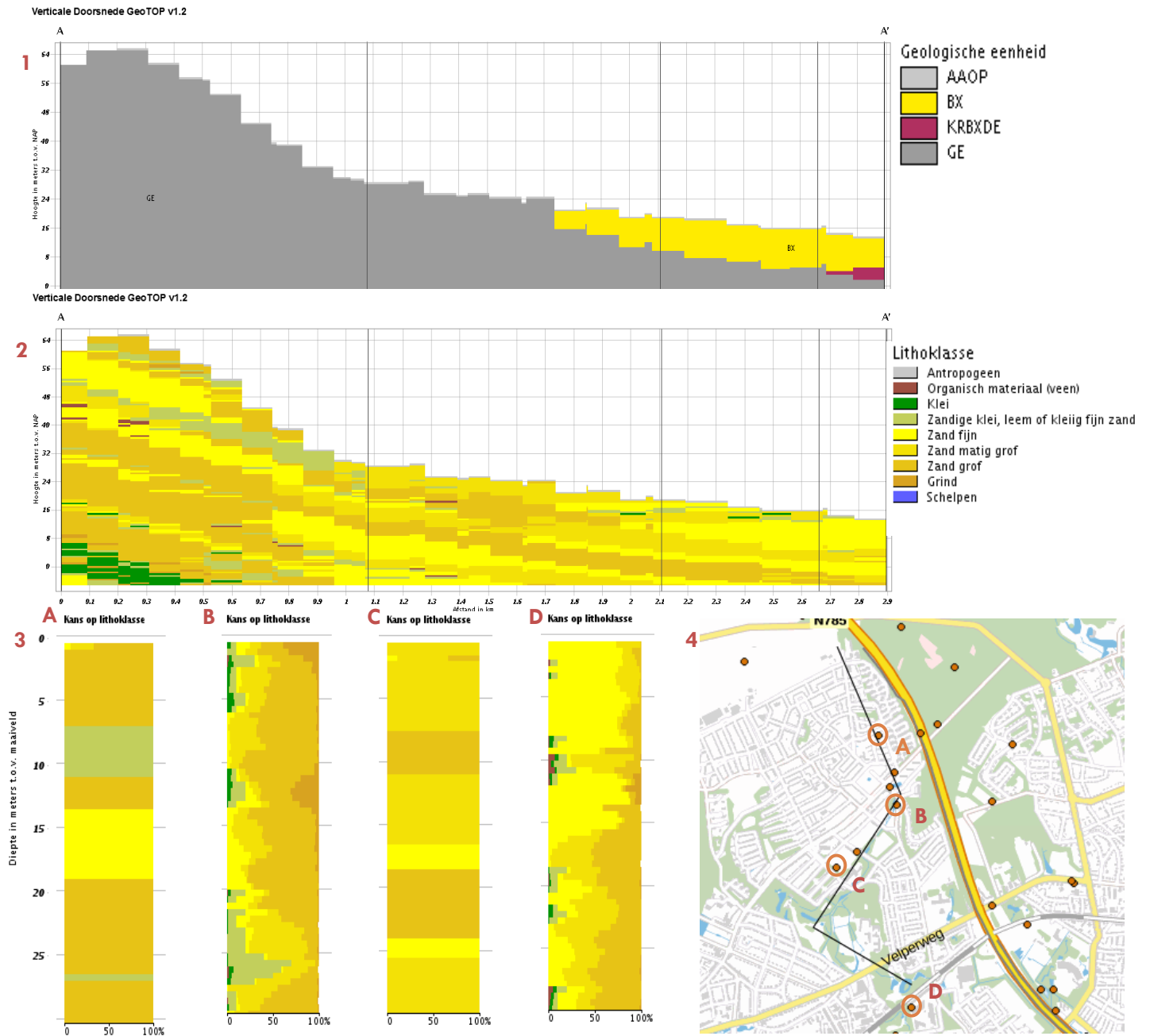
- [54] Groenblauwe Netwerken (2016) *Waterdoorlatende verhardingsmaterialen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <http://www.groenblauwenetwerken.com/measures/porous-paving-materials/>
- [55] FEBEstral (2004) *Waterdoorlatende verhardingen*, Brussel, Eddy Dano
- [56] Amsterdam Rainproof (2016) *Waterpleinen*, website bezocht: (4 mei 2016), beschikbaar: <https://www.rainproof.nl/toolbox/maatregelen/waterpleinen>
- [57] Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S. (2007) Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure, *Built Environment*, 33(1), 115-133.
- [58] Grimmond, C.S.B. , Roth, M., Oke, T.R., Au, Y.C., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L.S., Liu, C.H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D., Voogt, J. (2010) Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities, *Procedia Environmental Sciences*, 1(1), 247-274.
- [59] Hoek, J.P. van der , Hartog, P., Jacobs, E. (2014) Coping with climate change in Amsterdam – A watercycle perspective, *Journal of Water and Climate Change*, 5(1), 61-69.
- [60] Vleeschauwer, K. de, Weustenraad, J., Nolf, C., Wolfs, V., De Meulder, B., Shannon, K., Willems, P. (2014) Green-blue water in the city: Quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods, *Water Science and Technology*, 70(11), 1825-1837.
- [61] Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2014) *Hoe vaak komt extreme neerslag zoals op 28 juli tegenwoordig voor, en is dat anders dan vroeger?*, website bezocht: (2 juni 2016), beschikbaar: <http://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/hoe-vaak-komt-extreme-neerslag-zoals-op-28-juli-tegenwoordig-voor-en-is-dat-anders-dan-vroeger>
- [62] Bos, R. (2016), *BSc opdracht Arnhem*, (gesprek), 13 mei 2016, 9:00, Gemeente Arnhem.
- [63] Gemeente Arnhem (2014) *Aanpak Wateroverlast in Arnhem Noord*, Arnhem, Gemeente Arnhem.
- [64] Gemeente Arnhem, afdeling Openbare ruimte (2007) *Visie op de beken – de Beek op de Paasberg*, Arnhem, Gemeente Arnhem.
- [65] Gemeente Arnhem (2015) *Bestemmingsplan Leemlagen*, Arnhem, Gemeente Arnhem.
- [66] Kennisportaal Ruimtelijke Adaptatie (2013) Zwolle klimaatbestendig, website bezocht: (23 maart 2016), beschikbaar: <http://www.ruimtelijkeadaptatie.nl/nl/praktijkvoorbeeld-ruimtelijke-adaptatie/73/Zwolle-klimaatbestendig>
- [67] Geitenkampnet (2016) Over de wijk, website bezocht: (24 april 2016), beschikbaar: <http://www.geitenkampnet.nl/over-de-wijk-2/>
- [68] Gemeente Arnhem, afdeling Onderzoek en statistiek (2011), *Wijkprofielen 2011*, Arnhem, Gemeente Arnhem.
- [69] Paasberg en Wellenstein (2016) *Historie*, website bezocht: (13 mei 2016), beschikbaar: <http://www.paasberg-wellenstein.nl/Overdewijk/Geschiedenis/tabid/3105/Default.aspx>
- [70] Angerentein (2016) Over ons, website bezocht: (13 mei 2016), beschikbaar: <http://www.angerentein-arnhem.nl/swa/>

- [71] DINOLOket (2016) *Ondergrondmodellen*, website bezocht: (11 mei 2016), beschikbaar: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>
- [72] Vree, J. de (2016) *K-waarde*, website bezocht: (11 mei 2016), beschikbaar: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/k-waarde.shtml>
- [73] Bot, A.P. (2011) *Grondwaterzakboekje*, Rotterdam, Bot Raadgevend Ingenieur
- [74] Vlaamse Milieumaatschappij (2000) *Waterwegwijzer voor architecten. Een handboek voor duurzaam watergebruik in en om de particuliere woning*, Erembodegem, Vlaamse Milieumaatschappij
- [75] Ruimtelijkeplannen.nl (2016) website bezocht: (14 juni 2016) beschikbaar: <http://www.ruimtelijkeplannen.nl/web-roo/roo/bestemmingsplannen?tabFilter=ACTUEEL>
- [76] Bloei! In Arnhem (2014) *Over ons*, website bezocht: (12 mei 2016), beschikbaar: <http://www.bloeiinarnhem.nl/over-bloei/>
- [77] De Arnhemse Uitdaging (n.d.) *Over ons*, website bezocht: (12 mei 2016), beschikbaar: <http://www.arnhemseuitdaging.nl/arnhemse-uitdaging/over-ons>
- [78] De groene vos (2014) *Wie zijn wij*, website bezocht: (12 mei 2016), beschikbaar: <http://degroenevos.nl/duurzaamruimtelijk/>
- [79] Gemeente Arnhem (2015) *Perspectiefnota 2016-2019 - Gemeente Arnhem*, Arnhem, Gemeente Arnhem
- [80] Interreg (n.d.) *Gemeente Arnhem*, website bezocht: (2 juni 2016), beschikbaar: <http://www.nweurope.eu/projects/climate-active-neighbourhoods/partners/gemeente-arnhem/>
- [81] CASA (2015) *Over CASA*, website bezocht: (2 juni 2016), beschikbaar: <http://www.casa-arnhem.nl/over-casa>
- [82] Hoogvliet, M., Buma, J., Brolsma, R., Lange, G. de, Landwehr, H., Coenders-Gerrits, M., Rutten, P. en Landa, P. (2013) *Naar een bestendige stedelijke waterbalans*, Delft, Deltares.
- [83] (2006) *Rotterdam Groen van Boven*, Rotterdam, Gemeente Rotterdam
- [84] Luitelaar, H. van (2014) *Ervaringen met de aanpak van regenwateroverlast in bebouwd gebied*, hoofdstuk 22, Ede, Stichting RIONED.
- [85] Dooren, N. van (2009) *Regenwater in de tuin? Mooi well!*, Ede, Stichting RIONED.
- [86] Sacramento County Code (1990) *Soil Infiltration Rates*, website bezocht: (11 mei 2016). beschikbaar: http://qcode.us/codes/sacramentocounty/view.php?topic=14-14_10-14_10_110
- [87] Waterschap Rijn en IJssel (2016) *Waterkwantiteit*, website bezocht: (16 mei 2016), beschikbaar: http://waterdata.wrij.nl/index.php?wat=kaart_esri
- [88] Buishand, A. en Wijngaard, J. (2008) *Statistiek van extreme neerslag voor het stedelijk waterbeheer*, H20, nr8, pag. 28-30.

BIJLAGE A: MAATREGELEN VASTHOUDEN-BERGEN-AFVOEREN

MAATREGEL	OMSCHRIJVING
Bovengrondse afvoer / Water zichtbaar maken	
Greppels	Een kleine beplante sloot die tijdelijk regenwater vasthoudt, tranporteert en infiltreert.
Goten	Zie ↓
Molgoten	Ondiepe goot van klinkers
Prefab molgoot	Ondiepe goot van prefab beton
Open goten	Smalle eenvoudige bovengrondse afvoer
Bedeekte goten	Goot bedekt met een rooster
Trottoir herintroduceren/verhogen	Stoepranden langs de straat
Holle wegen	Hol ontworpen wegen
Open waterlopen	Open stedelijke waterlopen
Bufferen en infiltreren	
Groene daken	Dak bedekt met grond en planten
Intensief groen dak	Groen dak/natuurdak met gevarieerde beplanting
Extensief groen dak	Groen dak met dunne substraatlaag en een sedumbegroeiing, eventueel aangevuld met kruiden en grassen.
Groene gevels	Gevels van gebouw bedekt met planten
Helofytenfilter	Zone van riet voor natuurlijke waterzuivering
Infiltratiekratten	Kratten die onder het maaiveld worden geplaatst, bijvoorbeeld onder sportvelden of speeltuinen. Deze kratten kunnen hemelwater bergen en geleidelijk in de grond laten infiltreren door de zijanten.
Infiltratieputten	Ondergrondse bodemfiltratievoorziening. Verticaal geplaatste op het hemelwater aangesloten buizen met aan de onderkant een opening
Infiltratievelden /-stroken	Gebied om hemelwater (van daken en verharde terreinen) te infiltreren
Infiltratievelden/-stroken met bovengrondse opslag	Gebied om hemelwater op te slaan en te infiltreren
Moestuin	Moestuinen in de tuin of aan straat
Omgekeerde drainage	Met geotextiel omwikkelde geperformeerde buis die regen in de bodem infiltreert
Regenpijp afkoppelen	Regenwater lokaal infiltreren in plaats van naar het rioolstelsel
Regenwatergebruik	Zie ↓
Regenwatergebruik woningen/gebouwen	Regenwater gebruiken voor de wasmachine, de wc en de tuin
Regenton	Regenwater vasthouden in de tuin
Regenwateropslag onder gebouwen	Waterberging onder gebouwen
Regenwatervijvers	Regenwater opvangen in een vijver en vertraagd afvoeren
Seizoensberging	Zie ↓
Seizoensberging door de realisatie van extra oppervlak	Extra bergend oppervlak met gelijke peilfluctuatie
Seizoensberging door de realisatie van extra berghoogte	Bergend oppervlak ontwerpen op grotere peilfluctuatie
Flexibel peilbeheer	Waterberging geanticipeerd op verwachte neerslag
Specifieke seizoenberging	Bergbassin dat in de wintermaanden wordt gevuld ten behoeve van aanvulling van tekorten in zomermaanden
Toepassen van bodembedekkers en heesters	Verhard oppervlak of gras vervangen door bodembedekkers en heesters
Gras	Verhard oppervlak vervangen door gras
Struiken/bomen	Verhard oppervlak of gras vervangen door struiken/bomen
Wadi's	Begroeide beek om stormwater op te vangen, voor drainage en infiltratie
Waterdaken	Wateropslag op het dak. Vertraagde afvoer via geknepen afvoer.
Waterdoorlatende/-passerende verhardingsmaterialen	Poreus materiaal waar water doorheen kan gaan of open gedeelten waar het water langs kan infiltreren
Grasbetonstenen	Zie ↑
Poreuze klinkers	Zie ↑
Klinkers met open voegen	Zie ↑
Zachte half-verharding (houtspaanders)	Zie ↑
Harde half-verharding (grind)	Zie ↑
Mengsel van steenslag en gras	Zie ↑
Waterpleinen	Plein om regenwater te bufferen in tijden van extreme neerslag

BIJLAGE B: BODEMSOORT



FIGUUR 30: VERTICALE DOORSNEDE GEBIED RONDOM DE BEEK OP DE PAASBERG (1-GEOLOGISCHE EENHEID, 2-LITHOKLASSE) EN APPELBOORMETING OP VERSCHILLENDE PLAATSEN (3). LOCATIES VAN VERTICALE DOORSNEDE EN APPELBOORMETINGEN IN 4. AAOP = ANTROPOGENE AFZETTING; BX = FORMATIE VAN BOXTEL; KRBXDE = FORMATIE VAN KREFTENHEYE, INCLUSIEF FROMATIE VAN BOXTEL, LAAGPAKKET VAN DELWIJNEN; GE = DOOR LANDIJS GESTUWDE EENHEDEN.

BIJLAGE C: WATERBALANS

TABEL 10: INPUT WATERMODEL

Oppervlakte	dicht	hellend dak	plat dak	verharding	Open verharding	Tuin	Groen	nat	Infiltratieratio helling	Hemelwaterriool
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82000	6061	0	2813	63	0	5308	73816	0	0.68	0.0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
214000	102376	2559	23589	49102	12530	47298	82651	8801	0.51	1.0
592000	406902	115492	24916	182118	29170	145488	121610	2375	0.67	0.0
436000	167781	26704	19198	75936	24140	80595	213301	20266	0.64	0.2
499000	293966	53357	24197	127705	22200	151545	128558	13637	0.63	0.0
448000	212741	43564	16972	98595	23700	93300	172220	23349	0.75	0.1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
2271000	1189827	241676	111685	533519	111740	523535	792155	68428	0.660	0.15

TABEL 11: PARAMETERS WATERBALANS

Parameter	Waarde	Eenheid	Toelichting
Afvoercapaciteit_beek	0.156	mm/h	Afvoercapaciteit van de beek (0.11 mm) verdeeld over stroomgebieden waar de beek doorheen stroomt
Afvoercapaciteit_naar_hwr	25	mm/h	Capaciteit hemelwaterriool
Berging_groen	15	mm	Gemiddelde bergingscapaciteit op groen
Berging_nat	150	mm	Gemiddelde bergingscapaciteit open water
Berging_plat_dak	4	mm	Bergingscapaciteit van een plat dak
Berging_weg	10	mm	Gemiddelde bergingscapaciteit van wegen
Doorlatendheid	30	mm/h	Doorlatendheid van de bodem
Neerslag	50	mm/h	Hoeveelheid neerslag per uur
Ratio_tuin_verhard	0.6	[-]	Deel van de tuin dat verhard is
Ratio_verharding	0.1	[-]	Deel van open verharding waar kan infiltreren
Tijdsduur	1	uur	Duur van de bui

BIJLAGE D: SCRIPT MODEL WATERBALANS

```

%% Waterbalans Stroomgebied Beek op de Paasberg
clear; clc; close          %reset
%% Bestanden inladen
% stroomgebieden
% 1 - (niet stedelijk)
% 2 Klarenbeek klein
% 3 - (niet stedelijk)
% 4 Arnhemse Allee
% 5 Geitenkamp
% 6 Monnikenhuizen
% 7 Paasberg (Noord)
% 8 Paasberg (Zuid)
% 9 - (Klarenbeek)
stroomgebieden = xlsread('C:\Users\Daniëlle\Google
Drive\00Stage\StroomgebiedPaasbergBeek01.xlsx');

O_totaal = stroomgebieden(:,1)'/10000;           % [ha] oppervlakte
stroomgebied
O_hellend_dak = stroomgebieden(:,2)'/10000;     % [ha] oppervlakte hellend
dak (onderdeel van bebouwing)
O_plat_dak = stroomgebieden(:,3)'/10000;        % [ha] oppervlakte plat dak
(onderdeel van bebouwing)
O_weg = stroomgebieden(:,4)'/10000;            % [ha] oppervlakte gesloten verharding
(asfalt)
O_verharding_open = stroomgebieden(:,5)'/10000; % [ha] gedeelte open wegen
waar kan infiltreren (ratio = 1 helling <2,9)
O_tuin = stroomgebieden(:,6)'/10000;           % [ha] oppervlakte open
verharding (stoep/klinkers)
O_groenoverig = stroomgebieden(:,7)'/10000;    % [ha] oppervlakte groen
(parken, grasland)
O_nat = stroomgebieden(:,8)'/10000;            % [ha] oppervlakte nat
(water)
infiltratieratio = stroomgebieden(:,9)';        % ratio van infiltratie obv
helling
hemelwaterriool_beek =stroomgebieden(:,10)';   % ratio wat naar beek gaat
vanuit hemelwaterriool

%% Input
tijdsduur = 1;                                  % [uur]
doorlatendheid = 30*tijdsduur;                  % [mm/h] doorlaatbaarheid bodem
neerslag = 50*tijdsduur;                        % [mm/h] neerslag per uur
berging_plat_dak = 4;                           % [mm] een plat dak kan 4 mm neerslag
bergen
berging_weg = 10;                               % [mm] berging op weg (laagste
waarde, want veel afschot in de weg)
afvoercapaciteit_naar_hwr = 25*tijdsduur;      % [mm/h] capaciteit van riool
berging_groen = 15;                             % [mm] gemiddelde bergingscapaciteit
van groen
berging_nat = 150;                              % [mm] gemiddeld 15 cm peilverhoging
afvoercapaciteit_beek = 0.156* tijdsduur;      % [mm/h] 0.034 m^3/s * 2 (verdeeld
over de 4 stroomgebieden waar de beek door heen loopt)
ratio_tuin_verhard = 0.6;                       % [-]
ratio_verharding = 0.1;                         % [-]
beek_op_paasberg = [0 0 0 0.1 0 0.3 0.3 0.3 0 1]; % door welke stroomgebieden
stroomt de beek op de paasberg en deel debiet

```

```

O_groen_tuin = O_tuin*(1-ratio_tuin_verhard); % [ha] oppervlakte groen in tuin
O_verharding_tuin = O_tuin*ratio_tuin_verhard; % [ha] oppervlakte verharding in tuin
O_groen = O_groen_tuin + O_groenoverig;
O_verharding_weg_groen = O_verharding_open*ratio_verharding;
O_verharding_weg = O_verharding_open*(1-ratio_verharding) + O_weg;
hemelwaterriool_infiltratie = 1-hemelwaterriool_beek;
if O_totaal == 0
    hemelwaterriool = NaN;
end

%% Waterbalans
% De neerslag kan vallen op verschillende oppervlakken (bebouwing, groen,
% verharding & water).

% Wegen
% infiltreren
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
    if neerslag > O_verharding_weg_groen(n)/O_totaal(n) * doorlatendheid
        infiltreren_weg(n) = (O_verharding_weg_groen(n) *
doorlatendheid)/O_totaal(n); % [mm] tov totaal opp
        weg_infiltreren(n) = infiltreren_weg(n)*O_totaal(n)/O_weg(n);
    else
        infiltreren_weg(n) = (O_verharding_weg_groen(n) * neerslag)/O_totaal(n);
        weg_infiltreren(n) = infiltreren_weg(n)*O_totaal(n)/O_weg(n);
    end
    infiltreren_weg_cap(n) = (O_verharding_weg_groen(n) *
doorlatendheid)/O_totaal(n);
end

% water op straat
for n = 1: size(stroomgebieden,1)
    if neerslag > berging_weg + weg_infiltreren(n)
        bergen_weg(n) = (O_weg(n) * berging_weg)./O_totaal(n); % [mm] tov
totaal opp
        water_op_weg(n) = berging_weg;
    elseif neerslag < berging_weg
        bergen_weg(n) = (O_weg(n) * neerslag)./O_totaal(n); % [mm] tov
totaal opp
        water_op_weg(n) = neerslag-weg_infiltreren(n);
    else
        bergen_weg(n) = (O_weg(n) .* (neerslag-
weg_infiltreren(n)))./O_totaal(n);
        water_op_weg(n) = neerslag-weg_infiltreren(n);
    end
    bergen_weg_cap(n) = (O_weg(n) * berging_weg)./O_totaal(n);
end

% afvoer van wegen
water_weg = neerslag - weg_infiltreren - water_op_weg;
afvoer_weg = (O_weg.*water_weg)./O_totaal;

% controle weg
controle_weg1 = infiltreren_weg + bergen_weg + afvoer_weg;
controle_weg2 = neerslag .* O_weg ./O_totaal;
controle_weg = controle_weg1 - controle_weg2;

```

```

% Bebouwing
% Bergen op daken
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
    if neerslag > berging_plat_dak*(O_plat_dak(n)/(O_plat_dak(n)+
O_hellend_dak(n)))
        bergen_dak(n) = (O_plat_dak(n) * berging_plat_dak)/O_totaal(n); %
[mm] millimeter berging op daken t.o.v. totaal
        water_op_dak(n) =
(O_plat_dak(n)/(O_hellend_dak(n)+O_plat_dak(n)))*berging_plat_dak;
        elseif isnan(berging_plat_dak*(O_plat_dak(n)/(O_plat_dak(n)+
O_hellend_dak(n))))
            bergen_dak(n) = NaN;
            water_op_dak(n) = NaN;
        else
            bergen_dak(n) = (O_plat_dak(n) *neerslag)/O_totaal(n);
            water_op_dak(n) = neerslag;
        end
        bergen_dak_cap(n) = (O_plat_dak(n) * berging_plat_dak)/O_totaal(n);
        bergen_dak_over(n) = bergen_dak_cap(n)-bergen_dak(n);
    end
% Afvoer van daken
water_dak = neerslag-water_op_dak;
afvoer_dak = ((O_plat_dak + O_hellend_dak).*water_dak)./O_totaal;

% Afvoer van verharding tuin
afvoer_tuin = neerslag * O_verharding_tuin ./O_totaal;

%controle
controle_bebouwing1 = neerslag * (O_plat_dak +
O_hellend_dak+O_verharding_tuin)./O_totaal;
controle_bebouwing2 = bergen_dak + afvoer_dak + afvoer_tuin;
controle_bebouwing = controle_bebouwing1 - controle_bebouwing2;

% Hemelwaterriool
afvoer_naar_riool = afvoer_tuin+afvoer_dak+afvoer_weg;
afvoercapaciteit_riool = (O_hellend_dak + O_plat_dak + O_verharding_weg) *
afvoercapaciteit_naar_hwr./O_totaal;
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
    if afvoer_naar_riool(n) > afvoercapaciteit_riool(n)
        infiltreren_riool(n) =
hemelwaterriool_infiltratie(n)*afvoercapaciteit_riool(n);
        afvoer_riool_naar_beek(n) =
hemelwaterriool_beek(n)*afvoercapaciteit_riool(n);
    else
        infiltreren_riool(n) = hemelwaterriool_infiltratie(n)*(afvoer_tuin(n)+
afvoer_dak(n) + afvoer_weg(n));
        afvoer_riool_naar_beek(n) = hemelwaterriool_beek(n)*(afvoer_tuin(n)+
afvoer_dak(n) + afvoer_weg(n));
    end
end
end

% Groen
% infiltreren groen
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
    if neerslag > doorlatendheid*infiltratieratio(n)

```

```

infiltreren_groen(n) =
(O_groen(n)*doorlatendheid*infiltratieratio(n))/O_totaal(n);
groen_infiltreren(n) = doorlatendheid*infiltratieratio(n);
infiltreren_groen_over(n) = 0;
else
infiltreren_groen(n) = (O_groen(n) * neerslag)/O_totaal(n);
groen_infiltreren(n) = neerslag;
infiltreren_groen_over(n) = ((O_groen(n) * ((doorlatendheid *
infiltratieratio(n))-neerslag))/O_totaal(n));
end
infiltreren_groen_cap(n) =
(O_groen(n)*doorlatendheid*infiltratieratio(n))/O_totaal(n);
end

% bergen groen
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
if neerslag > groen_infiltreren(n) + berging_groen
bergen_groen(n) = (O_groen(n) * berging_groen)/O_totaal(n);
groen_bergen(n) = berging_groen;
bergen_groen_over(n) = 0;
else
bergen_groen(n) = (O_groen(n)* (neerslag -
groen_infiltreren(n)))/O_totaal(n);
groen_bergen(n) = neerslag - groen_infiltreren(n);
bergen_groen_over(n) = O_groen(n)* (berging_groen-groen_bergen(n))
/O_totaal(n);
end
bergen_groen_cap(n) = (O_groen(n) * berging_groen)/O_totaal(n);
end

% afvoeren groen
water_groen = neerslag - groen_infiltreren - groen_bergen;
afvoer_groen = (O_groen.*water_groen)./O_totaal;

%controle groen
controle_groen1 = neerslag * O_groen./O_totaal;
controle_groen2 = infiltreren_groen + bergen_groen + afvoer_groen;
controle_groen = controle_groen1-controle_groen2;

% Nat
% Bergen
for n = 1:size(stroomgebieden,1)
if neerslag > berging_nat
bergen_nat = (berging_nat * O_nat(n))/O_totaal(n);
nat_bergen(n) = berging_nat;
bergen_nat_over(n) = 0;
else
bergen_nat(n) = (neerslag * O_nat(n))/O_totaal(n);
nat_bergen(n) = neerslag;
bergen_nat_over(n) = O_nat(n)*(berging_nat - nat_bergen(n))/O_totaal(n);
end
bergen_nat_cap(n) = (berging_nat * O_nat(n))/O_totaal(n);
end

% Afvoeren
afvoer_nat = neerslag - nat_bergen;

```

```

% Controle
controle_nat1 = neerslag .* O_nat./O_totaal;
controle_nat2 = bergen_nat + afvoer_nat;
controle_nat = controle_nat1 - controle_nat2;

%% Afvoer
% capaciteit over
capaciteit_over = infiltreren_groen_over + bergen_groen_over + bergen_nat_over +
bergen_dak_over;
totale_afvoer = afvoer_dak + afvoer_weg + afvoer_groen + afvoer_tuin +
afvoer_nat+afvoer_riool_naar_beek;

Overlast = max(0, totale_afvoer - afvoercapaciteit_riool-
(afvoercapaciteit_beek*beek_op_paasberg));
Overlast1 = Overlast - capaciteit_over;

%% capaciteiten
% infiltreren
infiltreren_groen_cap;
infiltreren_weg_cap;
infiltreren_riool;
infiltratiecapaciteit = infiltreren_groen_cap + infiltreren_weg_cap
+infiltreren_riool;

% bergen
bergen_dak_cap;
bergen_groen_cap;
bergen_nat_cap;
bergen_weg_cap;
bergingscapaciteit = bergen_dak_cap + bergen_groen_cap + bergen_nat_cap +
bergen_weg_cap;

%afvoeren
afvoercapaciteit = afvoercapaciteit_beek*beek_op_paasberg;
afvoer_beek_cap = afvoercapaciteit;

%hemelwaterriool
infiltreren_riool_cap = hemelwaterriool_infiltratie.*afvoercapaciteit_riool;
afvoer_riool_naar_beek_cap = hemelwaterriool_beek.*afvoercapaciteit_riool;

%% Percentages
% weg
p_infiltreren_weg = infiltreren_weg./neerslag*100;
p_bergen_weg = bergen_weg./neerslag*100;
p_afvoer_naar_riool_weg = afvoer_weg./neerslag*100;
p_weg = p_infiltreren_weg + p_bergen_weg + p_afvoer_naar_riool_weg;
% bebouwing
p_bergen_dak = bergen_dak./neerslag*100;
p_afvoer_naar_riool_dak = afvoer_dak./neerslag*100;
p_afvoer_tuin = afvoer_tuin./neerslag*100;
p_bebouwing = p_bergen_dak + p_afvoer_naar_riool_dak + p_afvoer_tuin;

```



```
%groen
    p_infiltreren_groen = infiltreren_groen./neerslag*100;
    p_bergen_groen = bergen_groen./neerslag*100;
    p_afvoer_groen = afvoer_groen./neerslag*100;
    p_groen = p_infiltreren_groen + p_bergen_groen + p_afvoer_groen;
%nat
    p_bergen_nat=bergen_nat./neerslag*100;
    p_nat = p_bergen_nat;
    p_nat_test = O_nat./O_totaal;

controle = 100 - (p_weg + p_bebouwing + p_groen + p_nat);

%% Tabel maken
%sheet = {'sub1'; 'sub2'; 'sub3'; 'sub4'; 'sub5'; 'sub6'; 'sub7'; 'sub8'; 'sub9'};
for n = 1:size(stroomgebieden,1)

% vasthouden/bergen/afvoeren op verschillende ondergronden
    principe = {'vasthouden'; 'bergen'; 'afvoeren'};
    bebouwing = [0; bergen_dak(n); afvoer_dak(n)+afvoer_tuin(n)];
    wegen = [infiltreren_weg(n); bergen_weg(n); afvoer_weg(n)];
    groen = [infiltreren_groen(n); bergen_groen(n); afvoer_groen(n)];
    nat = [0; bergen_nat(n); afvoer_nat(n)];
    hemelwaterriool = [infiltreren_riool(n);0;afvoer_riool_naar_beek(n)];

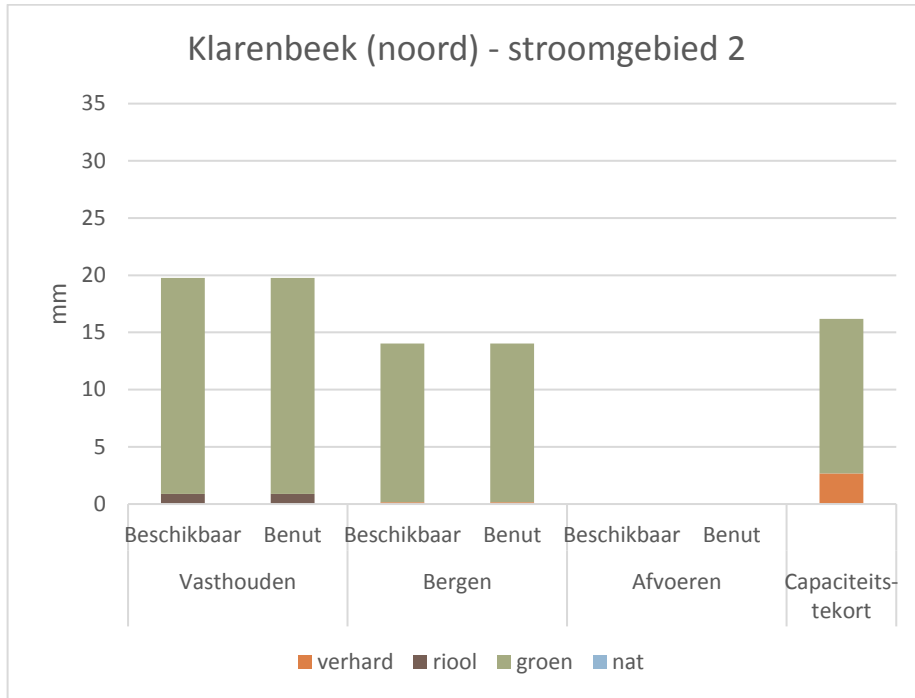
    T = table(bebouwing, wegen, groen, nat, hemelwaterriool, 'RowNames', principe);

    writetable(T, 'matlab_data.xlsx', 'Sheet', n)

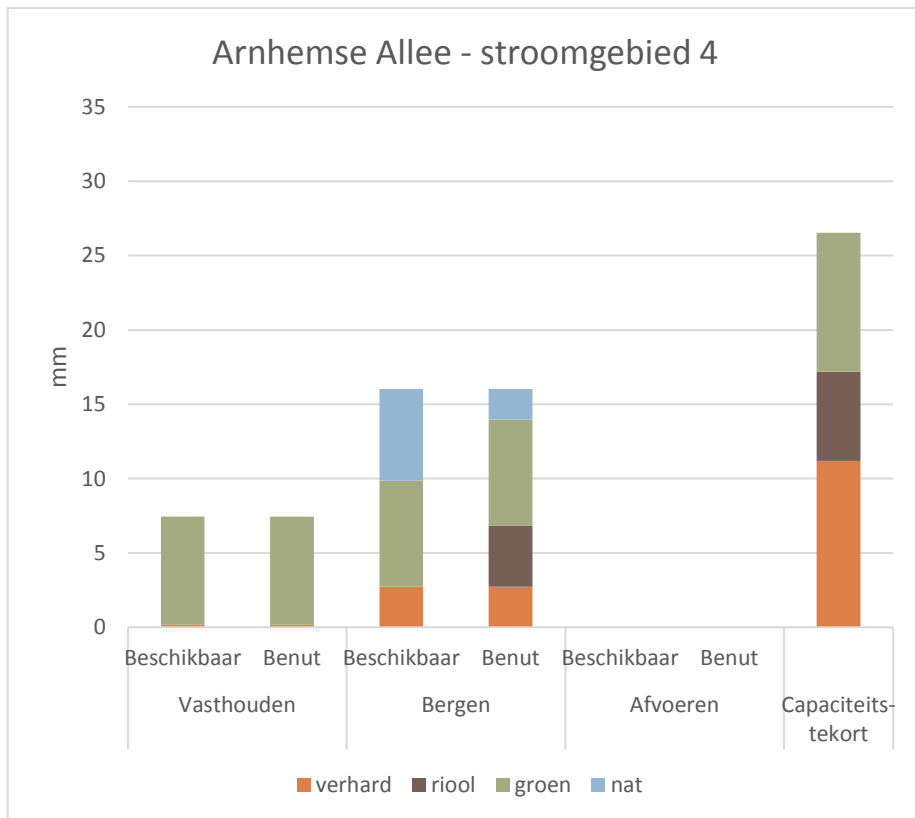
end
% capaciteiten
    infiltratie_cap = infiltratiecapaciteit';
    bergen_cap = bergingscapaciteit';
    afvoer_cap = afvoercapaciteit';

    T = table(infiltreren_groen_cap', infiltreren_weg_cap', bergen_dak_cap',
bergen_groen_cap', bergen_nat_cap', bergen_weg_cap', infiltreren_riool',
afvoer_beek_cap', infiltreren_riool_cap', afvoer_riool_naar_beek_cap');
    writetable(T, 'matlab_data.xlsx', 'Sheet', n+1)
```

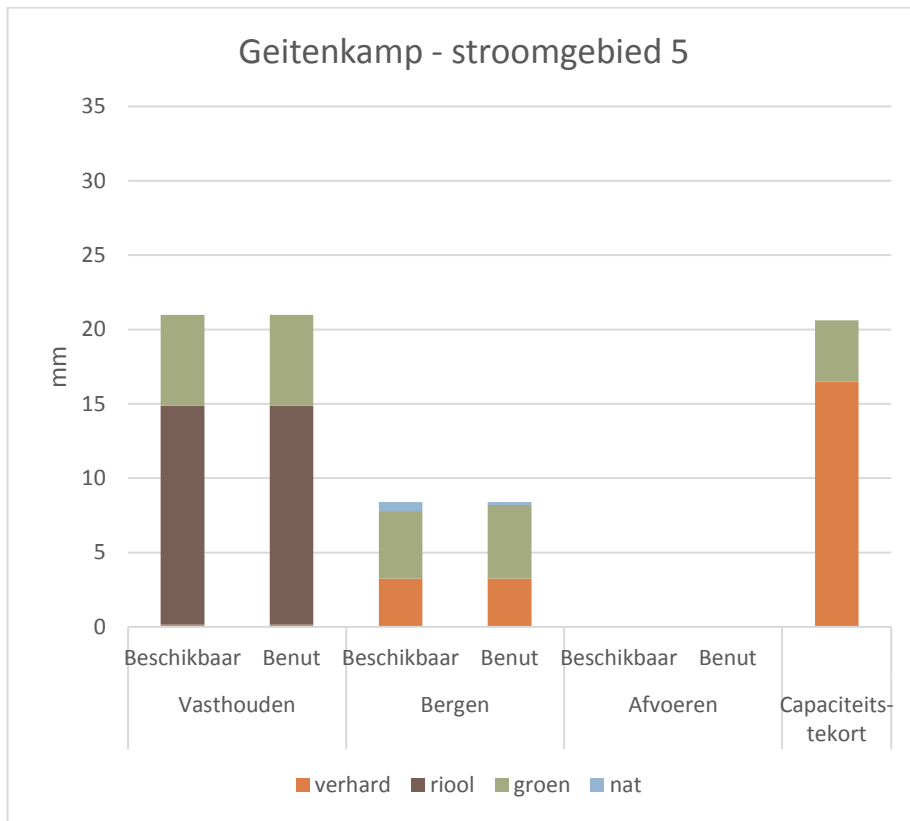
BIJLAGE E: RESULTATEN WATERBALANS



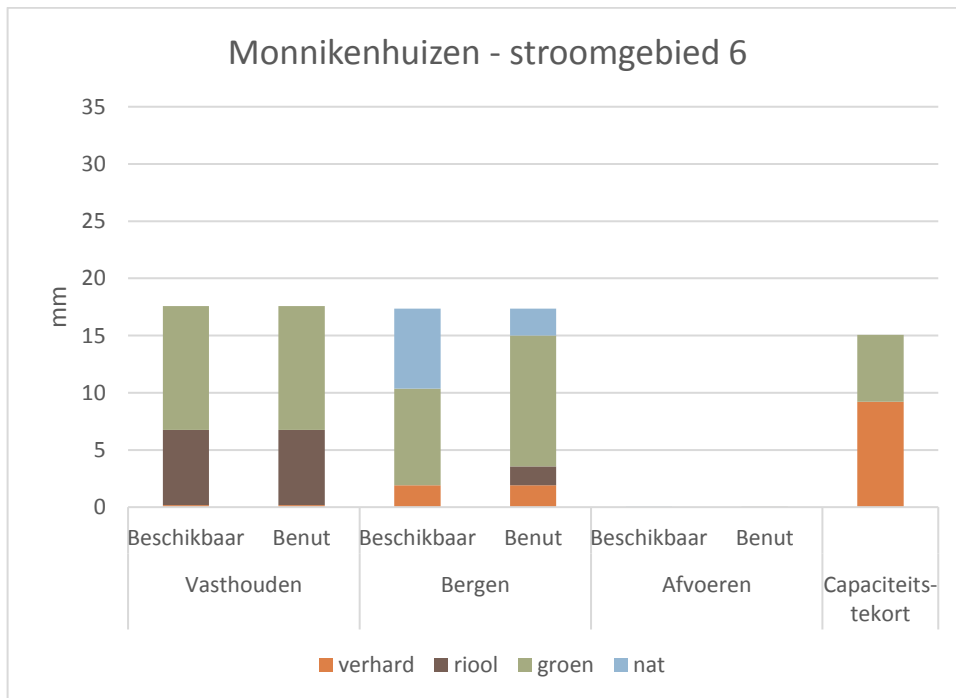
FIGUUR 31: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITETISTEKORT. BUI: 50 MM/H.



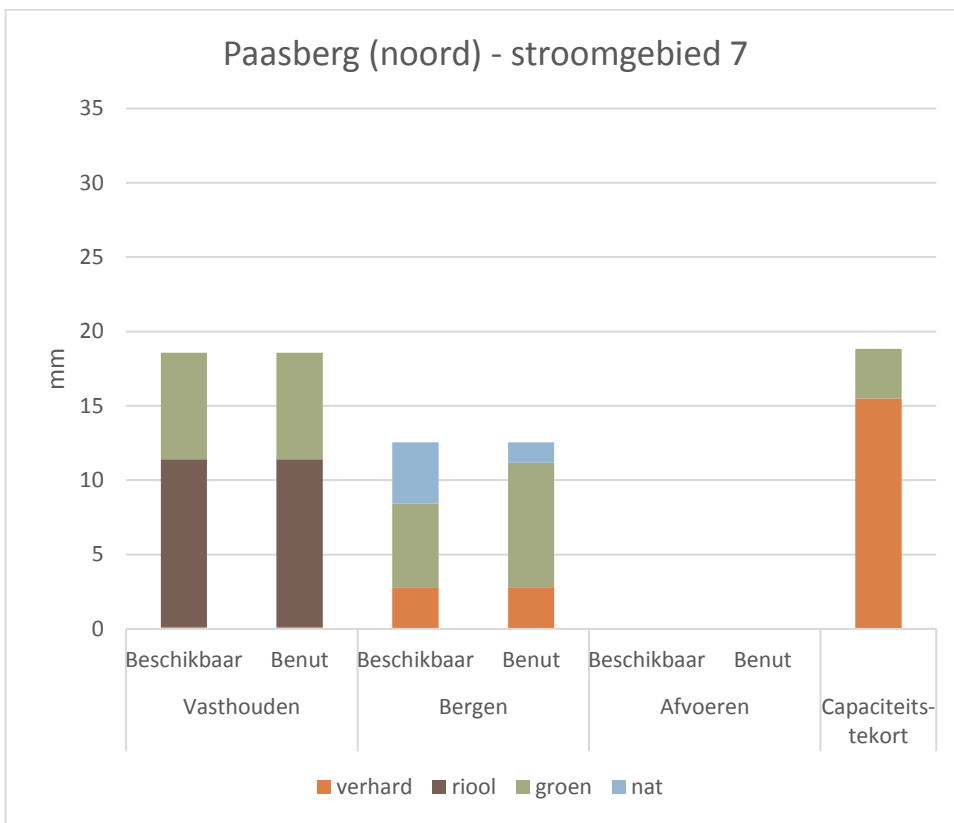
FIGUUR 32: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITETISTEKORT. BUI: 50 MM/H.



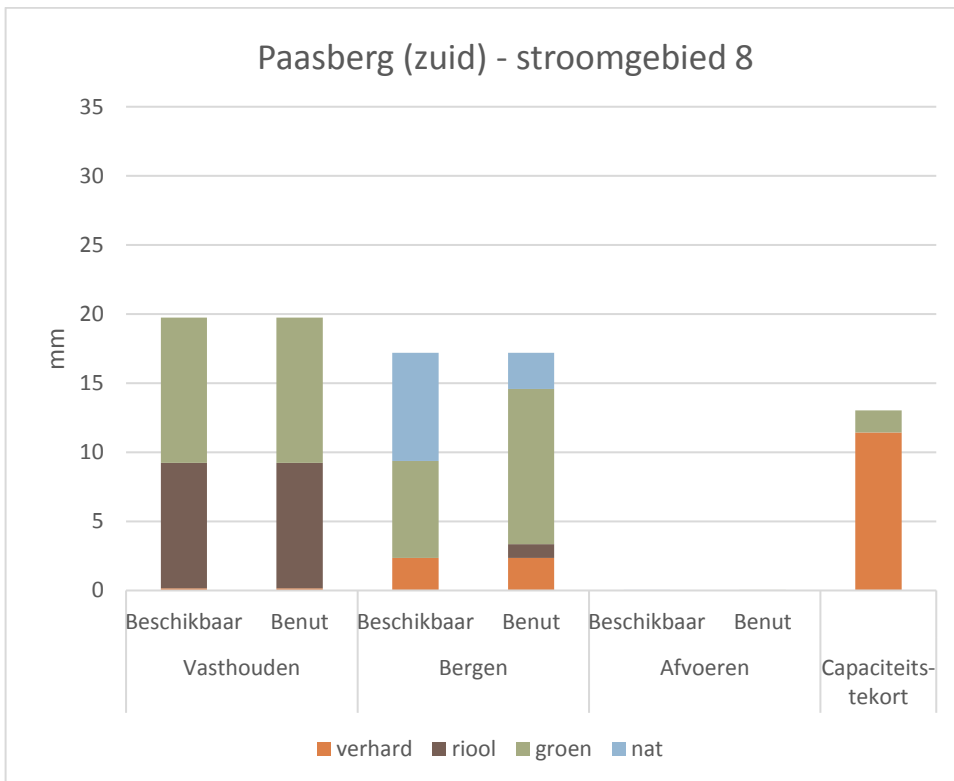
FIGUUR 33: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITETISTEKORT. BUI: 50 MM/H.



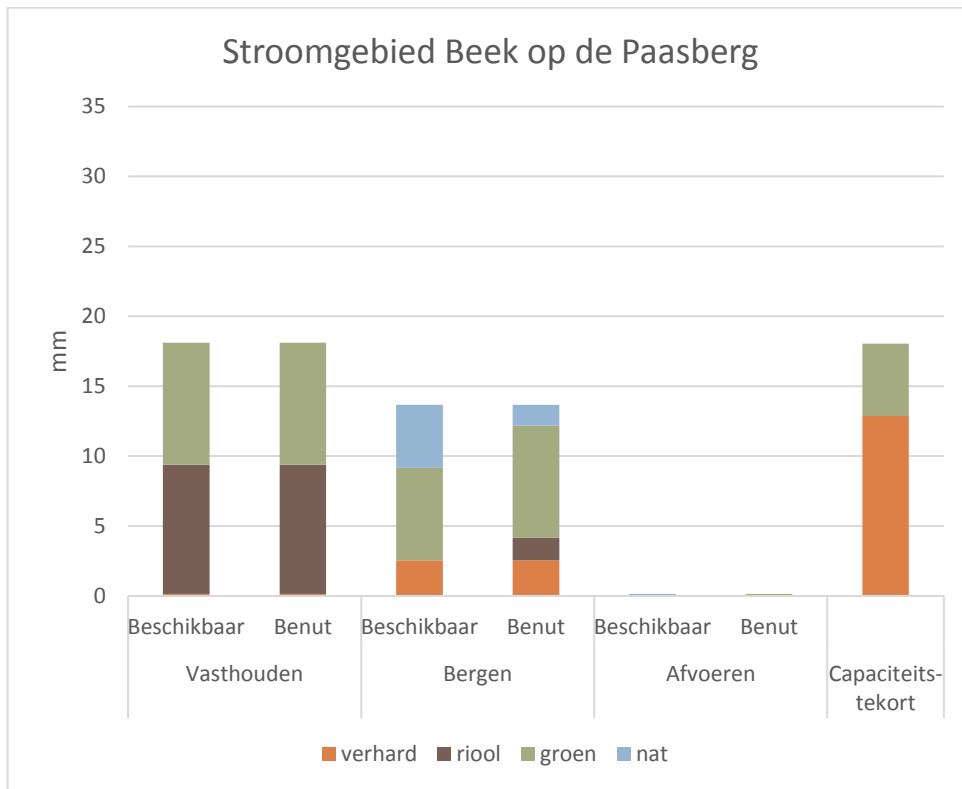
FIGUUR 34: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITETISTEKORT. BUI: 50 MM/H.



FIGUUR 35: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITEITSTEKORT. BUI: 50 MM/H.



FIGUUR 36: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITEITSTEKORT. BUI: 50 MM/H.



FIGUUR 37: OVERZICHT BESCHIKBARE EN BENUTTE CAPACITEIT EN HET CAPACITEITSTEKORT. BUI: 50 MM/H.