

Naar een bestendige stedelijke waterbalans

**Studie van waterbalansveranderingen, gevoeligheid en
maatregelen op wijkniveau**

M. Hoogvliet
J. Buma
R. Brolsma
G. de Lange
H. Landwehr
M. Coenders-Gerrits (TU Delft)
P. Rutten (student TU Delft)
P. Landa (student TU Delft)

1206329-000

Titel

Naar een bestendige stedelijke waterbalans

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1206329-000

Kenmerk

1206329-000-BGS-0013

Pagina's

196

Trefwoorden

Deltaprogramma, stedelijk waterbeheer, klimaatverandering, droogte, watervoorziening, nieuwbouw en herstructurering, grondwateronderlast, adaptatiemaatregelen

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2.0	Apr. 2013	M. Hoogvliet		F. van de Ven		H. Otter	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond en probleembeschrijving	1
1.2	Doel van de studie	2
1.3	Stappenplan	3
1.4	Leeswijzer	3
2	De studiegebieden	5
2.1	Trainingsgebied Prinseneiland Amsterdam	5
2.1.1	Keuze trainingsgebied	5
2.1.2	Historie en landgebruik	7
2.1.3	Ondergrond	10
2.1.4	Watersysteem	12
2.2	Casegebied Rivierenbuurt Amsterdam	14
2.2.1	Keuze casegebied en aandachtspunten Waternet	14
2.2.2	Historie en landgebruik	14
2.2.3	Ondergrond	15
2.2.4	Watersysteem	16
2.3	Casegebied Arnhem-Oost	17
2.3.1	Keuze casegebied en aandachtspunten gemeente Arnhem	17
2.3.2	Algemene gebiedsbeschrijving	18
2.3.3	Ondergrond	20
2.3.4	Watersysteem	21
2.3.5	Afbakening modelgebied	22
3	Waterbalansmodellering	27
3.1	Aanpak algemeen	27
3.2	Beschrijving van het model	29
3.3	Kalibratie en validatie: samenvatting en conclusies	32
3.4	Definitie balanscomponenten	33
3.5	Analyse waterbalans Rivierenbuurt	35
3.5.1	Huidig klimaat en daarin optredende droogtesituaties	35
3.5.2	Deltascenario's	40
3.6	Analyse waterbalans Arnhem-Oost	45
3.6.1	Huidig klimaat en daarin optredende droogtesituaties	45
3.6.2	Deltascenario's	50
4	Gevoeligheid in casegebieden	55
4.1	Aanpak en uitgangspunten	55
4.2	Checklist potentieel gevoelige objecten	55
4.3	Gevoeligheid in Rivierenbuurt	63
4.3.1	Ondergrondkarakteristieken	63
4.3.2	Hitte	67
4.3.3	Bebouwing	69
4.3.4	Infrastructuur	72
4.3.5	Groen	74
4.4	Gevoeligheid in Arnhem-Oost	75
4.4.1	Ondergrondkarakteristieken	75

4.4.2	Hitte	80
4.4.3	Bebouwing	82
4.4.4	Infrastructuur	83
4.4.5	Groen	85
5	Geschikte maatregelen	87
5.1	Aanpak en uitgangspunten	87
5.2	Rivierenbuurt	87
5.2.1	Effectiviteit van vergroten infiltratie hemelwater	88
5.2.2	Effectiviteit van peilopzet oppervlaktewater	95
5.2.3	Aanvoer en infiltratie van oppervlaktewater	97
5.2.4	Kostenafweging	98
5.2.5	Beperken hittestress	102
5.3	Arnhem-Oost	103
5.3.1	Effectiviteit van vergroten infiltratie hemelwater	103
5.3.2	Beperken hittestress	109
5.3.3	Beperken wateroverlast in kelders	110
5.3.4	Beperken wateroverlast op wegen/onderdoorgangen	110
5.3.5	Beperken erosie taluds door extreme neerslag	111
6	Toepassing methodologie in andere wijken	113
6.1	Stappenplan	113
6.2	Ervaringen met het geconstrueerde waterbalansmodel	113
6.3	Leidraad voor gebruik van het waterbalansmodel	114
6.4	Inventariseren van gevoeligheid	115
6.5	Selectie van maatregelen	117
7	Samenvattende conclusies	119
7.1	Het geconstrueerde stedelijke waterbalansmodel	119
7.2	Waterbalans van de casegebieden	121
7.2.1	Rivierenbuurt, huidig klimaat	121
7.2.2	Rivierenbuurt, Deltascenario's	122
7.2.3	Arnhem-Oost, huidig klimaat	123
7.2.4	Arnhem-Oost, Deltascenario's	125
7.3	Gevoeligheid in casegebieden	126
7.3.1	Rivierenbuurt	126
7.3.2	Arnhem-Oost	127
7.4	Maatregelen voor Rivierenbuurt	128
7.5	Maatregelen voor Arnhem-Oost	133
8	Referenties	135
9	Bijlage A: Terminologie	137
10	Bijlage B: Deltascenario's	139
11	Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland en Rivierenbuurt	143
11.1	Beschikbare informatie en metingen	143
11.1.1	Regenmetingen	143
11.1.2	Riolering	144
11.1.3	Landgebruik	144

11.1.4	Grondwaterstanden	144
11.1.5	Potentiële verdamping	145
11.1.6	Drinkwateraanvoer	145
11.2	Te modelleren processen	145
11.2.1	Landgebruiksfuncties	145
11.2.2	Neerslag	147
11.2.3	Interceptieverdamping vanaf bomen	147
11.2.4	Het stedelijk oppervlaktewater	147
11.2.5	De onverzadigde zone	147
11.2.6	Het stedelijk grondwater (de verzadigde zone)	148
11.2.7	Het rioleringssysteem	148
11.3	Invoer modelparameters en datareeksen	148
11.3.1	Interceptieverdamping vanaf bomen	148
11.3.2	Verdamping vanaf het maaiveld	149
11.3.3	Afvoerprocessen op het maaiveld	149
11.3.4	Het stedelijk oppervlaktewater	150
11.3.5	De onverzadigde zone	151
11.3.6	Het stedelijk grondwater	152
11.3.7	Het gescheiden riool	152
11.3.8	Het gemengde riool	153
11.3.9	Data-invoer en visualisatie	153
11.4	Kalibratie Prinseneiland	154
11.4.1	Aanpak en uitgangspunten	154
11.4.1	Resultaten kalibratie	156
11.4.2	Conclusies kalibratie	163
11.4.3	Totaalparameterset Prinseneiland	164
11.5	Validatie Prinseneiland	166
11.6	Validatie Rivierenbuurt	167
12	Bijlage D: Waterbalansmodel Arnhem-Oost	173
12.1	Beschikbare informatie	173
12.2	Beschrijving modelparameters	174
12.2.1	Oppervlakten landgebruiksfuncties	174
12.2.2	Oppervlakte overhang bomen	175
12.2.3	Riolering	176
12.2.4	Neerslag en verdamping	178
12.2.5	Drinkwateraanvoer	179
12.2.6	Beekafvoeren	179
12.2.7	Rivierstanden	181
12.2.8	Grondwaterstanden	181
12.2.9	Geohydrologische parameters	183
12.2.10	Samenvatting parameterwaarden Arnhem-Oost	183
12.3	Validatie Arnhem-Oost	186
13	Bijlage E: Sonderingen Rivierenbuurt	191
14	Bijlage F: Overzicht modelparameters waterbalansmodel	195

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleembeschrijving

In het kader van het Deltaprogramma en klimaatprogramma's is in de afgelopen twee jaar in relatief korte tijd veel informatie verzameld, gegenereerd en gebundeld over de effecten die klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkelingen kunnen hebben in het stedelijk gebied. Op een landelijk en regionaal schaalniveau zijn de mogelijke knelpunten in beeld: we weten in kwalitatieve zin wat we kunnen verwachten. Dit is gerapporteerd in de knelpuntenanalyses die voor het Deltaprogramma zijn uitgevoerd.

In kwantitatieve zin waren er voor de stad echter nog onbekenden. Met betrekking tot het stedelijk waterkwantiteitsbeheer betreft dit vooral:

- Een gebrek aan gegevens over de stedelijke waterbalans en de daarin te verwachten veranderingen
- Gebrek aan (effect- en schade)modellen die het stedelijk systeem goed vatten, zoals die er wel zijn voor de functies landbouw en natuur.

Elke stad heeft bovendien specifieke stedenbouwkundige kenmerken en veelal een heterogeen water- en bodemsysteem, wat modellering en het generaliseren van onderzoeksuitkomsten compliceert. Een resultante van de onbekenden en complexiteit is tevens dat het compenserende effect van maatregelen niet precies is te bepalen. Hierdoor is het lastig, zo niet onmogelijk, om adaptatiestrategieën (een afgepaste set maatregelen) in kwantitatieve zin vorm te geven en te beoordelen.

Bovengenoemde punten zijn niet nieuw. Wat wel nieuw is, is dat we momenteel beter weten hoe ver we kunnen komen met het beantwoorden van vragen over effecten en gevolgen op basis van anno 2011/2012 beschikbare kennis, informatie, databestanden en modellen. Dankzij de knelpuntenanalyses is dit inzicht verworven. Zeker op een landelijk schaalniveau hebben we het punt bereikt waarop we kunnen stellen dat er is uitgehaald wat er uit te halen valt. Er is op dat schaalniveau geen 'laaghangend fruit' meer dat relatief snel kan worden ingebracht in het werkproces van het Deltaprogramma.

Op een regionaal niveau kunnen nog wel stappen worden gemaakt. Kaarten van effecten en kwetsbaarheden kunnen bijvoorbeeld met regionale informatie worden verfijnd. Inzet op kennisverwerving van dit schaalniveau is voor het Deltaprogramma in de huidige programmafase echter niet rendabel. Na de fase van knelpuntenanalyse en met de te nemen deltabeslissingen in het vizier dient namelijk snel de stap te worden gemaakt naar maatregelenselectie en strategievorming.

Het in dit rapport beschreven onderzoek richt zich daarom op de ingrediënten die noodzakelijk zijn voor effectbepaling, gevoeligheidsanalyse, en maatregelenselectie. Dat betekent qua schaal een stap naar de niveaus waarop maatregelenstrategieën binnen een stad veelal moeten worden geselecteerd en ingezet: wijk/woonblok.

1.2 Doel van de studie

Centrale opgave voor het project is het voor twee casewijken (in Amsterdam en Arnhem) inzichtelijk maken van de stedelijke waterbalans, hoe deze verandert onder de Deltascenario's en wat het effect van maatregelen op de waterbalans is, en daarmee op het voorkomen van ongewenste gevolgen van klimaatverandering. Uit de waterbalans kan onder meer het watertekort in de wijken onder de scenario's worden geëxtraheerd.

Gekoppeld hieraan moeten ten behoeve van de vorming van maatregelenstrategieën de volgende vragen worden beantwoord:

- Wat is het compenserende effect van wateraanvoer naar de stad op het grondwatersysteem van de stad gedurende perioden van extreme neerslagtekorten en hoge temperaturen?
- Is het wenselijk hemelwater in de wijk vast te houden? Hoe kan dit worden gedaan? En in hoeverre compenseert dit ongewenste effecten in tijden van neerslagtekorten?

In het antwoord op deze vragen schuilt de afstemming rond strategievorming tussen de deelprogramma's Zoetwater (DPZW) en Nieuwbouw en Herstructurering (DPNH). Het gaat er daarbij om te kunnen bepalen of en hoe in de stad moet worden gereageerd op veranderingen in de wateraanvoer, en vice versa.

De deltaprogramma's werken toe naar zgn. deltabeslissingen. In deze beslissingen worden de in het programma geïdentificeerde opgaven in samenhang geadresseerd.

Deltabeslissing Deelprogramma Zoetwater

Komen tot een strategie voor duurzame zoetwatervoorziening:

- geeft inzicht in vraag en aanbod van zoetwater en de waterzekerheid
- doet uitspraken over de mogelijkheden voor waterbesparing, de optimale waterverdeling en toekomstig serviceniveau in relatie tot functies en de effecten daarvan voor die functies
- maakt de verdeling van verantwoordelijkheden tussen overheid, markt en gebruiker duidelijk.

Deltabeslissing Deelprogramma Nieuwbouw en Herstructurering

De manier waarop steden en dorpen in ruimtelijke ontwikkelingen met water rekening moeten en kunnen houden. Doel is afwenteling van kosten en problemen – nu en in de toekomst – te voorkomen door duidelijkheid te bieden over de inzet van onder meer ruimtelijke ordening.

Een additioneel doel is dat het met behulp van de studieresultaten mogelijk moet zijn uitspraken te gaan doen over de situatie in andere wijken, in andere steden. Dat kan niet door kwantitatieve waterbalansresultaten simpelweg representatief te stellen voor andere wijken of steden. Alle steden en wijken hebben immers specifieke kenmerken, zowel qua watersysteem, blootstelling aan effecten als qua gevoeligheid van functies.

Wel overdraagbaar zijn de in dit project ontwikkelde methodiek om de waterbalans en gevoeligheid te analyseren, en maatregelen te selecteren. De opzet van de methodiek en de opzet en inhoud van dit rapport zijn op deze overdracht afgestemd. De twee wijken fungeren daartoe als voorbeeldcases, als referenties voor vergelijkbare analyses van wijken elders. In dit rapport worden daarom niet alleen de uitkomsten voor de voorbeeld cases beschreven,

maar wordt ook aangegeven waarop moet worden gelet bij een vergelijkbare analyse voor andere wijken.

1.3 Stappenplan

De doelstelling is bereikt door voor verschillende typen stadswijken achtereenvolgens de volgende stappen te doorlopen:

A) Inzichtelijk maken van huidige en toekomstige waterbalans

- Relevante gebiedskenmerken analyseren: historie, landgebruik, ondergrond en watersysteemkenmerken.
- Waterbalansmodel bouwen.
- Waterbalans kwantificeren voor huidige situatie.
- Veranderingen in waterbalans kwantificeren onder Deltascenario's, voor een gemiddelde situatie, droge situatie (1/10) en een extreme droogtesituatie (1/100 jaar) in 2050.

B) Inzichtelijk maken van gevoeligheid wijk

- Analyse van gevoeligheid van groen, bebouwing en infrastructuur. Het gaat om de gevoeligheid voor schademechanismen die gerelateerd zijn aan constructiekenmerken en de gemodelleerde veranderingen in waterbalanscomponenten (bijv. een daling van de grondwaterstand).
- Aanduiden van de voornaamste gevoeligheden in de wijk o.b.v. de relatieve omvang mogelijke schades en beheerkosten.

C) Selectie van maatregelen voor de wijk

- Selectie van in de wijk toepasbare maatregelen die de blootstelling aan veranderingen in de waterbalanscomponenten verminderen en daarmee schademechanismen tegengaan.
- Compenserend effect van maatregelen op ongewenste waterbalansveranderingen ramen.
- Inventariseren van informatie over realisatiekosten van maatregelen.

Input voor bovenstaande onderdelen ligt niet bij steden op de plank. De antwoorden moeten in samenwerking met lokale partijen (gemeente, waterschap) worden gevonden, berekend en beoordeeld.

1.4 Leeswijzer

De voorbereiding van de studie bestond uit de selectie van representatieve, karakteristieke casegebieden. Hiervan wordt verslag gedaan in hoofdstuk 2. Dit hoofdstuk bevat ook een beschrijving van de historie, opbouw en het landgebruik van de casegebieden. Deze informatie is van groot belang voor het bepalen van de set (geo)hydrologische parameters die in het waterbalansmodel moet worden beschouwd en de toe te kennen waarden van (geo)hydrologische constanten. Bovendien is deze informatie noodzakelijk om uitkomsten van het balansmodel te kunnen evalueren.

Een voorname doelgroep van deze rapportage bestaat uit waterbeheerders (hydrologen) die een vergelijkbare aanpak willen volgen bij het analyseren van hun stedelijke waterbalans, de

veranderingen daarin als gevolg van klimaatverandering en de toepassing van maatregelen. Het rapport beschrijft daarom uitgebreid de opbouw van het model en de toepassing van het model op de casegebieden (hoofdstuk 3). Details, zoals de toegepaste formules en gemodelleerde parameters, zijn opgenomen in bijlage C en bijlage D. Deze informatie is essentieel voor de verantwoording en de reproductie van de ontwikkelde methodiek in vergelijkbare modelleertrajecten, voor andere wijken. Als hulpmiddel daartoe wordt in hoofdstuk 6 beschreven hoe zo'n modelleertraject kan worden aangepakt, en hoe dit rapport daarbij behulpzaam is.

De waterbalansmodellering wordt uitgevoerd om te leren hoe een gebied functioneert onder de huidige omstandigheden (klimaat, watersysteemkenmerken) en hoe dit verandert wanneer het klimaat wijzigt en/of de watersysteemkenmerken worden aangepast. De uitkomsten hiervan voor de casegebieden zijn opgenomen in paragrafen 3.4 en 3.5. Een toelichting op de toegepaste Deltascenario's is verwerkt in bijlage B. Gebruikte begrippen, en de relatie tussen begrippen, worden uitgelegd in bijlage A. Definities van veelvuldig gebruikte hydrologische termen zijn opgenomen in paragraaf 3.4.1.

Naast inzicht in de te verwachten veranderingen in de waterbalans, is het minstens zo belangrijk om te weten of de functies en objecten in het gebied sowieso gevoelig zijn voor klimaateffecten. Deze analyse wordt beschreven in hoofdstuk 4. Er is gekeken naar de gevoeligheid van de casegebieden voor hitte en de gevoeligheid van de in de casegebieden aanwezige bebouwing, infrastructuur en het groen.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 alle verworven kennis gecombineerd om te komen tot een selectie van maatregelen. Voor enkele prominente maatregelen is het effect daarvan gekwantificeerd met het balansmodel.

Hoofdstuk 7 ten slotte, bevat een overzichtelijke samenvatting van de conclusies uit de voorgaande hoofdstukken. Tevens worden in dit hoofdstuk de ervaringen met de ontwikkeling en toepassing van het waterbalansmodel geëvalueerd. De inhoud van dit hoofdstuk is afgestemd op het beantwoorden van de kernvragen die de aanleiding voor deze studie vormden.

2 De studiegebieden

Om de vragen te kunnen beantwoorden is de aandacht gefocust op twee steden die elk een karakteristiek deel van Nederland vertegenwoordigen:

- Amsterdam (Laag Nederland)
- Arnhem (Hoog Nederland en Rivierengebied).

Bij de start van het project is de beoogde aanpak afgestemd met de twee gemeenten en waterschappen (Waternet, gemeente Arnhem en Waterschap Rijn en IJssel). Doordat de gemeenten en waterschappen een partner in het project vormen, is er rekening mee gehouden dat zij specifieke wensen hebben t.a.v. de op te leveren resultaten.

Het onderzoek richtte zich niet op de steden als geheel. In overleg met de gemeenten zijn representatieve wijken/woonblokken geselecteerd die kenmerkend zijn voor de stad, geschikt leken voor het onderzoek en waarvoor tevens al informatie beschikbaar was.

Het waterbalansmodel is gebouwd o.b.v. de kenmerken van een zgn. trainingsgebied in Amsterdam. De keuze van dit gebied wordt in de navolgende paragraaf toegelicht. Daarop volgend worden de kenmerken beschreven van de twee gebieden die met het model zijn geanalyseerd en waarvoor gevoeligheden en mogelijke maatregelen zijn onderzocht.

2.1 Trainingsgebied Prinseneiland Amsterdam

2.1.1 Keuze trainingsgebied

Een 'trainingsgebied' is het gebied dat wordt gebruikt bij de bouw van een model. Over zo'n gebied zijn velerlei kenmerken bekend, zodat kan worden bepaald welke parameters in de modellering van belang zijn. Tevens worden metingen uit het gebied gebruikt bij het kalibreren van het model: de modelresultaten moeten de in werkelijkheid gemeten waarden zoveel mogelijk benaderen. Het werkende model kan vervolgens worden toegepast op wijken waarvoor minder data beschikbaar is.

De keuze van het trainingsgebied in Amsterdam is samen met Waternet gemaakt. Daarbij zijn verschillende stadsdelen beschouwd op stedenbouwkundige kenmerken en geschiktheid voor een waterbalansonderzoek. In eerste instantie is gekeken naar de Rivierenbuurt. De hemelwaterafvoer in deze buurt bleek echter dermate complex, dat geen goede metingen zouden kunnen worden verricht. Vervolgens is de naastgelegen Stadionbuurt beschouwd.

De Stadionbuurt heeft deels een gescheiden rioolstelsel en deels een gemengd stelsel. De hemelwaterafvoer van het gescheiden stelsel is op meerdere locaties aangesloten op het oppervlaktewater. Door die vele aansluitingen is het lastig om in dat deel van de wijk de afvoer van het hemelwater te kwantificeren. Het deel met het gemengde stelsel leek in eerste instantie wel geschikt, maar bij nader onderzoek van het watersysteem bleken er kostbare aanpassingen aan het rioolsysteem te moeten worden gedaan om de afvoer daarvan meetbaar te maken. Ook de Stadionbuurt viel hierdoor af.

In een scan van de stad door hydrologen en beheerders van Waternet is vervolgens het Prinseneiland als meest geschikte locatie uit de bus gekomen. De criteria die verband

houden met het kunnen uitvoeren van een waterbalansonderzoek (metingen van alle componenten in de balans) zijn daarbij het meest bepalend geweest. Een nadeel van deze buurt is de geringere omvang en het gebrek aan aaneengesloten stukken openbaar groen (parken). Dit vermindert de representativiteit van het landgebruik in de wijk voor andere wijken in Amsterdam en voor andere steden.

Kernpunten in afweging keuze trainingsgebied:

Rivierenbuurt

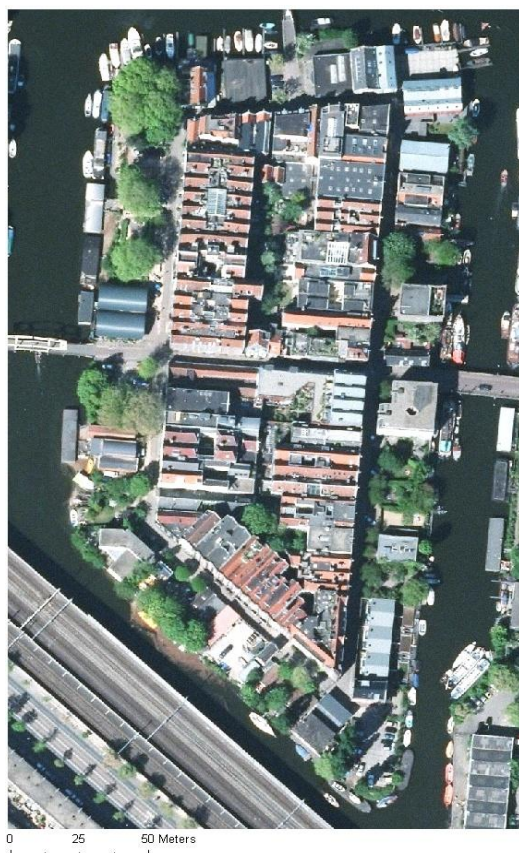
De Rivierenbuurt heeft gedeeltelijk een gescheiden stelsel en gedeeltelijk een gemengd stelsel. Het gemengde stelsel is het laatste decennium aangepast en verbeterd. De afvoersystemen in het gescheiden stelsel verkeren momenteel in een matig tot slechte staat en functioneren momenteel gedeeltelijk ook als drain. Het is daardoor niet mogelijk om een door metingen gevalideerde, sluitende waterbalans op te stellen voor dit gebied.

Stadionbuurt

In een deel van de Stadionbuurt blijkt het onmogelijk om zonder aanzienlijke kosten (circa €40.000,-) de afvoer in het gemengd stelsel te meten. Daarbij bleek ook nog dat het over een langere periode meten van de afvoer (lees afsluiten/afknijpen) in het stelsel capaciteitsproblemen zou opleveren. Geconcludeerd is dat de afvoer van het (lekke) riool in de Stadionbuurt niet nauwkeurig genoeg kan worden gemeten, en daardoor geen sluitende waterbalans kan worden opgesteld.

Prinseneiland

Prinseneiland is een relatief klein gebied (circa 275m * 125m) omringd met water op boezempeil en heeft een recent (1988) aangelegd gemengd stelsel met een modern gemaal waarin op eenvoudige wijze de afvoer van het stelsel kan worden bepaald. Het stelsel is in 2005 geïnspecteerd. Relevante lekkage kan worden uitgesloten. Er is door Waternet geen drainage aangelegd. Doordat alle voor een waterbalans relevante componenten voor dit gebied kunnen worden gemeten of afgeleid uit beschikbare data, is het gebied geschikt als testcase voor de opbouw van een waterbalansmodel. Het model kan met behulp van de metingen en data van Prinseneiland worden gekalibreerd en uitkomsten kunnen worden gevalideerd.



Figuur 2.1 Luchtfoto van het Prinseneiland, genomen in 2011.

2.1.2 Historie en landgebruik

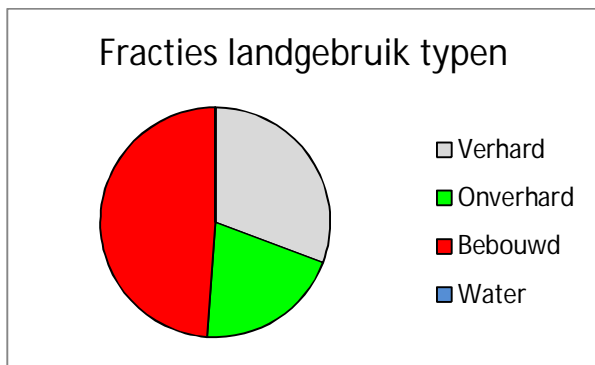
Het Prinseneiland ligt in het noordwesten van het historische centrum van Amsterdam, ten zuiden van het IJ en ten noorden van de spoorlijn Amsterdam Centraal - Zaandam. Het eiland wordt in het noorden begrensd door de Realengracht, in het oosten door de Bickersgracht, in het zuiden door de Eilandsgracht en in het westen door de Prinseneilandsgracht. Het Prinseneiland behoort samen met het Bickerseiland en het Realeneiland tot de Westelijke Eilanden.

De Westelijke Eilanden zijn in de zeventiende eeuw ontstaan, doordat stukken losgeslagen veen in de hoek van het IJ zijn aangeplempt en opgehoogd. Het ophogen gebeurde met veen en klei, dat vrijkwam bij het graven van de omliggende grachten. Onder de wegen is zand met puin aangebracht om de grondkarakteristieken van de wegcunetten te verbeteren.

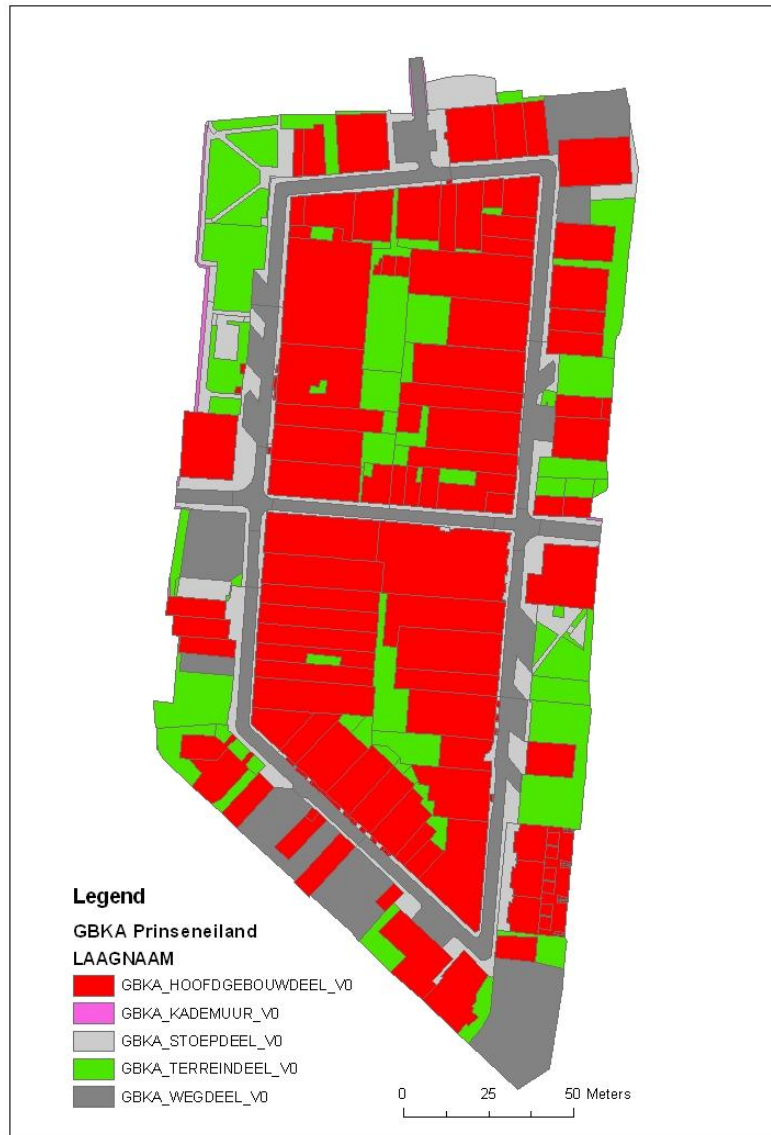
Na het ophogen werd het Prinseneiland eigendom van onder andere de West Indische Compagnie, die er scheepswerven en pakhuizen bestemd voor de opslag van hout en teer vestigde. Tot na de Tweede Wereldoorlog werd het eiland nauwelijks bewoond. Nu zijn de pakhuizen en overige gebouwen bewoond of verhuurd aan kleine bedrijven. Door de nabijheid van de spoorlijn naar het Centraal Station is het Prinseneiland een centraal gelegen, maar rustige woon- en werkbuilt.

In het midden van het eiland staan twee blokken met bebouwing. Deze bebouwing bestaat deels uit de pakhuizen uit de zeventiende eeuw en deels uit nieuwe(re) gebouwen. Aan de randen van het eiland zijn de scheepswerven vervangen door tuinen en een mix van laagbouw en enkele hogere gebouwen. Ten westen van het eiland liggen enkele woonboten aangemeerd aan de kade.

Ongeveer 49% van het oppervlak van het hele Prinseneiland bestaat uit bebouwing. 30% is verhard oppervlak, waarvan 17% wegoppervlak en 13% trottoir. Zowel de weg als de stoep is bestraat met klinkers. 20% van het oppervlak is onverhard. Het onverharde oppervlak bestaat uit tuinen, perkjes, parkeerplaatsen verhard met losse steentjes en een plantsoen. Ongeveer 8.5% van het oppervlak van het Prinseneiland wordt overhangen door de kruinen van bomen.



Figuur 2.2 Relatieve verdeling landgebruik typen Prinseneiland



Figuur 2.3 Verdeling verhard/onverhard/bebouwd terrein Prinseneiland o.b.v. Grootschalige Basiskaart Amsterdam.

2.1.3 Ondergrond

De opbouw van de ondergrond van het Prinseneiland is door de eeuwen heen door menselijk ingrijpen en door de werking van het IJ lokaal sterk veranderd. De ondergrond kan daardoor lokaal grote verschillen in opbouw vertonen. Door de grote mate van heterogeniteit vormt de navolgende beschrijving een weerspiegeling van de algemene opbouw van de ondergrond. Lokale afwijkingen worden buiten beschouwing gelaten vanwege het relatief kleine effect op de waterbalansmodellering.

Ophoogmateriaal

De bovenste laag van de ondergrond van het Prinseneiland wordt gevormd door het ophoogmateriaal. Dit materiaal bestaat voornamelijk uit veen en klei, dat vrijkwam bij het uitgraven van de omliggende grachten. Onder de wegen is (een deel van) deze laag verwijderd en vervangen door zand met puin. Lokaal worden in de ophooglaag ook houtresten gevonden.

Jonge zeeklei

De laag daaronder bestaat uit jonge zeeklei. Deze kleilaag is lokaal licht veenhoudend en/of bevat veenlaagjes. De bovenkant van de laag ligt tussen de 2 en 3.5 meter beneden NAP.

Hollandveen

Onder de jonge zeeklei ligt een laag met Hollandveen. Deze laag bevat lokaal klei. De laag begint op een diepte van 3 tot 4 meter beneden NAP.

Oude zeeklei

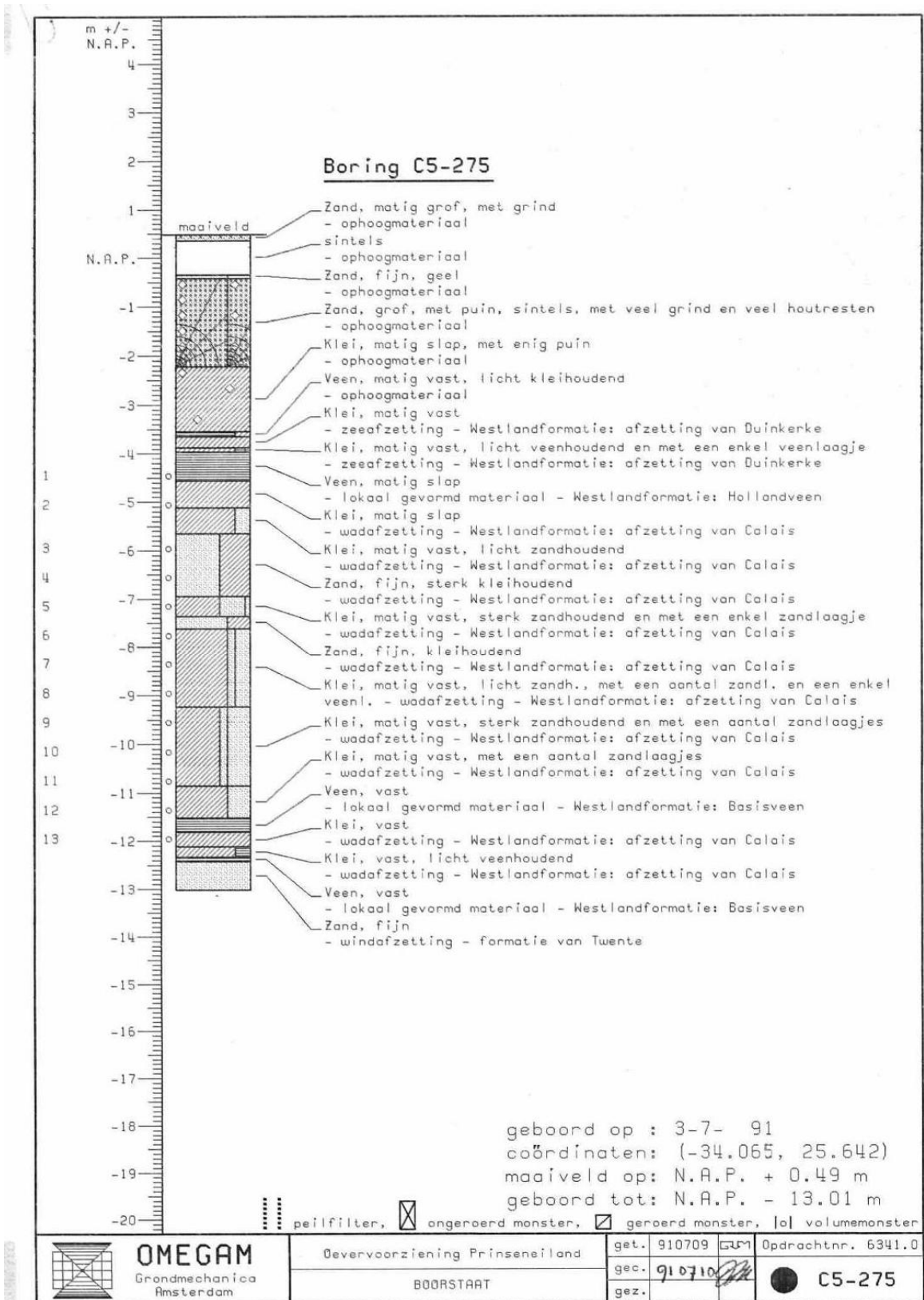
Onder het Hollandveen ligt de oude zeeklei. Lokaal is deze laag zandhoudend en/of veenhoudend. Er zijn ook schelpresten aanwezig in deze laag. Door het wandelen van de getijgeul van het IJ door de eeuwen heen, zijn delen van deze laag vervangen door één of meerdere lagen zand (getijgeulafzettingen). Dit heeft vooral plaatsgevonden in het oosten van het eiland. De bovenkant van de kleilaag ligt tussen de 4.5 en 5 meter beneden NAP. De getijgeulafzettingen beginnen op een diepte van 5.5 tot 6.5 meter beneden NAP.

Basisveen

De laag daaronder is het basisveen. Deze laag is over het hele gebied relatief dun (maximaal 30 cm.) In het oosten van het eiland is deze laag matig tot sterk vermengd met (getijgeul)zand door de werking van het IJ. De bovenkant van deze laag begint op een diepte van 12.5 meter beneden NAP.

Pleistoceen zand

Onder het basisveen ligt het Pleistoceen zandpakket. Deze grondlaag begint op een diepte van 12.5 tot 13.5 meter beneden NAP.



Figuur 2.4 Boorstaat van de ondergrond in het zuiden van het Prinseneiland

Tabel 2.1 Karakteristieken van de grondlagen onder het Prinseneiland

Grondlaag	Grondsoort(en)	Diepte top laag
Ophoogmateriaal	(lokaal teelaarde, zand met puin en houtresten), klei, veen	Maaiveld
Jonge zeeklei	Klei lokaal licht veenhoudend of met veenlaagjes	2 - 3.5m - NAP
Hollandveen	Veen lokaal kleihoudend	3 - 4 m - NAP
Oude zeeklei	Klei, lokaal zandhoudend, veenhoudend, met schelpresten. Lokaal vervangen door getijgeulafzettingen (zand)	4.5 - 5 - NAP
Basisveen	Veen	12.5 m - NAP
Pleistoceen zand	Zand	12.5 - 13.5 m - NAP

2.1.4 Watersysteem

Bij de analyse van het watersysteem van het Prinseneiland is onderscheid gemaakt naar bronnen, afvoer, (tijdelijke) berging van water en de optredende fluxen. Het watersysteem kan verder worden onderverdeeld in natuurlijke en kunstmatige componenten.

Bronnen van water

De bronnen van het water in/op het Prinseneiland bestaan uit de neerslag op en de aanvoer van drinkwater naar het gebied. Het grootste deel van de aanvoer van het drinkwater wordt door de bewoners gebruikt. Een klein deel van de aanvoer echter, vult door lekkages in het distributiesysteem het grondwater aan. Het aandeel lekkage op het aangevoerde drinkwater voor heel Amsterdam wordt geschat op 3%. Het aandeel lekkage op de wateraanvoer naar het Prinseneiland is niet bekend, maar zal gezien de relatief recente aanleg lager dan gemiddeld zijn.

Afvoer van water

De afvoer van water uit het gebied vindt plaats op zowel natuurlijke als kunstmatige wijze. De natuurlijke afwatering bestaat uit verdamping, stroming van grondwater naar de omliggende grachten en kwel naar diepere grondlagen. De kunstmatige afvoer vindt plaats door middel van de riolering. In het gebied is geen drainage aangelegd.

Verdamping

Bij verdamping van water uit het gebied kan onderscheid worden gemaakt tussen interceptie, plasverliezen en transpiratie. Interceptie bestaat uit neerslag dat op begroeiing in het gebied is gevallen en daar op is achter gebleven. Plasverliezen bestaan uit water dat in laagten in het terrein is achtergebleven. Dit achtergebleven water verdampt vervolgens zonder deel te hebben genomen aan andere processen in het gebied. Transpiratie bestaat uit water dat in de onverzadigde zone is doorgedrongen en via planten verdampt. Door het kleine aandeel beplant gebied op het Prinseneiland is deze term minder belangrijk dan in landelijk gebied.

Stroming naar gracht

Grondwaterstandmetingen verspreid over het Prinseneiland laten zien dat het grondwaterpeil op het eiland tijdens de hele meetperiode (1994 - nu) hoger ligt dan het oppervlaktewaterpeil. Hierdoor vindt er stroming van grondwater naar de grachten plaats. Deze stroming is groot genoeg om het grondwater op het eiland zonder extra drainerende werken binnen de gestelde grenzen te houden.

Neerwaartse kwel

De stijghoogte in het freatische grondwater is ongeveer anderhalve meter hoger dan de stijghoogte van het grondwater in het pleistoceen zandpakket. Hierdoor treedt een neerwaartse stroming naar het pleistoceen zandpakket op. Deze stroming wordt ernstig beperkt door de grote dikte van de tussenliggende veen- en kleilagen. Over een langere periode heeft deze component echter een substantieel aandeel in de waterbalans.

Riolering

De riolering van het Prinseneiland voert zowel het afvalwater van de bewoners als de neerslag dat op het bebouwde en verharde oppervlak valt naar de waterzuivering af. De hoeveelheid afvalwater is ongeveer gelijk aan de hoeveelheid drinkwater dat de bewoners gebruiken.

De neerslag op het bebouwde oppervlak wordt bijna volledig door de riolering afgevoerd. De afvoer vanaf het verharde oppervlak is minder dan de neerslag op het oppervlak, doordat water door de spleten tussen de elementverharding de grond in kan infiltreren. Het aandeel van de infiltratie op de waterbalans hangt onder meer af van de neerslag intensiteit, de helling en 'doorlatendheid' van het verharde oppervlak en de karakteristieken van de ondergrond. Water dat eenmaal geïnfiltrerd is, heeft een grote kans in de grond te blijven doordat de elementverharding werkt als een barrière tegen verdamping.

Tijdens hevige regenval hebben het pompgemaal en de berging van het rioolstelsel niet genoeg capaciteit om de instroom van water te verwerken. Om te voorkomen dat rioolwater op straat komt te staan of de huizen in stroomt, is er een noodoverstort in het noorden van het eiland geplaatst. Deze noodoverstort lost water dat niet verwerkt kan worden door het rioolstelsel op de Realengracht.

Berging van water

Op het eiland vindt niet alleen stroming van water plaats, maar ook berging. Deze berging kan zowel kortstondig als langdurig zijn. De kortstondige opslag van water vindt plaats door de vorming van plassen op straten, daken en het onverharde oppervlak. Ook vindt er tijdelijke opslag plaats in het rioleringsstelsel, doordat het pompgemaal het water in het stelsel niet altijd meteen weg kan pompen. De retentietijd van de kortstondige berging is in de orde grootte van een dag.

Langdurige berging vindt plaats in de onverzadigde en verzadigde zone in de ondergrond. Het merendeel van het water in de onverzadigde zone stroomt in de loop der tijd naar de verzadigde zone of wordt opzogen door plantenwortels. Hierdoor is de retentietijd van de onverzadigde zone in de orde grootte van dagen tot maanden.

Het water in de verzadigde zone wordt over het algemeen langer geborgen, doordat er minder stroming en een grotere berging is dan in de onverzadigde zone. Hierdoor heeft het grondwater een bufferende werking. De retentietijd van de verzadigde zone heeft een orde grootte van maanden tot jaren.

2.2 Casegebied Rivierenbuurt Amsterdam

2.2.1 Keuze casegebied en aandachtspunten Waternet

Hoewel de Rivierenbuurt niet geschikt is als trainingsgebied, maakt de problematiek die hier speelt de buurt wel zeer interessant als casegebied. Het is een buurt die onder meer gevoelig is voor kleine veranderingen in de grondwaterstand. Zowel iets hogere als iets lagere grondwaterstanden kunnen leiden tot overlast of schades. Bovendien is het een gebied met een representatieve oppervlakteverhouding tussen groen, verhard, bebouwd en onverhard terrein. Bijkomend punt is dat Waternet voornemens is te onderzoeken hoe de buurt klimaatproof kan worden gemaakt. In dat kader heeft Waternet aangegeven geïnteresseerd te zijn in:

- Mate van grondwateraanvulling door neerslag
- Verdeling van neerslag op daken over riool, bodeminfiltratie, verdamping
- Interactie grondwaterpeil – oppervlaktewaterpeil.

Een doel van Waternet is om de uitkomsten van voorliggend onderzoek te kunnen aanwenden bij het verbeteren van haar eigen modelschematisaties.

Waternet wil een gebiedsdekkend en actueel inzicht creëren in de grondwatersituatie en in de opbouw en gebruik van de ondergrond. Ook wordt er onderzoek gedaan naar maatregelen om grondwaterfluctuaties op te vangen als gevolg van klimaatverandering. Hiervoor is een inventarisatie van bestaande grondwaterproblemen, analyse van funderingsgegevens en grondwatermonitoring en optimalisatie van het grondwatermeetnet gepland.

2.2.2 Historie en landgebruik

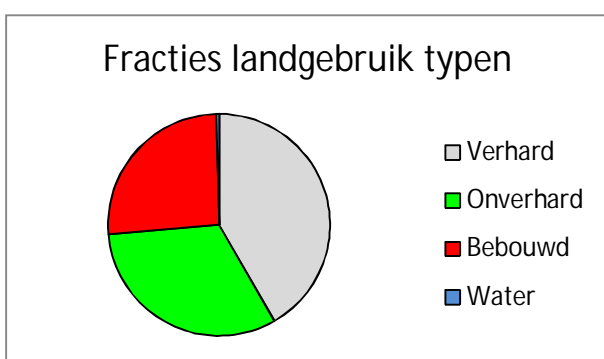
De Rivierenbuurt in Amsterdam-Zuid maakt deel uit van Plan-Zuid van H.P. Berlage en richtte zich op de middenklasse. De Rivierenbuurt is in de jaren twintig en dertig van de 20e eeuw gebouwd. De straatnamen in de buurt werden vernoemd naar Nederlandse rivieren. In de Rivierenbuurt is veel bebouwing te vinden in de stijl van de Amsterdamse School.

De Rivierenbuurt wordt grotendeels omsloten door oppervlaktewater dat een peil heeft dat gelijk is als dat van de Amstel (NAP - 0,4 m). In het zuidwesten ontbreekt oppervlaktewater, waardoor de hydrologische afbakening van het gebied minder duidelijk is. Het RAI terrein is niet in het modelgebied betrokken.



Figuur 2.5 Gebied- en modelgrens Rivierenbuurt.

Ongeveer 26% van het oppervlak van de Rivierenbuurt bestaat uit bebouwing. 42% is verhard oppervlak. 32% van het oppervlak is onverhard.



Figuur 2.6 Relatieve verdeling landgebruik typen Rivierenbuurt.

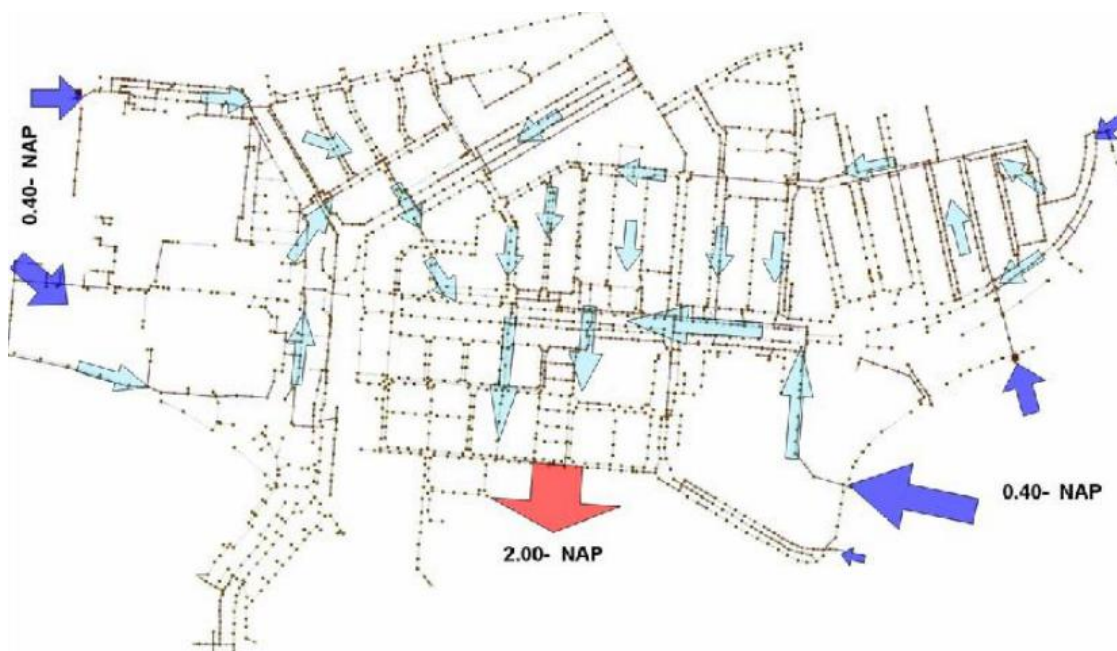
2.2.3 Ondergrond

Integrale ophoging (bij nieuwbouw) door de gemeente vond pas plaats na de invoering van het erfpachtstelsel in 1896. Aanvankelijk gebeurde dit met baggerspecie, zoals in de Vogelbuurt en de Van der Pekbuurt, maar vanaf circa 1925 werd, voor onder andere de aanleg van de Rivierenbuurt, schoon zand zonder klei en slib gebruikt.

Een nadere beschrijving van ondergrondkarakteristieken, in het licht van de gevoeligheid van de buurt voor schademechanismen, is opgenomen in paragraaf 4.3.1.

2.2.4 Watersysteem

De Rivierenbuurt kent een gedifferentieerd grondwatersysteem. Binnen en net buiten de wijk zijn grote verschillen in stijghoogtes waargenomen, die zorgen dat het water overwegend naar het zuiden stroomt. Aan de randen van het gebied ligt de grondwaterstand rond het peil van het oppervlaktewater. Ook in het midden van de buurt ligt de grondwaterstand overwegend op het peil van het omringend oppervlaktewater, maar daalt deze gedurende de zomer.



Figuur 2.7 Overheersende stromingsrichting grond en oppervlaktewater in Rivierenbuurt. Oppervlaktewaterpeil rondom buurt is 0,4m-NAP. Stijghoogte eerste watervoerend pakket in zuiden is circa 2m-NAP (bron: Waternet)

Binnen de wijk zijn micro grondwatersystemen aanwezig, o.a. doordat lekke riolen drainerend werken. Waternet heeft al geconstateerd dat voor een exacte analyse van risicovolle gebieden in de wijk een gedetailleerde waterbalans nodig is. De gedifferentieerdheid van het grondwatersysteem maakt dit echter moeilijk. Daardoor is het lastig om maatregelen te selecteren en dimensioneren voor het klimaatbestendig maken van de wijk.

De Rivierenbuurt heeft gedeeltelijk een gescheiden rioolstelsel en gedeeltelijk een gemengd rioolstelsel. In het Noorden van de buurt is een gemengd en verbeterd gemengd rioolstelsel aanwezig. Dit systeem voert af onder vrij verval naar het gebied ten noorden van de buurt. In het Zuiden ligt een gescheiden rioolstelsel. Het gemengde stelsel is het laatste decennium aangepast en verbeterd. De afvoersystemen in het gescheiden stelsel verkeren momenteel in een matig tot slechte staat en functioneren momenteel gedeeltelijk ook als drain.

De stijghoogte in het eerste watervoerend pakket onder de wijk bedraagt 3 meter onder NAP. Daardoor vindt overwegend infiltratie richting dit pakket plaats.

Voor de modellering is aangenomen dat 50% van de rioolafvoer via het gemengd stelsel plaatsvindt en 50% via het gescheiden stelsel.

Er is geen informatie over de lekkage vanuit drinkwaterleidingen. Er is aangenomen dat deze vergelijkbaar is met die op het Prinseneiland: 1%.

2.3 Casegebied Arnhem-Oost

2.3.1 Keuze casegebied en aandachtspunten gemeente Arnhem

Arnhem is als case stad geselecteerd vanwege de ligging op de hoge zandgronden en aan een rivier. Dergelijke gebieden kennen specifieke problemen. Het gaat niet alleen om problemen in de hogere delen, maar ook om de knelpunten die ontstaan door de interactie tussen hoog- en laag gelegen gebied. Daarom is gekozen voor een gebied dat zowel hoog als laag gelegen buurten omvat en het laag gelegen deel bovendien wordt beïnvloed door rivierwaterstanden: Arnhem-Oost. In feite kent dit gehele gebied dus drie aandachtzones: de hogere gelegen zandgronden, de laag gelegen kleigronden in de rivierlakte en het overgangsgedebied tussen deze twee zones.



Figuur 2.8 Satellietfoto van Arnhem, beeldmateriaal uit 2005

In de gemeentelijke toekomstvisie op water wordt gewezen op de volgende aandachtspunten:

- Grote ruimtelijke waarde van beken en fonteinen.
- Groen is belangrijk en wordt gestimuleerd.
- Om piekbuien te kunnen verwerken is de oppervlaktewaterberging vergroot.

- De riolering is grotendeels afgekoppeld: regenwater wordt in het merendeel van het hoog gelegen deel van Arnhem gescheiden afgevoerd en geïnfiltreerd in tuinen of openbaar groen.
- Er wordt ingezet op besparing van drinkwater, door zowel huishoudens als industrie
- Arnhem streeft ernaar om een waterbewuste stad te worden, die leeft met en rond het water. Dit resulteert naar verwachting in een verschuiving naar gebruik van meer 'lokaal' water: grond- en regenwater.

Mede in relatie tot deze toekomstvisie kunnen volgens de gemeente Arnhem de volgende klimaateffecten en knelpunten relevant worden in het casegebied:

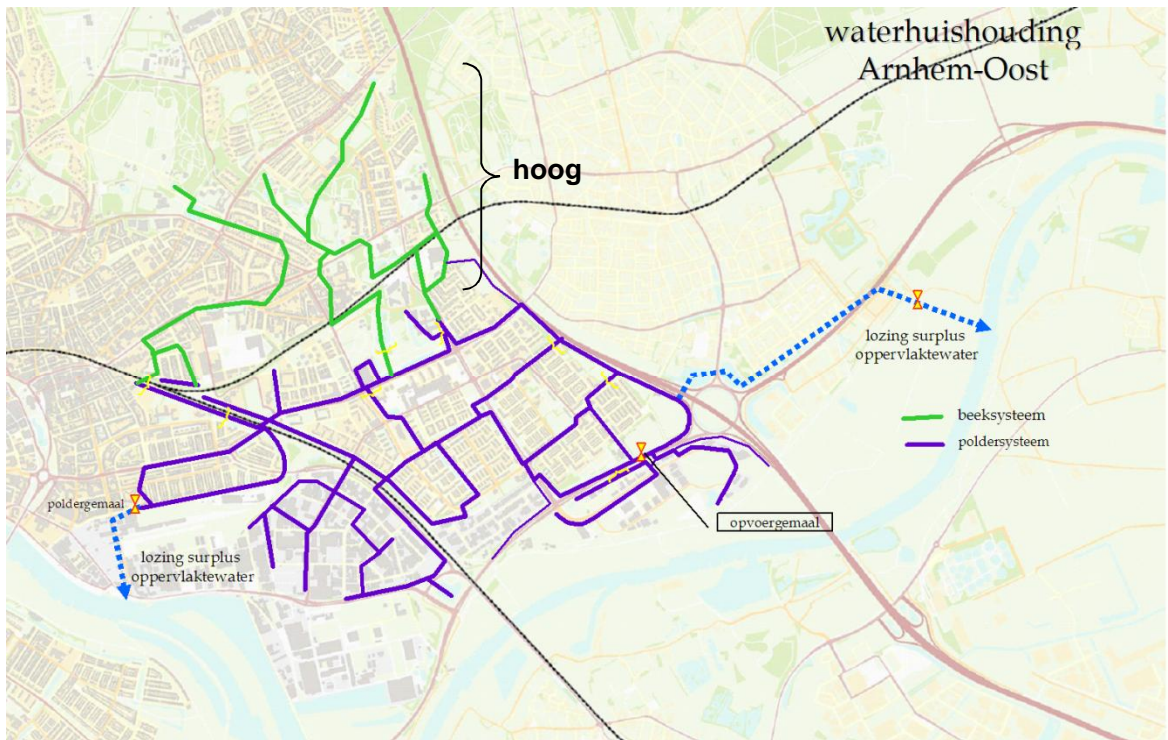
- Hitte
- Verdroging van groen
- Verslechtering waterkwaliteit vijvers en beken, met name als gevolg van botulisme en door vertraging en stoppen van de doorstroming van beken in droge perioden.
- Grondwateroverlast is een voornaam thema in het gebied. Met name in de overgangszone van hoog naar laag. Problemen concentreren zich in enkele straten
- De waterbeschikbaarheid in het hoog gelegen deel van het case gebied is beperkt. Er zijn geen wateraanvoermogelijkheden. Zal op een bepaald moment moeten worden overgegaan tot acceptatie van droogte effecten?
- Welke maatregelen kunnen worden genomen om de 'leefbaarheid' van het gebied op peil te houden in een droger klimaat?

De gemeente Arnhem heeft voornamelijk behoefte aan aangrijpingspunten voor het in stand houden van de leefbaarheid onder extremere omstandigheden (droger, heter, natter).

De hypothese is dat dit onderzoek geen nieuwe knelpunten voor het stadsdeel aan het licht zal brengen. Het streven van Arnhem is om meer kwantitatieve inzichten te verwerven in de reeds verwachte knelpunten en onzekerheden om klimaateffecten verder in te perken.

2.3.2 Algemene gebiedsbeschrijving

Het casegebied, zoals te zien in Figuur 2.9, ligt net boven de splitsing van de Nederrijn en IJssel.

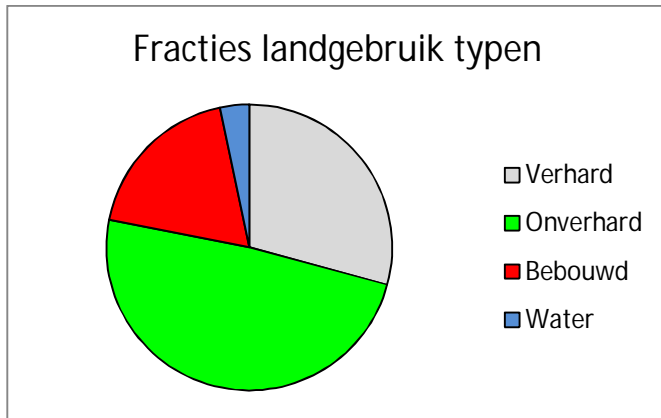


Figuur 2.9 Ligging casegebied Arnhem-Oost met daarop geprojecteerd het oppervlaktewatersysteem. Groene lijnen zijn de beken die door het hoge deelgebied stromen. De paarse lijnen zijn de watergangen in het lage deelgebied. De scheiding tussen hoog en laag ligt ongeveer op de zwart ingetekende spoorlijn.

De begrenzing van het casegebied aan de noordoostzijde wordt bepaald door de hoogteligging van de stuwwal, het retentiegebied van de beken, de isohypsen van het eerste watervoerende pakket en de rioleringsdistricten. Nabij de van Zuidwest naar Noordoost lopende spoorweg gaat het hoge deelgebied over in het lage deelgebied.

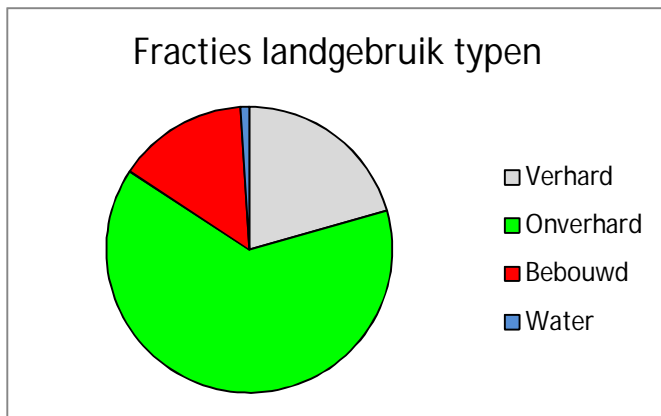
De uiterwaarden liggen op een hoogte van 10 m+NAP, de heuvels ten noordoosten van Arnhem hebben een hoogte van 80 tot 90 m+NAP.

Ongeveer 19% van het oppervlak van Arnhem-Oost Laag bestaat uit bebouwing. 29% is verhard oppervlak. 49% van het oppervlak is onverhard en 3% bestaat uit oppervlaktewater.



Figuur 2.10 Relatieve verdeling landgebruik typen Arnhem-Oost Laag.

Ongeveer 15% van het oppervlak van Arnhem-Oost Laag bestaat uit bebouwing. 21% is verhard oppervlak. Maar liefst 64% van het oppervlak is onverhard en 1% bestaat uit oppervlaktewater.



Figuur 2.11 Relatieve verdeling landgebruik typen Arnhem-Oost Hoog.

2.3.3 Ondergrond

Voor het bepalen van de opbouw van de ondergrond zijn diverse geohydrologische onderzoeken ter beschikking gesteld door de gemeente Arnhem. De onderzoeken zijn vervolgens onderverdeeld in hoog en Arnhem-Oost Laag om zo een goed beeld te krijgen van het verschil in bodemopbouw tussen beide gebieden.

Het gestuwde gebied van Arnhem-Oost Hoog bestaat uit scheef gestelde lagen van afwisselend zand, grind, klei en leem. Er is veel heterogeniteit, waardoor ook de grondwaterstand sterk varieert.

In een groot deel van Arnhem-Oost Laag is een ophooglaag van zand aangebracht die een dikte tot circa 2,5 meter heeft. Daaronder ligt een natuurlijke kleilaag (rivierafzetting) die in dikte varieert van 1 tot 3 meter. Vervolgens volgt het eerste watervoerende pakket met een dikte van circa 30 meter. Gezien de aanzienlijke dikte van de scheidende laag (3 tot 10

meter) tussen het eerste en tweede watervoerend pakket is het eerste watervoerende pakket bepalend voor de waterbalans van Arnhem-Oost Laag.

De overheersende grondwaterstroming in geheel Arnhem-Oost is en zuidelijke richting. Uit geohydrologisch onderzoek blijkt dat er een directe relatie bestaat tussen de rivierwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en dat dit de grondwaterstroming danig beïnvloedt. Tevens is gebleken dat in Arnhem-Oost Laag infiltratie plaatsvindt naar het eerste watervoeren pakket. Dit geldt ook voor Arnhem-Oost Hoog, maar hier bevinden zich leem- en kleilagen die de infiltratie plaatselijk verhinderen.

Een nadere beschrijving van ondergrondkarakteristieken, in het licht van de gevoeligheid van de buurt voor schademechanismen, is opgenomen in paragraaf 4.4.1.

2.3.4 Watersysteem

In het gebied zijn feitelijk drie typen watersysteem aanwezig:

- Riviersysteem
- Poldersysteem (Laag)
- Beeksysteem (Hoog).

In Figuur 2.9 is middels een kleurcodering van het oppervlaktewater aangegeven waar welk systeem ligt.

Het *riviersysteem* beslaat de bedding en uiterwaarden langs de Nederrijn en IJssel. De invloed van de rivieren rijkt tot ver in het poldersysteem, waar de rivierwaterstand voor drukverschillen in de watervoerende pakketten zorgt en daardoor mede bepalend is voor de grondwaterstand. De rivierwaterstand is geheel afhankelijk van de Rijnafvoer.

Het oppervlaktewater van het *poldersysteem* bestaat uit gegraven sloten en wordt gereguleerd middels gemalen.

De *beken* ontspringen vanuit de stuwwal en worden gevoed door vanuit de Veluwe uittredend 'diep' grondwater (sprengen), grondwater dat via ondiepe stroming uittreedt in de bedding van de beken, en oppervlakkig afstromend regenwater. De beken monden uit in vijvers en sloten. De vijvers zijn restanten van landgoederen – net als de tussengelegen groenzones - en hebben een nevenfunctie als waterberging. In periode van langdurige droogte en dalende grondwaterstanden stopt het uittreden van grondwater, stagneert de doorstroming van de beken of vallen zij zelfs droog.

Grondwater speelt een voorname rol in het gebied. De situatie is complex. Zo zijn in de stuwwal scheefgestelde kleilagen aanwezig die zorgen voor korte afstandsvariabiliteit in grondwaterstanden. In de diepere ondergrond bevinden zich verschillende watervoerende pakketten die van elkaar worden gescheiden door ondoorlatende kleilagen. Deze scheiding is echter niet homogeen. Plaatselijke klei- en lemlagen en onderbrekingen in de scheidende lagen zorgen ook voor veel heterogeniteit in de stijghoogten van het grondwater.

Bronnen van water

Water komt het gebied in via neerslag, aanvoer van drinkwater en als kwelwater uit de stuwwal. Daarnaast kan water in uitzonderlijke situaties het gebied in komen bij hoge waterstanden.

Afvoer van water

Water verlaat het gebied door verdamping, infiltratie naar het eerste watervoerende pakket, afvalwaterafvoer, regenwaterafvoer en oppervlaktewaterafvoer.

Door de grote hoeveelheid groen in het gebied speelt transpiratie door vegetatie een voorname rol in de balans.

Er zijn drie grondwaterwinningen nabij het gebied aanwezig: Pinkenberg, Ir. H. Symons en pompstation La cabine. Deze zijn niet van invloed op de waterbalanscomponenten die in deze studie worden onderzocht.

Middels het afkoppelen van regenwater wordt momenteel het merendeel van het regenwater apart afgevoerd en geïnfiltreerd. Naar schatting gaat het om 90 tot 95 procent van het afgekoppelde regenwater. De overige 5 tot 10 procent wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater. Dit is zeer relevant voor de waterbalans.

Afvalwater verlaat het gebied via twee rioolgemalen: het Rijngemaal en het Driepoortengemaal. Het Rijngemaal beschermt de binnenstad van Arnhem bovendien tegen wateroverlast bij zware neerslag en hoog water in de Rijn.

Oppervlaktewater wordt via verschillende (opvoer)gemalen geloosd op de Nederrijn en IJssel.

Berging van water

Berging vindt plaats in het oppervlaktewater, in riolering en in het grondwater. Kortstondige berging vindt plaats in plassen, op daken en in de riolering. Langdurige berging kan plaatsvinden in oppervlaktewater, in de onverzadigde bodemzone en in het grondwater.

2.3.5 Afbakening modelgebied

De modelgrenzen voor Prinseneiland worden eenvoudigweg bepaald door het omringende oppervlaktewater. Voor Arnhem-Oost is het bepalen van de modelgrenzen een stuk complexer. Dit vergt een analyse van alle voor de hydrologie relevante factoren binnen, maar ook buiten het gebied. De basis voor deze analyse is dat het opstellen van een waterbalans draait om de aan-, afvoer (fluxen) en berging van water en dat er op de modelgrenzen zo weinig mogelijk fluxen plaatsvinden.

Rivieren

De Nederrijn en de IJssel zijn hydrologisch gezien geschikte grenzen van het modelgebied. De grens is hier gelegd op de plek van dijken en kademuuren. De uiterwaarden vallen buiten het modelgebied.

Waterlopen

Naast de rivieren bevinden zich binnen het gebied ook andere waterlopen: vijvers, sloten, kanalen en beken. De meeste van deze waterlopen zijn kunstmatig, een enkele beek is nog natuurlijk. Sommige waterlopen zijn met elkaar verbonden via duikers. De grenzen van het modelgebied lopen niet dwars op waterlopen, maar liggen ter plaatse van duikers of gemalen zodat de fluxen tussen de waterlopen kunnen worden bepaald.

Maaiveldhoogte

Gezien de grote hoogteverschillen is het belangrijk om maaiveldhoogte mee te nemen in de analyse. Het beïnvloedt de oppervlakte afstroming, grondwaterstroming, grondwaterstand en het ontspringen van beken.

Isohypsens

Isohypsens zijn lijnen die punten met een gelijke grondwaterstand verbinden. Het afbakenen van het gebied met behulp van isohypsens geeft een (visuele) indicatie van de stroming van grondwater naar en/of uit het modelgebied. Aangezien er in het casegebied een ondoorlatende kleilaag van ongeveer 10 meter dik tussen het eerste en tweede watervoerende pakket zit, zijn de isohypsens van de eerste watervoerende laag het meest relevant.

Wegen

Vaak wordt de ligging van wegtracés bepaald door de aanwezigheid van een goede ondergrond en een uniforme hoogteligging. Daarnaast is het zo dat, zeker bij grotere wegen, er weinig uitwisseling van oppervlakte water kan plaatsvinden door het tracé. Uitwisseling via duikers en bruggen is altijd mogelijk, maar de fluxen zijn dan goed te lokaliseren en te meten.

Wijken

Omdat een wijk veelal eenduidige kenmerken heeft (groen, verharding, bebouwing) en er vaak op wijkniveau wordt gedraineerd, loopt een modelgrens bij voorkeur niet dwars door een wijk.

Rioolstelsels

Uit kaartmateriaal van de gemeente blijkt dat de scheiding tussen verschillende rioolstelsels (gemengd, gescheiden of verbeterd gescheiden) samenvalt met wegtrajecten en wijkgrenzen. Tussen gebieden met een specifiek rioolstelsel vindt weinig uitwisseling plaats. De grenzen van het modelgebied zijn daarom gekoppeld aan de grenzen van rioolstelsels die samenvallen met wegtrajecten en wijkgrenzen.

Stroomgebieden

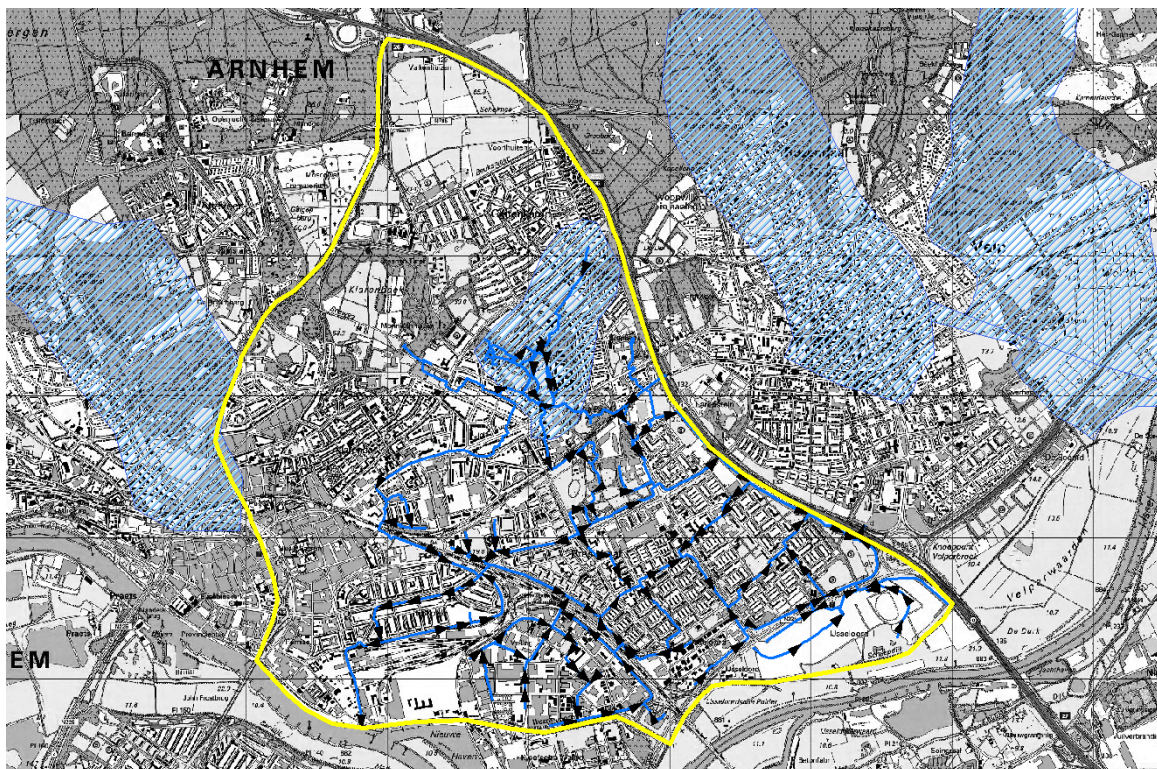
De bovenstroomse beïnvloedingsgebieden voorzien de beken van water. Een beïnvloedingsgebied dient geheel binnen of geheel buiten het modelgebied te vallen.

Modelgebied

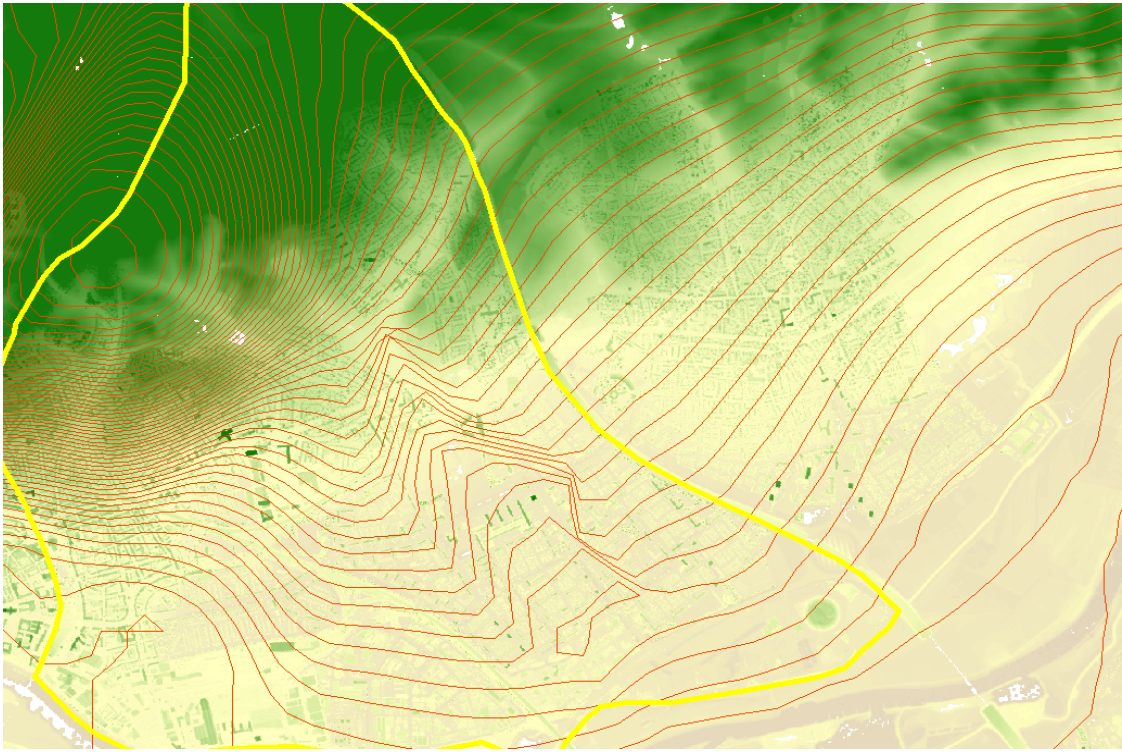
Na de analyse van het casegebied op bovenstaande factoren is een modelgebied afgebakend, zie Figuur 2.12 t/m Figuur 2.14. Het modelgebied wordt aan de oostzijde begrensd door de Schaapsdijk. Aan de zuidkant van het gebied vormt de Westervoortedijk de begrenzing. De Westervoortedijk gaat over in de Nieuwe Kade, de kade langs de Nederrijn, die doorloopt tot aan de John Frostbrug. Industrierrein Kleefse Waard is buiten het modelgebied gehouden omdat de waterlopen daar niet in contact staan met de rest van het gebied. Het industrierrein is bovendien op basis van riolering en drinkwateraanvoer te scheiden van het casegebied.

De grens aan de westzijde van het modelgebied wordt gevormd door de Nijmeegseweg, die verder loopt in de Velperbinnensingel en overgaat in de Apeldoornseweg. De laatstgenoemde volgt de isohypsens en de hoogteligging van het maaiveld. Door de begrenzing aan de westzijde op deze manier te kiezen loopt de grens ook precies gelijk met de grens van een beïnvloedingsgebied.

De Apeldoornseweg loopt door tot aan de A12, die de begrenzing aan de noordkant vormt. De A12 volgt de hoogtecontouren en loopt haaks op de isohypsen. Daarnaast vormt de A12 een scheiding tussen wijken, openwaterlopen en rioldistricten. De A12 grens loopt door tot aan de IJssel en sluit weer aan op de Schaapsdijk.



Figuur 2.12 : Modelgebied, topografie, waterlopen, bovenstroomse beïnvloedingsgebieden (blauw gearceerd).



Figuur 2.13: Modelgebied, isohypsen en hoogteligging



Figuur 2.14: Modelgebied en wijkgrenzen

3 Waterbalansmodellering

3.1 Aanpak algemeen

De grootte van de waterbalans termen van een stedelijk watersysteem vormen een belangrijk kennishiaat. Er is vooral weinig nauwkeurige informatie over de hoeveelheid water die via oppervlaktewater wordt aangevoerd, wat het effect van oppervlaktewateraanvoer is op de grondwaterstanden en welk deel van de neerslag ten goede komt aan de vegetatie en het aanvullen van het bodem-, grond- en oppervlaktewater.

Om deze kennishiaat in te vullen zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

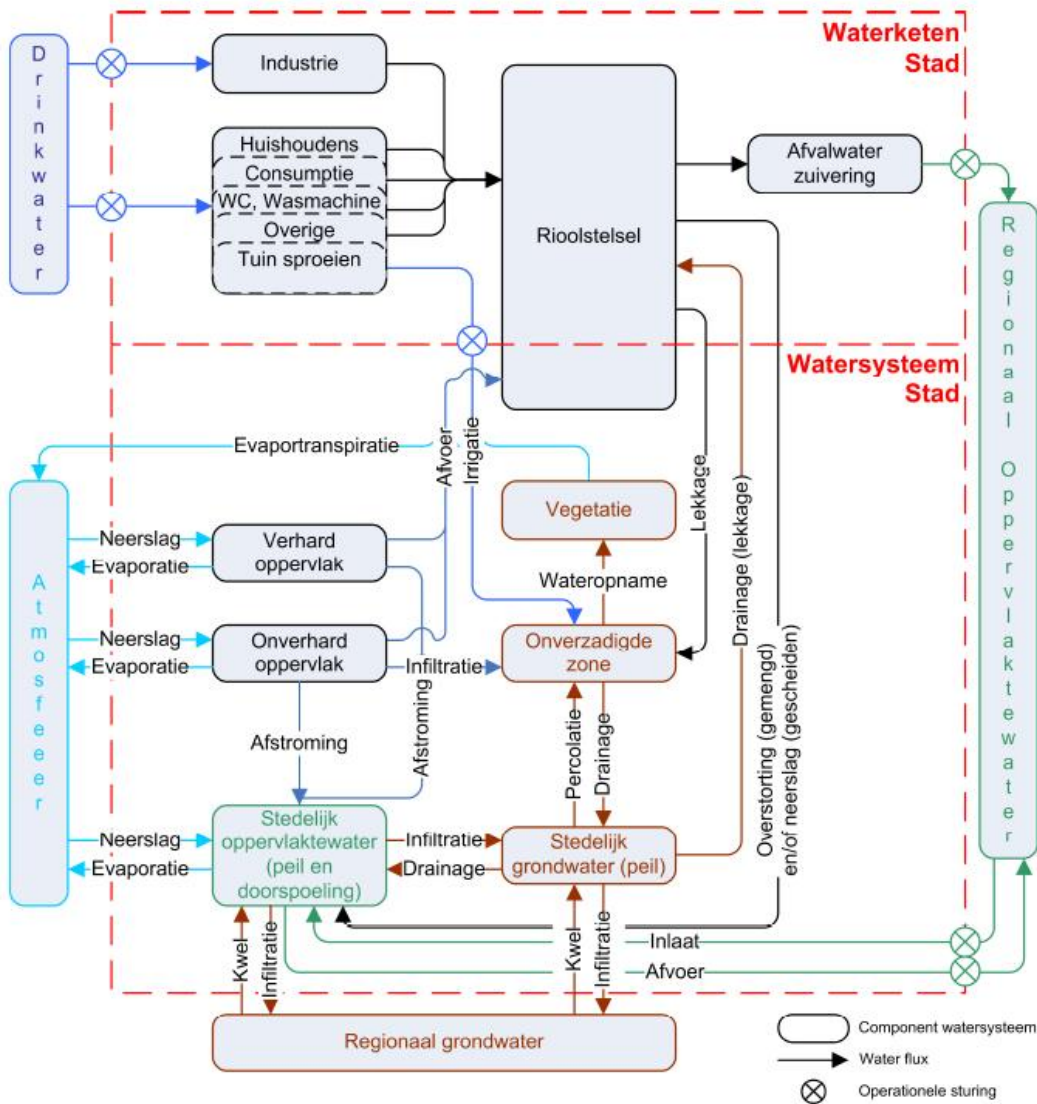
- Voor waterbalans relevante gebiedskenmerken analyseren: historie, landgebruik, ondergrond en watersysteemkenmerken (zie hoofdstuk 2)
- Verzamelen van gegevens van hydrologische parameters (meteo, oppervlaktewaterpeilen, grondwaterstanden, enz.)
- Stedelijk WaterBalansmodel (SWB-model) bouwen
- Waterbalans kwantificeren voor huidige situatie
- Veranderingen in waterbalans kwantificeren onder Deltascenario's, voor een gemiddelde situatie, droge situatie (1/10) en een extreme droogtesituatie (1/100 jaar) in 2050.

Het specificeren van relevante waterbalanscomponenten is grotendeels al gedaan in het project Schades door watertekorten en –overschotten in stedelijk gebied, zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2 (Deltares, maart 2012). De opgave voor onderhavige studie is om per casegebied te bepalen welke balans termen in meer of mindere mate bepalend zijn en hoe de termen met elkaar interacteren.

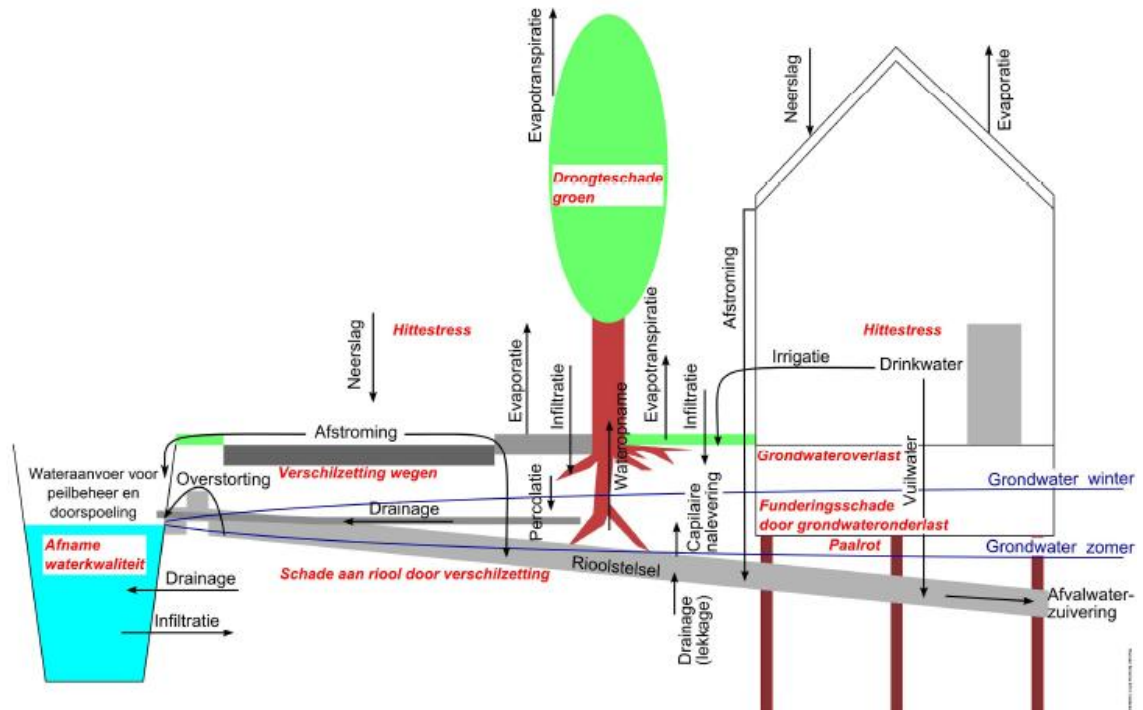
Als ontwikkelplatform voor het balansmodel is gekozen voor MATLAB (www.mathworks.nl). Dit maakt het mogelijk om het model flexibel in te richten, snel te kunnen rekenen, daardoor een veelheid aan scenario's te kunnen analyseren en tegelijkertijd uitkomsten te visualiseren.

De focus van het onderzoek ligt op droogtesituaties, maar voor een algemeen begrip van de beschouwde watersystemen is het model zowel op droogtesituaties als de gemiddelde situatie gekalibreerd en gevalideerd.

De keuze van de door te rekenen klimaatscenario's (zie Bijlage B: Deltascenario's) en maatgevende droogtejaren is afgestemd op de scenarioberekeningen van DPZW.



Figuur 3.1 Schematisatie van het stedelijk watersysteem en relatie tot het regionale systeem (gebaseerd op figuur R. de Graaf, 2009).



Figuur 3.2 Schematische weergave van het watersysteem en daaraan gerelateerde schademechanismen, op straatniveau.

3.2 Beschrijving van het model

Het SWB-model is een conceptueel model, waarin de hydrologische processen in de stad (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2) op een dagelijkse tijdschaal door middel van reservoirs ('bakjes') gemodelleerd worden. Het model gaat uit van een homogene ruimtelijke verdeling, met uniforme ('lumped') reservoir parameters. Hetzelfde geldt voor het gebruik van een tijdstap van een hele dag; de temporele variatie in processen binnen een dag wordt niet meegenomen. Voor deze benadering is gekozen om de volgende redenen:

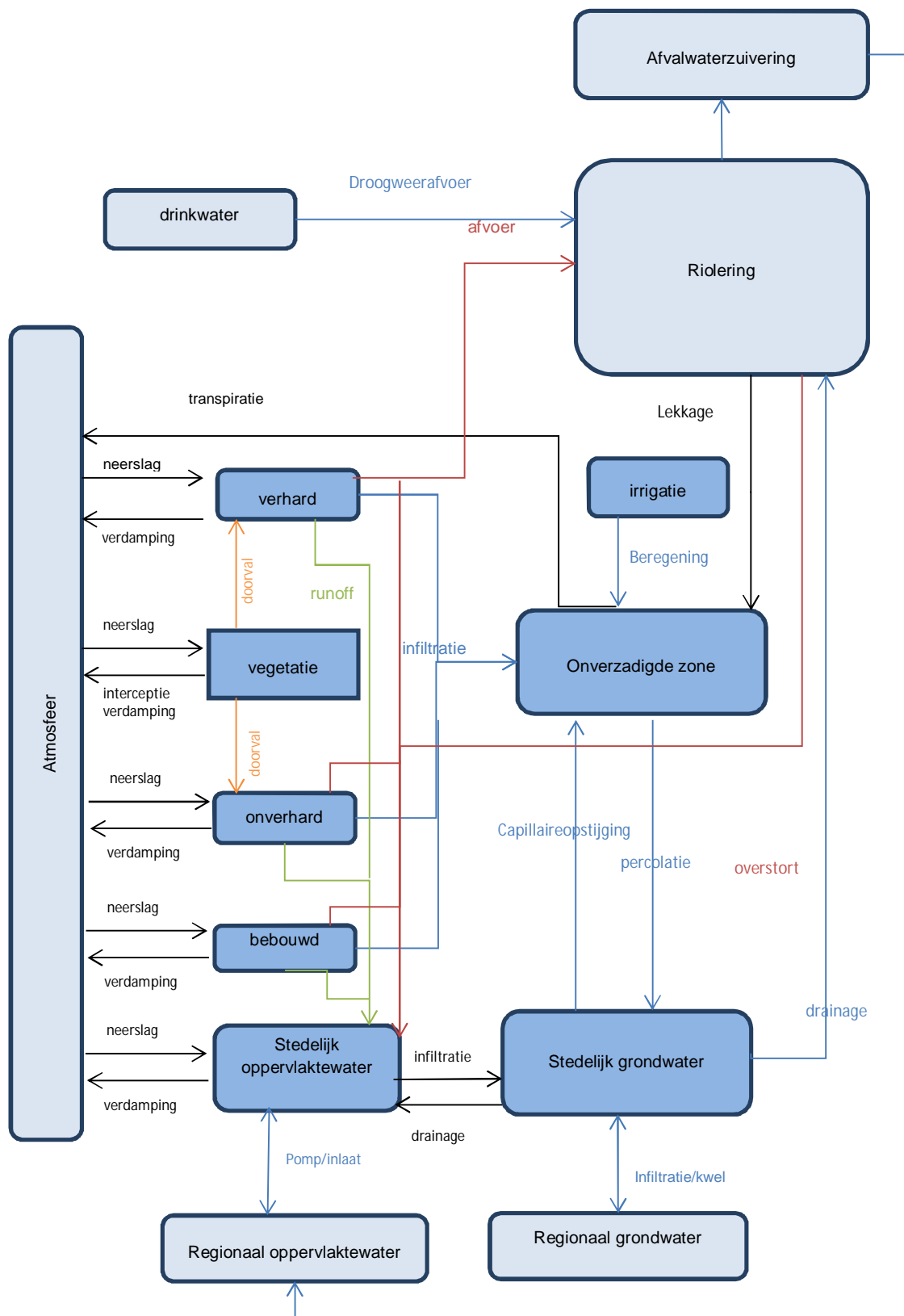
- 1 Er kan snel inzicht worden verkregen in de stedelijke waterbalans zonder het risico het overzicht te verliezen in de details van de ruimtelijke en temporele verschillen die zich in een gebied voor kunnen doen. Door het model conceptueel in plaats van ruimtelijk gedistribueerd te houden wordt de complexiteit van de invoer, de parameterisering, de modellering en de uitvoer enorm verminderd. Hierdoor is het eenvoudiger om de uitkomsten van het model te duiden. De dagelijkse tijdstap betekent vooral een vereenvoudiging voor het simuleren van de riolering, maar gezien de insteek vanuit droogte schuilt er voorsnog geen meerwaarde in het maken van analyses op kortere tijdschalen.
- 2 Veel meetgegevens zijn ook "lumped", bijvoorbeeld rioolafvoeren die geregistreerd worden bij rioolgemalen die vaak meerdere wijken of zelfs een hele stad bedienen. En de meetdichtheid van grondwaterstanden is dikwijls zo laag, dat het gebruik van numerieke, ruimtelijk gedistribueerde modellen beperkte meerwaarde heeft en zelfs schijnnaauwkeurigheid kan opleveren.

De modelprocessen zijn gemodelleerd door middel van reservoirs waar water instroomt, geborgen wordt en via een afvoerproces weer uitstroomt. De berging en uitstroom van water worden bepaald door de reservoirs te modelleren als *interceptiereservoir* of als een *lineair reservoir*. De uitstroom uit een interceptiereservoir bestaat uit een overstort door een overschrijding van een drempelwaarde van de maximale berging, danwel een proces dat het geborgen water (deels) onttrekt aan het reservoir. De lineaire reservoirs hebben geen overstort mogelijkheid. De uitstroom bestaat uit een fractie van de berging in het reservoir. Deze fractie wordt vastgesteld als een evenredigheidsconstante.

In Figuur 3.3 is een diagram van het SWB-model weergegeven met daarin de gemodelleerde reservoirs en processen. In Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland worden de modelstructuur en processen, de modellering van deze processen en de benodigde invoerdata in detail besproken.

Modelparameters

Het model maakt gebruik van maar liefst 55 invoerparameters, 11 beginvoorwaarden, 1 randvoorwaarde en 10 invoer datareeksen. Een aantal parameters zijn onderling gecorreleerd, bijvoorbeeld de verschillende landgebruiksfracties. In Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland wordt een overzicht van alle invoerparameters gegeven met een korte beschrijving.



Figuur 3.3 Stroomdiagram geconstrueerd stedelijk waterbalans model. De rode pijlen geven de stroming van water van en naar het rioleringsstelsel weer. De blauwe en groene pijlen geven respectievelijk stroming van water van, naar en in de ondergrond en het oppervlaktewater weer.

3.3 Kalibratie en validatie: samenvatting en conclusies

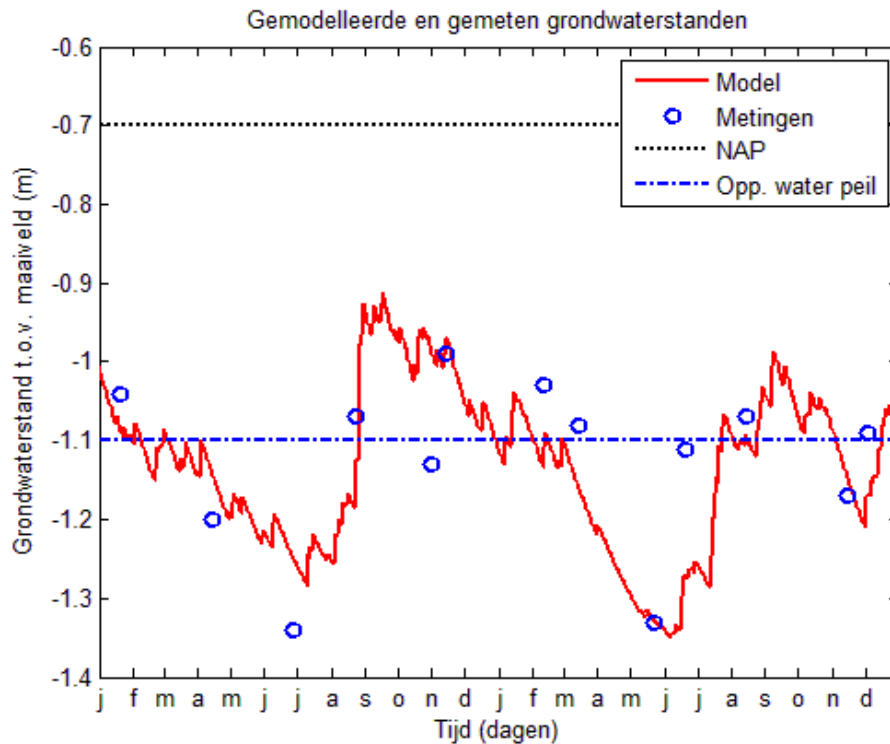
Het SWB-model is gekalibreerd op gemeten rioleringsdebieten en grondwaterstanden op het Prinseneiland. In deze stap zijn een aantal generieke, niet-gebiedsspecifieke modelparameters ingesteld. Vervolgens is het model gevalideerd op een andere meetperiode op het prinseneiland, en voor de Rivierenbuurt en Arnhem-Oost. In de twee laatstgenoemde gebieden zijn alleen modelparameters aangepast die duidelijk gebiedsspecifiek zijn, zoals landgebruiksfracties. Een uitgebreide rapportage van de kalibratie- en validatieresultaten is te vinden in Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland en Rivierenbuurt en Bijlage D: Waterbalansmodel Arnhem-Oost.

Op basis van de validatieresultaten wordt geconcludeerd dat de gevolgde werkwijze een in grote delen van Nederland bruikbaar model heeft opgeleverd. Zeker als naar in de tijd en ruimte geaggregeerde waterhoeveelheden wordt gekeken, zoals in deze studie. Kalibratie op het Prinseneiland heeft zinvolle begrenzingen opgeleverd voor belangrijke processen zoals de neerslag-afvoer-relaties van de landgebruiksfuncties. Deze zijn goed extrapoleerbaar, aannemende dat verhardingstypen binnen Nederland niet structureel verschillen.

In de Rivierenbuurt konden grootte en dynamiek van de gemeten grondwaterstand adequaat worden gereproduceerd met een model dat ten opzichte van Prinseneiland weinig aanpassingen behoefde. Er is op slechts één meetreeks gevalideerd maar deze lijkt representatief voor het gebied. Een gunstige omstandigheid daaromtrent is wel dat de ondergrond in de Rivierenbuurt, namelijk een integrale ophoging met zand, relatief eenvoudig is. Aandachtspunt is de parameterisatie van rioleringsparameters. Met de voor Rivierenbuurt beschikbare validatiemetingen is het niet mogelijk gebleken de prestaties van het model voor rioleringsdebieten te beoordelen. Het model wordt echter in de huidige staat van ontwikkeling al goed genoeg bevonden om "lumped" (in ruimte en tijd geaggregeerde kwantitatieve) analyses voor de Rivierenbuurt mee te doen, en voldoet daarmee aan de doelstelling.

Voor Arnhem-Oost is de situatie gecompliceerder als gevolg van een grote variatie in randvoorwaarden binnen het gebied, met name de dikte van de onverzadigde zone en beekpeilen. Deze heterogeniteit kan niet naar volle tevredenheid in het model worden ingebouwd. Geconcludeerd wordt dat de absolute niveaus en dynamiek van de waterbalans termen niet goed genoeg worden gereproduceerd, maar dat het model wel kan worden toegepast om ordegrrootte en richting van veranderingen te bepalen in droogtesituaties, onder klimaatscenario's en na het nemen van maatregelen.

Figuur 3.4 toont ter illustratie van de kalibratie uitkomsten de gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden voor de Rivierenbuurt.



Figuur 3.4 Gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in de Rooseveltlaan over de periode 2010-2011. De streepjes op de x-as geven de eerste dag van de maand aan.

3.4 Definitie balanscomponenten

Bij de analyse van de waterbalansen is de aandacht in eerste instantie uitgegaan naar alle waterbalansfluxen, om de optredende verschillen te kunnen duiden. Deze zijn uitgedrukt in netto jaarsommen, aan het einde van een kalenderjaar.

Vervolgens is gekeken naar de daling van het grondwater, de daaruit voortvloeiende waterbehoefte, en de cumulatieve aanvulling van het grondwatersysteem vanuit het oppervlaktewater. Deze kentallen zijn niet bepaald als jaarsommen, maar op basis van het moment in het jaar waarop de laagste grondwaterstand en het laagste bodemvochtgehalte optreden.

Om een eenduidige interpretatie van de gepresenteerde resultaten te borgen, worden de balanscomponenten in Tabel 3.1 gedefinieerd. Sommige termen komen meerdere keren voor (bv. drainage), maar dan blijkt uit de figuur op welk deel van het systeem ze betrekking hebben.

Tabel 3.1 Definities van waterbalanscomponenten

Component	Definitie
Neerslag	Neerslag
Evaporatie	interceptieverdamping, verdamping direct vanaf het maaiveld en de verdamping vanuit het oppervlaktewater
Transpiratie	Transpiratie door vegetatie
Infiltratie	Infiltratie van water van het maaiveld in de bodem
Neerslagafvoer	Neerslag, die tot afstroming komt en door de riolering wordt afgevoerd naar de rioolwaterzuivering (in het geval van een gemengd stelsel) of het oppervlaktewater (in het geval van een gescheiden stelsel), of beide (in het geval van een verbeterd gescheiden stelsel).
Percolatie	Netto neerwaartse flux vanuit de onverzadigde zone. Of, in tegengestelde richting: netto opwaartse flux als gevolg van capillaire nalevering vanuit het grondwater naar de onverzadigde zone.
Drainage (naar riool)	Toestroming van grondwater naar een lekke riolering.
Uitstroom/overstort	Som van (1) de uitstroom vanuit het (verbeterd) gescheiden rioolstelsel en (2) de overstort vanuit het gemengde rioolstelsel naar het oppervlakte water
Drainage (naar oppervlaktewater)	Uitwisseling tussen het grondwater en het oppervlaktewater. Als de netto flux op jaarbasis van het grondwater naar het oppervlaktewater plaatsvindt, wordt deze Drainage genoemd. Als de netto flux op jaarbasis van het oppervlaktewater naar het grondwater plaatsvindt, wordt deze Aanvulling genoemd.
Oppervlaktewater	In de Rivierenbuurt betreft dit het water in de boezem dat de Rivierenbuurt aan drie kanten omringt. In Arnhem-Oost Laag zijn dit de singels binnen het stedelijk gebied, dus niet de rivieren Nederrijn en IJssel. In Arnhem-Oost Hoog wordt het oppervlaktewater uitsluitend gevormd door het bekensysteem.
Infiltratie of Kwel	Als de grondwaterflux van het ondiepe grondwater naar het diepe grondwater plaatsvindt, zoals het geval is in infiltratiegebieden, wordt de flux Infiltratie genoemd. Als de flux van het diepe grondwater naar het ondiepe grondwater plaatsvindt, zoals in kwelgebieden, wordt deze kwel genoemd.
DWA (Droog Weer Afvoer)	De afvoer van vuilwater van bewoners en bedrijven. Deze is gelijkgesteld aan het drinkwaterverbruik.
AWZI	De som van de DWA, neerslagafvoer (in het geval van een gemengd of verbeterd gescheiden stelsel) en eventueel door een lek riool gedraineerd grondwater naar de afvalwaterzuivering (AWZI).
Vershil in berging	Dit is geen flux, maar het verschil in de hoeveelheid water die geborgen wordt in alle componenten van het systeem, tussen het begin en het einde van het kalenderjaar. Het verschil wordt vooral bepaald door het verschil in aanwezig grondwater en bodemvocht.
Daling grondwater	Het verschil tussen de laagste grondwaterstand in de huidige situatie en de laagste grondwaterstand in het betreffende deltasceario of de betreffende droogtesituatie. NB: De tijdstippen waarop de laagste grondwaterstand optreedt wordt hoeven voor beide situaties niet samen te vallen. Eenheid: m
Waterbehoefte	De hoeveelheid water die <u>eenmalig</u> aan het systeem moet worden toegevoegd om het laagst voorkomende grondwaterpeil en bodemvochtgehalte in het klimaatscenario aan te vullen tot het niveau van het laagst voorkomende peil en bodemvochtgehalte in de huidige situatie. Dit is gelijk aan het verschil in bodemvochtgehalte, plus het verschil in grondwaterstand tussen de beschouwde situaties. Eenheid: m ³ . Er is onderscheid gemaakt in een lage en een hoge waterbehoefte (marge), afhankelijk van de grootte van de bergingscoëfficiënt die wordt aangenomen voor de berekening van de aanvulling van de grondwaterstand.

	<p>Het beschouwen van een <i>eenmalige</i> toevoeging heeft een onderschatting van de waterbehoefte tot gevolg. Zodra de vereiste waterbehoefte namelijk eenmalig is toegevoegd aan het systeem, wil het systeem weer terug naar een evenwicht met de dan nog steeds droge omstandigheden. Dat betekent een hernieuwde daling van de grondwaterstand en / of onttrekking van vocht aan de bodem. Om de onderschatting van de waterbehoefte als gevolg van deze werkwijze te kwantificeren is een testberekening voor een extreem droog jaar uitgevoerd. In deze simulatie is het grondwaterpeil in de extreem droge situatie continu aangevuld zodra deze onder het minimum peil van een gemiddeld jaar kwam. De aldus berekende aanvulling is circa 10% hoger dan de schatting op basis van de 'lage waterbehoefte', maar blijft lager dan de 'hoge waterbehoefte'.</p>
--	--

3.5 Analyse waterbalans Rivierenbuurt

3.5.1 Huidig klimaat en daarin optredende droogtesituaties

Ook in het huidige klimaat komen nattere en drogere jaren voor. Voor het simuleren van de effecten van droogte op de waterbalans is gebruik gemaakt van een gemiddeld, droog en extreem droog jaar. Voor het simuleren van een gemiddeld jaar is het gevalideerde model gevoed met meteorologische gegevens van het jaar 1967. Voor het simuleren van een droog jaar wordt het jaar 1989 aangewend en voor een extreem droog jaar wordt de data van het jaar 1976 gebruikt. De voor deze analyse gebruikte meteorologische data is afkomstig uit het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI). Er is voor deze jaren gekozen omdat zij ook als karakteristieke jaren zijn gebruikt in de knelpuntenanalyse van het Deelprogramma Zoetwater. Leidend voor DPZW zijn de herhalingstijden van de afvoeren van de grote rivieren. Deze herhalingstijden zijn respectievelijk T=1 (1967), T=10 (1989) en T=100 (1976).

In Figuur 3.5 worden de berekende jaarsommen van de belangrijkste fluxen in het stedelijk watersysteem getoond. De getallen en breedte van de pijlen geven de grootte van de fluxen aan. In verband met de leesbaarheid van de figuren zijn de lekkages van de riolering en drinkwaterleidingen naar de onverzadigde zone (rozige vlak) niet weergegeven. Deze fluxen zijn van ondergeschikt belang (gezamenlijk ongeveer 10mm).

Figuur 3.6 en Figuur 3.7 tonen de variaties door het jaar heen van belangrijke grootheden en waterbalanstermen. Tabel 3.2 geeft de daling van de grondwaterstand, waterbehoefte en aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

De belangrijkste *conclusies* met betrekking tot de gevolgen van toenemende droogte die op basis van de figuren en Tabel 3.2 getrokken kunnen worden zijn:

- In Figuur 3.6 is te zien dat de gebruikte meteorologische tijdreeksen wezenlijk van elkaar verschillen. Wat wel opvalt is dat het droge jaar 1989 zich pas vanaf september onderscheidt van het gemiddelde jaar. Dit uit zich zowel in het totale neerslagoverschot als in de spreiding van de neerslag over het jaar. Uit de figuur blijkt dat het extreem droge jaar 1976 vanaf april een veel lager neerslagoverschot heeft dan de droge en gemiddelde situatie. Bij het bodemvochtgehalte in de onverzadigde zone valt op dat de droogtesituaties hierop niet veel invloed hebben.

- De transpiratie neemt toe, vanwege de grotere potentiële verdamping. De transpiratie wordt niet gelimiteerd door de beschikbaarheid van bodemvocht bij grotere droogte, aangezien deze in alle situaties ongeveer gelijk blijft. Dit is dus geen bepalende factor bij het eventueel optreden van hittestress.
- De afname van de infiltratie en de toename van de transpiratie vertalen zich door naar een afname van de percolatie, een dalend grondwaterpeil, en een negatieve bergingsverandering.
- De grondwaterstand in de Rivierenbuurt zakt iedere zomer onder het peil in het oppervlaktewater, ook in een gemiddelde situatie. Dit betekent dat het grondwater in de Rivierenbuurt iedere zomer wordt aangevuld door het oppervlaktewater, en 's winters vice versa. In de droge en extreem droge jaren zorgen de grondwaterdalingen ervoor dat er méér water uit het oppervlaktewater naar het grondwater stroomt. Zie verder Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m³ op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m³ op duizendtallen.

Situatie	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
Huidig, droog	-0,01	6.300	7.300	24.000
Huidig, extreem droog	-0,31	70.000	94.000	68.000

De 'waterbehoefte' en 'toename aanvulling' die in Tabel 3.2 zijn aangeduid, heffen elkaar niet op. Beide balanstermen duiden op een watervraag ten opzichte van de gemiddelde situatie in het huidige klimaat.

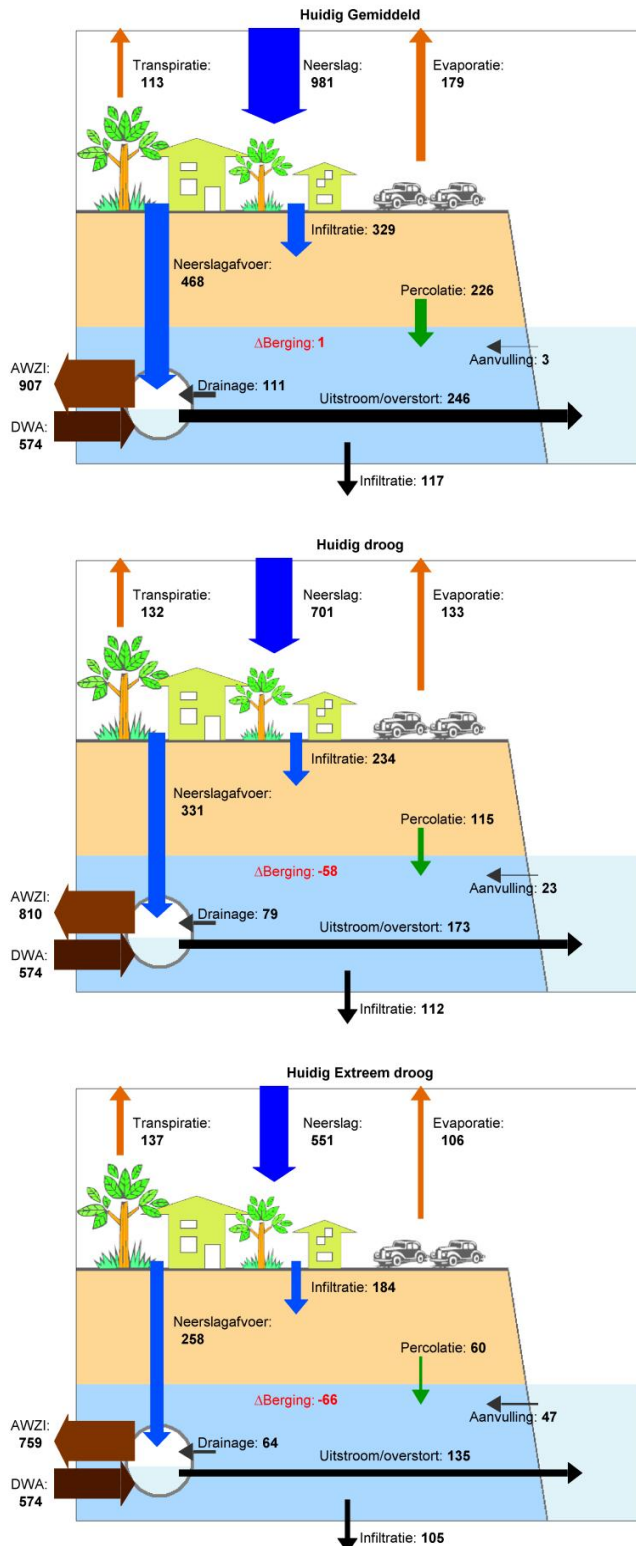
In een extreem droog jaar bijvoorbeeld, verbruikt de Rivierenbuurt 68.000m³ meer oppervlaktewater dan gemiddeld. Dit verbruik belast de watervraag voor stedelijk oppervlaktewaterpeilbeheer.

En daarbovenop is er een resterende watervraag van tussen de 70.000 en 94.000m³ als gevolg van een afname van het bodemvochtgehalte en de grondwaterstand. Om aan deze vraag te voldoen zullen additionele maatregelen moeten worden ingezet.

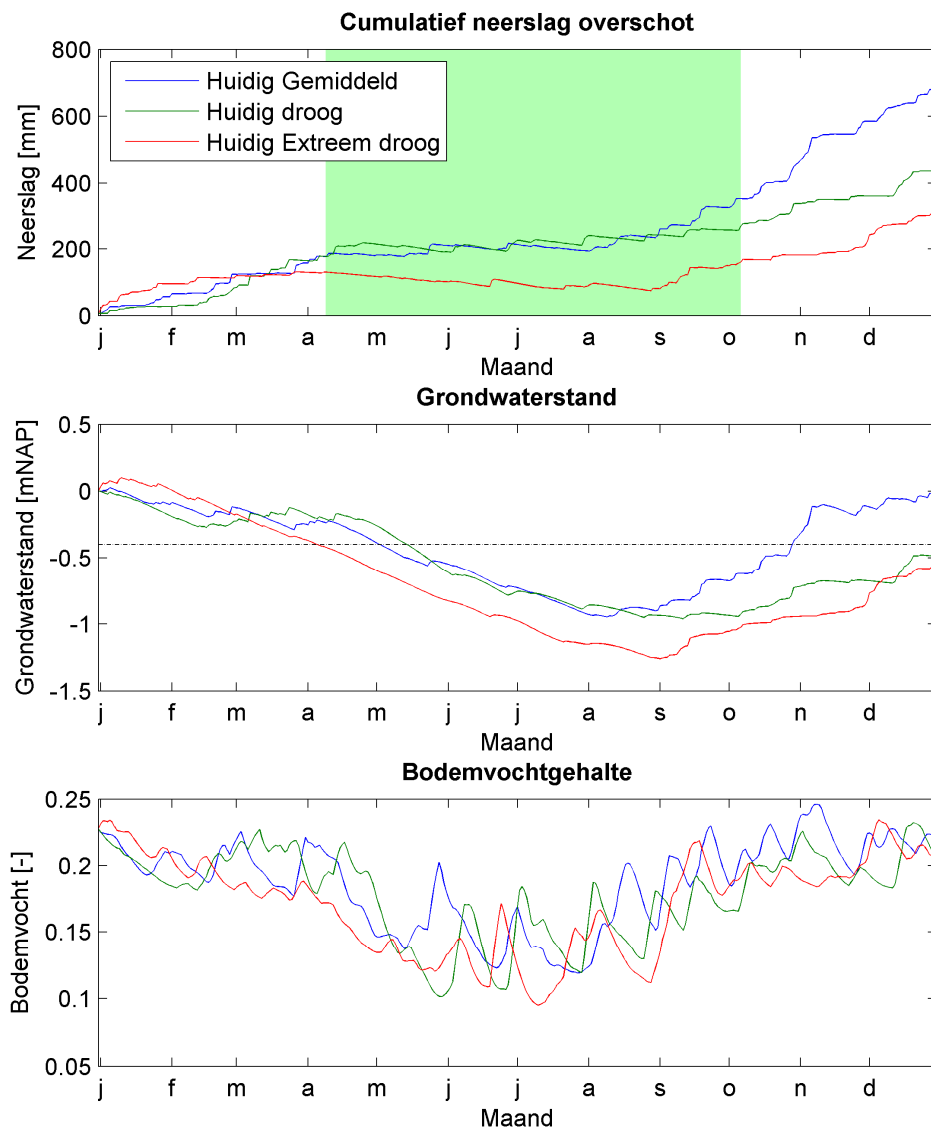
Afhankelijk van welke te behalen situatie wordt gekozen, kan met de cijfers in Tabel 3.2 en Tabel 3.3 worden berekend hoeveel extra water voor peilbeheer door de wijk wordt gevraagd en hoeveel water addtionele maatregelen in de wijk moeten opbrengen. Daarmee is een essentieel puzzelstuk ingevuld in het komen tot afstemming van maatregelen tussen de deelprogramma's Zoetwater en Nieuwbouw & Herstructurering op wijk- en stadsniveau.

In Tabel 3.2 valt op dat de toename in aanvulling vanuit het oppervlaktewater bijna even groot of zelfs groter is dan de berekende waterbehoefte. In het droge voorbeeldjaar komt dit doordat de droogte pas in het najaar viel. Daardoor moest de grondwaterstand alsnog worden aangevuld vanuit het oppervlaktewater. Met andere woorden, de aanvulling vanuit het oppervlaktewater is in omvang weliswaar vergelijkbaar met de waterbehoefte, maar treedt voor een belangrijk deel later op dan de piek in de waterbehoefte.

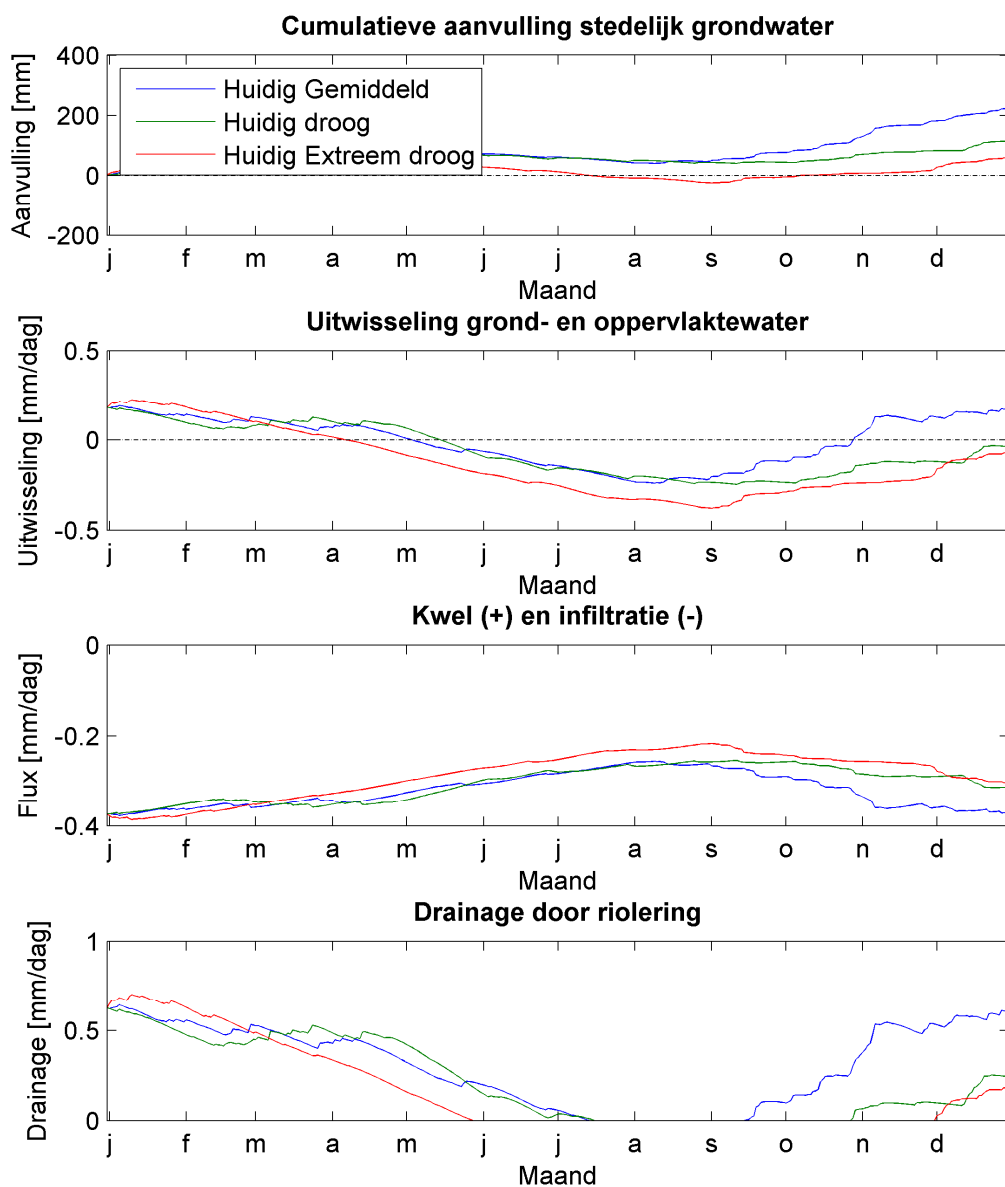
De aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater is daarmee een niet te verwaarlozen balansterm, zoals ook blijkt uit Figuur 3.5. Dit strookt niet met de aanvankelijke verwachtingen. Zowel een gevoeligheidsanalyse op deze parameter als een nadere analyse van grondwaterstanden in de Rivierenbuurt hebben echter geen aanleiding kunnen geven om een lagere of verwaarloosbare uitwisseling te kunnen aannemen. De oorzaak van de aanvulling ligt waarschijnlijk bij de zandige, goed doorlatende ophooglaag.



Figuur 3.5 Berekende waterbalans van de Rivierenbuurt als gevolg van een gemiddeld (boven), een droog (midden) en een extreem droog jaar (onder) in het huidige klimaat. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.6 Het gesimuleerde cumulatieve neerslagoverschot (= neerslag - transpiratie - actuele verdamping), de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte over het jaar voor drie droogtescenario's in het huidige klimaat. De streepjes op de x-as stellen de eerste dag van de maand voor. Het groene vlak in bovenste figuur geeft het groeiseizoen van de vegetatie weer. De grijze stippellijn in de middelste figuur stelt het oppervlaktewaterpeil voor (NAP -0,4 m).



Figuur 3.7 De gesimuleerde cumulatieve aanvulling van het stedelijk grondwater, de stroming van water van het stedelijk grondwater naar nabijgelegen oppervlaktewater, de stroming van water van het stedelijk grondwater naar diepere grondlagen en de drainerende werking van de riolering over het jaar voor drie droogtescenario's. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

3.5.2 Deltascenario's

Voor het simuleren van de gevolgen van een veranderend klimaat op de waterbalans is gebruik gemaakt van de G en W+ klimaatscenario's van het KNMI voor 2050 (zie toelichting in Bijlage B: Deltascenario's). De klimaatscenario's zijn gebruikt om de neerslag en verdamping in de gemiddelde, droge en extreem droge jaren te transformeren van de huidige situatie naar 2050. De in totaal 9 combinaties van klimaat- en droogtescenario's zijn gebruikt om de gevolgen van droogte in een veranderd klimaat te simuleren.

In Figuur 3.8 en Figuur 3.9 worden de resultaten voor de jaarsommen getoond. Ter vergelijking zijn ook de waterbalansen voor het huidige klimaat weergegeven. In Figuur 3.10 worden de veranderingen over het jaar van de belangrijkste fluxen in de meest in het oog springende combinaties van scenario's getoond. Tabel 3.3 geeft de daling van de grondwaterstand, waterbehoefte en aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

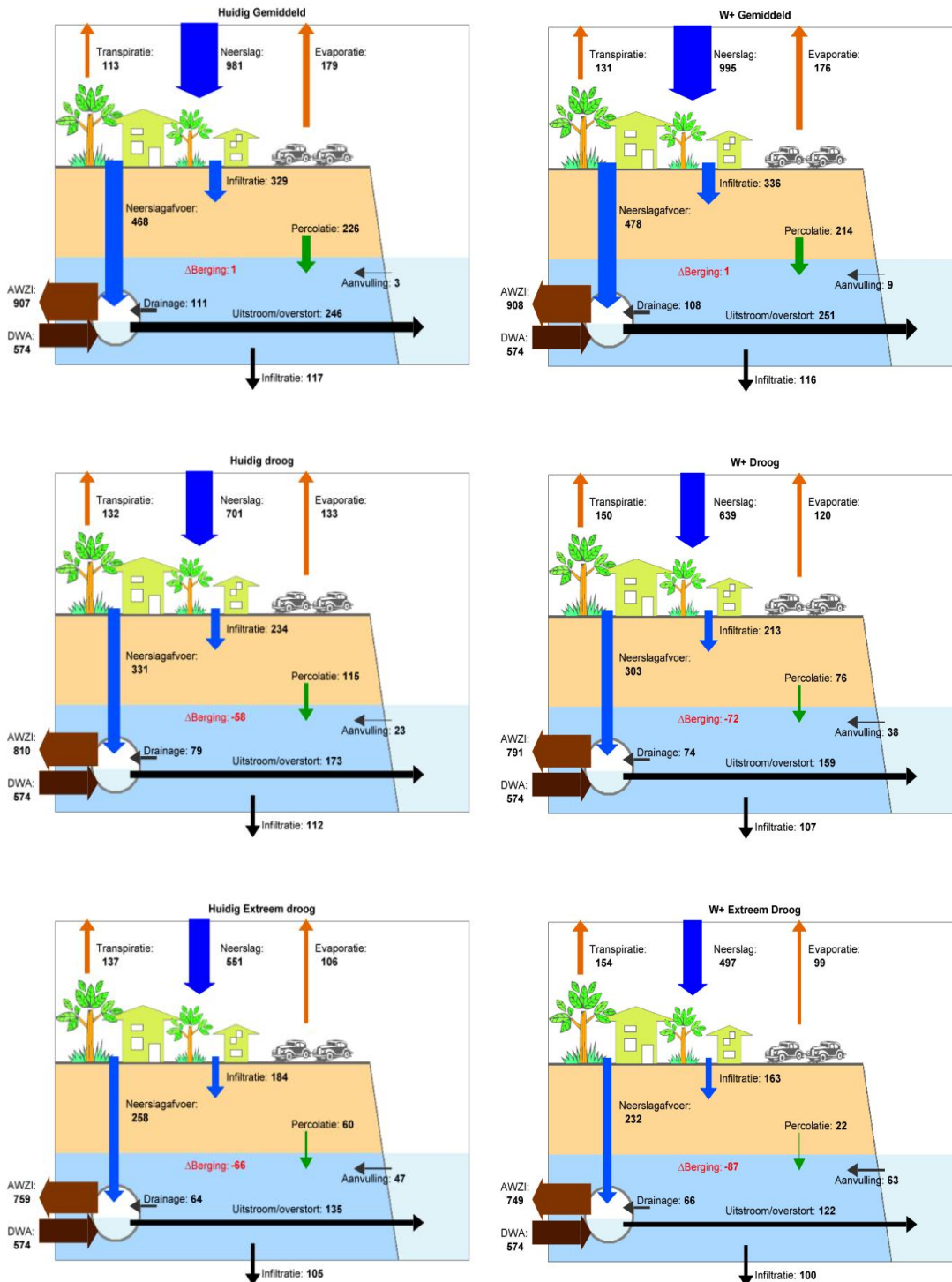
De belangrijkste conclusies met betrekking tot de gevolgen van toenemende droogte die op basis van de figuren en Tabel 3.3 getrokken kunnen worden zijn:

- Voor de gemiddelde situatie worden op jaarbasis (netto fluxen over het gehele jaar) geen grote veranderingen als gevolg van de G of W+ scenario's gesimuleerd. De grondwaterstand komt in het zomerhalfjaar onder W+ wel circa 0,12 m lager te liggen.
- De verschillen tussen huidig klimaat en G scenario zijn voor de droge en extreem droge situatie sterk gelijkend. Deze gelijkenissen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het kleine aandeel onverhard oppervlak in het gebied, waardoor de verdamping niet veel toe kan nemen bij een grotere potentiële verdamping.
- De resultaten voor het W+ scenario vertonen grote verschillen voor de droge en extreem droge situatie. Een belangrijk kenmerk van dit scenario is de sterke afname van neerslag en toename van verdamping. Blijkbaar is de invloed daarvan groot genoeg om ook bij een relatief gering aandeel onverhard oppervlak tot effecten te leiden.
- De verschillen tussen het huidig klimaat en W+ scenario, per droogtejaar, zijn kleiner dan de variatie tussen de droogtejaren die in het huidige klimaat al aan de orde is. Dit betekent echter niet dat deze verschillen verwaarloosd kunnen worden, want elke toename van de blootstelling aan effecten zal leiden tot meer risico's op schade.
- De toename van de aanvulling vanuit het oppervlaktewater is in W+ Extreem Droog gelijk aan de waterbehoefte, maar ook hier is sprake van een verschil in timing tussen de piek in behoefte en piek in aanvulling (zie uitleg in paragraaf 3.5).

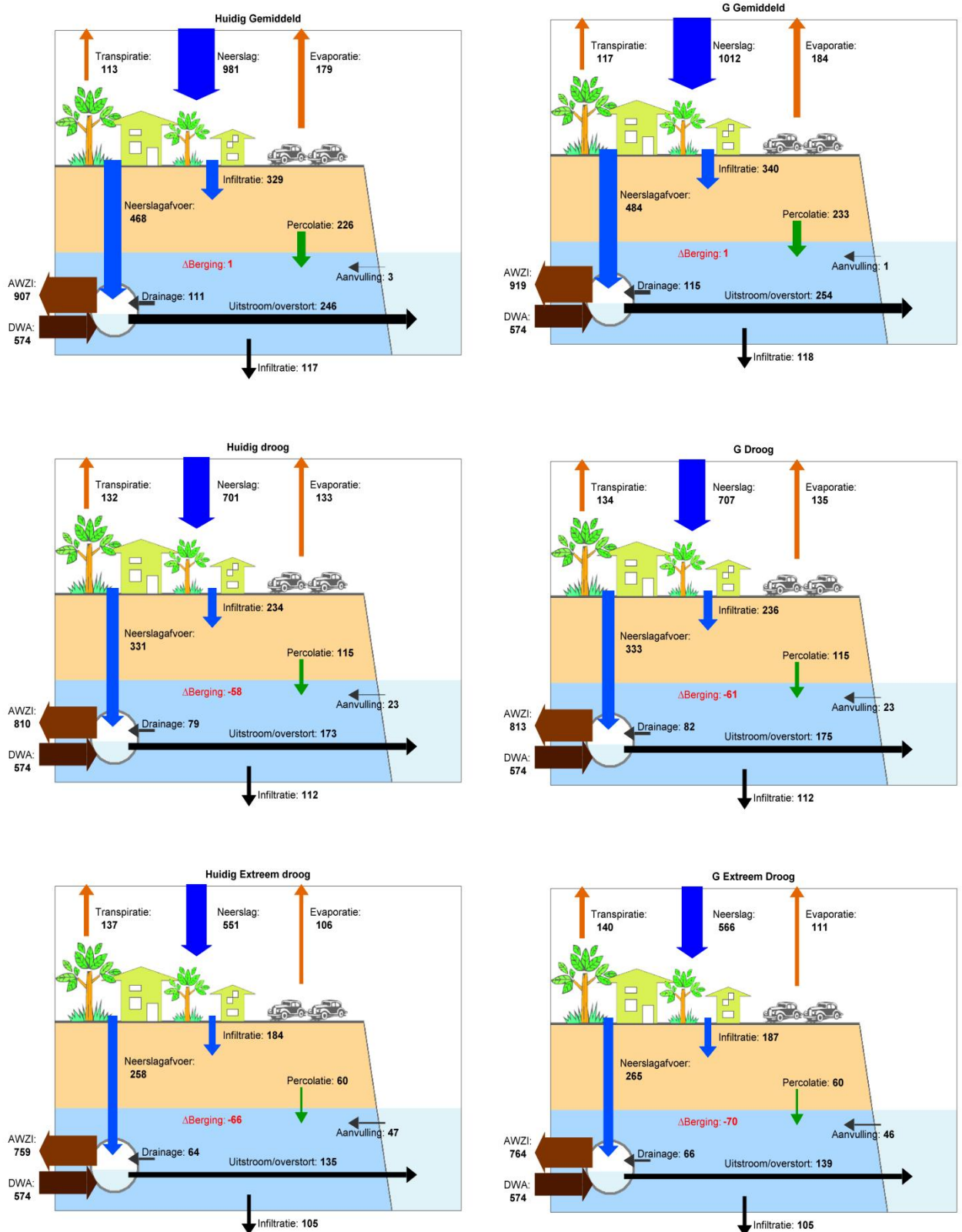
Tabel 3.3 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m3 op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m3 op duizendtallen.

Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,02	3.800	5.000	600
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,12	28.000	38.000	14.000
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,16	36.000	49.000	36.000

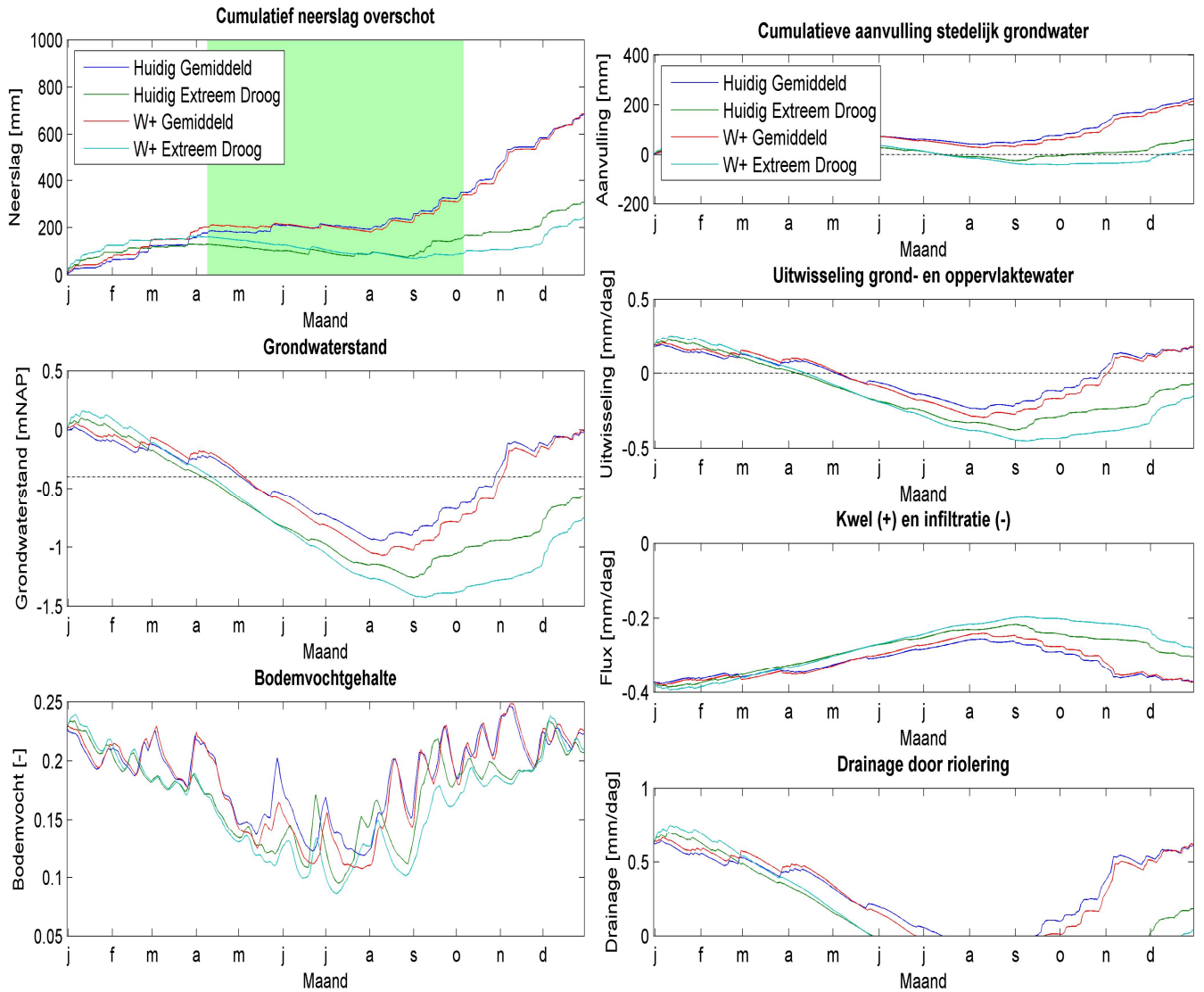
Uitgaande van de wens om de huidige omstandigheden in een gemiddeld jaar onder W+ te handhaven, zullen additionele maatregelen in de Rivierenbuurt maximaal 38.000m3 water moeten opbrengen om de toegenomen waterbehoefte in te vullen. De watervraag van de buurt voor oppervlaktewaterpeilbeheer neemt toe met 14.000m3.



Figuur 3.8 Berekende waterbalans van de Rivierenbuurt als gevolg van een gemiddeld (boven), een droog (midden) en een extreem droog jaar (onder) in het W+ klimaatscenario. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.9 Berekende waterbalans van de Rivierenbuurt als gevolg van een gemiddeld (boven), een droog (midden) en een extreem droog jaar (onder) in het G klimaatsscenario. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.10 Gesimuleerde jaarlijkse tijdsverlopen van een aantal waterbalanstermen voor vier combinaties van twee droogte- en twee klimaatscenario's. De streepjes op de x-as stellen de eerste dag van de maand voor. Het groene vlak in bovenste figuur geeft het groeiseizoen van de vegetatie weer. De grijze lijn in de middelste figuur stelt het oppervlaktewater peil voor. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

3.6 Analyse waterbalans Arnhem-Oost

3.6.1 Huidig klimaat en daarin optredende droogtesituaties

De gevolgde procedure is gelijk aan de simulaties voor de Rivierenbuurt, met de aanvulling dat ook de veranderende rivierstanden onder de klimaatscenario's zijn overgenomen uit het NHI.

De waterbalansen in de drie verschillende droogtesituaties van het huidige klimaat zijn weergegeven in Figuur 3.11 (Arnhem-Oost Laag) en Figuur 3.12 (Arnhem-Oost Hoog). In Figuur 3.13 en Figuur 3.14 worden de veranderingen over het jaar van de belangrijkste fluxen in de meest in het oog springende combinaties van scenario's getoond. Tabel 3.4 en Tabel 3.5 geven de daling van de grondwaterstand, waterbehoefte en toename van de aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

Uit de analyse komen de volgende conclusies en bijzonderheden naar voren:

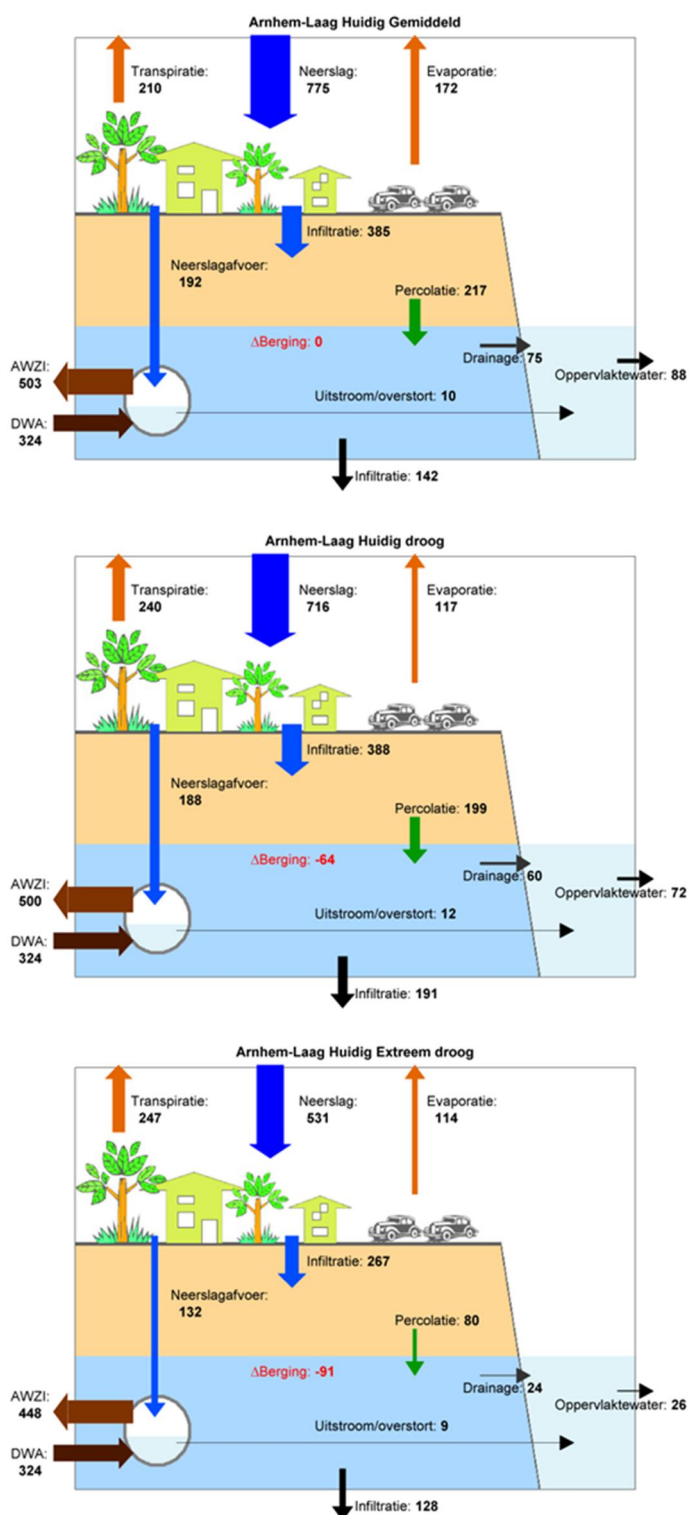
- In het droge jaar (1989) ligt de laagst voorkomende grondwaterstand hoger dan in de gemiddelde situatie. Dit wordt veroorzaakt doordat in het droge voorbeeldjaar de droogte pas in het najaar kwam. Door het natte voorjaar in dit "droge" jaar is de netto drainage van het grondwater naar het oppervlaktewater zelfs groter dan in het gemiddelde jaar. Omdat de droogte van 1989 vooral wordt gekenmerkt door lage rivierstanden, houdt de wat hogere grondwaterstand in Arnhem-Oost Hoog langer aan dan in Arnhem-Oost Laag. Dit verschijnsel is typerend voor de wijze waarop Hoog en Laag verschillend reageren op veranderde omstandigheden.
- In vergelijking met de Amsterdamse modelgebieden vind er meer infiltratie van regenwater plaats. Een belangrijke oorzaak hiervan is een groter aandeel onverhard terrein. Een andere oorzaak is dat het verharde oppervlak deels is aangesloten op een gescheiden riolering met infiltratievoorzieningen.
- In Arnhem-Oost Laag vindt netto infiltratie naar het regionale grondwatersysteem plaats, ondanks de ligging onderaan de stuwwal. De oorzaak is de invloed van de meestal lagere waterstand van de Nederrijn, vergeleken bij de grondwaterstand in Arnhem-Oost Laag.
- Een belangrijk en zeer relevant verschil tussen Arnhem-Oost Hoog en Laag is de ontwikkeling van het bodemvochtgehalte in het extreem droge jaar. Dit blijft in Laag op peil maar daalt in Hoog. Dit heeft in Hoog een verminderde transpiratie tot gevolg, en daarmee een verhoogde kans op hittestress.
- Een ander aandachtspunt is de droogval van beken in Arnhem-Oost Hoog. Uit Figuur 3.14 is af te leiden dat in een extreem droog jaar de drainage van grondwater naar het oppervlaktewater (het bekensysteem) iets afneemt. Dit betekent dat de kans op droogval van het bekensysteem iets toeneemt.
- De grondwaterstands daling in het extreem droge jaar in Arnhem-Laag wordt vooral veroorzaakt door lagere waterpeilen in de Nederrijn. De hieruit voortvloeiende waterbehoefte wordt maar voor een klein deel gecompenseerd door een toename in de aanvulling vanuit het stedelijke oppervlaktewater.

Tabel 3.4 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie, Arnhem-Oost Laag. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m³ op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m³ op duizendtallen.

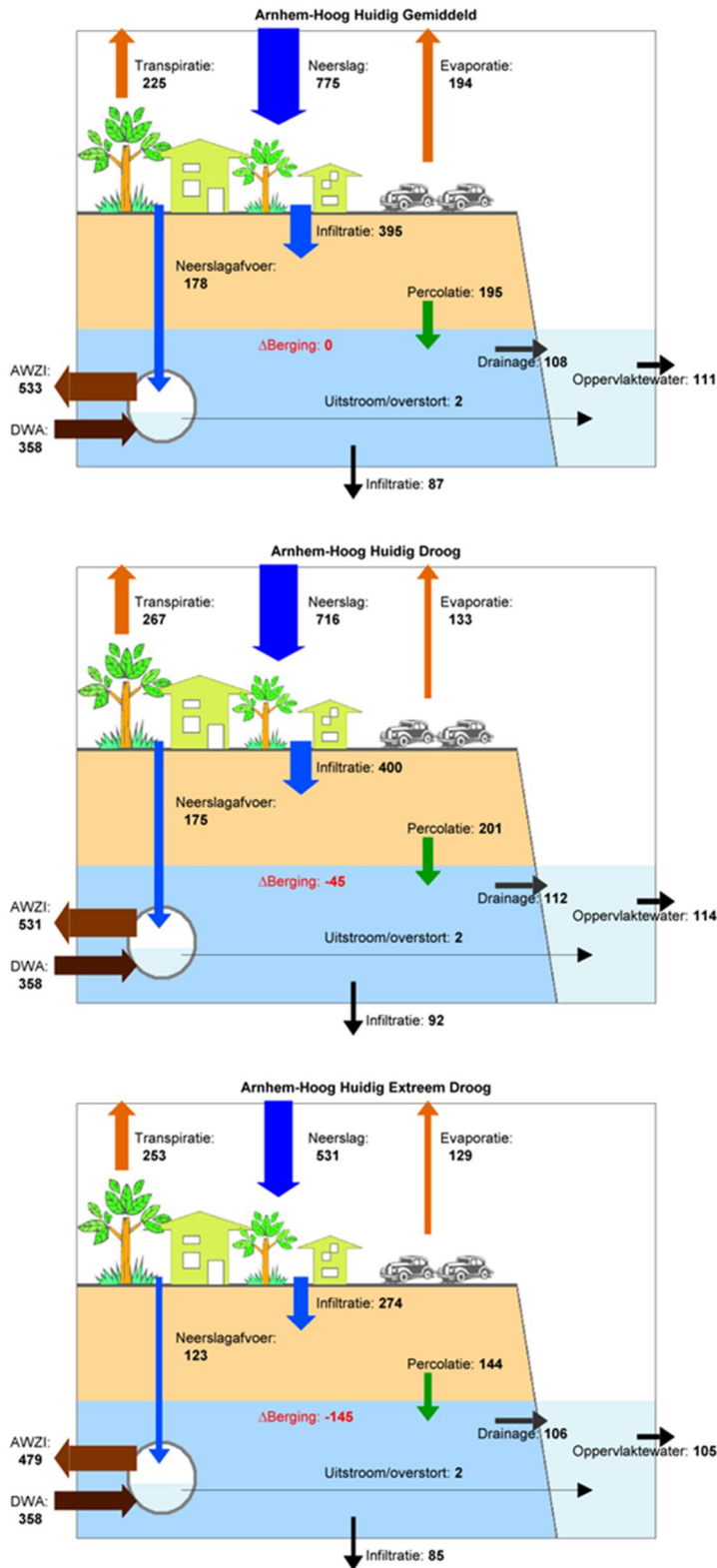
Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
Huidig Droog	-0,18	83.000	263.000	114
Huidig Extreem Droog	-0,72	420.000	1.139.000	101.000

Tabel 3.5 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie, Arnhem-Oost Hoog. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m³ op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m³ op duizendtallen.

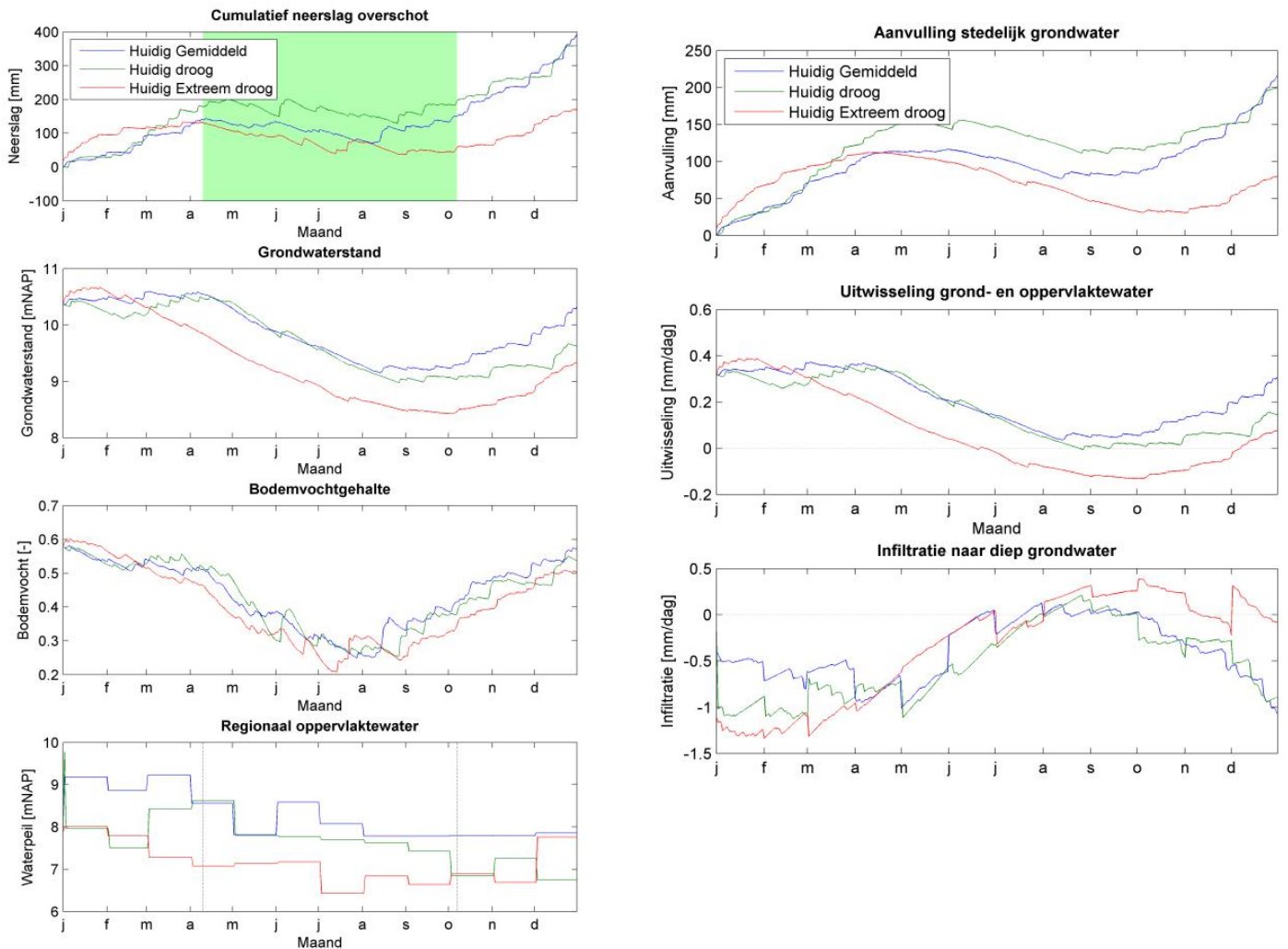
Situatie	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
Huidig Droog	0,05 (stijging)	0	0	0
Huidig Extreem Droog	-0,18	375.000	553.000	0



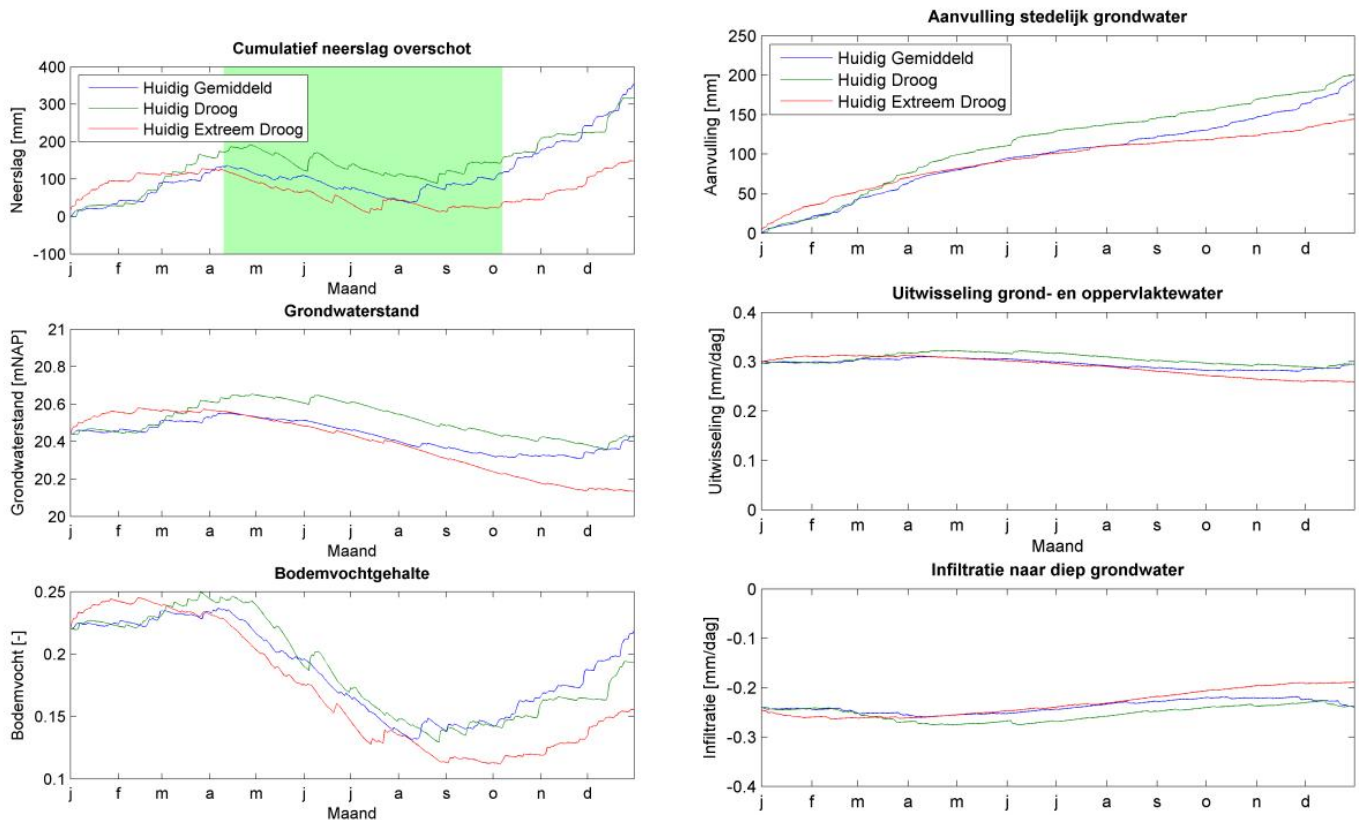
Figuur 3.11 Waterbalans van Arnhem-Oost Laag in de huidige situatie in een gemiddeld, een droog en een extreem droog jaar. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.12 Waterbalans van Arnhem-Oost Hoog voor in de huidige situatie in een gemiddeld, een droog en een extreem droog jaar. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.13 Gemodelleerde variatie in de tijd voor verschillende processen en waterbalansen termen, Arnhem-Oost Laag. De groene arcering geeft het groeiseizoen aan. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.



Figuur 3.14 Gemodelleerde variatie in de tijd voor verschillende processen en waterbalanstermen, Arnhem-Oost Hoog. De groene arcering geeft het groeiseizoen aan. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

3.6.2 Deltascenario's

In Figuur 3.15 en Figuur 3.16 zijn de waterbalansen voor Arnhem-Oost Laag en Hoog onder het W+ Deltascenario weergegeven. Ter vergelijking zijn ze naast de waterbalansen voor de huidige situatie afgebeeld. In Figuur 3.17 is de variatie van een aantal waterbalanstermen door het jaar heen weergegeven. Tabel 3.6 en Tabel 3.7 geven de daling van de grondwaterstand, waterbehoefte en aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

Uit de analyse komen de volgende conclusies en bijzonderheden naar voren:

- De verschillen tussen huidig klimaat en G-scenario zijn verwaarloosbaar, zie Figuur 3.17. Een iets hogere neerslag houdt een iets hogere transpiratie ongeveer in evenwicht. Om die reden, en omwille van het beperken van de hoeveelheid figuren in het hoofdrapport, zijn de waterbalansfiguren voor het G-scenario achterwege gelaten.
- Opvallend in het G-scenario is de afname van de aanvulling van grondwater vanuit het oppervlaktewater. Dit komt doordat het waterpeil in de Nederrijn in dit scenario hoger ligt dan in de huidige situatie.

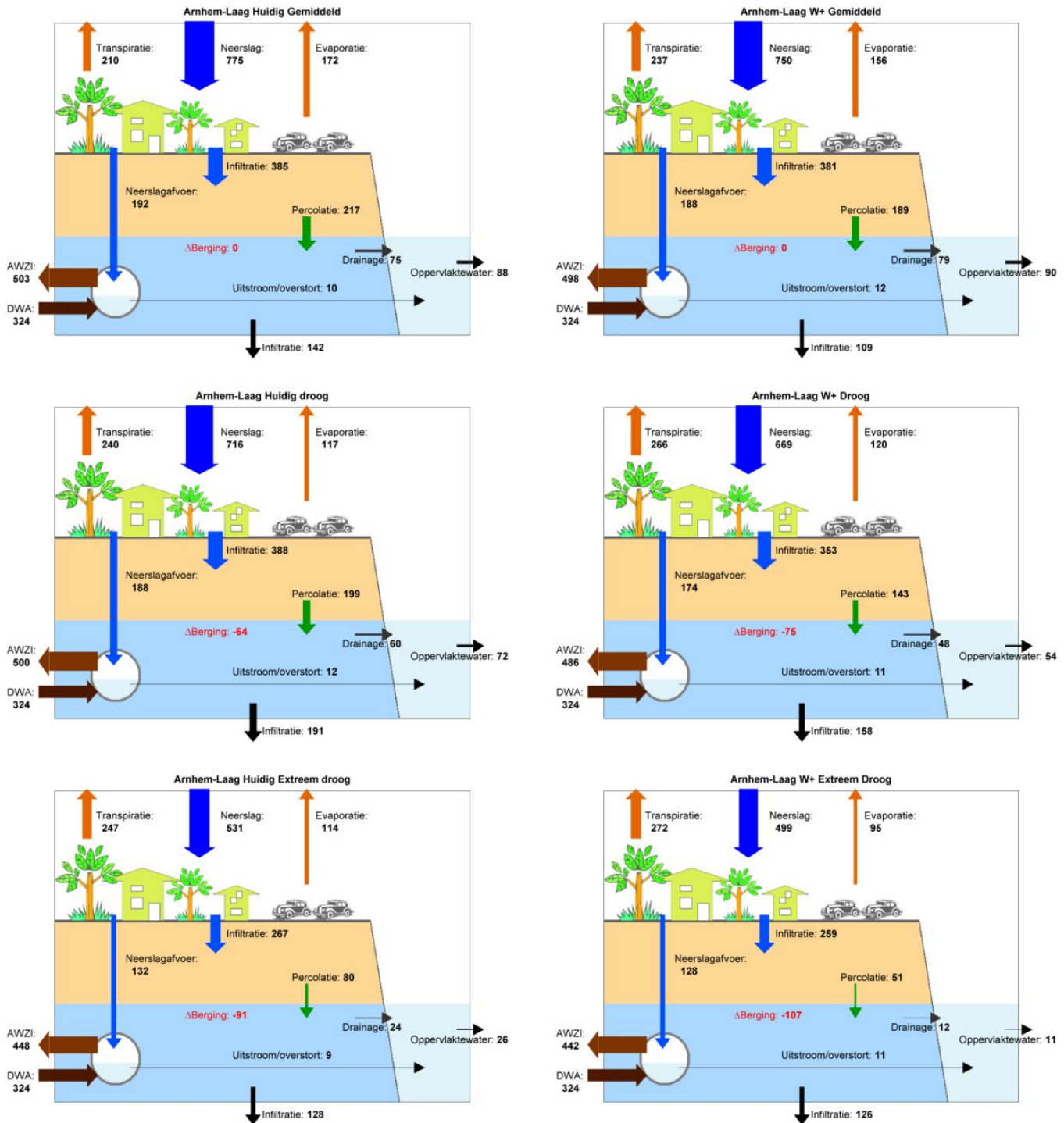
- De verschillen tussen gemiddeld W+ en gemiddeld huidig klimaat zijn van eenzelfde orde grootte als de verschillen tussen een gemiddelde en extreem droge situatie in het huidige klimaat.
- In beide deelgebieden daalt de grondwaterstand. In Arnhem-Oost Hoog resulteert dit in een dalend bodemvochtgehalte en daarmee op een verhoging van de kans op hittestress. In Arnhem-Oost Laag is dit niet het geval.
- In Arnhem-Oost Hoog neemt de drainage van grondwater naar het bekensysteem structureel af. De afname is bescheiden en van een zelfde orde van grootte als de afname in een extreem droog jaar in het huidige klimaat, maar is gedurende het hele jaar aan de orde. Dit suggereert een toename van de periode van droogval in de Arnhemse beken.
- In het W+ scenario daalt het grondwater in de zomer en het najaar enkele decimeters in Arnhem-Oost Laag, en neemt de waterbehoefte toe. Hoewel de aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater toeneemt, is dit niet genoeg om de grondwaterstands daling te voorkomen.

Tabel 3.6 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, Arnhem-Oost Laag. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m3 op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m3 op duizendtallen.

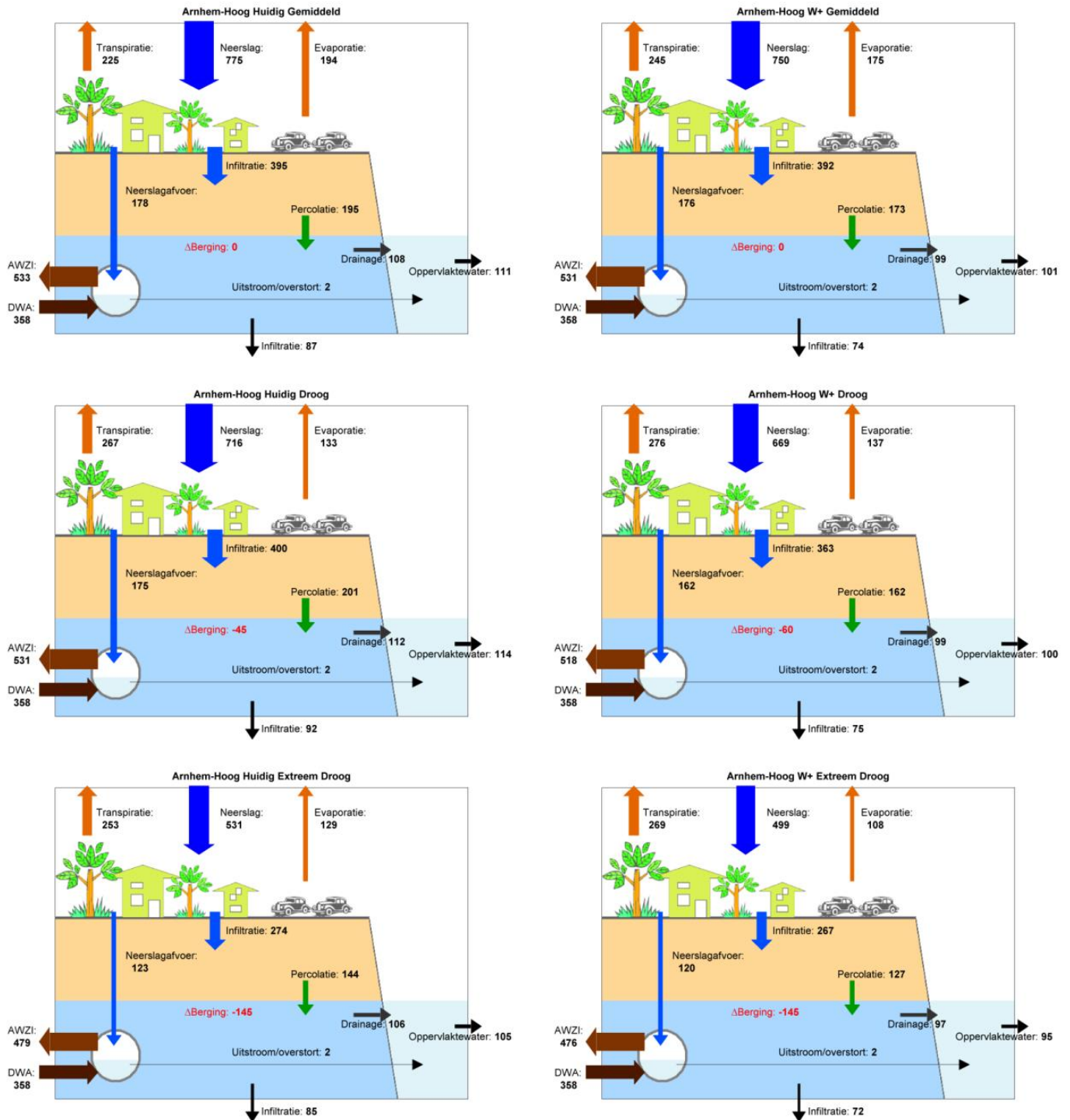
Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	0,08 (stijging)	0	0	0
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,46	293.000	749.000	19.000
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,35	212.000	559.000	90.000

Tabel 3.7 Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, Arnhem-Oost Hoog. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m3 op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m3 op duizendtallen

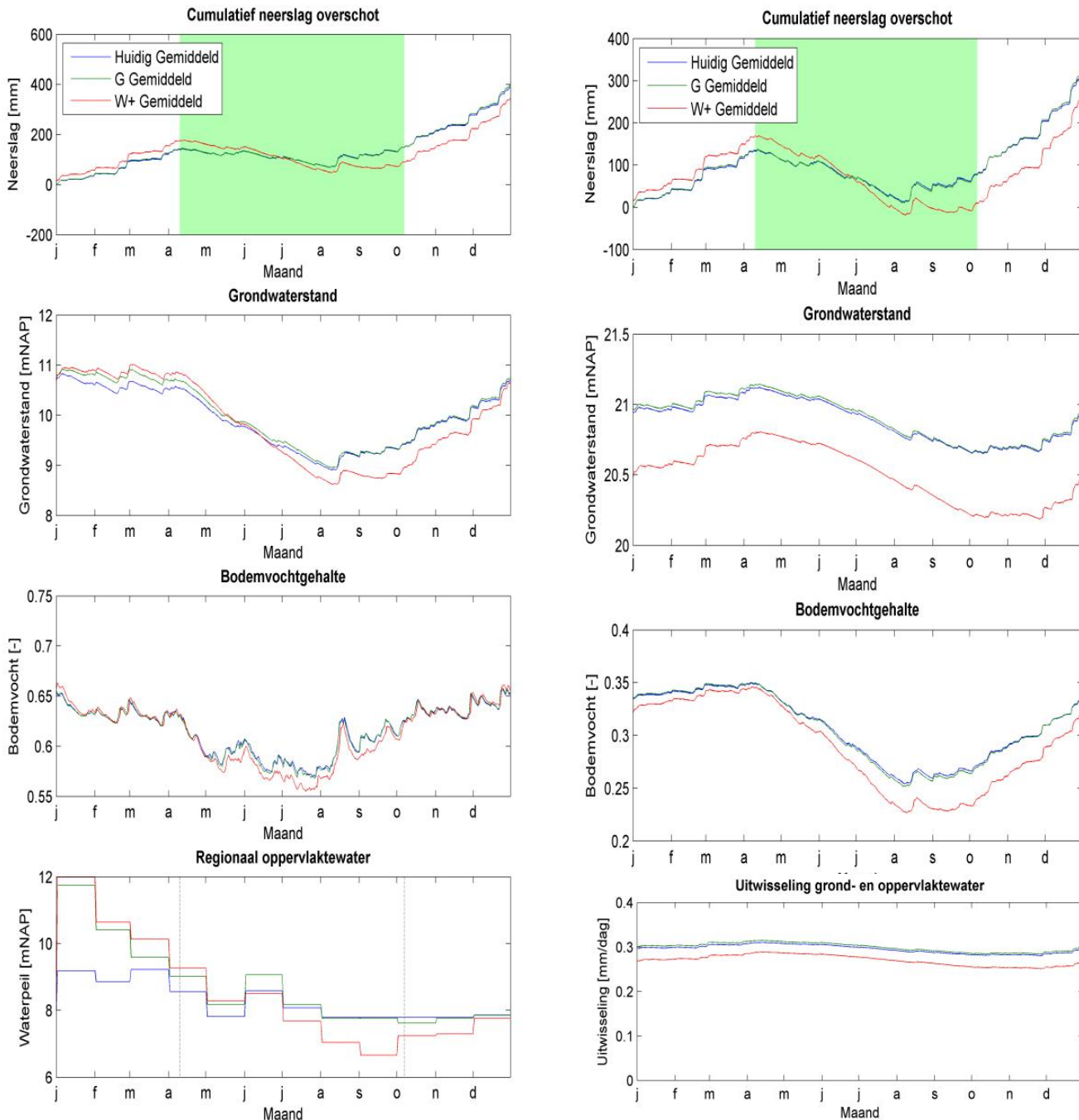
Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	0,03 (stijging)	0	0	0
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,24	458.000	704.000	0
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,22	458.000	681.000	0



Figuur 3.15 Waterbalans van Arnhem-Oost Laag in 2050 in het W+-Deltascenario in een gemiddeld, een droog en een extreem droog jaar. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.16 Waterbalans van Arnhem-Oost Hoog in 2050 in het W+-Deltascenario in een gemiddeld, een droog en een extreem droog jaar. De getallen bij de pijlen zijn in millimeter over het gebied.



Figuur 3.17 Cumulatief neerslag overschot, grondwaterstand, bodemvochtgehalte en regionaal oppervlaktewaterpeil c.q. uitwisseling grond- en oppervlaktewater in Arnhem-Oost Laag (links) en Hoog (rechts) voor een gemiddeld jaar in de huidige situatie en voor in het G en W+ scenario. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

4 Gevoeligheid in casegebieden

4.1 Aanpak en uitgangspunten

In dit onderdeel is voortgebouwd op de geconstateerde kennishiaten en aanbevelingen uit het project Schades door watertekorten en –overlast in het stedelijk gebied. Voor de in dit project geconstateerde relevante schademechanismen is geanalyseerd:

- Ondergrondkarakteristieken. Deze gegevens zijn ondersteunend bij het inschatten van de gevoeligheid van functies in het gebied omdat er een directe relatie is tussen de ondergrond, bouwwijzen en vegetatietypen.
- Verkenning van de gevoeligheid van bebouwing, infrastructuur en groen (wat zijn de kenmerken van de aanwezige objecten; wat maakt deze wel/niet kwetsbaar voor welke schademechanismen; welke schades zijn door welke schademechanismen reeds opgetreden en welke worden verwacht) en gevoeligheid van gebied voor hitte.
- Aanduiden van de voornaamste gevoeligheden o.b.v. relatieve omvang mogelijke schade en beheerkosten

Het benoemen van kostendragers en verantwoordelijkheden is reeds onderwerp van een andere studie in het DPNH. Hierop wordt in dit project daarom niet diepgravend ingegaan.

De analyse beperkt zich tot een schets van de huidige situatie.

Er worden in het project geen (nieuwe) schadebedragen geraamd door een connectie te leggen tussen de verandering van de waterbalans en gevoeligheden. Daarvoor zijn schadefuncties noodzakelijk waarin de uitkomsten van deze studie kunnen worden gebruikt.

4.2 Checklist potentieel gevoelige objecten

Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.5 bevatten een generiek overzicht van in stedelijke omgeving relevante objecten die gevoelig zijn voor veranderingen in de waterhuishoudkundige toestand. Er is een onderverdeling gemaakt naar bebouwing, infrastructuur, waterkwaliteit, groen en hitte. Aangegeven is hoe het mechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameter is. Per casegebied is nagegaan of deze potentiële gevoelige objecten en mechanismen aanwezig zijn.

NB. Er is bij de analyse van de casegebieden onvoldoende informatie gevonden om uitspraken te doen over de ontwikkeling van de waterkwaliteit. Dit thema wordt voor de gebieden daarom niet apart behandeld. Voor de volledigheid is er wel een tabel t.a.v. waterkwaliteit gemaakt.

Tabel 4.1 Potentieel gevoelige objecten in de stad. Hitte

	Potentiele gevoelige objecten	Ongewenste gebeurtenis	suboorzaak	Bepalende parameter
1a	Wijk (of deel ervan) ervaart toename van hittestress	Oncomfortabele toename van temperatuur.	Temperatuurverhoging in combinatie met bebouwing, verharding, belemmering natuurlijke verkoeling enz.	Stedelijke invulling
1b	Wijk (of deel ervan) ervaart toename van hittestress	Afname van verkoelende effecten.	Afname van 'groen', zoals bomen, parken, groene daken en gevels (remt de opslag van warmte) waardoor de werkende capaciteit afneemt.	Hoeveelheid 'groen'

Tabel 4.2 Potentieel gevoelige objecten in de stad. Bebouwing

	Potentiele gevoelige objecten	Ongewenste gebeurtenis	suboorzaak	Bepalende parameter
1a	Gebouwen met fundering op palen	Schade aan gebouw door zakking fundering.	Als gevolg van een ophoging of grondwaterstandsverlaging zal ondergrond gaan samendrukken. Door de zetting van de ondergrond gaat grond aan paal hangen en neemt de (negatieve) kleefkracht op palen toe. Deze extra kracht verhoogt de kracht in het materiaal. Materiaal kan bezwijken indien materiaalsterkte van de paal onvoldoende is.	Freatische grondwaterstand Gewicht ophoging Sterkte materiaal
1b	Gebouwen met fundering op palen	Schade aan gebouw door zakking fundering.	Als gevolg van een ophoging of grondwaterstandsverlaging zal ondergrond gaan samendrukken. Door de zetting van de ondergrond gaat grond aan paal hangen en neemt de (negatieve) kleefkracht op palen toe; deze extra kracht verhoogt de kracht die overgebracht wordt op de ondergrond. Paal gaat zakken indien de draagkracht van de ondergrond onvoldoende is.	Freatische grondwaterstand

1c	Gebouwen met fundering op houten palen	Schade aan gebouw door zakking fundering.	Door verlaging grondwaterstand kan het bovenste deel van paal (+ houten onderdelen van de funderingsconstructie) (tijdelijk) droog komen te staan waardoor het hout wordt aangetast en kan bezwijken. De bovenbouw zal dan gaan zakken. Grondwaterstandsverlaging is meestal een reactieve maatregel op de bodemdaling. (Tijdelijke) droogstand van houten palen veroorzaakt 'paalrot'.	Freatische grondwaterstand Bovenkant paalhout
2a	Gebouwen met fundering op staal	Schade aan gebouw door zakking fundering	Een grondwaterstandsverlaging veroorzaakt een zetting van samendrukbare lagen samendrukken en de fundering 'meezakt'.	Freatische grondwaterstand Diepte fundering Heterogeniteit ondergrond Diepte samendrukbare lagen
2b	Gebouwen met fundering op staal	Schade aan gebouw door zakking fundering	Een grondwaterstandsverhoging verlaagd de opneembare belasting door de ondergrond waarna de fundering zal zakken. Dit komt alleen voor wanneer bij het ontwerp van een fundering uitgegaan is dat de grondwaterstand niet tot onderkant fundering of maaiveld kan komen.	Freatische grondwaterstand Diepte fundering Hoog ligging t.o.v. grondwater
3	Kelders onder gebouwen	Wateroverlast Zie ook: Parkeergarages (open vloeren / polderprincipe	In kelders doorgaans geen drain of riool aanwezig.	Freatische grondwaterstand Neerslag diepte
4	Berg/ bezinkbasins riolering	Schade aan bassins of aansluitingen door opdrijven of zakken van bassins bij veranderende grondwaterstand.	Door verandering grondwaterstand/stijghoogte neemt opwaartse druk toe (stijging) of af (daling) waardoor effectief gewicht veranderd en zwel of zakking kan optreden.	Freatisch grondwaterstand Stijghoogte

5	Parkeergarages (open vloeren / polderprincipe)	Wateroverlast door onvoldoende capaciteit grondwaterafvoer door bodem.	Door toename grondwaterstand/stijghoogte neemt kwel van grondwater toe, waardoor meer grondwater moet worden afgevoerd.	Freatisch Capaciteit riool
6	Parkeergarages (gesloten vloeren)	Schade aan vloeren en aansluiting met muren door grotere waterdruk onder vloer.	Door verhoging grondwaterstand/stijghoogte neemt opwaartse druk toe waardoor vloer zwaarder belast wordt.	Freatisch grondwaterstand Stijghoogte
7	Sluiskolken	Schade aan vloeren en aansluiting met muren door grotere waterdruk onder vloer. Eventueel in combinatie met verlaagde waterstand in kolk.	Door verhoging grondwaterstand/stijghoogte neemt opwaartse druk onder vloer toe waardoor vloer zwaarder belast wordt en neemt waterdruk op muur toe waardoor muur zwaarder belast wordt.	Freatisch grondwaterstand Stijghoogte
8a	Tunnel	Zie berg/bezinkbassins		
8b	Tunnel	Wateroverlast door onvoldoende capaciteit drainage/riolering	Zie Parkeergarages (open vloeren / polderprincipe)	
8c	Tunnel	Wateroverlast door onvoldoende capaciteit drainage/riolering	Onvoldoende afvoer door neerslag	Neerslag Capaciteit riool
9	Landhoofden bruggen/viaduct en	Schade aan landhoofden door zakking bij fundering op staal	Zie gebouwen met fundering op staal;	
10	Ondergrondse afvalcontainers	Zie berg/bezinkbassins		
11	Beschoeiing kaden	Schade aan beschoeiing of kademuren door bezwijken of verplaatsen	Door een veranderde grondwaterstand verandert de belasting op de constructie waarna deze kan bezwijken (materiaal niet sterk genoeg) of zal verplaatsen (grond niet sterk genoeg).	Freatische grondwaterstand

In de tabel Infrastructuur zijn naast gevoelige objecten tevens aspecten opgenomen die op gebiedsniveau spelen en invloed kunnen hebben op het functionele gebruik van infrastructuur.

Tabel 4.3 Potentieel gevoelige objecten in de stad. Infrastructuur

	Potentiele gevoelige objecten	Ongewenste gebeurtenis	Suboorzaak	Bepalende parameter
1a	Wegverharding/wegen	Schade aan verharding door zakking wegen	Grondwaterstandsverlaging veroorzaakt een samendrukking van de ondergrond waardoor weg zakt.	Freatische grondwaterstand Heterogeniteit ondergrond
1b	Wegverharding/wegen	Schade aan verharding door zakking wegen	Grondwaterstandsverhoging veroorzaakt afname van opneembare belasting door weg/verkeer waardoor (lokaal) zakkingen ontstaan. Opvriezen van wegen.	Freatische grondwaterstand
1c	Wegverharding/wegen	Beperkte beschikbaarheid van weg door wateroverlast op de weg.	Neerslag veroorzaakt water op de weg waardoor de capaciteit van de weg sterk afneemt.	Neerslag Infiltratie Capaciteit riool
2	Dataleidingen/kabels Specifiek aandacht voor (huis)aansluitingen	Schade aan relatief buigzame kabels/leidingen door te grote trekspanningen als gevolg van zakkingen	Grondwaterstandsverlaging of ophoging veroorzaakt samendrukking van samendrukbare grondlagen. De kabels zakken mee. Hierdoor willen de kabels verlengen. Het materiaal kan de spanning niet meer opnemen.	Freatische grondwaterstand
3	Riolering Specifiek: huisaansluitingen, aansluiting bij inspectieputten	Schade aan rioolbuizen door zakking buizen als gevolg van bodemdaling.	Grondwaterstandsverlaging of ophoging veroorzaakt samendrukking van samendrukbare lagen. De rioolbuizen zakken mee. Door ongelijkmatige zakkingen ontstaan lekkages in buisaansluitingen	Freatisch grondwaterstand

4	Watertransport/gastransport/stadsverwarming leidingen Aansluitingen	Schade aan leidingen door zakking leidingen als gevolg van bodemdaling.	Grondwaterstandsverlaging of ophoging veroorzaakt samendrukking van samendrukbare lagen. De relatief stijve leidingen zakken mee. Door ongelijkmatige zakkingen ontstaan buigspanningen in het materiaal. Het materiaal kan de spanningen niet meer opnemen.	Freatische grondwaterstand
5	Warmte-koude opslag	Negatieve beïnvloeding van effectiviteit van WKO	Door verandering van grondwaterstroming(richting) wordt efficiency van het systeem beïnvloed	stijghoogteverdeling
6	Verdiepte liggingen/onderdoorgangen	Wateroverlast door onvoldoende capaciteit drainage/riolering	Onvoldoende afvoer door neerslag	Neerslagintensiteit Capaciteit riool
7	Metro lijn/tunneltracé's	Schade aan tunnel door opdrijven bij toenemende grondwaterstand.	Grondwaterstandsverhoging leidt tot een toename van de opwaartse druk. Geld alleen voor ondiepe tunnels die niet geheel in het grondwater liggen.	Freatische grondwaterstand stijghoogte
8	Archeologie	Schade aan archeologische locaties door verdroging.	Grondwaterstandsverlaging leidt tot droogvallen locatie waardoor objecten vergaan.	Freatische grondwaterstand
9	Grondwaterkwaliteit	Door veranderde omstandigheden verandert de waterkwaliteit (verziltning, verzuring enz.)	Grondwaterstandsverlaging leidt tot meer kwel of horizontale toestroming. Hierdoor kan de kwaliteit van het grondwater veranderen (o.a. verziltning).	Freatische grondwaterstand Stijghoogte
10	Verontreinigingslocaties	Door veranderde omstandigheden kan verontreiniging zich verplaatsen.	Grondwaterstandsverlaging of verhoging verandert de grondwaterstroming waardoor verontreinigingslocaties zich kunnen verplaatsen.	Freatische grondwaterstand Stijghoogte

11	Bodemdaling	Schade door toenemende maaiveld daling.	Langdurige of periodieke grondwaterstandsverlagingen (of ophogingen) zorgen voor een permanente of toenemende zetting van de ondergrond en daardoor een permanente of toenemende zakking van het maaiveld.	Freatische grondwaterstand Stijghoogte
12a	Stabiliteit taluds	Schade aan taluds door onvoldoende stabiliteit bij een stijgende grondwaterstand.	Grondwaterstandsverhoging leidt tot een afname van de opneembare schuifkracht. Het talud kan instabiel worden als de belasting niet meer kan worden opgenomen.	Freatische grondwaterstand Stijghoogte (dijken)
12b	Stabiliteit taluds	Schade aan taluds door onvoldoende stabiliteit na erosie van oppervlak door neerslag.	Neerslag kan leiden tot erosie van de beschermingsbekleding van het oppervlak (zoals gras, stenen). Het talud kan dan instabiel worden als water het talud verder erodeert of daarna kan intreden in het talud.	Neerslag Freatische grondwaterstand

Tabel 4.4 Potentieel gevoelige objecten in de stad. Waterkwaliteit

	Potentiele gevoelige objecten	Ongewenste gebeurtenis	suboorzaak	Bepalende parameter
1	Open water	Afname waterkwaliteit door onvoldoende verversing van water	Onvoldoende neerslag of grondwaterstandsverlaging leidt tot verandering kwaliteit.	Neerslag Freatische grondwaterstand Stijghoogte
2	Open water	Afname waterkwaliteit door vervuiling.	Vervuiling door derden veroorzaakt afname waterkwaliteit.	'derden'

Tabel 4.5 Potentieel gevoelige objecten in de stad. Groen

	Potentiele gevoelige objecten	Ongewenste gebeurtenis	suboorzaak	Bepalende parameter
1	Groen	Schade aan groen door verslechterde leefomstandigheden	Grondwaterstandsverlaging of verhoging leidt tot verdroging of vernatting waardoor groen ziek wordt of eerder vergaat.	Freatische grondwaterstand

4.3 Gevoeligheid in Rivierenbuurt

4.3.1 Ondergrondkarakteristieken

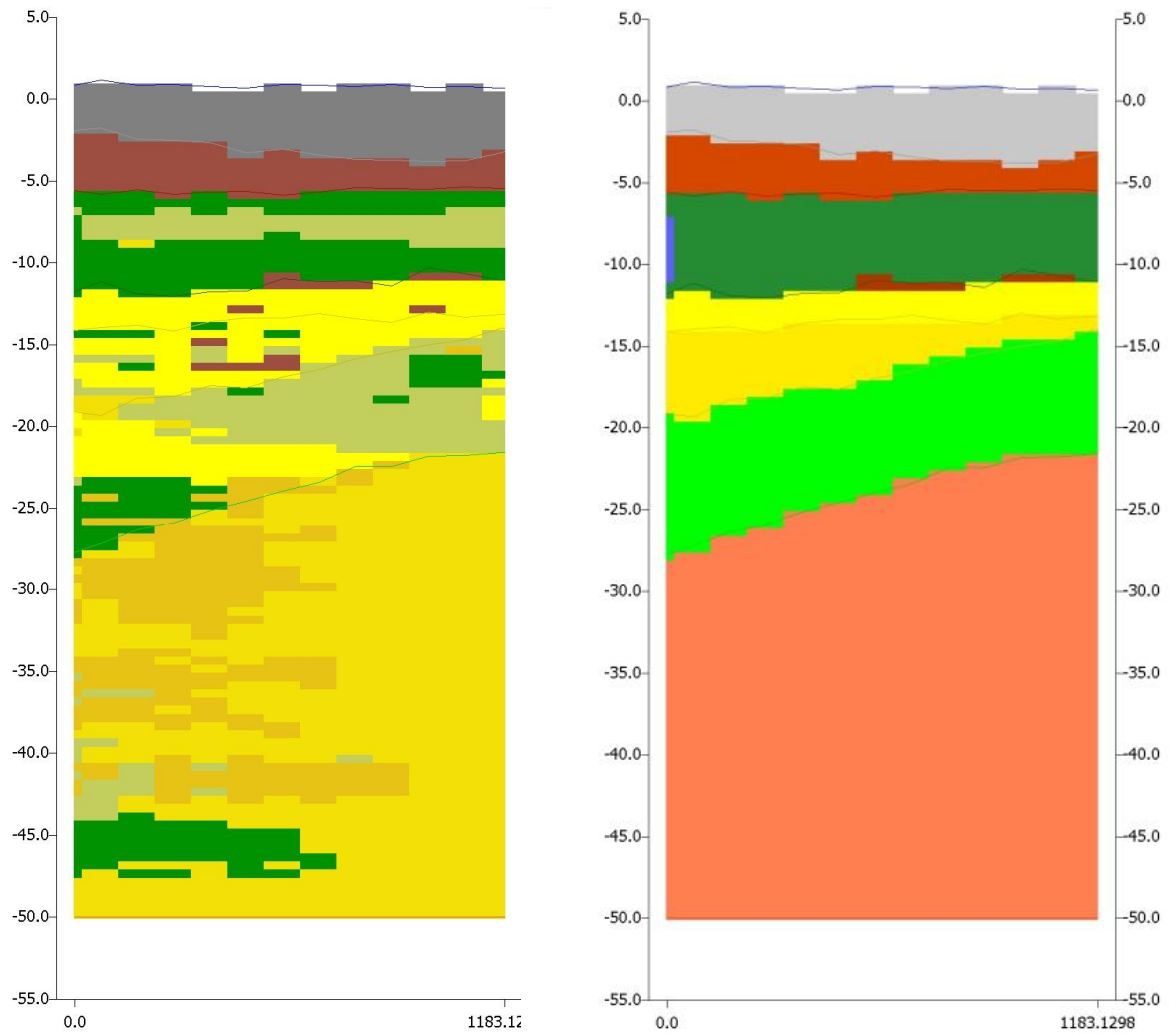
Voor het beschouwen van de lokale ondergrondomstandigheden op meer detailniveau dan genoemd in paragraaf 2.2 en in relatie met de functies in het gebied zijn gegevens verzameld met betrekking tot (het gebruik van) de ondergrond. Voor een beschrijving van de ondergrond is gebruik gemaakt van het 3D-ondergrondmodel GeoTop, aangevuld met gegevens van sonderingen en boringen uit DINO, het data en informatiebestand van de Nederlandse ondergrond, beide in beheer bij de Geologische Dienst Nederland van TNO.

GeoTop is een 3D ondergrondmodel dat is opgebouwd uit blokken van 100*100*0,5 m tot een diepte van NAP – 50 m. Van ieder blok is uit de beschikbare informatie over de ondergrond uit boringen en sonderingen statistisch bepaald wat de meest waarschijnlijke grondsoort is en bij welke geologische laag deze is ingedeeld.

In Figuur 4.1 zijn 2 lijnen weergegeven waarlangs dwarsdoorsnedes zijn gegenereerd uit het GeoTop model. De dwarsdoorsnedes zijn Noord-Zuid (rood) en West-Oost (blauw) georiënteerd.

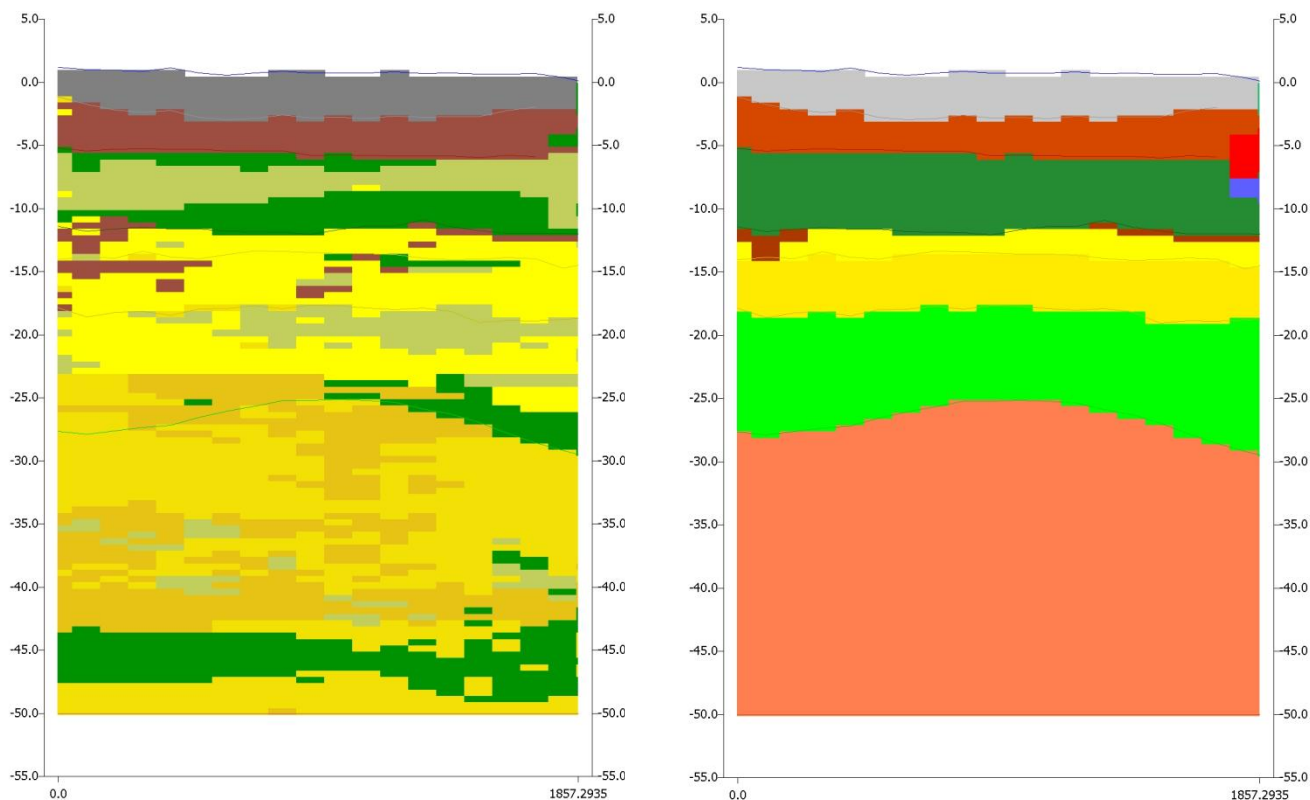


Figuur 4.1 Locatie van dwarsprofielen NZ en WO uit het GeoTop model



Figuur 4.2 Dwarsprofiel NZ: Grondopbouw uit GeoTop model





Figuur 4.3 Dwarsprofiel WO: Grondopbouw uit GeoTop model

Het typisch Amsterdamse grondprofiel bestaat uit een Pleistocene en Holocene opvulling van een glaciaal bekken dat door stuwing in de Saalien ijstijd is gevormd. De Rivierenbuurt ligt op de zuidelijke rand van dit bekken. De top van het Pleistoceen ligt op ca. NAP – 12 m. Het Pleistoceen is voornamelijk zandig ontwikkeld. De Eem- en glaciale klei komen alleen nog langs de noordrand voor. De Eemklei is sterk zandig. Tussen NAP – 12 m en NAP – 18 m komen periglaciaire fijne zanden voor, de zogenaamde Eerste en Tweede Zandlaag, meestal gescheiden door een dunne kleiige laag. De houten paalfunderingen zijn meestal gefundeerd in de Eerste en Tweede Zandlaag. Betonpalen zijn meestal gefundeerd in de Tweede Zandlaag. Voor zware constructies, zoals moderne hoogbouw, worden de palen ook wel in de zandlaag onder de bekkenopvulling gefundeerd. Deze laag wordt in Amsterdam de Derde Zandlaag genoemd. De holocene lagen vertonen het typische profiel van de Amsterdamse binnenstad: een laag opgebrachte grond tot NAP -2 tot -4 m, daaronder Hollandveen tot circa NAP – 6 m, gevolgd door wadafzettingen en zeeklei van de Formatie van Naaldwijk, en het Laagpakket van Wormer tot een diepte van NAP – 12 m. Deze laag bestaat uit twee kleilagen, gescheiden door een zandige laag, die soms ook wel als Boerenzandlaag wordt aangeduid. Aan de basis van het Holoceen is, zeer discontinu, een dunne laag Basisveen aanwezig. De opgebrachte grond in de Rivierenbuurt bestaat uit schoon zand.

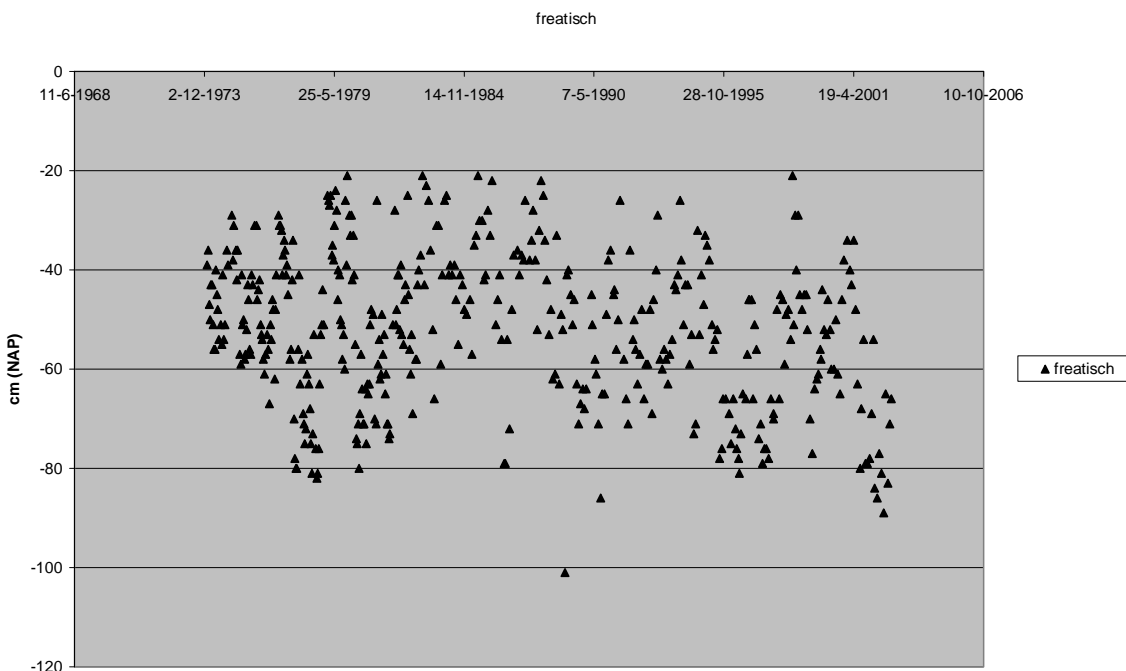
De maaiveldhoogte in de Rivierenbuurt ligt uniform op NAP +0,5 m. Onder de ophooglaag en op de Eerste Zandlaag bevindt zich een zettingsgevoelig pakket. Tijdens de aanleg is de wijk integraal opgehoogd met schoon zand op de Hollandveenlaag. Door het gewicht van het ophoogzand is er in de loop der tijd zetting opgetreden. Het is waarschijnlijk dat dit tot spanningen in de funderingspalen heeft geleid als gevolg van negatieve kleeft. Ook kunnen zettingsverschillen tot spanningen in kabels en leidingen hebben geleid.

Dino

In Figuur 4.5 is een situatie met de locaties van beschikbare locaties in DINO weergegeven. In bijlage E zijn resultaten van een selectie van sonderingen en boringen weergegeven.

De grondwaterstand ter plaatse wordt mede bepaald door het Amsterdamse boezempeil (hier de Amstellandboezem) en de waterlopen die de Rivierenbuurt omsluiten. Dit peil wordt en werd in het verleden op NAP – 0,4 m gehouden. De invloed van het vaste peil in de watergangen is van een beperkte omvang. Uit de peilbuiswaarnemingen van B25G0675 (locatie Pres. Kennedylaan hoek Alblasstraat) blijkt dat de freatische grondwaterstand in de wijk zelf aanmerkelijk lager kan zijn en tussen NAP -0,2 m en NAP – 0.85 kan fluctueren. het gemeentelijke grondwatermeetpunt in de Rooseveltlaan laat echter een verloop zien dat slechts ca. 0.20 m rond het boezempeil fluctueert. Uit een gesprek met Waternet is verder nog opgemerkt dat de RAI een parkeergarage heeft die droog wordt gehouden door een bemaling, waardoor de grondwaterstanden in de omgeving lager zijn. Dit geldt ook voor de begraafplaats Zorgvlied ten zuiden van de President Kennedylaan, waar een onderbemaling met een streefpeil van NAP – 2 m wordt aangehouden.

De stijghoogte in de eerste en tweede zandlaag is gemiddeld lager dan de freatische grondwaterstand, zodat van inzijging sprake is.



Figuur 4.4 Freatische grondwaterstanden peilbuis B25G0675

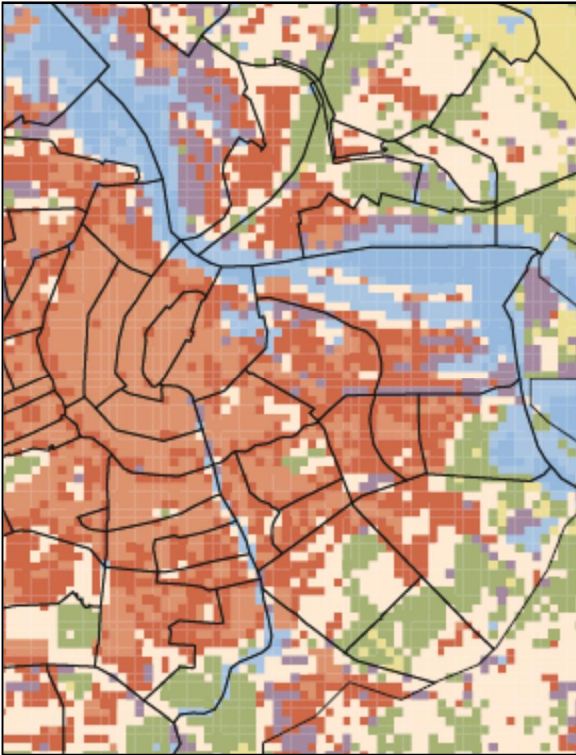
De zoet-brak grens bevindt zich op een diepte NAP – 60 tot 65 m. Het freatische grondwater heeft echter een chloridegehalte van meer dan 600 mg/l.



Figuur 4.5 Sonderingslocaties (selectie) in DINO

4.3.2 Hitte

Bepaalde delen van de Amsterdamse binnenstad zijn zeer gevoelig voor het warmte-eiland effect. Hoewel het College van B&W in juli 2011 in antwoord op schriftelijke vragen nog indiceerde dat door de relatief grote hoeveelheid bomen en oppervlaktewater, de nabijheid van Noordzee en IJsselmeer, Amsterdam waarschijnlijk in een relatief gunstige positie verkeerde, is in de recente studie Amsterwarm: Gebiedstypologie warmte-eiland Amsterdam, van Frank van der Hoeven, Alex Wandl, in het kader van het Kennis voor Klimaat project Climate Proof Cities, duidelijk gemaakt dat dit een te rooskleurig beeld is. Tijdens een hittegolf zijn overdag temperaturen 10 a 20 graden hoger dan in het landelijke Waterland gemeten, en 's-nachts een geringe afkoeling. Voor de Rivierenbuurt komt daar de inefficiënte bouw bij. Het gebrek aan oppervlaktewater in de wijk en de hoge verhardingsgraad dragen hieraan bij. De relatief hoge bomendichtheid, die voor schaduw en transpiratie zorgt, vangt het warmte-eilandeffect dus maar voor een beperkt deel op.



f.1 Typologie ruimtegebruik

	Satellietbeeld			Gemeente GIS		3D-model	
	Warmte-eiland LST	Verhardings-index 0-100	Vegetatie index 0-1	% Oppervlakte water	% Verkeersoppervlak	Gebouwschil index	Schaduw 0-600
warmst	10°C	52	0.4	5%	49%	1.8	281
warmer	9°C	56	0.4	6%	30%	4.9	321
heet	9°C	50	0.3	14%	9%	0.4	148
warm	7°C	33	0.5	5%	37%	0.9	278
koel	3°C	18	0.7	11%	15%	0.2	293
koeler	2°C	11	0.7	7%	3%	0.0	30
koelst	0°C	19	0.3	72%	4%	0.1	76
fris	-5°C	2	0.0	98%	0%	0.0	9

Figuur 4.6 Hittekaart uit studie Amsterwarm

In de Structuurvisie 2040 en in de nota Amsterdam Waterbestendig wordt nadrukkelijk ruimte gemaakt voor klimaatbestendige maatregelen m.b.t. hittestress. Hierin zijn de recente onderzoeksresultaten nog niet meegenomen, zodat in de plannen alleen in kwalitatieve zin hierop wordt ingegaan.

4.3.3 Bebouwing

Onder bebouwing worden in dit verband woningen, woongebouwen, bedrijfspanden, en bouwwerken genoemd, die als losstaande objecten, voorzien van een fundering, gezien kunnen worden.

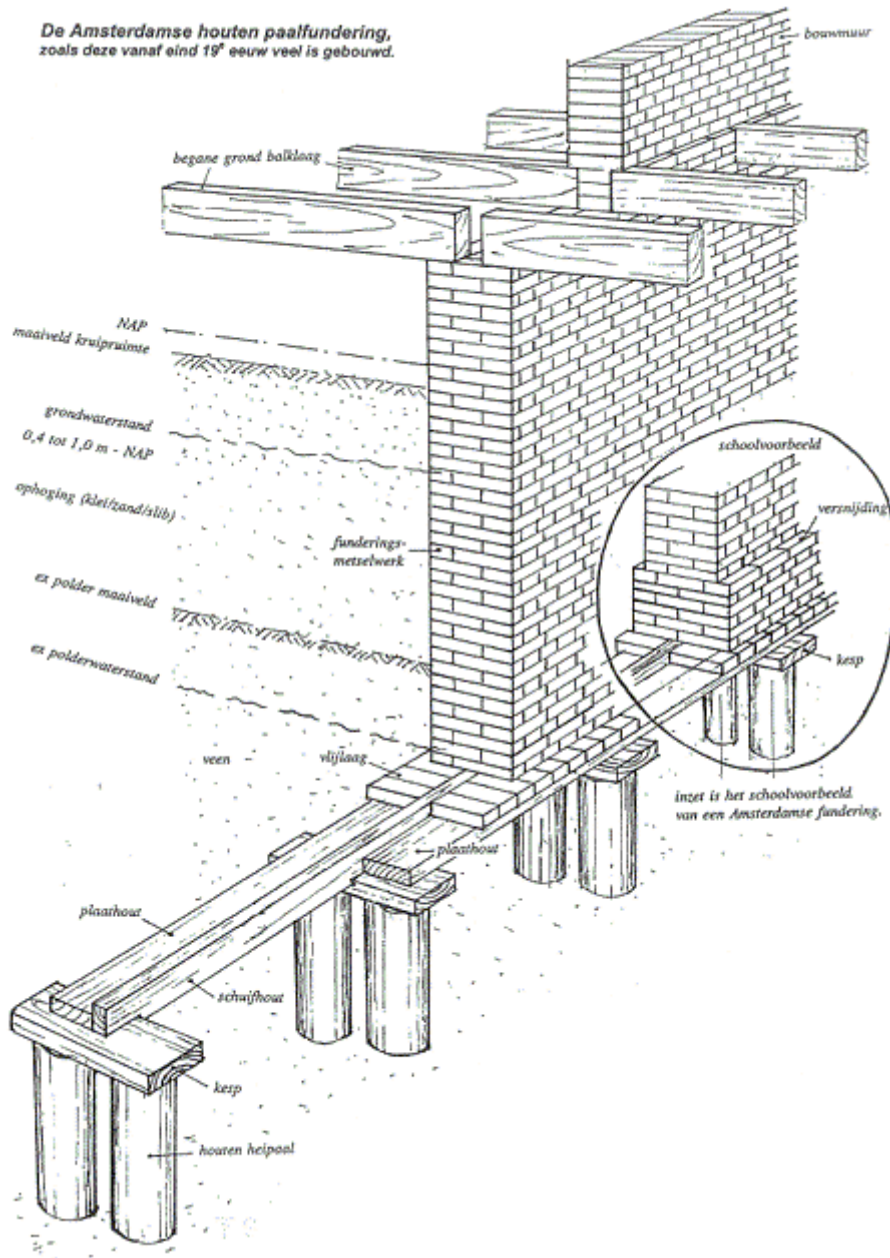
In Tabel 4.2 is de meest relevante potentiële gevoelige bebouwing weergegeven. Aangegeven is hoe het mechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameters zijn. Wanneer deze aanwezig zijn dan wordt verder worden ingegaan op de verwachte werkelijke gevoeligheid.

Huidige situatie

Na analyse van de beschikbare informatie van Stadsdeel Zuid en een gesprek met Waternet is vastgesteld dat voor het case gebied Rivierenbuurt de volgende relevante soorten bebouwing aanwezig is.

1. Gebouwen met funderingen op palen (hout en beton)
2. Gebouwen met fundering op staal
3. Kelders onder gebouwen

De Rivierenbuurt maakt deel uit van de Gordel 20-40, de grote stedelijke uitbreiding tussen de twee wereldoorlogen, meer specifiek Berlage's Plan Zuid. De wijk kenmerkt zich door gesloten woonblokken van vier tot zes lagen hoog, brede, groene doorgangswegen en smallere ventwegen en straten. In de wijk bevindt zich de eerste hoogbouw van Amsterdam, een woontoren van 12 verdiepingen. Enkele moderne gebouwen zijn na 1960 gebouwd waarvan de toren van het Okura Hotel het opvallendste en hoogst gebouw is. De wijk wordt aan de noordzijde begrensd door het Amstelkanaal, aan de oostzijde door de Amstel, aan de westzijde door de Boerenwetering en aan de zuidzijde door de RAI/Europaplein en de President Kennedylaan.



Figuur 4.7 Ideale situatie Amsterdamse houten paalfundering (bron: Stadsdeel Zuid)

Met uitzondering van de enkele na-oorlogse bebouwing is de Rivierenbuurt gefundeerd op houten palen. Bouw- en Woningtoezicht heeft een uitgebreide inventarisatie van de staat van de funderingen uitgevoerd. Van 1651 panden zijn gegevens verzameld. In de meeste gevallen betreft dit herhaalde metingen aan meetbouten. Van ca. 8% van de panden is bekend dat er funderingsherstel heeft plaatsgevonden. Bij 31 daarvan is een inspectieput gegraven. Uit de gegevens van de inspectieputten blijkt dat de bovenkant van het funderingshout varieert van NAP – 0,55m tot NAP – 1,77 m. De gemiddelde zettingssnelheid van de gemeten panden bedraagt 1 mm/jaar. Bij 11 gemeten panden is de zettingssnelheid over de hele meetperiode groter dan of gelijk aan 3 mm/jaar, wat een indicatie is dat er een probleem met de fundering is. Uit inspecties blijkt dan in de meeste gevallen dat er sprake is

van paalrot en daardoor breuk van houten funderingsdelen. Metselwerk is in het algemeen niet aangetast. Uit onderzoek naar de uitgebreide schades in de 19^e eeuwse gordel was vaak sprake van een oorzaak in het ontwerp. Door onbekendheid met dit fenomeen was geen rekening gehouden met negatieve kleeft, waardoor de palen overbelast raakten. Door het toepassen van de ophoging bij het bouwrijp maken van de Rivierenbuurt is het niet uit te sluiten dat door de als gevolg van de ophoging optredende zetting van de onderliggende slappe lagen bij sommige palen negatieve kleeft tot het verlies van draagvermogen heeft geleid.

De door Bouw en Woningtoezicht van Amsterdam gewenste waterdekking (de hoogte van de freatische grondwaterstand boven het funderingshout) is 40 cm. Het is echter aan te nemen dat, gezien de waargenomen grondwaterstanden en het niveau van de bovenkant van de funderingen (periodieke) droogstand tot paalrot heeft geleid.

Bij panden waar de gemeten zetting minder dan 3 mm/jaar bedraagt, kan toch de fundering aangetast zijn. Er moet rekening gehouden worden met het feit dat op den duur veel meer panden ontoelaatbare zetting zullen gaan vertonen als gevolg van doorgaande paalrot. Een voldoende waterdekking is geen garantie dat de fundering goed blijft. Ook onder water zal aantasting door bacteriën optreden. Dit is onder meer afhankelijk van de toegepaste houtsoort en –kwaliteit en afhankelijk van het zuurstofgehalte van het water. Uiteindelijk zullen alle paalfunderingen eens aan vervanging toe zijn. Bouw en Woningtoezicht stelt bijvoorbeeld dat het twijfelachtig is dat een matige fundering (d.w.z. een fundering waarbij 1,5 mm/jaar zakking optreedt) nog 25 jaar meegaat.

Op staal gefundeerde gebouwen, uitgezonderd mogelijk in de loop der tijd neergezette schuurtjes e.d., komen niet voor.

Door Waternet is aangegeven dat in een groot deel van de Rivierenbuurt in tuinen sprake is van wateroverlast bij neerslag in de winterperiode. Veel tuinen hebben een lagere ligging.

In de na-oorlogse gebouwen, zoals de RAI, zijn de kelders waterdicht of met drainage aangelegd. Bij funderingsherstel worden soms kelderruimtes onder de oorspronkelijke panden gebouwd. Gezien de huidige grondwaterstand moeten deze waterdicht worden aangelegd. Nieuwe kelders moeten om die redenen niet gevoelig voor veranderingen in de waterbalans worden aangelegd, maar oudere kelders zijn wel gevoelig voor hogere grondwaterstanden.

Enkele opmerkingen over de beïnvloeding van panden onderling. Naast het optreden van vershilzettingen door verschillen in draagvermogen en aantasting van de fundering onder een pand kan schade optreden in belendende panden door verschillen in zetting tussen de panden. Door verschillen in zetting tussen gerepareerde of onderkelderde panden en zakkende buurpanden kunnen onderling schades optreden.

Relatie tussen waterbalans en gevoeligheid

De gevoeligheid van houten funderingen voor droogstand is een belangrijke schade factor in de relatie tot de waterbalans. Naar wordt aangenomen veroorzaakt een cumulatieve droogstand (som van de perioden waarin droogstand optreedt) van het funderingshout van 10 tot 20 jaar, afhankelijk van de dikte van de paal, en schade aan de fundering die funderingsherstel noodzakelijk maakt. In de praktijk van Bouw en Woningtoezicht worden panden, waarvan bekend is dat het funderingshout circa 5% van het jaar droogstaat met een

waarschuwingcode rood aangeduid, ten teken dat hier schade verwacht moet worden en een inspectie op zijn plaats is.

De gemeten en gemodelleerde grondwaterstanden laten, in vergelijking met de hoogte van het funderingshout, zien dat bij het huidige klimaat en zonder aanvullende maatregelen voor een aantal panden blijft gelden dat de grondwaterstanden regelmatig tot beneden de bovenzijde van het funderingshout daalt, waardoor schade kan optreden.

De additionele negatieve gevolgen van een G klimaatscenario zijn beperkt, doordat de waterbalans (en dus de resulterende grondwaterstand) niet veel verschilt van die bij het huidige klimaat.

In de W+ scenariosimulaties blijkt dat voor een gemiddeld jaar weliswaar de berging, c.q. de gemiddelde grondwaterstand, niet verandert, maar dat er wel een verlaging van de zomergrondwaterstand plaatsvindt met circa 10 cm. Hierdoor wordt ook de periode van droogstand langer. In de droge en extreem droge W+ jaren is dit effect nog versterkt, wat een versnelling van toename in cumulatieve droogstand tot gevolg heeft, en toename van de risico's van funderingsschade.

4.3.4 Infrastructuur

Onder infrastructuur worden in dit verband netwerken verstaan, nodig om verkeer, elektra/gas/water/data, openwater/neerslag/afvalwater of energie te vervoeren. Uitval van (delen van) het netwerk leidt een verminderde beschikbaarheid (schade en herstelkosten). Eventueel kan vervolgschade optreden (wateroverlast leidt tot stroomuitval enz.), echter daar wordt niet op ingegaan.

In Tabel 4.3 zijn de meest relevante potentiële gevoelige infrastructuurtypen verzameld. Aangegeven is hoe het mechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameter is. Tevens is aangegeven of deze potentiële gevoelige objecten aanwezig zijn in het gebied. Wanneer deze aanwezig zijn dan wordt verder worden ingegaan op de verwachte werkelijke gevoeligheid.

Huidige situatie

In de Rivierenbuurt zijn de volgende objecten aanwezig en mogelijk van invloed op de gevoeligheid van het case gebied.

Dit zijn:

1. Wegverhardingen en wegen
- 2 t/m 4. Kabels en leidingen, riolering
11. Bodemdaling

Wegen

Door de gelijkmatige voorbelasting van de ophoging zijn er geen problemen met de wegen en straten. De zandondergrond en de zandcunetten waarin de riolen zijn aangelegd dragen bij aan de afvoer van regenwater, waardoor er, met uitzondering van extreme buien, geen wateroverlast op straat is.

Kabels/leidingen

Met betrekking tot kabels en leidingen worden geen bijzondere gevoeligheden gesignaleerd anders dan bij de aansluiting met onderheide gebouwen, zoals woningen. Door de slappe

ondergrond is Amsterdam een gebied dat voor zettingsverschillen tussen onderheide woningen en de omliggende grond gevoelig is. Enkele gasexplosies worden door netbeheerder Liander gezien als aanwijzing dat voor Amsterdam een hoger risico op schade geldt. De frequentie waarmee met zogenaamde gassnuffelaars het gasleidingnet wordt geïnspecteerd is daarom verhoogd. Omdat de gemiddelde grondwaterstand sinds de aanleg niet is gewijzigd wordt de gevoeligheid voor verschilzettingen bepaald door de langzaam doorgaande zetting ten gevolge van de ophoging.

De gevoeligheid van aansluitingen kan gezien worden als 'standaard' behorende bij een normale levensduur cyclus voor de kabels en leidingen in dit deel van Nederland. Bij geplande vervanging moet rekening worden gehouden met dan geldende verwachte belastingen/zettingen.

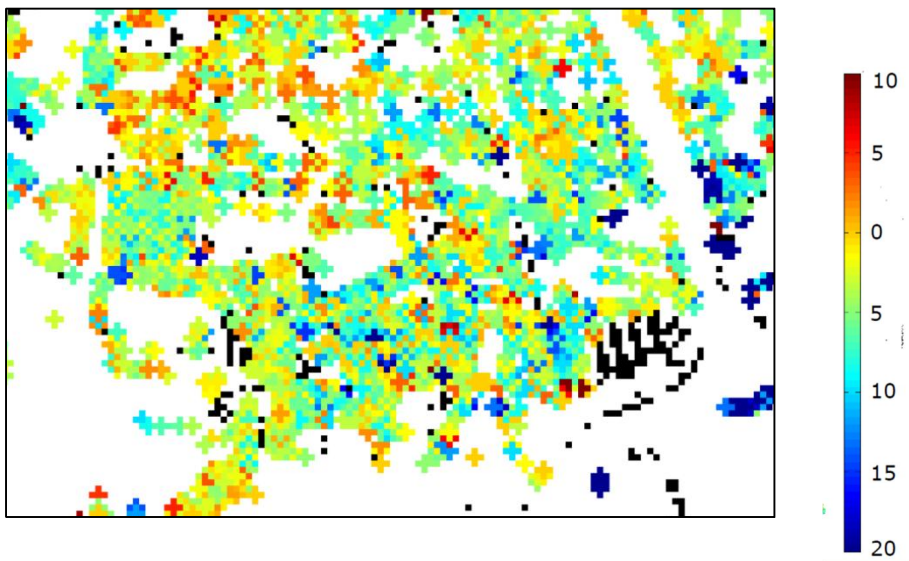
Riolen

In de Rivierenbuurt komen zowel gescheiden als gemengde riolen voor. Het rioolstelsel is even oud als de wijk. Lekkage komt veelvuldig voor. Het rioolstelsel is ontworpen voor een bui met een herhalingsstijd van twee jaar. Bij piekafvoeren is de capaciteit van het stelsel onvoldoende gebleken en is er wateroverlast op straat. De capaciteit van het riool wordt sterk beïnvloed door de staat ervan. Onderhoud is dus een belangrijke factor bij de gevoeligheid van deze locaties voor neerslag.

De transportriolen en aansluitputten zijn onderheid. Uit een recente studie van J. Dirksen (Waternet) blijkt dat er aanzienlijke zettingsverschillen in het oudere rioolstelsel zijn opgetreden tot wel tientallen centimeters. Zettingen worden gemeten door waterpassing bij de putten en door hellingmeting met inspectievoertuigjes in de buis. Een beeld van de verschillende zettingssnelheden in een uitsnede van de Rivierenbuurt is gegeven in Figuur 4.8.

Zettingen gaan plaatselijk nog steeds door. De gemiddelde grondwaterstanden zijn in de loop der jaren niet veranderd. De fysieke kwetsbaarheid van het riool is een gevolg van de zetting onder eigen gewicht en het gewicht van de ophooglaag. De verschilzetting wordt dan ook bepaald door de heterogeniteit van de ondergrond. Er is echter geen relatie gevonden tussen de ouderdom en de mate van zetting. Opvallend is dat het niet mogelijk is gebleken om een directe relatie te leggen met lekkage of andere schade op basis van de mate van zetting. Wel wordt het afschot nadelig beïnvloed, kan berging verminderen en verstopping ontstaan. De aansluiting met onderheide elementen is ook hier de zwakke plek en kan tot breuk leiden.

De situatie in de Rivierenbuurt is niet uitzonderlijk. Er is sprake van schades die behoren bij een normale levensduur cyclus voor het riool. Bij vervanging moet rekening gehouden worden met dan geldende verwachte belastingen/zettingen.



Figuur 4.8 Zettingssnelheden rioolbuizen. Uitsnede uit kaart van Dirksen

Bodemdaling

De slappe grond onder de ophoging is gevoelig voor belastingsverhogingen. Heterogeniteit van de ondergrond leidt tot verschillende mate van bodemdaling. Omdat de ondergrond de belasting van de ophoging al heeft opgenomen is de ondergrond minder gevoelig voor grondwaterstandsfluctuaties om het huidige (en historische) gemiddelde. Langduriger grondwaterstandsverlagingen, zoals bij bemalingen en droogte kunnen tot verdere daling en navenante verschildzetting leiden.

Relatie tussen waterbalans en gevoeligheid

Klimaatverandering heeft slechts een beperkt effect op de infrastructuur. In de gemiddelde jaren is er geen netto grondwaterstandsverlaging. In het extreem droge W+ scenario zakt de grondwaterstand circa 12 cm dieper. Dit leidt tot maximaal tot 4 cm extra zetting van het straatniveau over een periode van meerdere droge jaren.

De klimaatscenario's voorspellen wel grotere piekafvoeren. De ernst van wateroverlast door de onvoldoende capaciteit van het rioolstelsel zal hierdoor zonder verdere maatregelen toenemen.

4.3.5 Groen

In vrijwel alle straten komen bomen voor. Bij Waternet is geen beleid speciaal gericht op de watervraag van het groen (in het algemeen in Amsterdam). De gezondheid van de bomen wordt voornamelijk bepaald door de kwaliteit van de grond in de wortelzone en de beluchting. Bij het vervangen van bomen wordt hier extra aandacht aan besteed. Het openbaar groen is niet gevoelig voor droogte als gevolg van grondwaterstandsfluctuaties. Tuinen in de Rivierenbuurt hebben wel te maken met hoge grondwaterstanden in de winter en bij hevige regenval door het gebrek aan drainage. Het groen (vnl. bomen) heeft daardoor meer te lijden onder te natte omstandigheden. Ook een gebrek aan wortelruimte is een issue. Droogte is momenteel geen knelpunt.

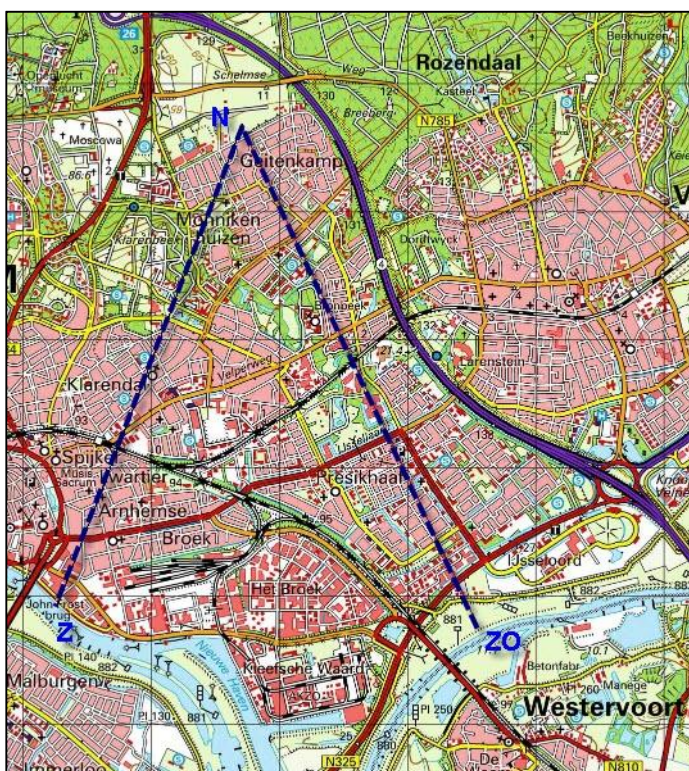
4.4 Gevoeligheid in Arnhem-Oost

4.4.1 Ondergrondkarakteristieken

Voor het beschouwen van de lokale ondergrondomstandigheden op meer detailniveau dan genoemd in paragraaf 2.3.3, zijn gegevens verzameld met betrekking tot de ondergrond. Deze gegevens zijn ondersteunend bij het inschatten van de gevoeligheid van functies in het gebied.

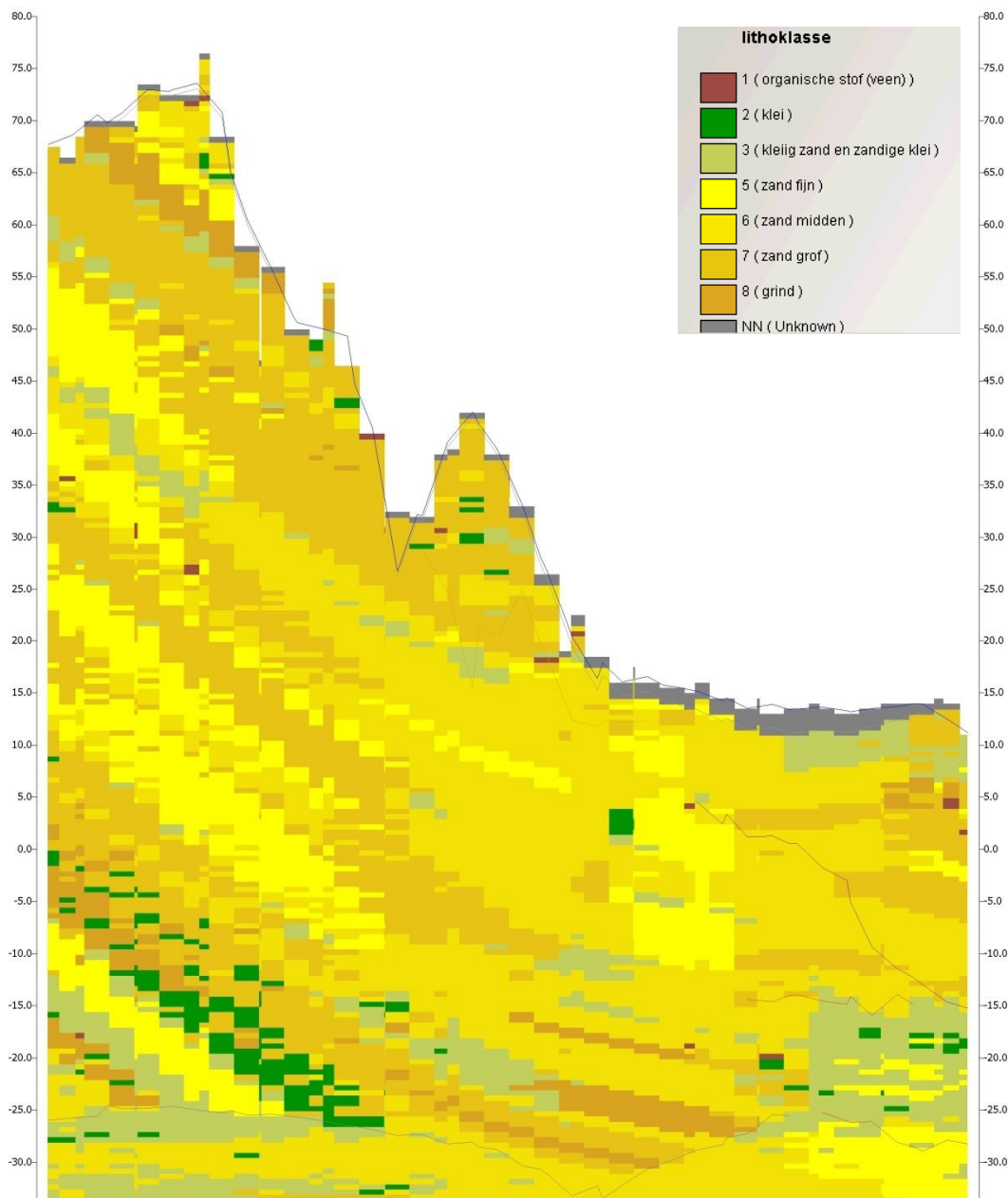
GeoTop

Het model GeoTOP van TNO geeft een gedetailleerd driedimensionaal beeld van de Nederlandse ondergrond tot een diepte van ongeveer 50 meter onder maaiveld. In Figuur 4.9 zijn twee lijnen weergegeven waarlangs dwarsdoorsnedes zijn gegenereerd uit het GeoTop model.



Figuur 4.9 Locatie van dwarsprofielen NZ en NZO uit het GeoTop model

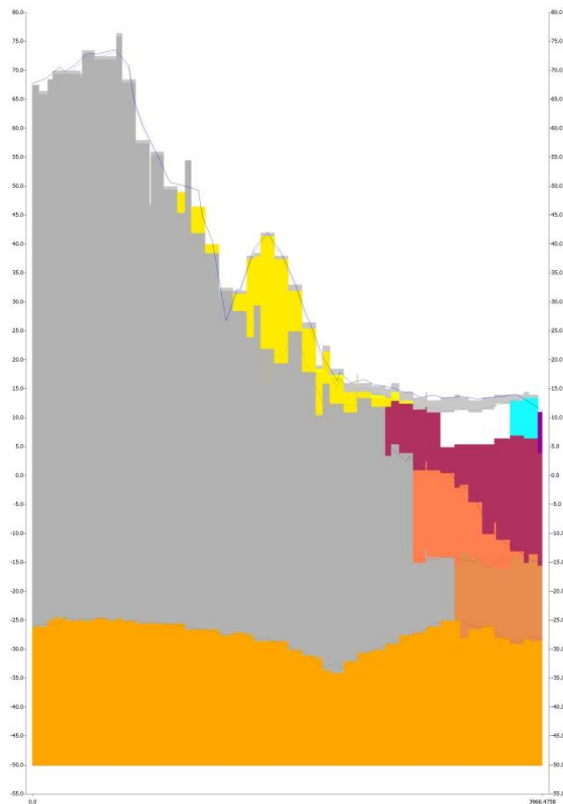
De dwarsdoorsnedes zijn Noord-Zuid en Noord-Zuidoost georiënteerd. De dwarsdoorsnedes starten in het hoge deel van Arnhem en lopen richting de Nederrijn (N-O) net langs het centrum en parallel aan de A12 richting de IJssel (N-ZO). De in het midden lopende spoorlijn is ongeveer de grens tussen het poldergebied (de uiterwaarden) en het hoge deel van Arnhem. In Figuur 4.10 is het dwarsprofiel N-Z weergegeven.



Figuur 4.10 Dwarsprofiel N-Z: Grondopbouw uit GeoTop model

Het dwarsprofiel heeft een lengte van circa 4 km. Links en rechts van de grafiek zijn de hoogte in m t.o.v. NAP aangegeven. In het poldergebied zijn met maaiveldhoogtes tussen NAP + 12 en + 15 m. Onder de opgebrachte zandige toplaag (grijs) zijn, over een deel, samendrukbare grondlagen, zoals klei en soms veen, aanwezig. De linkerhelft van de figuur maakt duidelijk zichtbaar dat de maaiveldhoogte snel oploopt. Te zien is dat er hier voornamelijk zandige grondlagen aanwezig zijn (geel) met af en toe dunne kleiige (leem) lagen (groen).

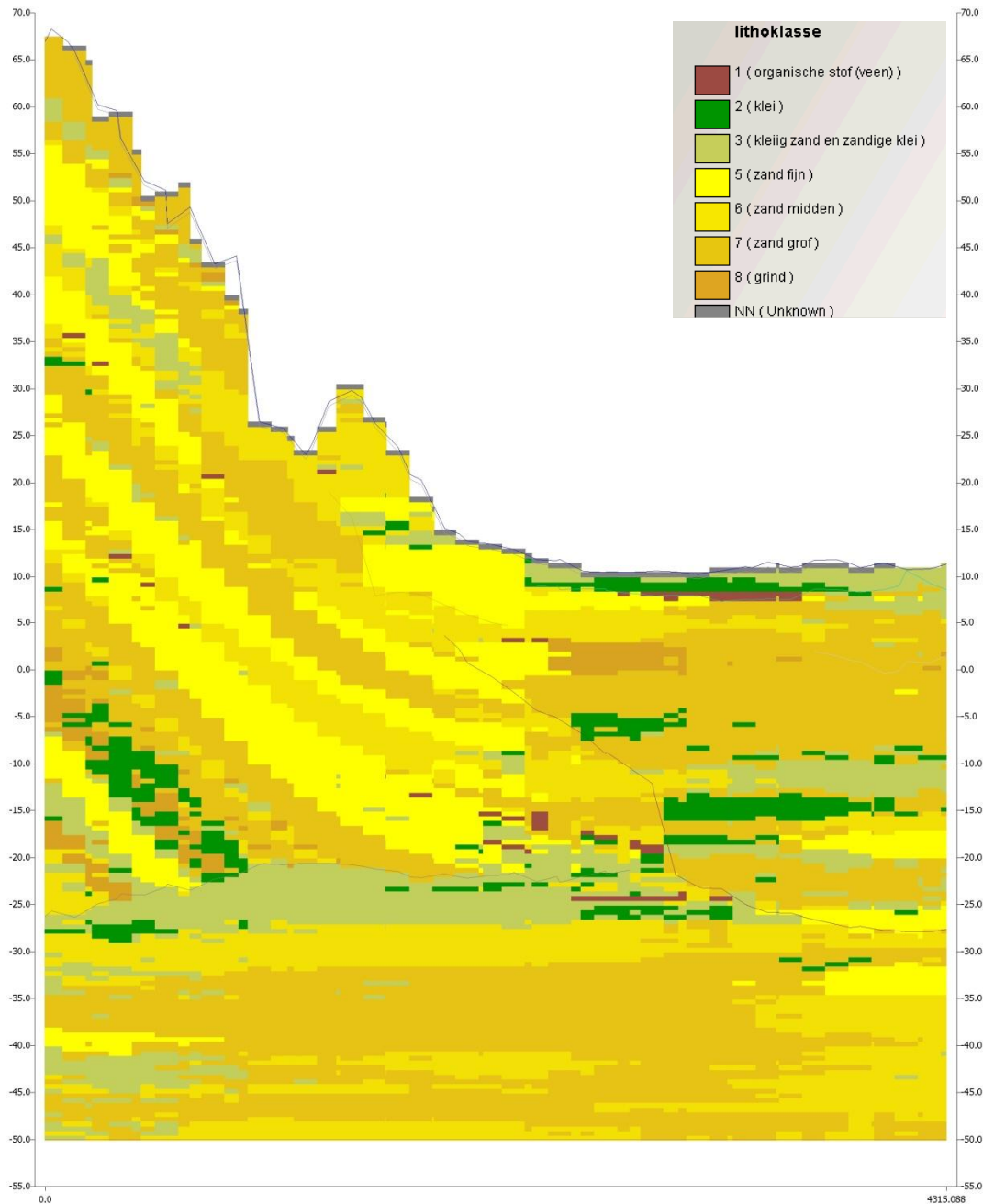
In Figuur 4.11 is dezelfde doorsnede gegeven, nu met de lithostratigrafische weergave (afzettingen).



Figuur 4.11 Dwarsprofiel N-Z: afzettingen uit GeoTop model

Aan de rechterzijde zijn de ondiepe kleiige lagen (wit en blauw) zichtbaar, aan de linkerzijde zijn gestuwde afzettingen (grijs) kenmerkend.

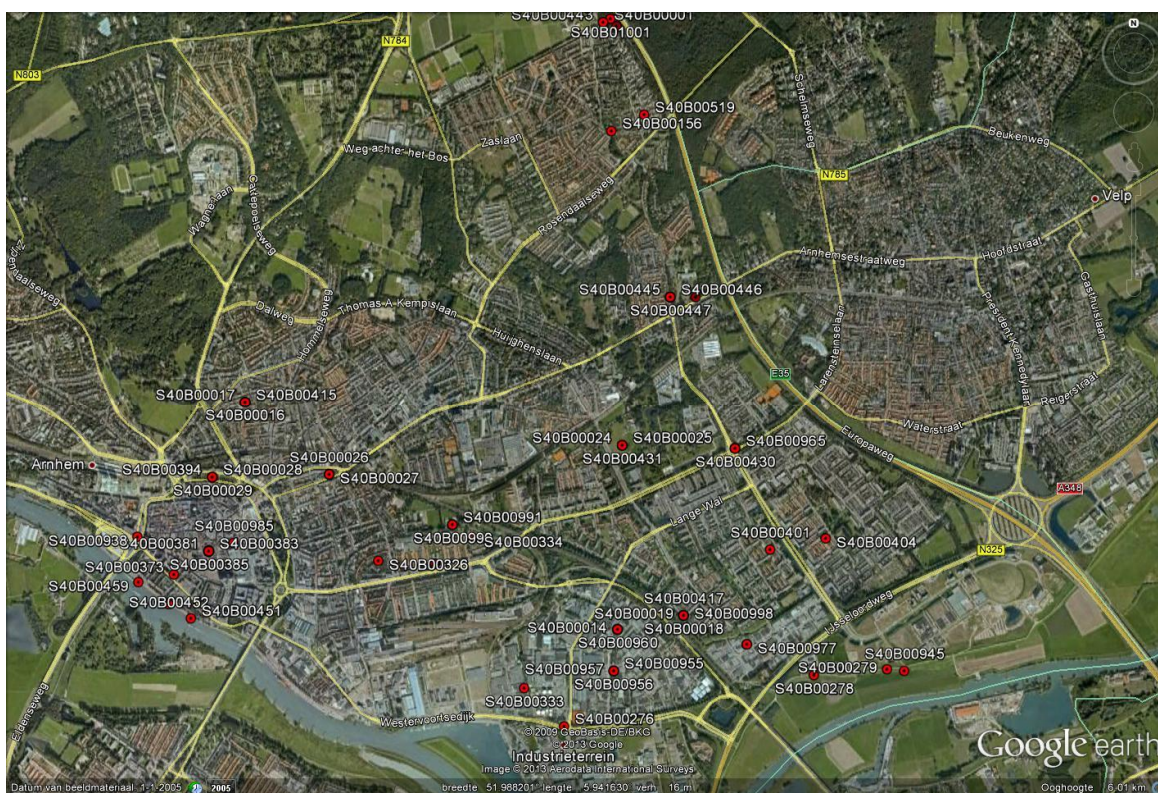
In Figuur 4.12 is het dwarsprofiel N-ZO weer weergegeven. Het dwarsprofiel heeft een lengte van circa 4,3 km. Links en rechts van de grafiek zijn de hoogte in m t.o.v. NAP aangegeven. Te zien is dat in het polderdeel, rechterhelft van de figuur, kleilagen en dunne veenlagen aanwezig zijn. De dikte van dit pakket lijkt aan deze zijde dikker te zijn dan in profiel N-Z.



Figuur 4.12 Dwarsprofiel N-ZO: Grondopbouw uit GeoTop model

DINO

Vanuit de DINO database zijn diverse sonderingen en boorbeschrijvingen verkregen. Dit om op diverse locaties langs de GeoTop dwarsprofielen met meer detail naar de grondopbouw te kunnen kijken. In Figuur 4.13 zijn de locaties van beschikbare boringen en sonderingen in DINO weergegeven.



Figuur 4.13 Locatie sonderingen beschikbaar in DINO

De in de sonderingen en boringen aangetroffen grondopbouw bevestigt de in de profielen getoonde laagopbouw. In het lage deel van Arnhem, de poldergebieden, is te zien dat de ondergrond zich kenmerkt door een opbouw van slappe lagen klei en veen op zandafzettingen (orde 6 m dik in het oostelijk deel, en afnemend in dikte nabij het Centrum). Hierop ligt een, na de inpoldering aangebrachte, grondlaag die hoofdzakelijk uit zand lijkt te bestaan. Het maaiveld varieert door de aangebrachte laag van NAP +10,5 tot + 14 m. De NederRijn loopt hier pas sinds de omlegging van de rivier in 16^e eeuw, dit in tegenstelling tot het westelijk deel van het case gebied.

Richting de oude binnenstad, het centrum, neemt de dikte van de slappe grondlagen af. Bij het centrum wordt voornamelijk zand aangetroffen. Echter lokaal worden nog steeds ondiepe (binnen 5 m) hooguit enkele meters dikke klei/leem lagen aangetroffen.

De slappe klei en veen lagen nemen eveneens richting de IJssellaan (richting het noorden), in dikte af. Tussen de IJssellaan en de spoorlijn/ Velperweg is er een overgang naar voornamelijk zand met dunne leemlagen (stijve klei). Dit is eveneens de overgang naar Arnhem-Oost Hoog. In het gebied ten noorden van de Velperweg wordt voornamelijk zand aangetroffen met lokaal dunne (circa maximaal 1 m dikke) leemlagen.

Op basis van gegevens uit de DINO database blijkt dat de stijghoogte in het zand direct onder de slappe klei/veenlagen circa NAP + 9 m bedraagt in het lage deel van Arnhem. De variatie per meetpunt is orde +/- 0,7 m bij de peilbuis in het oostelijke deel (B40B0424) en circa +/- 1 m bij de peilbuis in het westelijk deel. Opgemerkt wordt dat het hier niet gaat over een grondwaterstand in een ondiepe peilbuis. De freatische grondwaterstand zou wat af kunnen wijken. Gegevens hiervoor ontbreken echter. In de meetreeks komen een aantal

uitschieters, zowel omhoog als omlaag, voor. Deze worden veroorzaakt door respectievelijk hoog en laag water op de rivier.

In het hoge deel van Arnhem is er veel variatie tussen verschillende locaties. De grondwaterstand varieert tussen enkele meetpunten van circa 3 m onder maaiveld tot meer dan 10 m onder maaiveld in het noordelijk deel van het case gebied. De variatie in grondwaterstand op een meetpunt is +/- 0,3 à 0,5 m.

De zoet-brak water grens bevindt zich op een diepte van meer dan 150 m-NAP.

Samengevat

In Arnhem Laag is een grondslag aanwezig die overeenkomt met een rivierengebied zoals ook in Laag Nederland wordt aangetroffen waarbij er een zettingsgevoelige laag aan de oppervlakte aanwezig is. In Arnhem Hoog worden net als in overige hoge gebieden in Nederland over het algemeen zandige afzettingen aangetroffen. De zettingsgevoeligheid is gering, de waterdoorlatendheid groot. Er is een sterke heterogeniteit als gevolg van lokaal aanwezige klei- en lemlagen en scheefstelling (opstuwing). Brak of zout grondwater bevindt zich op grote diepte en is daarom niet relevant.

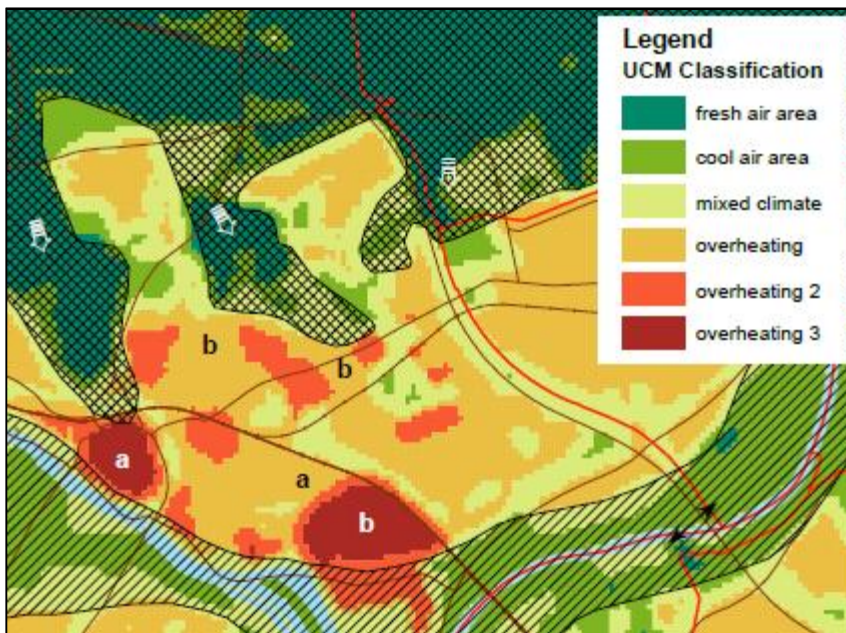
4.4.2 Hitte

In Arnhem is een onderzoek gedaan naar het stedelijk warmte eiland. De resultaten hiervan zijn gebruikt in dit rapport (bron:

http://www.arnhem.nl/Ondernemen/Energie_made_in_Arnhem_EmiA/Klimaatbestendige_stad/Hitte_in_Arnhem)

Hittekaart

Met hulp van kennis en ervaring uit het buitenland (Duitsland en China) is voor Arnhem een 'Urban Climate Analysis Map' opgesteld, een hittekaart van Arnhem. Deze kaart toont gebieden met het meeste risico op warmteophoping en moeite om 's avonds af te koelen en gebieden die koele lucht kunnen produceren om de stad overdag en vooral 's nachts af te koelen. Een uitsnede van de hittekaart van 2012 is weergegeven in Figuur 4.14.



Figuur 4.14 Hittekaart Arnhem (bron: website gemeente Arnhem)

Bepalende factoren

In het onderzoek worden vijf factoren bepalend geacht voor hitte in de stad. Deze factoren hangen sterk met elkaar samen. Het gaat daarbij om windpaden, de structuur van de stad, de samenstelling en kleur van de toegepaste bouwmaterialen in wegen, daken en muren, de functies van een gebied en de hoogteverschillen in het landschap. Water wordt in het onderzoek niet als bepalende primaire factor genoemd.

De factoren bepalen hoeveel warmte in een gebied wordt opgeslagen en hoe snel dat gebied weer kan afkoelen. Groen, zoals bomen, parken, groene daken en groene gevels, remt de opslag van warmte af. Natuurlijke ventilatie zorgt ervoor dat de warmte wordt afgevoerd en koelere lucht de stad in wordt aangevoerd. De warmtebalans is goed als de warmte zich niet ophoopt.

Risicovolle gebieden

De hittekaart laat die gebieden in Arnhem zien waar de warmte zich kan ophopen en die moeite hebben om af te koelen (donker rode en rode gebieden). Hier ligt de prioriteit om ervoor te zorgen dat de situatie niet verslechtert. Bij andere gebieden is dit risico lager (oranje en gele gebieden).

Te beschermen gebieden

De hittekaart laat ook de gebieden in Arnhem zien die koele lucht produceren. De koele lucht uit deze gebieden kan ervoor zorgen dat delen van de stad overdag maar vooral 's nachts afkoelt. Het gaat hierbij om de bossen, het open landelijk gebied, de rivieren en de parken. Doordat de stad sterker opwarmt dan het omringende gebied, en die warmte opstijgt, wordt de koele lucht uit deze gebieden als het ware de stad in gezogen en koelt op deze manier de stad.

Dalwinden

In Arnhem doet zich nog een speciaal effect voor dat voor Nederlandse begrippen vrij uniek is, een gevolg van de aanwezige heuvels, en hellingen van de Veluwe. Dit effect is ook in

steden in Zuid Duitsland geconstateerd. Koele lucht die in de bossen boven op de hellingen wordt geproduceerd, zakt langzaam door de dalen de helling af naar het laagste punt. Veelal zijn dit de parken op de hellingen van de Veluwe. Het gaat om een zwakke luchtstroming die nauwelijks is te meten. Juist deze dalwinden koelen het noordelijke deel van de stad.

Aanbevelingen uit structuurvisie

In de structuurvisie wordt het volgende over bestrijding van hitte gemeld:

- 1 open houden van de grote parken op de randen van de Veluwe, met het oog op de verkoelende werking (dalwinden) op de stad, specifiek de gebieden die sterk opwarmen (zie punt 3). Meer bebouwing in deze gebieden is niet toegestaan.
- 2 open houden van de uiterwaarden en open gebieden rond de stad voor verkoelende winden. Eventuele toevoeging van bebouwing moet de toegankelijkheid van het stedelijk weefsel voor verkoelende winden niet blokkeren.
- 3 verbeteren van het stadsklimaat in de binnenstad aangezien dit gebied sterk opwarmt met nadelige gevolgen voor het leefklimaat van de buitenruimte en voor het binnenklimaat (hoger energieverbruik voor koeling):
 - bij ingrepen in de stedelijke morfologie wordt uitdrukkelijk rekening gehouden met de toetreding van verkoelende luchtstromen en koelingsmogelijkheden van het stedelijk weefsel (voldoende groen, omvang, locatie en vormgeving van gebouwen en verharding)
 - kansen benutten tot meer vergroenen van het gebied (onder andere pleinen en binnenterreinen) met bomen, verticaal groen en dakgroen (laatste vooral effect op binnenklimaat)
- 4 dezelfde inzet draagt er in overige 'kritische' gebieden (zie kaartbeeld) toe bij dat verdere opwarming wordt tegengegaan. Dan gaat het om vooral oudere, stenige woonwijken, bedrijventerreinen en winkelcentrum Presikhaaf.

4.4.3 Bebouwing

Onder bebouwing worden in dit verband woningen, woongebouwen, bedrijfspanden, en bouwwerken genoemd, die als losstaande objecten, voorzien van een fundering, gezien kunnen worden.

In Tabel 4.2 zijn de meest relevante potentiële gevoelige bebouwing verzameld. Aangegeven is hoe het mechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameter is. Met de gemeente Arnhem is nagegaan welke typen potentieel gevoelige bebouwing in het casegebied aanwezig is. Dit zijn:

1. Gebouwen met funderingen op palen
2. Gebouwen met fundering op staal
3. Kelders onder gebouwen.

Funderingsschade

In het lage deel van Arnhem-Oost zijn vanwege de slappe ondergrond onder de opgebrachte antropogene laag funderingen op palen aanwezig onder vrijwel alle gebouwen. Funderingen op houten palen komen volgens de gemeente niet voor. De wijk is voornamelijk opgebouwd na de periode 1945. Er zijn alleen betonnen palen toegepast, ook bij meer recente herinrichting en nieuwbouw. Door de toepassing van het materiaal beton zijn de gevoeligheden gekoppeld aan houten palen (1a en 1c in Tabel 4.2) niet van toepassing.

In het hoge deel van Arnhem-Oost wordt, vanwege de zandige ondergrond, voornamelijk fundering op staal toegepast, ook daar waar lemlagen aanwezig zijn, aangezien deze grondlagen zeer stijf zijn. In sommige gevallen worden ook funderingen op palen toegepast, dit betreft dan altijd betonnen palen.

In het gebied zijn geen problemen bekend met funderingen of zakkende funderingen. Dit is van belang omdat bij oude palen de kans dat negatieve kleeft als belastingcomponent is meegenomen klein is. Van betonnen palen is echter bekend dat deze voldoende capaciteit bezitten (veel gehanteerde methode was dat de draagkracht 2x zo groot moest zijn als de te verwachten belasting, in de tijd voor de toepassing van rekenwaarden). De toename van de belasting van een paal door een extra negatieve kleeft zal dan ook naar verwachting in weinig gevallen tot een dusdanige zakking leiden dat schade aan de bebouwing ontstaat. Bovendien zal het materiaal beton ook in slechts uitzonderlijke gevallen niet voldoende zijn om de belasting op te nemen. Met de NEN9997 (EC7) is de extra verplaatsing van een betonnen paal bij een toename van de negatieve kleeft te bepalen. Bij een geringe waterstandsverlaging gaat het hier om millimeters.

(grond)wateroverlast in kelders

In het hoge gebied is in de huidige situatie veel variatie in grondwaterstand aanwezig, variërend van orde 1m tot tientallen meters beneden het maaiveld. Vaak is de aanwezige ondiepe grondwaterstand een zgn. schijnwaterstand als gevolg van aanwezige lemlagen.

Aan informatie van de gemeente Arnhem blijkt dat er in perioden met veel neerslag in Arnhem Hoog wateroverlast in kelders optreedt. Daarbij is bijzonder dat veel water via het oppervlak naar huizen toe afstroomt en zich verzamelt op de diepst gelegen locaties.

In het lage deel van Arnhem, nabij de rivier, treedt tijdelijke wateroverlast op bij hoge rivierwaterstanden als gevolg van opwaartse kwel.

4.4.4 Infrastructuur

Onder infrastructuur worden hier netwerken verstaan, nodig om verkeer, elektra/gas/water/data, openwater/neerslag/afvalwater of energie te vervoeren. Uitval van (delen van) het netwerk leidt een verminderde beschikbaarheid (schade).

In Tabel 4.3 zijn de potentieel gevoelige infrastructurele objecten verzameld. Aangegeven is hoe het gevoeligheidsmechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameter is. Met de gemeente Arnhem is nagegaan welke typen objecten in het casegebied aanwezig is. Dit zijn:

1. Wegverhardingen en wegen
- 2 t/m 4. Kabels en leidingen, riolering
6. Verdiepte liggingen/onderdoorgangen
12. Taluds

Wegen

Er zijn in het gebied geen gevallen bekend waarbij de grondwaterstand bepalend is geweest voor verzakking van wegen.

Gevoeligheden zijn er wel gemeld op het vlak van wateroverlast bij neerslag (water op straat). Bij extreme neerslag stroomt water oppervlakkig af en verzamelt zich op de laagste punten, waar voldoende afvoer- en/of infiltratiecapaciteit ontbreekt.



Figuur 4.15 Wateroverlast op een weg in Arnhem

In Arnhem-Oost Laag is voornamelijk sprake van wateroverlast bij onderdoorgangen. Daarvan zijn er zes in het gebied aanwezig. Er is een onderdoorgang/tunnel die 1 a 2 keer per jaar onder water staat, zodanig dat deze weg tijdelijk (circa 1 dag) niet beschikbaar is. De oorzaak is de beperkte capaciteit van het daar aanwezige riool.



Figuur 4.16 Wateroverlast bij onderdoorgangen

Kabels/leiding/riolering

Met betrekking tot kabels en leidingen bestaan geen bijzondere gevoeligheden anders dan de aansluiting met onderheide gebouwen. De mate van zetting in het gebied is echter gering. De gevoeligheid van aansluitingen kan geclassificeerd worden als 'standaard' behorende bij een normale levensduur cyclus voor de kabels en leidingen.

In Arnhem Hoog en Laag is nooit een relatie geconstateerd tussen grondwaterstandsverlagingen of zettingen en schade aan riool. Ook hier geldt dat de gevoeligheid 'standaard' is, behorende bij een normale levenscyclus voor het riool.

Taluds

Enkele verkeersaders in het gebied liggen op taluds: de Nijmeegse weg, de A12 en verhoogde spoorlijnen. Door een toenemende kans op extreme neerslaghoeveelheden, zoals in de klimaatscenario's wordt voorspeld, wordt het risico van erosie en instabiliteit groter. Deze kans is tevens afhankelijk van de begroeiing, de taludhelling, de bodemopbouw onder het talud, de samenstelling van het talud en de staat van onderhoud.

4.4.5 Groen

Het huidige aanplantbeleid in Arnhem richt zich op inheemse bomen. Deze bomen hebben bewezen aangepast te zijn aan de lokale omstandigheden. Er is een Ecologisch Groenplan. Bij toekenning van de groentypen in dit plan is rekening gehouden met de grote schaal (Riviergebied, Veluwe) van het gebied. In sommige delen van de stad overheerst de cultuurhistorie en de bestaande beplanting bij de keuze voor vervangende bomen.

De bomen in de straten worden gemiddeld 30 jaar oud. Daarna worden ze gekapt. De redenen hierachter zijn de beperkte ondergrondse groei ruimte in de straat, onderhoudswerkzaamheden en schade aan wortels bij het aanleggen van leidingen. In parken kunnen de bomen wel ouder worden.

Hoewel er uiteraard een fysieke relatie bestaat tussen waterbeschikbaarheid en het presteren van groen, is er nooit aanleiding geweest tot onderzoek naar de situatie in Arnhem ten aanzien van eventuele verdroging. In het algemeen is er in Arnhem geen sprake van verdroging. Bomen worden niet besproeid in de zomer. Enige uitzondering hierop is het besproeien van jonge aanplant, die standaard – overal in Nederland - wordt besproeid totdat deze goed is aangeslagen. Er zijn nooit bomen gekapt die zijn afgestorven als gevolg van droogte. Op basis van visuele waarnemingen in de parken (voornamelijk Arnhem-Oost Hoog) is wel de conclusie dat in geval van langdurige droogte de staat van het groen achteruit gaat. Dit is een uiting van het natuurlijke beschermingsmechanisme van bomen bij drogere omstandigheden en wordt niet als 'schade' beschouwd.

Bij droogval van het beekstelsel is de ervaring in Arnhem dat er verruiging van groen optreedt. De ecologische consequenties hiervan zijn niet onderzocht.

Er zijn in Arnhem enkele vijvers aanwezig die droog kunnen vallen in de zomer. Bij een aantal vijvers wordt in de voortplantingsperiode van vissen (april tot juli) bij langdurige droogte (meer dan drie weken) water ingebracht. Dit komt niet vaak voor. Het beheer van de vijvers is afgestemd op de ecologische doelen die aan de vijvers zijn toegekend.

5 Geschikte maatregelen

5.1 Aanpak en uitgangspunten

Gebruik makend van de maatregeleninventarisatie uit het project Schades door watertekorten en –overlast in het stedelijk gebied, zijn geschikte maatregelen geselecteerd voor de casegebieden. De inpassing van deze maatregelen in de onderzoeksgebieden wordt nader beschreven, maar er is geen pasklaar ontwerp gemaakt.

Er is nog maar zeer weinig bekend over de hydrologische effectiviteit van maatregelen. Het is daarom niet voor alle maatregelen mogelijk om de effectiviteit onder de Deltascenario's te kwantificeren. Onderzocht is in hoeverre de effectiviteit van maatregelen kan worden ingeschat en hoe de maatregelen tot uiting kunnen worden gebracht als termen in het waterbalansmodel. De analyse van de effectiviteit wordt hierbij vanuit twee routes aangevlogen: enerzijds wordt bepaald wat het compenserend vermogen van maatregelen op de waterbalans idealiter zou moeten zijn en anderzijds wordt ingeschat wat het compenserend vermogen van een maatregel is.

Voornaam punt in deze analyse is te bepalen of het sowieso mogelijk is om met maatregelen de blootstelling aan nadelige effecten van droogtesituaties volledig te voorkomen, of dat een zekere mate van blootstelling onvermijdelijk is en dus moet worden ingezet op het beperken van de gevoeligheid.

Uitgangspunten bij de analyse zijn:

- In het project wordt alleen gekeken naar schademechanismen die in de casegebieden spelen of kunnen gaan spelen.
- Het Kennis voor Klimaat programma Climate Proof Cities werkt reeds aan een afwegingsinstrument voor de keuze van maatregelen bij extreme neerslag. Ook over het compenserend vermogen en de kosten van dergelijke maatregelen is al veel bekend. Onderhavige studie focust daarom op maatregelen die soelaas bieden onder droogtesituaties.

5.2 Rivierenbuurt

De Rivierenbuurt kent een groot aantal gebouwen met een monument status. Wegens de historische waarde van de planologie heeft de wijk zelfs als geheel deze status. Alle omgevingsmaatregelen en verbeteringen aan de panden zullen dus gericht zijn op het behouden van het huidige aanzicht van de wijk. Voor de in hoofdstuk 4 geconstateerde gevoeligheden in de Rivierenbuurt zijn de volgende maatregelen te noemen waarmee de blootstelling aan veranderingen in de waterhuishouding kan worden verminderd:

- 1 Vergroten van de infiltratie van hemelwater
- 2 Opzet van het oppervlaktewaterpeil rondom de buurt
- 3 Aanvoer van oppervlaktewater via een infiltratie-drainage systeem, met waar nodig aansluiting op een infiltratie-drainage systeem op pandniveau.

De effectiviteit van maatregelen 1 en 2 kon worden bepaald met het waterbalansmodel.

5.2.1 Effectiviteit van vergroten infiltratie hemelwater

Om het effect van afkoppelen van verhard oppervlak in beeld te krijgen, zijn scenario's doorgerekend waarbij de infiltratie van verhard oppervlak is verdubbeld. Er zijn verschillende manieren om de infiltratie te vergroten:

- Vervangen van gesloten verharding door half-open verharding.
- Het vervangen van halfopen verharding door zeer doorlatende verhardingen
- Afkoppelen van regenwaterafvoer daken.
- Infiltratie naar de onverzadigde zone met behulp van infiltratie voorzieningen als infiltratieriolen, infiltratiekratten, zakputten, wadis, granudrains.
- Direct naar het grondwater te infiltreren met behulp van infiltratie putten, -velden of -sleuven.

NB. Oude, lekke riolering wordt meestal om andere redenen vervangen, maar vervanging draagt niettemin bij aan het vergroten van de waterberging in de bodem.

Waternet heeft aangegeven i.i.g. in te zetten op de toepassing van doorlatende weg- en tramlijnoppervlakken en opvang van regenwater in de tuinen.

De uitwerking van de maatregel kan inzichtelijk worden gemaakt t.o.v. verschillende referentiesituaties. Tabel 5.1 geeft de uitwerking weer t.o.v. de situatie zonder maatregel in een vergelijkbaar klimaat en onder vergelijkbare meteorologische omstandigheden. In Tabel 5.2 is de uitwerking op de grondwaterstand aangegeven t.o.v. grondwaterstand zonder maatregel, in een gemiddeld jaar, in het huidige klimaat. Figuur 5.1 tot en met Figuur 5.3 geven de effecten in waterbalansschema's. Op basis van de resultaten zijn de volgende conclusies getrokken:

- Door een verdubbeling van de infiltratie van verhard oppervlak neemt de effectieve infiltratie met ongeveer 25% toe. Door de grotere infiltratie vindt er tevens minder oppervlakkige afstroming naar de riolering plaats.
- Tabel 5.2 laat zien dat de maatregel een beperkt compenserend effect heeft onder drogere omstandigheden, en voor hogere grondwaterstanden zorgt onder gemiddelde omstandigheden.
- De extra infiltratie heeft geen effect op de transpiratiejaarsommen. Dit wordt veroorzaakt doordat de extra infiltratie in het model bijna geheel naar de verzadigde zone stroomt via percolatie en niet tot extra aanvulling van de onverzadigde zone leidt. Hierdoor blijft de hoeveelheid voor vegetatie beschikbaar bodemvocht bijna hetzelfde, waardoor ook de transpiratie ongeveer hetzelfde blijft.
- De extra percolatie leidt tot aanzienlijk minder aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater. Deze aanvulling wordt gedreven door het peilverschil tussen grondwater (lager) en oppervlaktewater (hoger). Een groter verschil betekent meer aanvulling, en het peilverschil wordt door de maatregel beperkt.
- De wat hogere grondwaterstand zorgt verder voor een grotere stroming van grondwater naar diepere grondlagen door het grotere stijghoogteverschil met het watervoerend pakket. Ook stroomt er meer water richting de lekke riolering doordat het

stijghoogteverschil groter is over een langere periode. Dit gaat ten kosten van de effectiviteit van de maatregel.

- Waternet heeft aangegeven dat het rioolcunet in combinatie met de zandige ophooglaag een deel van het geïnfiltreerde hemelwater afvoert. Het afdammen van deze drainageweg vergroot de effectiviteit van de infiltratie.
- De grotere afname in de berging na uitvoering van de maatregel wekt op het eerste gezicht bevreemding, maar is verklaarbaar aan de hand van het feit dat ook bij de maatregelsimulaties een inrekenperiode wordt gehanteerd. Daardoor is al aan het begin van het jaar de grondwaterstand onder invloed van de infiltratiemaatregel. Doordat het effect van deze maatregel op de toename van de grondwaterstand in de winterperiode groter is dan in de zomerperiode, is de grondwaterstandsval (verschil tussen hoogste en laagste stand) over het gehele jaar genomen groter, ook al is de grondwaterstand in de zomer nog steeds hoger dan in de referentiesituatie: de grondwaterstandsdynamiek is toegenomen. De toename van de dynamiek wordt getoond in de middelste grafiek van Figuur 5.2. De 'winst' (de hogere grondwaterstand gedurende de droge periode, wanneer het water het hardste nodig is) is circa 10 cm.
- Waternet heeft onlangs los van deze studie op basis van indicatieve berekeningen ingeschat dat een grondwaterstijging van ca. 15 cm mogelijk zou moeten zijn met een verhoging van de overstordrempels in IT-riolen, het aanleggen van granudrain systemen (=poreuze wegverharding), het verbeteren van de infiltratie in trambanen, en het aanbrengen van opvangbakken in tuinen (mondelinge mededeling Waternet). Met de uitkomsten van onderhavige studie kan deze schatting worden verbeterd.

Samenvattend kan worden gesteld dat de maatregel onder droge omstandigheden een beperkt effect heeft. Maar 10 cm grondwaterstandsverhoging is zeker geen verwaarloosbaar resultaat. In de winter echter, en wanneer het klimaat zich volgens een natter scenario ontwikkelt, leidt een strategie die alleen infiltratievoorzieningen bevat, tot een niet gewenste stijging van de grondwaterstand. Ook een toename van de dynamiek van de grondwaterstand is niet gewenst.

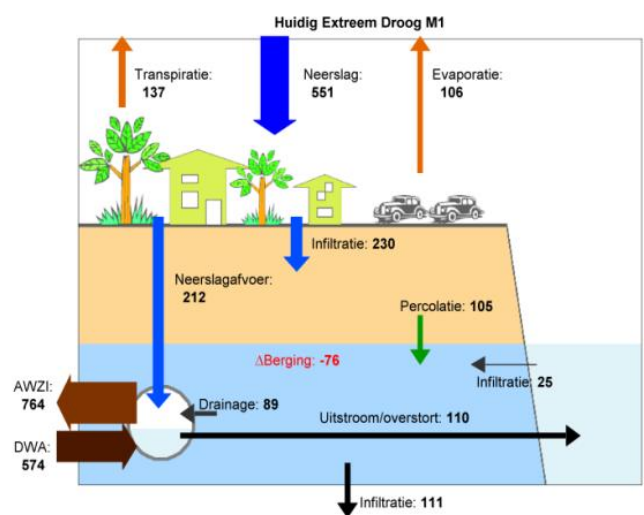
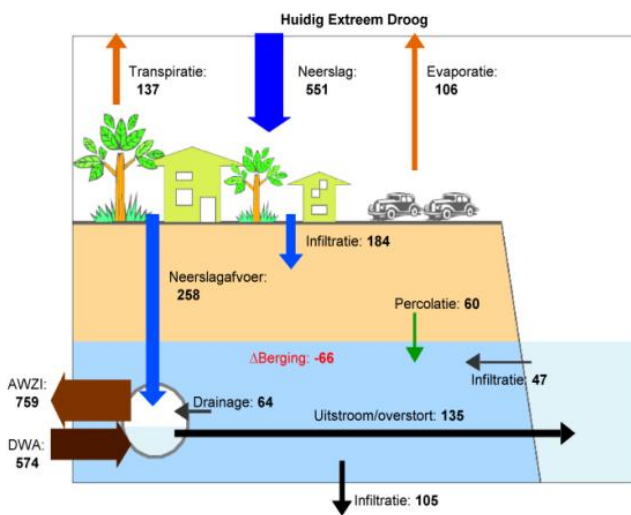
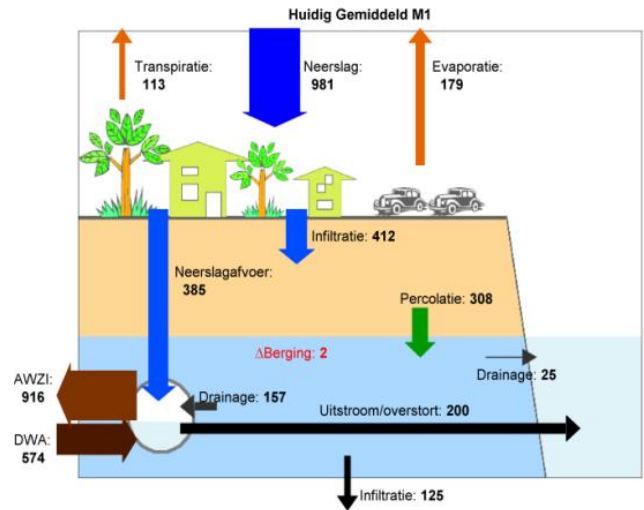
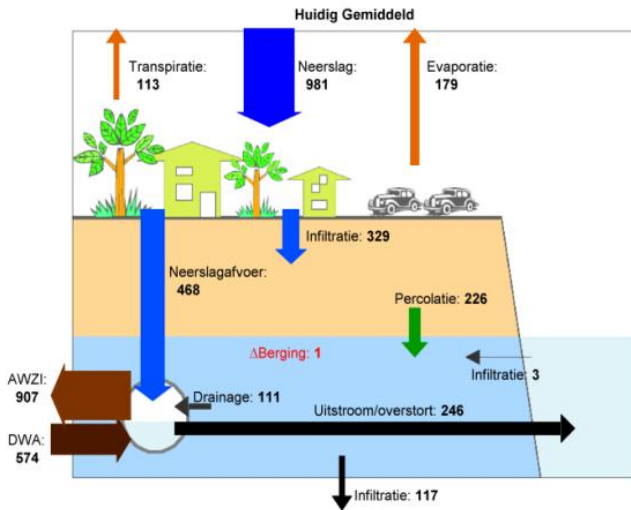
In de praktijk is daarom maatwerk nodig, bestaande uit een samengesteld pakket van maatregelen: infiltratiebevordering en aftoppen van te hoge grondwaterstanden door draingageverbetering. Een goed moment om delen van de maatregel ten uitvoer te brengen is bij het vervangen van de riolering. Ook de vervanging van de riolering an sich, zal de waterberging in de buurt vergroten. Een acute noodzaak voor het herstel van de riolering ontbreekt momenteel. Deze zal worden uitgevoerd volgens de "normale" planning.

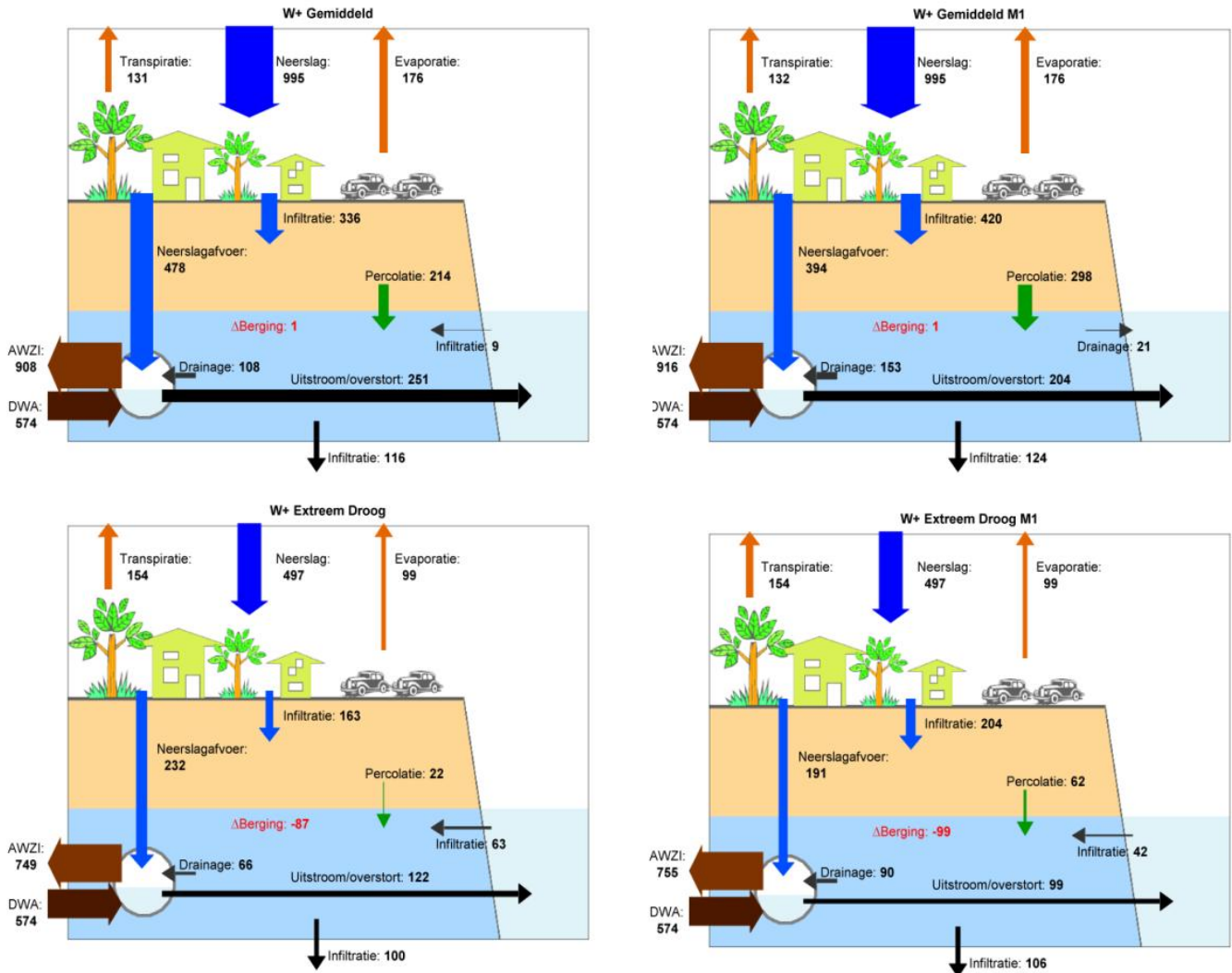
Tabel 5.1 Stijging grondwaterstand, afname waterbehoefte en afname aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater met inzet van maatregel, ten opzichte van scenario zonder de maatregel, Rivierenbuurt. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn hoeveelheden beneden 10000 m3 op honderdtallen afgerond en hoeveelheden boven 10000 m3 op duizendtallen.

Scenario	Stijging grondwater door maatregel, (m)	Afname waterbehoefte doormaatregel, laag (m3)	Afname waterbehoefte doormaatregel, hoog (m3)	Afname aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater door maatregel (m3)
Huidig Gemiddeld M1	0,10	21.000	29.000	18.000
Huidig Extreem Droog M1	0,08	17.000	23.000	25.000
W+ Gemiddeld M1	0,10	21.000	29.000	19.000
W+ Extreem droog M1	0,07	15.000	20.000	20.000

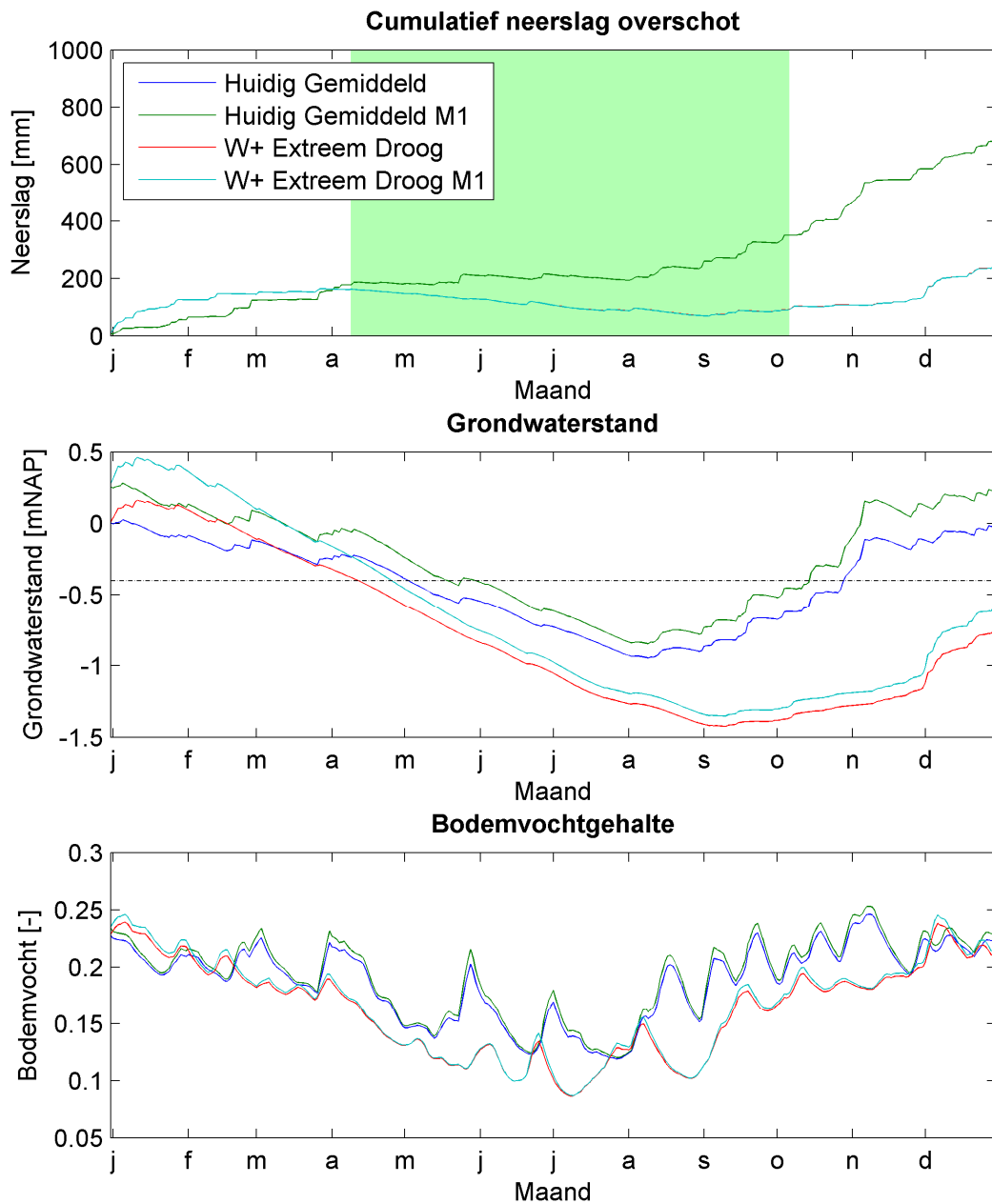
Tabel 5.2 Verandering van grondwaterstand bij huidig en W+ klimaat, en in verschillende droogtejaren, t.o.v. de grondwaterstand in het huidige klimaat, in een gemiddeld jaar.

klimaat	droogtejaar	met/zonder maatregel	GW peil t.o.v. huidig gemiddeld [m]
huidig	gemiddeld	M1	0,10
W+	gemiddeld	M1	0,08
<i>huidig</i>	<i>gemiddeld</i>		<i>0,00</i>
huidig	droog		-0,01
W+	gemiddeld		-0,02
huidig	extreem droog	M1	-0,23
huidig	extreem droog		-0,31
W+	extreem droog	M1	-0,40
W+	extreem droog		-0,47

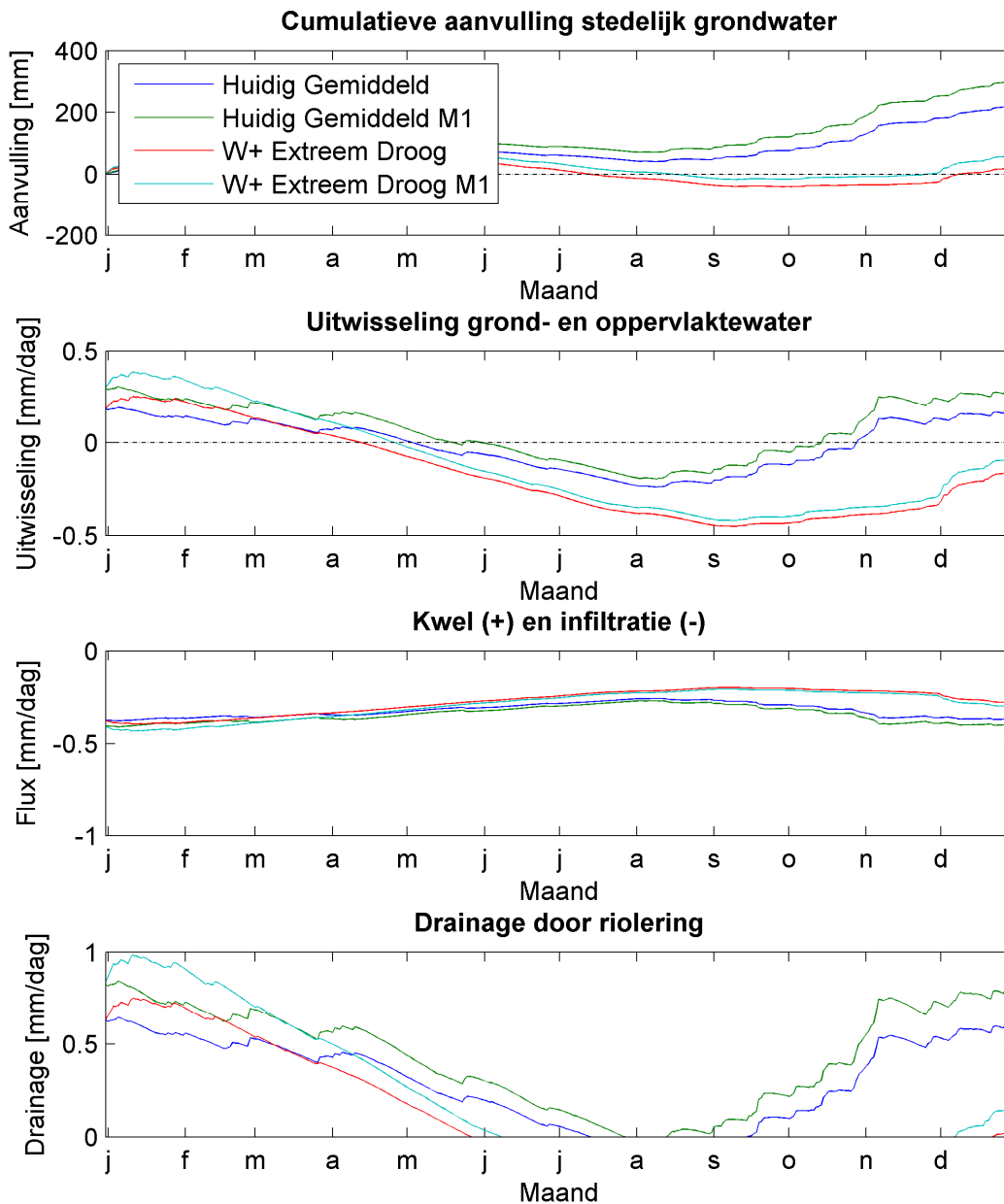




Figuur 5.1 Waterbalansen in de Rivierenbuurt als gevolg van een verdubbeling van de infiltratiecapaciteit van verhard gebied, diverse situaties en scenario's.



Figuur 5.2 Het gesimuleerde cumulatieve neerslagoverschot, de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte over het jaar voor vier combinaties van scenario's. De streepjes op de x-as stellen de eerste dag van de maand voor. Het groene vlak in bovenste figuur geeft het groeiseizoen van de vegetatie weer. De grijze lijn in de middelste figuur stelt het oppervlaktewaterpeil voor.



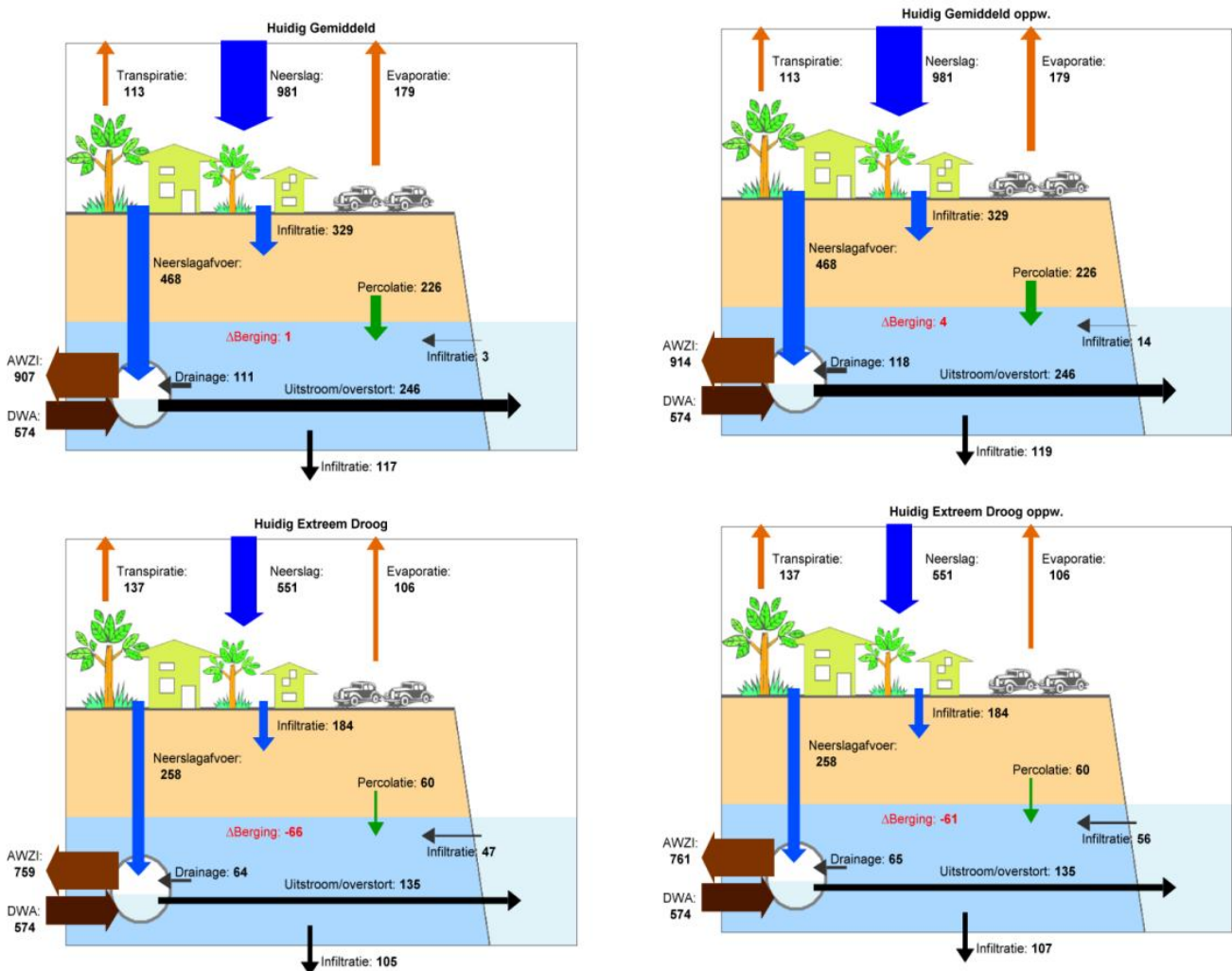
Figuur 5.3 De gesimuleerde cumulatieve aanvulling van het stedelijk grondwater, de stroming van water van het stedelijk grondwater naar nabijgelegen oppervlaktewater, de stroming van water van het stedelijk grondwater naar diepere grondlagen en de drainerende werking van de riolering over het jaar voor vier combinaties van scenario's. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

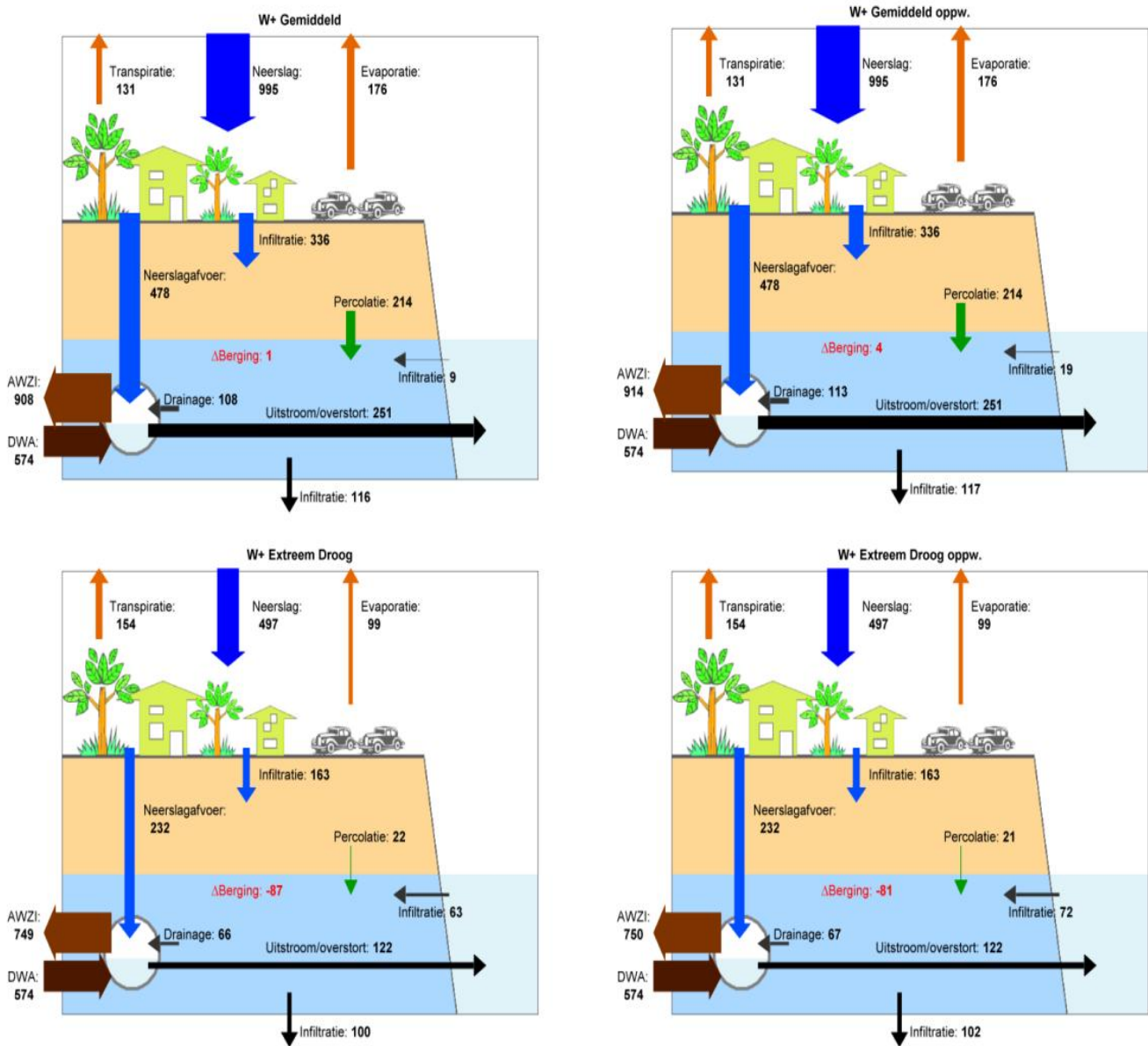
5.2.2 Effectiviteit van peilopzet oppervlaktewater

Voor de Rivierenbuurt is het effect op de waterbalans doorgerekend van een eenmalige en tijdelijke verhoging van het oppervlaktewaterpeil met 0,2 m gedurende het groeiseizoen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.4 en Figuur 5.5.

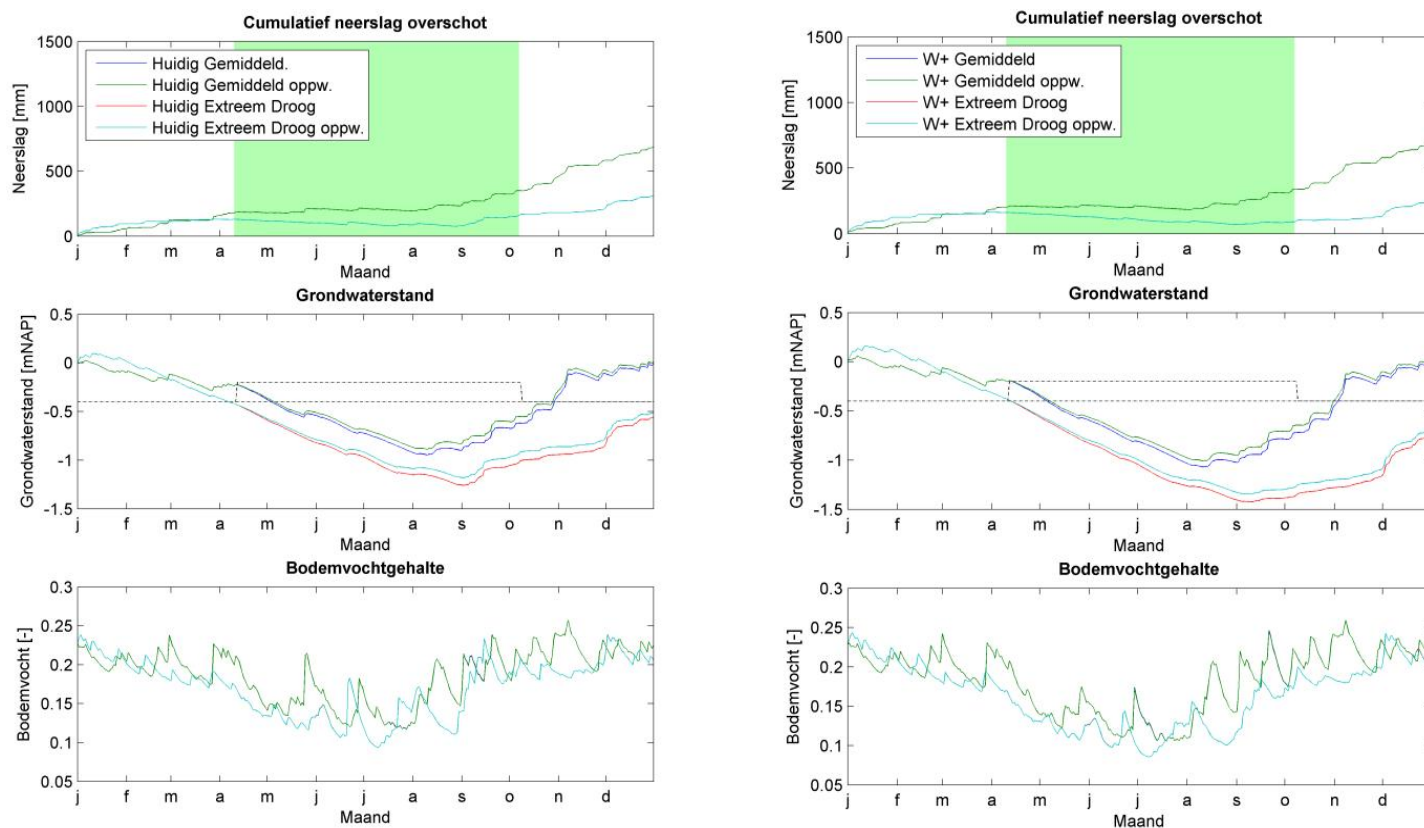
De maatregel heeft minder effect dan de infiltratiemaatregel, zie bijvoorbeeld de tijdreeksgrafiek met grondwaterstand (Figuur 5.5). Deze stijgt slechts met enkele centimeters. De oorzaak hiervan ligt in de tijdelijke aard van de peilopzet, in tegenstelling tot het permanente karakter van de infiltratievoorzieningen van maatregel 1.

Het moment van peilverhoging lijkt goed te zijn gekozen: de maximaal mogelijke opzet van de grondwaterstand is bereikt op het moment dat die het laagste peil in het jaar heeft. In de praktijk zal echter pas later in de droge zomer worden besloten tot peilopzet. Het effect is gedurende de periode met het grootste watertekort dan kleiner omdat de 'oplaadperiode' korter is.





Figuur 5.4 Waterbalansen in de Rivierenbuurt als gevolg van een peilverhoging, diverse situaties en scenario's.



Figuur 5.5 Cumulatief neerslagoverschot, grondwaterstand en bodemvochtgehalte in de Rivierenbuurt in de huidige situatie, zonder en met maatregel en in het W+ scenario met en zonder peilopzetmaatregel.

5.2.3 Aanvoer en infiltratie van oppervlaktewater

In de nota 'Amsterdam Waterbestendig' wordt aangegeven dat er meer water moet worden vastgehouden voor de droge maanden. Het vergroten van de infiltratiecapaciteit van de verharding kan daar een bijdrage aan leveren. Op pand of blokniveau (maatwerk) is afkoppelen van regenwater ten behoeve van de infiltratie een veel toegepaste maatregel. De waterbalansberekening voor deze maatregel laat echter zien dat alleen het vergroten van de infiltratiecapaciteit en/of peilopzet in de boezem het watertekort in de droge zomers onvoldoende aanvult.

Uit informatie van Waternet blijkt dat in het grootste deel van de Rivierenbuurt de waterdekking bij de gemiddeld hoogste grondwaterstand reeds minder is dan de gewenste 0,4 m boven de fundering. In de zomer is de waterbehoefte dermate groot dat de gemodelleerde maatregelen (vergroten infiltratie en/of peilopzet) de verdieping van de grondwaterstand in de droogste huidige en W+ zomers wel ten dele compenseren, maar daarmee de droogstand van de funderingen niet opheffen. Verder zorgt de grotere infiltratie in de winter voor een ongewenste hoge grondwaterstand.

Wanneer wordt gestreefd naar het afdoende dempen van de blootstelling aan te lage grondwaterstanden is dus meer nodig. Voor het voorkomen van droogstand moet de grondwaterstand worden aangevuld worden met (lokaal) geborgen regenwater of met water uit het oppervlaktewatersysteem. Uit de studie "Zoetwatervoorziening in Nederland - verwachte knelpunten in de 21e eeuw" (Deltares 2012) blijkt dat de aanvoer van boezemwater in het gebied geen knelpunt is in 2050. Alleen in het extreem droge W+ scenario wordt een licht tekort verwacht in 2100. Aanleg van grootschalige berging van regenwater is daarom vooralsnog niet nodig. Resteert de infiltratie van oppervlaktewater door de aanleg van watergangen of infiltratiedrains. De aanleg van infiltratiedrains kan kostenbesparend worden uitgevoerd indien dit wordt gecombineerd met de geplande rioolvervangning.

In een gesprek met Wareco zijn de mogelijkheden voor maatregelen doorgenomen. Wareco heeft reeds ervaring opgedaan met het ontwerp van infiltratiedrainagesystemen waarmee droogstand kan worden tegengegaan. Uit het gesprek kwam naar voren dat een infiltratieoplossing altijd uit maatwerk op pand of blokniveau bestaat. Waar het waterbalansmodel een goed beeld oplevert van het droogstandsrisico, is het voor het ontwerp van de maatregel noodzakelijk een lokaal model te gebruiken met locatiespecifieke gegevens over ondergrond, gebouw en waterbalans (grondwaterstanden). Om dergelijke modellen te kalibreren is het wel noodzakelijk om op perceelniveau te monitoren hoe de grondwaterstand op het klimaat reageert, zodat de benodigde infiltratiecapaciteit kan worden gedimensioneerd.

Proeven in Dordrecht hebben aangetoond dat een infiltratiedrain zeer effectief is in de handhaving van een gewenste ontwateringsdiepte. Bij een zandige ondergrond, zoals de ophooglaag in de Rivierenbuurt, is op grond van die resultaten te verwachten dat de waterstandsverhoging tot ver naar de achterzijde van de panden zal reiken. Wareco benadrukt dat dimensionering van maatregelen altijd maatwerk is (Wareco, 2004).

Waternet heeft te kennen gegeven dat infiltratiedrains naar verwachting niet effectief zullen zijn, omdat ze door gebruik van het boezemwater zullen verstopen. Deze verwachting wordt echter niet zondermeer onderschreven door Deltares, Wareco en Alterra.

5.2.4 Kostenafweging

Wanneer bovengenoemde maatregelen worden getroffen betekent dat niet dat het funderingsprobleem is opgelost. Van de bemeten 1650 panden kunnen er 264 als met een matige fundering worden aangeduid. Het werkelijke aantal zal nog hoger liggen. Wanneer een restlevensduur van 25 jaar voor deze funderingen wordt aangehouden, is een eventuele klimaatverandering niet relevant. Voor deze panden zal voor behoud een funderingsherstel ook bij het huidige klimaat nodig zijn. Nog goede funderingen dienen te worden beschermd door een voldoende grondwaterdekking. Bij de maatschappelijke kostenafweging van de grondwatermaatregelen zal daarom een gedetailleerder inzicht noodzakelijk zijn in de huidige kwaliteit van de funderingen en de diepte van de bovenkant van het funderingshout in relatie tot de huidige kans op droogstand door funderingsinspecties en een dichter netwerk van grondwatermonitoringspunten.

Om de keuze voor maatregelen te ondersteunen is in Tabel 5.3 een indicatie van kosten en baten in de vorm van vermijdbare schade gemaakt. Bij het combineren van de aanleg van infiltratiedrains met de aanleg van nieuwe riolering zullen de totale kosten enkele miljoenen euro's bedragen. Aparte aanleg van infiltratiedrain zal waarschijnlijk het dubbele bedragen.

Het vervangen van het rioleringsstelsel kost inclusief de onderheide voorzieningen een veelvoud daarvan. Het betreft hier maatregelen in de openbare ruimte.

De kosten kunnen worden afgezet tegen de kosten (schades) die op gaan treden bij onveranderd grondwaterregime. Uit de inventarisatie van de kwaliteit van de funderingen kan worden geschat (uit de steekproef van circa 1650 van de 4100 panden dat 2 procent al als slecht dient te worden beschouwd en moet worden hersteld. Dit funderingsherstel kan op 4,7 miljoen euro worden geschat. De toekomstige herstelkosten van de 16% (dit percentage volgt uit de steekproef) panden die op een termijn van 25 jaar (volgens Bouw- en Woningtoezicht Stadsdeel Zuid) aan herstel toe zijn, zullen circa 37 miljoen euro bedragen.

Het overgrote deel van de funderingen is waarschijnlijk in een redelijk tot goede staat. Het handhaven van een grondwaterstand boven de fundering betekent hier in de meeste gevallen een aanzienlijke levensduurverlenging, van meerdere decennia.

Tabel 5.3 toont de totaalkosten van enkele mogelijke maatregelen in de publieke ruimte. Deze kunnen worden geïnterpreteerd als de 'basiskosten voor de aanleg van een (distributie)netwerk' in de wijk. Zoals reeds aangegeven is een daaraan gekoppelde infiltratieoplossing op pand of blokniveau altijd maatwerk, waarvan de kosten niet konden worden geraamd.

De levensduur van PVC drains is, mits constructief stevig, meer dan 60 jaar (informatie over buissystemen kan bijvoorbeeld worden gevonden op www.teppfa.eu). Onderhoud bestaat uit het doorspuiten van de drains zodat deze schoon en permeabel blijven. Dit is zeker niet vaker dan 1 maal per jaar nodig. De kosten van dit onderhoud bedragen circa € 3,- per meter drain. Deze kentallen zijn gebruikt bij de berekening van de onderhoudskosten in Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Indicatie kosten aanleg en onderhoud infiltratiedrains (aanvoer oppervlaktewater) in publieke ruimte Rivierenbuurt; de kosten van alleen vervanging riolering (ter vergelijking); gemiddelde kosten funderingsherstel woning en staat van funderingen in Rivierenbuurt

Maatregel	Aanlegkosten per meter	Straatlengte Rivierenbuurt		Onderhoudskosten	Totaal kosten life cycle
Infiltratiedrains aanleggen op moment dat riool wordt vervangen	€40 à 50	30 km	1,2 tot 1,5 miljoen €	€ 90.000/jaar (worst case)	maximaal 6,9 miljoen € in 60 jaar
Infiltratiedrains apart aanleggen	circa €100		3 miljoen €	€ 90.000/jaar (worst case)	maximaal 8,4 miljoen € in 60 jaar
Referentie: alleen riool vervangen (niet onderhoud riool)	circa €100	25 km	2,5 miljoen €		
Referentie: alleen riool vervangen (onderhoud)	circa €1.000	Onbekend	Onbekend, kosten zijn afhankelijk van specifieke situatie		

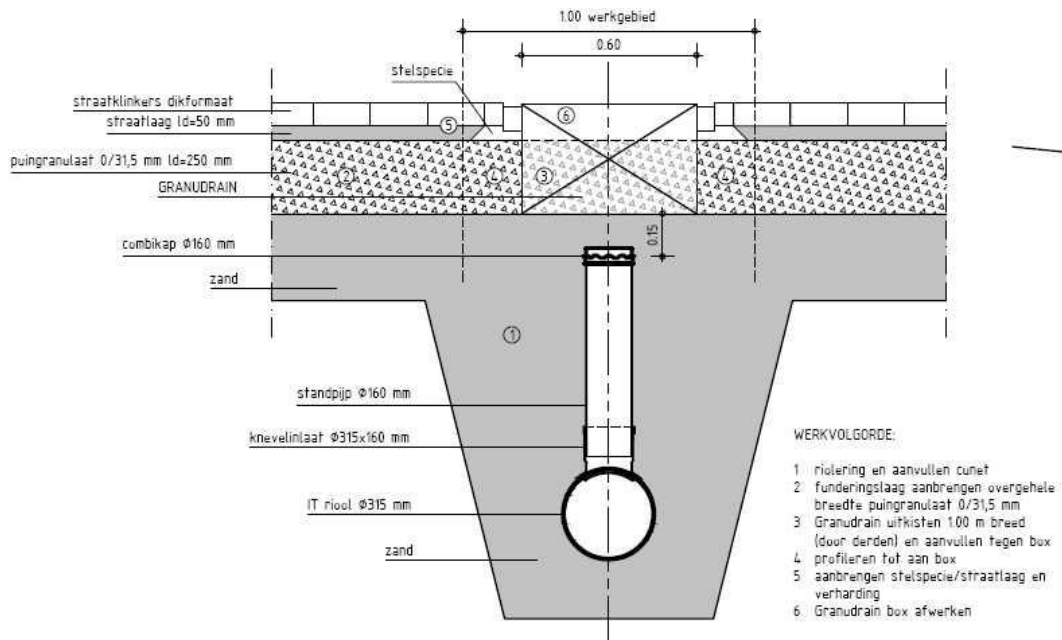
Funderingsherstel	Kosten per pand	Totaal aantal panden Rivierenbuurt	Slechte fundering	Matige fundering	Redelijke tot goede fundering
			Moet momenteel sowieso worden hersteld	Herstel binnen 25 jaar nodig, ongeacht klimaatverandering	Te beschermen panden
Kosten; aantal panden	€57.000	4100	82	656	3362

Uit de modellering van de maatregel 'vergroten infiltratie hemelwater' (zie paragraaf 5.2.1) blijkt dat deze maatregel een voor de Rivierenbuurt niet te verwaarlozen effect heeft, en daarom zinnig is om te nemen, maar onvoldoende compensatie biedt om herhaalde droogstand te voorkomen. Door de additionele aanleg van infiltratiedrains wordt het naar verwachting wel mogelijk om voldoende water in het gebied te krijgen en een gewenste ontwateringsdiepte te handhaven. Tabel 5.3 toont bovendien dat de totale kosten van de aanleg van infiltratiedrains in de publieke ruimte, inclusief onderhoud, behoorlijk lager zijn dan de potentiële kosten van het herstel van funderingen. Temeer wanneer aanleg tegelijk met de vervanging van de riolering plaatsvindt.

In de publieke ruimte wordt middels deze maatregelen een aanmerkelijke inspanning verricht om (de mogelijkheid voor particulieren te creëren om) schades te voorkomen. Schades kunnen echter nooit volledig worden uitgesloten. De maatregelen zullen niet overal in de wijk even effectief blijken en ook de gevoeligheid van de panden varieert. Er zal daarom altijd in enige mate funderingsherstel noodzakelijk zijn.

Waternet beoogt met infiltratiemaatregelen (IT-riolen, infiltratie ter plaatse van trambanen, granudrains, infiltratie hemelwater in tuinen door particulieren) ook de piekafvoeren beter te kunnen beheersen. Aangezien bij sommige van deze maatregelen toch ook de aanleg van extra drainage is vereist om overlast bij piekbuien te voorkomen, kan deze buis ook als

infiltratievoorziening worden aangelegd, ten behoeve van aanvoer van oppervlaktewater in langdurige droge perioden.



PRINCIPE DOORSNEDE "Granudrain"

(besteksleverantie / coördinatie door besteks aannemer)
SCHAAL 1:20



Figuur 5.6 Principe doorsnede Granudrain; voorbeeld Granudrain afvoersysteem in Alkmaar (bron: Waterindewijk.nl); voorbeeld PVC IT buis.

Geconcludeerd kan worden dat een optimaal resultaat bereikt wordt als meerdere typen maatregelen tegelijk in de openbare ruimte en bij panden door huiseigenaren worden getroffen.

Gezien de behoefte aan oppervlaktewater als bron van de aanvulling van de grondwaterstand kunnen de goede houten funderingen op de lange termijn alleen worden beschermd als de gemeente en het waterschap de waterinfrastructuur verbeteren. Voorwaarde is dan dat in de droogste zomers altijd voldoende water aangevoerd kan worden vanuit het oppervlaktewater. Huiseigenaren moeten in staat worden gesteld hun verantwoordelijkheid te nemen.

Op de eigenaren rust de plicht ervoor te zorgen dat de aanvulling ook de achterkant van de panden bereikt. Lokaal onderzoek en monitoring zal moeten uitwijzen welke maatregelen hiervoor moeten worden getroffen. Eigenaren kunnen door het aanleggen van infiltratiedrains naar de achtertuinen tevens wateroverlast voorkomen.

5.2.5 Beperken hittestress

Uit de waterbalansanalyses volgt dat er geen maatregelen noodzakelijk zijn om het functioneren van het bestaande groen te beschermen in het kader van de bestrijding van hittestress. Ook onder een warm, droger klimaat blijft de transpiratie op peil. Er is dan ook vanuit het oogpunt van de beschikbaarheid van bodemvocht geen beletsel voor de inzet van meer groen in de strijd tegen hittestress. Vanzelfsprekend moet hierbij dan wel rekening worden gehouden met andere factoren die de levensvatbaarheid bepalen, zoals het voorkomen van te natte omstandigheden en bewortelingsruimte. Bovendien moet de positie van groen secuur worden gekozen t.o.v. bebouwing, zodat de waterbehoefte van bomen niet zorgt voor een daling van grondwaterstanden onder funderingen.

Uit de Amsterwarm studie blijkt dat de verhardingsgraad in Amsterdam een dominante rol speelt in het optreden van het warmte eilandeffect. Maatregelen gericht op het verminderen van albedo, het weerkaatsingsvermogen, van bestrating en daken leveren het meeste rendement op. Te denken valt aan (citaat uit conclusies 'Amsterwarm'):

- Groene en koele daken
- Koele bestrating en minder bestrating
- Oppervlaktewater
- Bomen en groen
- Energie-efficiënte gebouwen.

'Koel' betekent in deze context veelal: daken of bestrating met een relatief hoge albedowaarde. 'Verkoeling' is relatief eenvoudig uit te voeren en kan toegepast worden bij regulier weg- of dakonderhoud door het aanbrengen van coating (verf), en/of het kiezen van andere materialen.

Vanaf 2020 moeten nieuwe en gerenoveerde gebouwen energie-neutraal zijn. Er gaat dus veel verbeterd worden aan woningen, kantoren en winkels. Het koel houden van gebouwen tijdens de zomer, en het omzetten van zonnestraling in duurzame energie dienen deel uit te maken van die opgave.

Deze maatregelen kunnen meeliften met onderhoud en andere initiatieven. Tegelijkertijd levert de relatief grote hoeveelheid bomen in Amsterdam een belangrijke bijdrage aan het

welzijn door de schaduwwerking. De grondwaterstand wordt in de droogste zomers niet zo laag dat de bomen bedreigd worden, maar de kwaliteit van het bladerdek kan wel achteruitgaan.

5.3 Arnhem-Oost

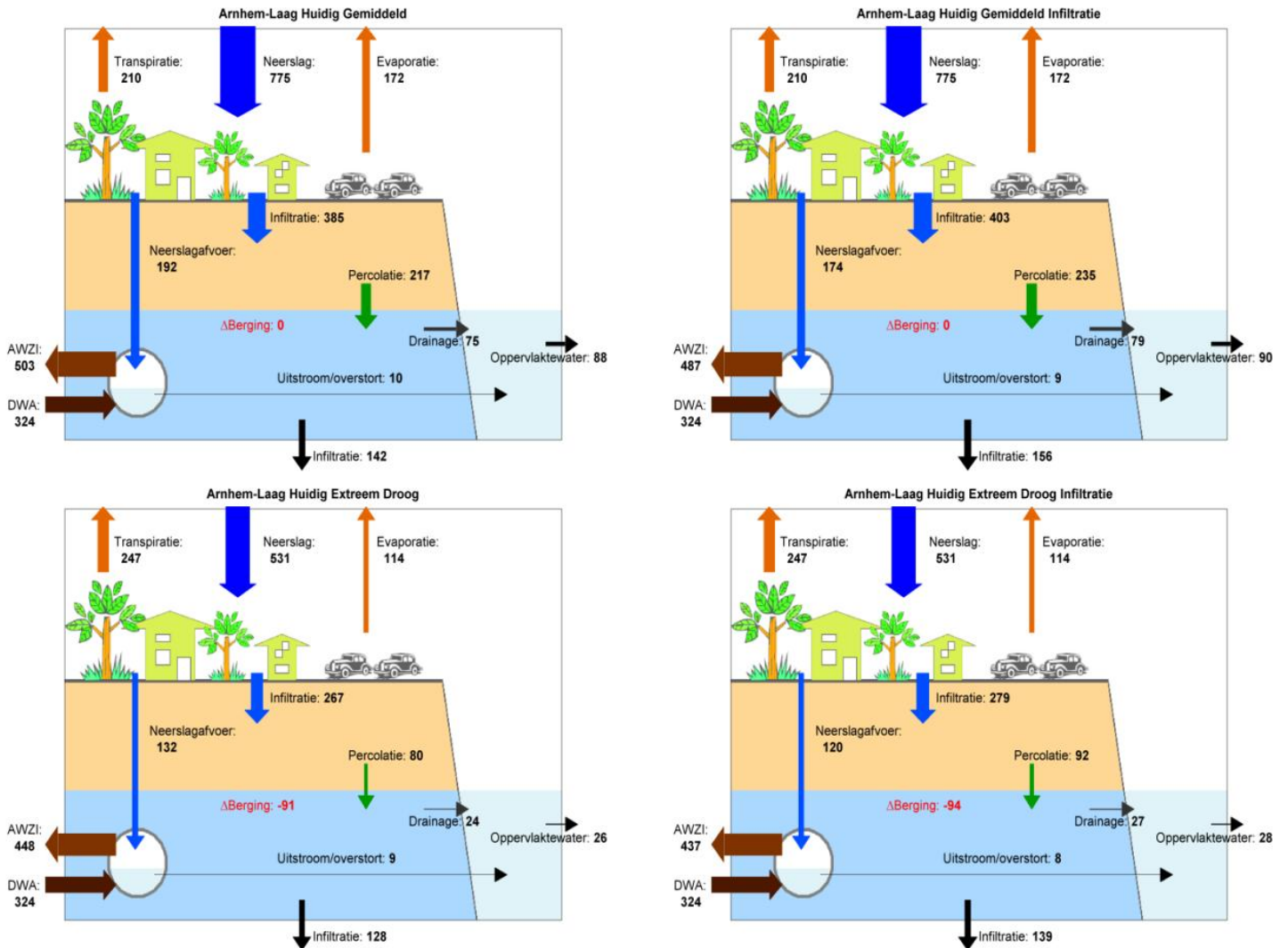
5.3.1 Effectiviteit van vergroten infiltratie hemelwater

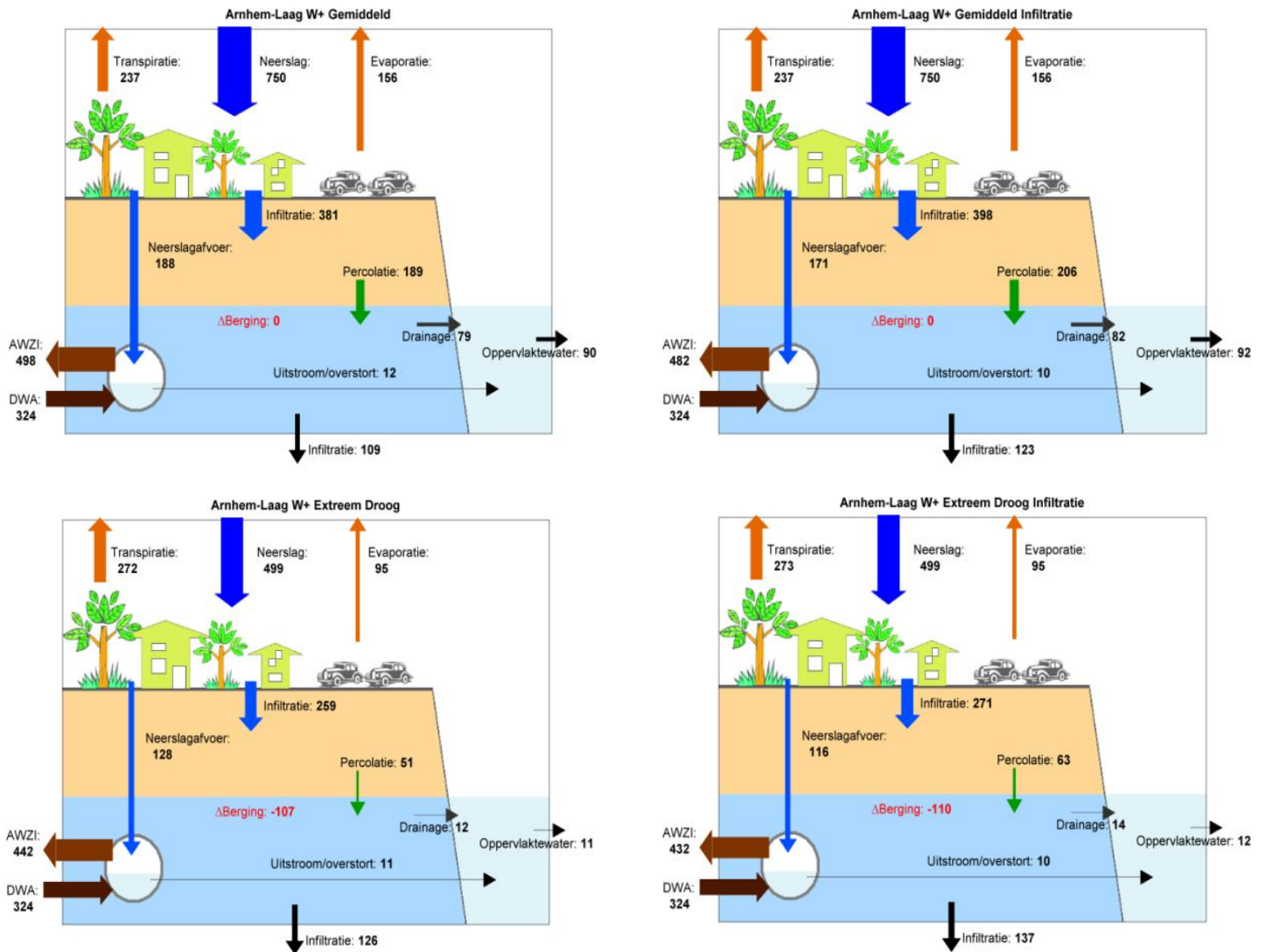
Op basis van de waterbalansanalyse die in dit onderzoek is uitgevoerd, is geconcludeerd dat in Arnhem-Oost geen directe noodzaak bestaat voor het nemen van maatregelen gerelateerd aan droogte. Het gebied is wel gevoelig voor wateroverlast als gevolg van extreme neerslag (intensief of langdurig). Ook in het huidige klimaat geeft dit problemen. In dat kader is doorgerekend wat de effecten zijn van het verdubbelen van de hoeveelheid infiltratie die plaatsvindt vanuit verhard oppervlak. De uitkomsten van de maatregel worden weergegeven in Figuur 5.7 tot en met Figuur 5.10.

Uit de figuren blijkt dat het effect van de maatregel, gezien vanuit het oogpunt van droogtebestrijding, beperkt is. Alleen in Arnhem-Oost Hoog is sprake van een lichte stijging van de grondwaterstand. Er is daardoor ook een toename van de beekafvoer, die de afname van de beekafvoer als gevolg van het W+ scenario, zoals getoond in Figuur 3.17, gedeeltelijk compenseert. De belangrijkste oorzaak voor het beperkte effect van deze maatregel is vermoedelijk het feit dat een significant deel van de riolering in de huidige situatie al is afgekoppeld en aangesloten op infiltratievoorzieningen. Ook het reeds relatief grote aandeel onverhard oppervlak beperkt de invloed van de maatregel.

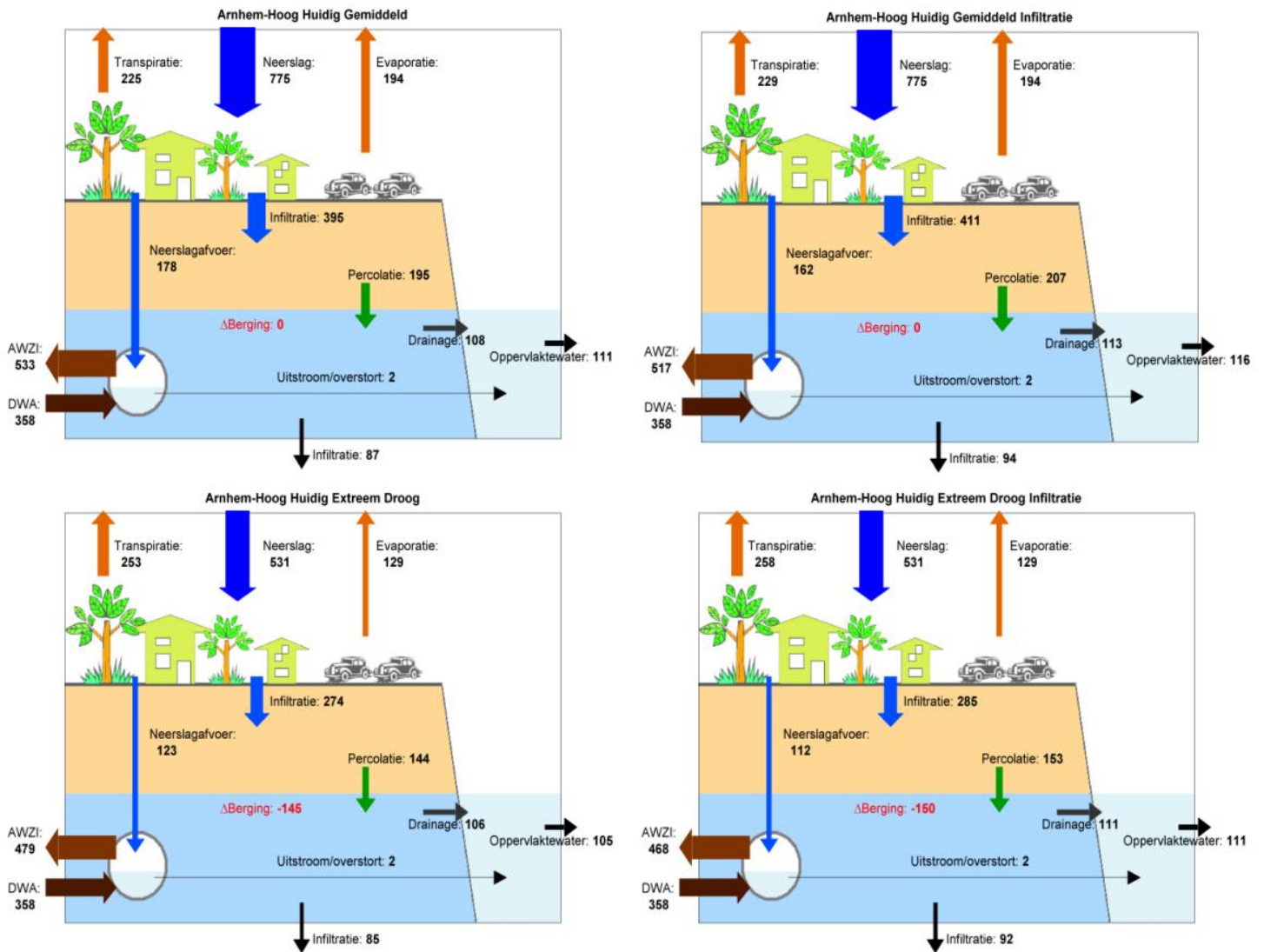
In Arnhem-Oost Laag verandert de transpiratie niet als gevolg van de maatregel, omdat de verdamping toch al niet werd gelimiteerd door het bodemvochtgehalte. In Arnhem-Oost Hoog neemt de transpiratie wel iets toe, zij het marginaal. Blijkbaar komt de extra infiltratie vooral ten goede aan percolatie naar het grondwater en niet aan het bodemvocht. Het mechanisme hierachter is identiek aan dat in de Rivierenbuurt: de meeste extra infiltratie zal plaatsvinden in het winterhalfjaar, wanneer de transpiratie vrijwel nul is.

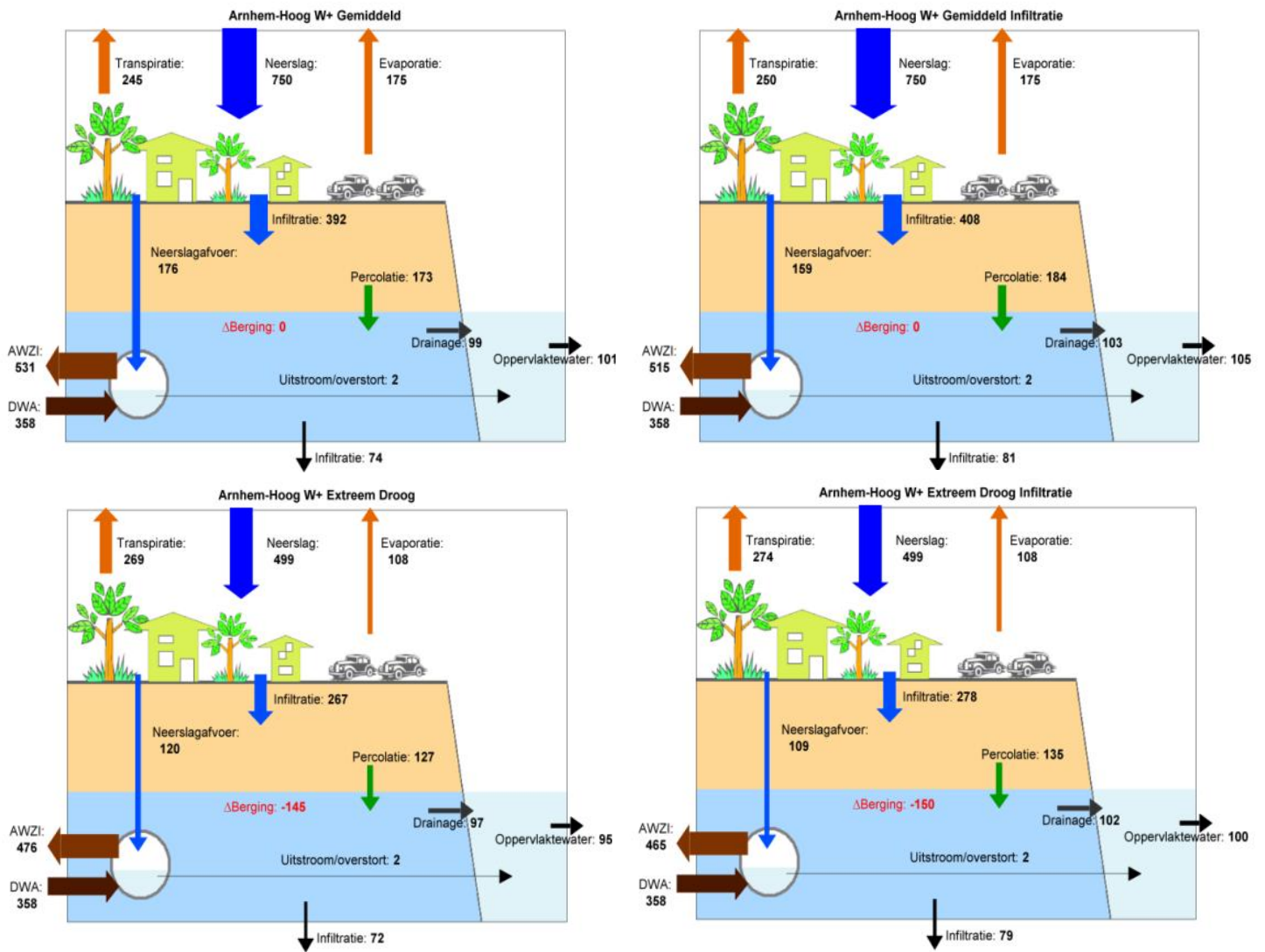
Het geringe compenserend effect tegen droogte, en het ontbreken van gevoeligheid voor droogte in Arnhem-Oost, leidt tot de conclusie dat vanuit dit oogpunt geen basis voor de maatregel bestaat. Vanuit het oogpunt van bestrijding van wateroverlast, wat wel aan de orde is in Arnhem-Oost, is vergroting van de infiltratie wel degelijk zinnig. De kleine compensatie van droogte lift dan mee.



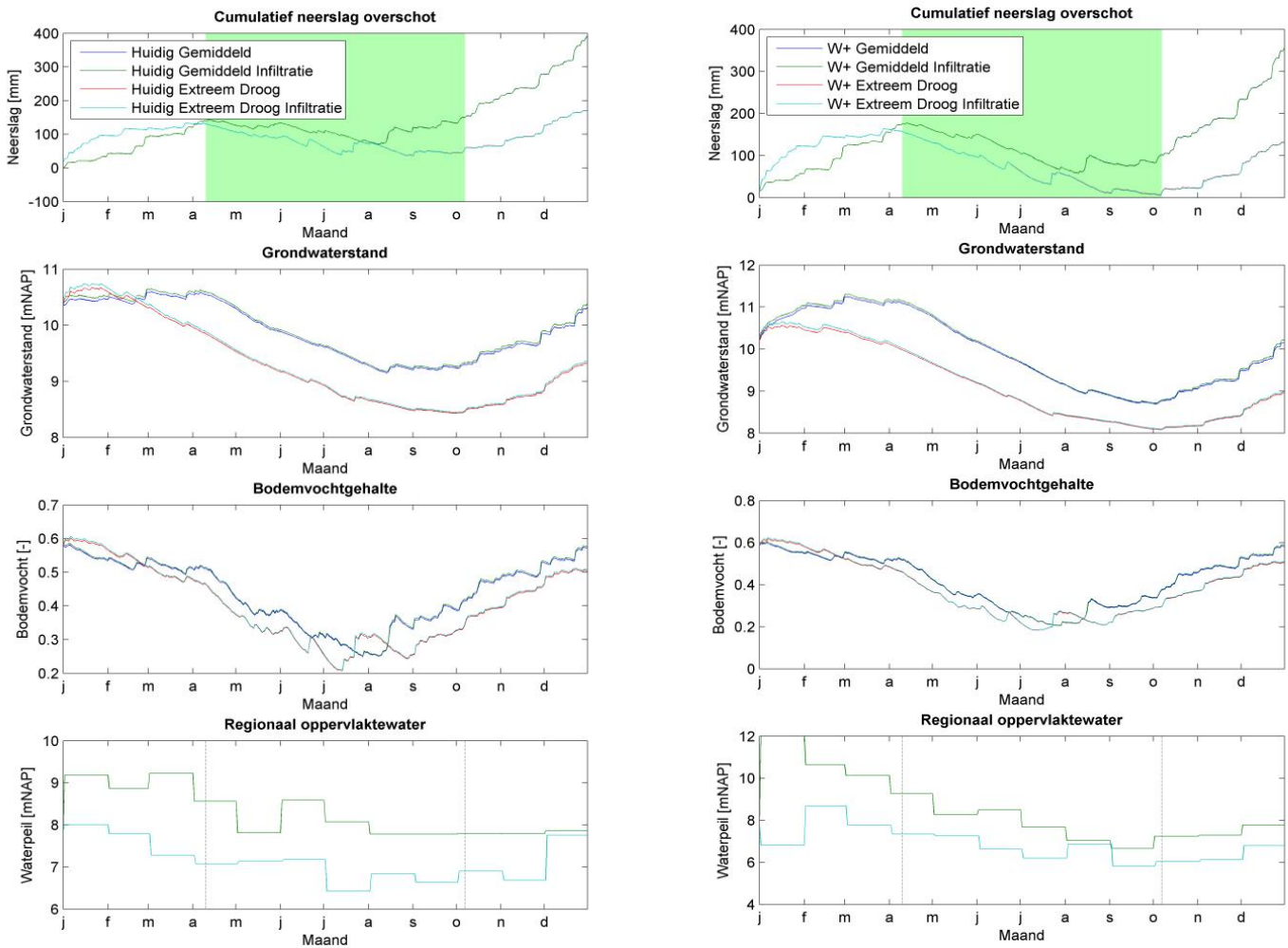


Figuur 5.7 Waterbalans van Arnhem-Oost Laag als gevolg van een verdubbeling van de infiltratiecapaciteit van verhard gebied, diverse situaties en scenario's.

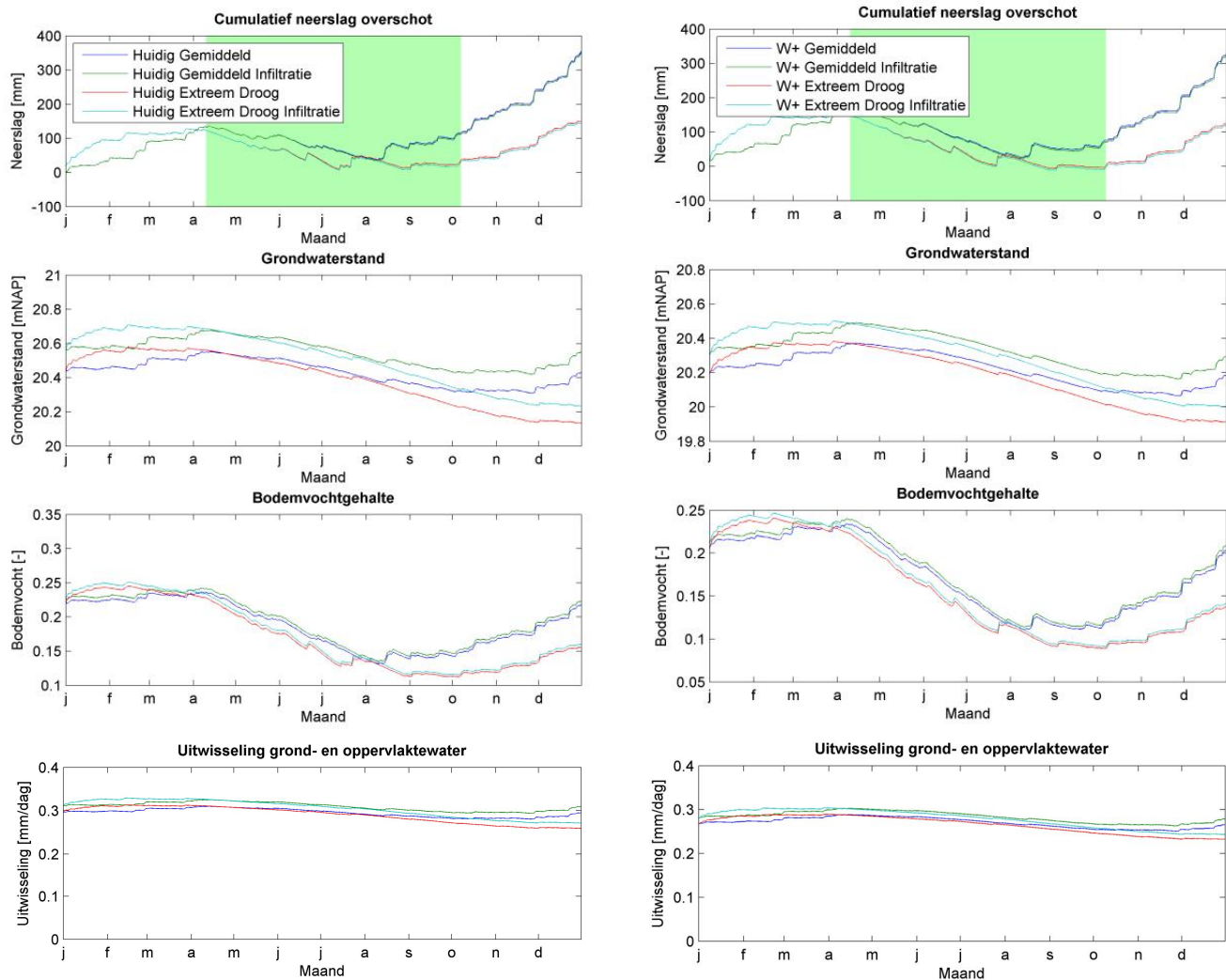




Figuur 5.8 Waterbalans van Arnhem-Oost Hoog als gevolg van een verdubbeling van de infiltratiecapaciteit van verhard gebied, diverse situaties en scenario's.



Figuur 5.9 Cumulatief neerslagoverschot, grondwaterstand, bodemvochtgehalte en oppervlaktewaterpeil in Arnhem-Oost Laag in de huidige situatie, zonder en met maatregel en in het W+ scenario met en zonder infiltratiemaatregel.



Figuur 5.10 Cumulatief neerslagoverschot, grondwaterstand, bodemvochtgehalte en uitwisseling grond- en oppervlaktewater in Arnhem-Oost Hoog in de huidige situatie, zonder en met maatregel en in het W+ scenario met en zonder infiltratiemaatregel. Voor de uitwisseling grond- en oppervlaktewater geldt: een positieve waarde is drainage van grondwater naar oppervlaktewater, een negatieve waarde is aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

5.3.2 Beperken hittestress

Hittestress kan wel aanleiding zijn voor maatregelen. Wanneer daarbij wordt gekozen voor meer groen neemt de waterbehoefte van het gebied in principe toe. In Arnhem-Oost Hoog is dit een aandachtspunt aangezien hier een grondwaterstands daling wordt voorzien en langs de bedding van de beken daardoor minder ondiep grondwater uittreedt. De voeding van de beken door sprengen blijft naar verwachting onder gemiddelde omstandigheden ook onder het W+ scenario in stand. Er zijn momenteel echter geen aanwijzingen in Arnhem dat het groen (het huidige groenbeleid) niet zou kunnen functioneren onder de omstandigheden van een droger klimaat, dat er een 'faalpunt' wordt bereikt. Er is dan ook vanuit het oogpunt van de beschikbaarheid van bodemvocht geen beletsel voor de inzet van meer groen in de strijd tegen hittestress.

5.3.3 Beperken wateroverlast in kelders

Voorkomens hiervan blijken zeer lokaal bepaald te zijn door de bodemopbouw, het reliëf en infiltratiecapaciteit van de bodem. Indien overlast ontstaat door oppervlakkige afstroming richting woningen (alleen van toepassing in Arnhem-Oost) kan een maatregel waarbij water wordt afgeleid of sneller infiltreert in de ondergrond helpen de overlast te voorkomen of te beperken. In andere gevallen is vergroting van de afvoercapaciteit van het riool, in combinatie met infiltratievoorzieningen, een adequate maatregel.

In Arnhem-Oost Laag veroorzaakt hevige neerslag in combinatie met opkwellend grondwater (a.g.v. hoge rivierwaterstanden) overlast.

Kansrijke maatregelen zijn:

- Profilering maaiveld; door kleine hoogteverschillen in de straat en groenstroken kan regenwater oppervlakkig naar plekken geleid worden waar geen overlast ontstaat.
- Infiltratievoorzieningen (infiltratieriolen, infiltratiekratten, zakputten, wadis, granudrains).
- Vervangen van gesloten verharding door half-open verharding en vervangen van halfopen verharding door zeer doorlatende verhardingen.
- Direct naar het grondwater infiltreren met behulp van infiltratieputten, -velden of -sleuven.
- Grondwaterpeil gestuurde drainage (Arnhem Laag).
- Vergroten afvoercapaciteit riool.
- Waar maatregelen in openbare ruimte tekortschieten: pompsysteem in kelders.

5.3.4 Beperken wateroverlast op wegen/onderdoorgangen

Dit type overlast speelt met name in het overgangsgebied naar Arnhem Laag. Onder de nattere klimaatscenario's kan de overlast zich uitbreiden naar andere locaties. Geschikte maatregelen zijn:

- Vergroten afvoercapaciteit riool.
- Meer periodiek inspectie en onderhoud van de werking van het riool. Het wordt steeds belangrijker de volledige capaciteit van de bestaande riolering ter beschikking te hebben voor het reduceren van overlast bij extreme situaties.
- Infiltratievoorzieningen (infiltratieputten, -riolen, -kratten, zakputten, wadis, granudrains).

De locaties van infiltratievoorzieningen dienen goed gekozen te worden en met zorg te worden ontworpen om eventuele verhoging van grondwaterstand nabij woningen, en daarmee de kans op grondwateroverlast, te voorkomen. Anders is dit middel erger dan de kwaal.

In Arnhem-Oost Hoog kunnen de parken een rol spelen in de berging van de toename van overtollig water.

Vergroting van de rioolcapaciteit kan worden gerealiseerd bij het reguliere onderhoud van het systeem.

5.3.5 Beperken erosie taluds door extreme neerslag

Met name de taluds van de A12 en de spoorlijn zijn steil. Deze taluds zijn in beheer van Rijkswaterstaat en ProRail. De begroeiing op deze taluds (en soms aangebrachte steenbekleding) voorkomt erosie. Bij de verwachte toename van extreme neerslag neemt de kans op erosie toe. Naast tijdig onderhoud van of aanpassing van de bekleding is de aanleg van drainage om de hoeveelheid water die over de taluds stroomt te reduceren, een geschikte maatregel. Ook kan een zwaardere ontwerpwaarde voor extreme neerslag worden gehanteerd. Arnhem houdt overigens al rekening met een 1/10 jaar bui in plaats van de 1/2 jaar bui waarop meestal wordt ontworpen.

6 Toepassing methodologie in andere wijken

6.1 Stappenplan

De stappen die in deze studie zijn doorlopen om de doelstelling te bereiken zijn universeel geldig en dienen dus ook te worden uitgevoerd bij een analyse van wijken elders:

A) Inzichtelijk maken van huidige en toekomstige waterbalans

- Relevante gebiedskenmerken analyseren: historie, landgebruik, ondergrond en watersysteemkenmerken
- Waterbalansmodel opzetten
- Waterbalans kwantificeren voor huidige situatie
- Veranderingen in waterbalans kwantificeren onder klimaatscenario's.

B) Inzichtelijk maken van gevoeligheid wijk

- Analyse van gevoeligheid van groen, bebouwing en infrastructuur.
- Aanduiden van de voornaamste gevoeligheden in de wijk o.b.v. de relatieve omvang mogelijke schades en beheerkosten.

C) Selectie van maatregelen voor de wijk

- Selectie van in de wijk toepasbare maatregelen die de blootstelling aan veranderingen in de waterbalanscomponenten verminderen en daarmee schademechanismen tegengaan.
- Compenserend effect van maatregelen op ongewenste waterbalansveranderingen ramen, met waterbalansmodel of o.b.v. kentallen uit cases elders.
- Bepalen van realisatiekosten van maatregelen.

In de voorgaande hoofdstukken is uitgebreid beschreven hoe deze stappen zijn doorlopen voor de casegebieden en welke zaken daarbij op welke wijze zijn geanalyseerd. In de navolgende paragrafen worden t.b.v. een reproductie additionele adviezen gegeven.

6.2 Ervaringen met het geconstrueerde waterbalansmodel

De ontwikkeling van het stedelijke waterbalansmodel voor het stedelijk watersysteem inclusief de waterketen, en de toepassing ervan in Amsterdam en Arnhem, hebben geleid tot een voorzichtig optimisme met betrekking tot de toepassingsmogelijkheden in andere stedelijke gebieden. Met het model wordt 2-dimensionale informatie (uitkomsten over de periode van 1 jaar, uitgedrukt in voor de gehele wijk geldende waarden) verkregen over effecten van klimaatverandering en maatregelen op het watersysteem van een wijk. Duidelijk wordt hoe de verschillende onderdelen van het watersysteem, gedurende een meteorologisch jaar, reageren.

Vooraf in de Rivierenbuurt zijn de resultaten goed: ondanks afwijkingen tussen model en metingen worden zowel absolute niveaus als dynamiek van de grondwaterstand juist gesimuleerd door het model. Daarbij wordt de realiteit geen geweld aangedaan; voor de modelparameters die de generieke hydrologische processen beschrijven zijn de voor Prinseneiland gekalibreerde waarden ongewijzigd overgenomen. Een deel van de gebiedsspecifieke modelparameters kon met voldoende nauwkeurigheid worden bepaald op

basis van beschikbare databestanden. Een ander deel van de gebiedsspecifieke modelparameters kan niet of slechts kwalitatief worden geschat; de schatting van deze groep parameters vormt de grootste bedreiging voor goede resultaten. De grondwaterstand blijkt minder gevoelig voor dit laatste type parameters dan riooldebieten. Zo kan het bijvoorbeeld bijna niet anders dan dat de riooldebieten in de Rivierenbuurt sterk beïnvloed worden door de afvoer van regenwater (uit aangrenzende gebieden, of als gevolg van foutieve aansluitingen op het vuilwaterriool of lekkage van grondwater). De pieken die hierdoor veroorzaakt worden kunnen onmogelijk worden gesimuleerd door een model dat veronderstelt dat het vuilwaterriool alleen vuilwater afvoert. Opgemerkt moet wel worden dat de relatief uniforme bodemopbouw in de Rivierenbuurt een gunstige omstandigheid was voor de validatie.

De toepassing van het waterbalansmodel wordt meer beperkt door de beschikbaarheid van gegevens dan door onvolkomenheden in het model zelf. En dan niet zozeer de beschikbaarheid in absolute zin, maar de verhouding tussen beschikbaarheid en complexiteit van randvoorwaarden.

In Arnhem-Oost Hoog zijn deze randvoorwaarden sterk variabel binnen het gebied (beekpeil, maaiveldhoogte, dikte onverzadigde zone). Validatie op slechts 1 meetreeks is dan ook niet voldoende als het gaat om absolute waarden; door randvoorwaarden te variëren binnen het bereik van wat werkelijk optreedt in het gebied kan relatief eenvoudig een bevredigend resultaat worden behaald, maar dit heeft weinig zeggingskracht.

In de Rivierenbuurt is ook maar op 1 meetreeks gevalideerd, maar deze reeks was qua absoluut niveau en dynamiek wel representatief voor het hele gebied. Bovendien is hier de randvoorwaarde vanuit het oppervlaktewater homogeen.

Gunstig voor de toepassing van het waterbalansmodel in andere wijken is dat alle voor de casegebieden gebruikte data voor de meeste wijken in Nederland beschikbaar zijn, zij het dat meestal wel een bewerkingsslag nodig zal zijn.

6.3 Leidraad voor gebruik van het waterbalansmodel

Op basis van de ervaringen in dit project worden de volgende aanbevelingen voor gebruik door derden gegeven:

- Bij het verzamelen van de gegevens om het waterbalans te voeden, is het raadzaam om een indeling in drie categorieën modelparameters te hanteren:
 - (1) min of meer gebiedsonafhankelijke procesparameters die ongewijzigd kunnen worden overgenomen uit deze studie, tenzij er duidelijk aanwijzingen zijn voor afwijkende omstandigheden in het betreffende studiegebied;
 - (2) gebiedsparameters die goed te bepalen zijn op basis van beschikbare gegevens en (eventueel) een beperkt aanvullend veldonderzoek; en
 - (3) niet of moeilijk te bepalen gebiedsparameters. De derde categorie parameters verdient extra aandacht bij het lokaal valideren van het model (zie ook de aanbevelingen hierna). Een overzicht van modelparameters en hun indeling in de beschreven categorieën is opgenomen in Bijlage F.
- Aanvullend op de modelparameters is recente (bij voorkeur niet ouder dan 5 jaar) informatie nodig over de volgende modelvariabelen: neerslag en verdamping (zo lokaal mogelijk), stijghoogte van het grondwater in diepere watervoerende lagen, drinkwatertoevoer en droogweerafvoer (DWA) van het vuilwaterriool.

- Bij de selectie en beoordeling van meetpunten voor kalibratie / validatie moet nota worden genomen van de lokale omstandigheden die binnen het te modelleren gebied kunnen variëren, en invloed kunnen hebben op de optimalisatie van de relevante modelparameters. Voorbeeld: de validatie op de grondwaterstand in het hellende gebied in Arnhem-Oost Hoog is uitgevoerd met een waarde voor het beekpeil die representatief is voor de hoogteligging van de betreffende peilbuis.
- Het valideren van het waterbalansmodel op te weinig grondwatermeetreeksen bemoeilijkt de interpretatie van de resultaten. Indien het voornemen bestaat dit waterbalansmodel in een gebied toe te passen, is het raadzaam om voor de uitvoering daarvan een analyse te maken van de beschikbaarheid van grondwatermeetreeksen, en zonodig een uitbreiding van het grondwatermeetnet te plegen. Dit dient bij voorkeur een jaar van te voren te gebeuren zodat in ieder geval één jaarlijks tijdsverloop voor de betreffende locatie kan worden meegenomen in de analyse.
- Er moet altijd worden gecontroleerd of er meer dan één parameterconfiguratie is die tot een "optimale" modelprestatie leidt. De voor Prinseneiland beschreven combinatie van Monte Carlo analyse en beoordeling van modelprestaties met de (log) Nash-Sutcliffe coëfficiënt is een hiervoor bruikbare methode. De kans op meerdere optimale parameterconfiguraties is groter naarmate de beschikbaarheid van validatiegegevens beperkter is.
- Er moet worden nagegaan welke invloed het hanteren van alternatieve, even goed presterende parameterconfiguraties heeft op de beantwoording van de onderzoeksvraag.
- De analyse moet betrekking hebben op de netto jaarresultaten van de balans (zie de balansfiguren met aangeduide fluxen in deze rapportage), maar zeker ook op de variatie door het jaar heen (zie de weergegeven grafieken). Beide zijn nodig om inzicht te krijgen in hoe het systeem reageert en reacties te kunnen verklaren.
- Bij scenarioberekeningen moet een inrekenperiode worden toegepast die aansluit bij de reactietijd van de traagste component van het stedelijke watersysteem (vrijwel altijd het grondwatersysteem). Voorbeeld: voor de droogte- en Deltascenario's in Arnhem-Oost is een inrekenperiode van 30 jaar toegepast. In deze periode is de aanpassing reeds doorgevoerd en verandert het systeem naar een nieuwe evenwichtssituatie. Bij analyses van effecten op een termijn korter dan de inrekenperiode dient hier rekening mee gehouden te worden.

6.4 Inventariseren van gevoeligheid

De analyse richt zich op objecten en functies die gevoelig zijn voor blootstelling aan veranderingen in de waterbalanscomponenten. Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.5 bevatten een generiek overzicht van dergelijke objecten. Er is een onderverdeling gemaakt naar bebouwing, infrastructuur, groen en hitte. Aangegeven is hoe het mechanisme werkt en wat daarin de bepalende parameter is. Bij het reproduceren van de in deze studie uitgevoerde analyse, kan dit overzicht worden nagelopen.

De inventarisatie dient echter te starten met het verkrijgen van inzicht in de ondergrond. Daartoe kan, net als in deze studie, een beroep worden gedaan op de DINO database van TNO en geohydrologische rapportages uit het gebied.

Bijzonderheden en relevante ontwikkelingen:

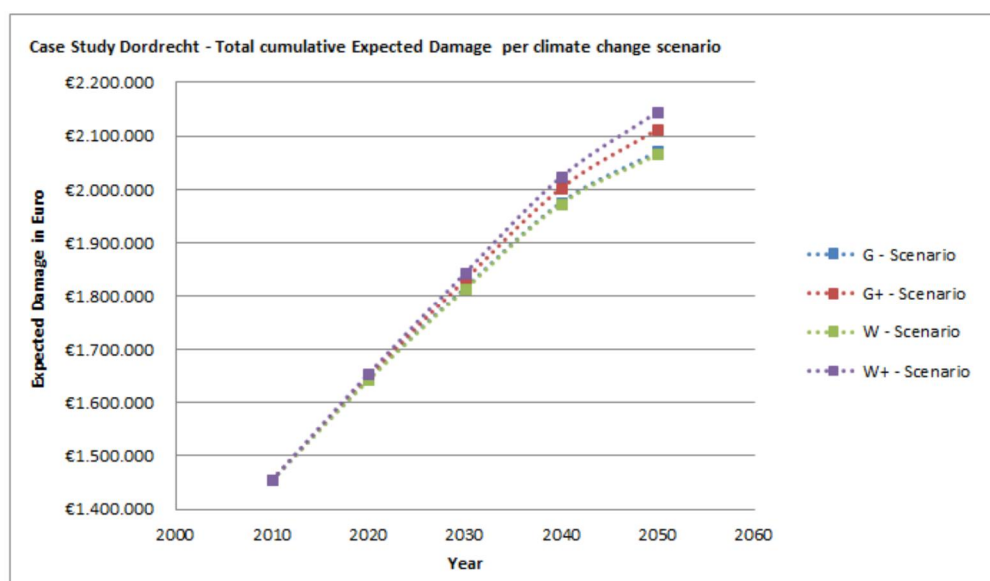
Bodemdaling en zettingsgevoeligheid

Bodemdaling- en zettingsgevoeligheid zijn locatiespecifieke fenomenen. Voor een indicatie van de gevoeligheid op regionale schaal zijn de kaarten uit de Quickscan (Deltares, maart 2012) richtinggevend. Infrabeheerders als Alliander en Oasen en het kennisinstituut KWR maken momenteel gebruik van de GIS-bestanden van zettingsgevoeligheid om toepassingsgerichte indicatiekaarten te maken die het beheer en de inspectie- en onderhoudsprioritering van hun netwerken ondersteunen. Locatiespecifieke kaarten met meer kwantitatieve informatie kunnen pas gemaakt worden als meer informatie wordt verzameld. In het infra project IJKNET worden momenteel rekentools ontwikkeld die gebruik makend van deze informatie gerichtere keuze van maatregelen mogelijk te maken.

Houten paalfunderingen

Ook de problematiek van houten paalfunderingen is locatiespecifiek. Het fenomeen palenpest, de bacteriële aantasting van grenen palen, is hier buiten beschouwing gelaten als zijnde een autonoom probleem. Paalrot is echter een universeel probleem dat direct gekoppeld is aan de waterbalans. Voor een indicatie van de omvang zijn de kaarten in de Quickscan (Deltares, maart 2012) geschikt. De methodiek ontwikkeld door T. Veldkamp (zie navolgend kader) maakt de gevoeligheid op wijkniveau mogelijk, door een meer gedetailleerde kostencalculatie en de relatie met het klimaatscenario bij een ongewijzigd waterbeheer in beeld te brengen. In combinatie met de hier ontwikkelde waterbalansmodule kunnen ook de effecten van maatregelen in beeld worden gebracht. Het model van Veldkamp is echter nog onvoldoende gevalideerd. Hiervoor zijn meer gegevens nodig van grondwaterstandsverloop en de kwaliteit van de funderingen. Na de inwinning van meer locatiespecifieke gegevens zal een bruikbaar afwegingsinstrument ontstaan, waarmee de baten van maatregelen in de vorm van kostenbesparing op funderingsherstel kunnen worden gekwantificeerd.

In de studie "Pole-faults, Developing a methodology for the risk assessment of wooden pile foundation problems in urban areas caused by periods of cumulative drought under climate change", MSc Thesis VU, 2012, heeft T. Veldkamp een rekenmodel opgesteld en gevalideerd waarmee op basis van de grootte van een huis en de verwachte cumulatieve droogstand in verschillende klimaatscenario's het risico van paalrot wordt berekend. Er zijn twee cases beschouwd: Amsterdam en Dordrecht. De toename in cumulatieve droogstand in de droge scenario's wordt ook in deze studie berekend. Door het kleine aantal validatiepanden in Amsterdam zijn de berekende kosten per decennium voor alle scenario's gelijk. In Dordrecht wordt wel een geringe toename in de kosten berekend bij een droger scenario. Voor een toepassing in andere gevoelige gebieden is de methodiek nog niet geschikt door de gebrekkige validatie. De methode om de kosten van funderingsherstel te berekenen is wel algemeen bruikbaar. De methodiek kan verbeterd worden als er meer gegevens over de grondwaterstand in relatie tot de hoogte van de top van het funderingshout beschikbaar zijn. Een combinatie met de ontwikkeling en verbetering van het waterbalansmodel naar een ruimtelijke model ligt dan voor de hand



Figuur 6.1 Toename cumulatieve kosten Indische buurt/ 19^e-eeuwse schil Dordrecht (Veldkamp, 2012)

6.5 Selectie van maatregelen

Gebruik makend van de maatregeleninventarisatie uit het project Schades door watertekorten en –overlast in het stedelijk gebied (Deltares, maart 2012), kunnen geschikte maatregelen worden geselecteerd. Naast deze inventarisatie is ook de ‘maatregelenmatrix’ van Deelprogramma Nieuwbouw & Herstructurering bijzonder goed bruikbaar (een overzicht met 155 klimaatmaatregelen: fysieke maatregelen die genomen kunnen worden ter voorkoming van overlast door water, droogte en hitte en maatregelen die schade bij een eventuele overstroming kunnen beperken).

Allereerst kan een selectie van maatregelen worden gemaakt op basis van de gebiedskenmerken, watersysteemkenmerken en verwachte gevoeligheden. De maatregelen kunnen gericht zijn op het verminderen van de blootstelling aan veranderingen in waterbalanscomponenten en daarmee schademechanismen tegengaan, of de gevoeligheden van objecten of functies in het gebied beperken.

Inzicht in de dynamiek van de waterbalans helpt bij het selecteren van maatregelen. Kijk naar de grootte van en interactie tussen de termen in de balans. Welke componenten gaan hoe veranderen t.g.v. welke klimaateffecten? Ga na welke typen maatregelen ingrijpen op de veranderende componenten (welke maatregelen kunnen worden ingezet om de als niet wenselijk geachte verandering teniet te doen of te dempen?). Maak op basis hiervan de definitieve selectie van maatregelen.

Het is vervolgens zaak om het compenserend effect van de maatregelen te ramen. Voor maatregelen die ingrijpen op de blootstelling aan veranderingen in de waterhuishouding kan gebruik worden gemaakt van een waterbalansmodel, zoals in deze studie. Wanneer dat niet mogelijk is kan een beroep worden gedaan op kentallen uit toepassingen elders. Helaas zijn deze kentallen nog dungezaaid. Veel maatregelen zijn nog in een experimenteel stadium. Ook over de kosten van maatregelen is nog weinig bekend.

Een voordeel van de aanpak die met het waterbalansmodel in dit onderzoek is gevolgd, is dat de analyse van de effectiviteit van maatregelen vanuit twee routes wordt aangevlogen: enerzijds wordt bepaald wat het compenserend vermogen van maatregelen op de waterbalans idealiter zou moeten zijn en anderzijds wordt ingeschat wat het compenserend vermogen van een maatregel is. Ook zonder te beschikken over exacte kentallen kan dan al snel worden ingeschat of het sowieso mogelijk is om met maatregelen de blootstelling aan nadelige effecten van droogtesituaties volledig te voorkomen, of dat een zekere mate van blootstelling onvermijdelijk is en dus moet worden ingezet op het beperken van de gevoeligheid. Dit inzicht is al van grote waarde t.b.v. het opzetten van een adaptatiestrategie.

Over maatregelen die wateroverlast tegengaan is al wel veel bekend. Nederland kent op dit thema een lange traditie en bezit een grote sector. Het Kennis voor Klimaat programma Climate Proof Cities werkt aan een afwegingsinstrument voor de keuze van maatregelen bij extreme neerslag.

Zoek altijd naar combinatiemogelijkheden van maatregelen met autonome ontwikkelingen.

Een andere aanbeveling is om bij het prioriteren van maatregelen te letten op het paradigma dat ook in het buitengebied geldt: eerst vasthouden, dan bergen en vervolgens pas aanvoeren.

De in deze studie uitgevoerde analyse op de Rivierenbuurt is representatief voor historische op houten palen gefundeerde vooroorlogse stedelijke gebieden in Laag Nederland. Hierbij geldt als kanttekening dat de Rivierenbuurt met zand is opgehoogd, terwijl veel andere stedelijke gebieden in Laag-Nederland een kleiiger bodemprofiel hebben. Dit heeft gevolgen voor de extrapoleerbaarheid van de kwantitatieve modeluitkomsten voor de Rivierenbuurt, maar niet voor de extrapoleerbaarheid van het model zelf en de gevolgde methodiek.

7 Samenvattende conclusies

In de navolgende paragrafen zijn de onderzoeksresultaten samengevat naar de doelstellingen van het project.

7.1 Het geconstrueerde stedelijke waterbalansmodel

Model bepaalt de waterbalans van een wijk met voldoende nauwkeurigheid

Op basis van de validatieresultaten en case resultaten wordt geconcludeerd dat de gevolgde werkwijze een bruikbaar waterbalansmodel heeft opgeleverd, gezien de beschikbaarheid van meetgegevens en conceptuele schematisering van de afvoerprocessen. En zeker ook als het de doelstelling is snel, in tijd en ruimte geaggregeerde waterhoeveelheden te bepalen, zoals in deze studie.

Model vult hiaat tussen regionale modeluitkomsten en lokale informatiebehoefte

Met het model vormt in zekere zin het 'proof of concept' om met een zgn. bakjesmodel geaggregeerde informatie te verkrijgen over de werking van een watersysteem op wijkniveau en hoe dit systeem reageert op meteorologische veranderingen, klimaatverandering en de inzet van waterbeheermaatregelen. Het:

- Rekent snel (enkele minuten), dit is essentieel voor het verkrijgen van gevoel voor hoe het systeem reageert op veranderingen;
- Is flexibel af te stemmen op plaatselijke watersysteemkenmerken;
- Kwantificeert waterbalanscomponenten en fluxen, w.o. grondwaterstandsverandering, waterbehoefte in bodem, uitwisseling grondwater – oppervlaktewater;
- Biedt inzicht in verloop van fluxen gedurende kalenderjaar;
- Berekent geaggregeerde fluxen op jaarbasis;
- Is geschikt voor het doorrekenen van klimaatscenario's en het effect van maatregelen
- Visualiseert uitkomsten;
- Vult de informatiehiat tussen uitkomsten van (boven)regionale modellen (zoals NHI) en de informatiebehoefte op stad/wijkniveau.

Model brengt strategieën Deltaprogramma dicht bij praktijk

Een bakjesmodel mist de ruimtelijke component. Het gaat uit van en bepaalt voor de gehele wijk geldende waarden. Dit laat voor sommige doelstellingen te wensen over. Maar voor de doelstelling van deze studie, waarbij op het schaalniveau van een gehele wijk wordt onderzocht welke effecten klimaatverandering en maatregelen hebben en gezocht wordt naar totaalhoeveelheden water per component, voldoet het model goed. Dit is eveneens het schaalniveau waarop stedelijke waterbeheerders verkennende studies (willen) uitvoeren. De vraag 'met hoeveel water meer of minder moeten we nu eigenlijk rekening houden?' wordt beantwoord. Het model is daarmee geschikt om in het kielzog van de maatregelenstrategieën die voortkomen uit het Deltaprogramma voor stadsdelen te verkennen welke effecten in een wijk kunnen worden verwacht, en vervolgens daarbij passende maatregeltypen te selecteren of ontwerpen.

Model is generiek toepasbaar, mits watersysteem zorgvuldig wordt geschematiseerd

De ontwikkeling van het stedelijke waterbalansmodel voor het stedelijk watersysteem inclusief de waterketen, en de toepassing ervan in Amsterdam en Arnhem, hebben geleid tot een voorzichtig optimisme aangaande de toepassingsmogelijkheden van het model om de

waterbehoefte te bepalen in andere stedelijke gebieden in Nederland. Onderstaand een toelichting op deze conclusie.

Om tot een zinvolle evaluatie te komen is het noodzakelijk om de set modelparameters in drie groepen onder te verdelen. Ten eerste de parameters die een bepaald proces beschrijven en niet gebiedsgebonden zijn, althans niet binnen Nederland. Dit zijn onder andere de afvoerfactoren van de verschillende landgebruiksfuncties, en de parameters die verdampings- en interceptieprocessen beschrijven. Ten tweede de parameters die wel karakteristiek zijn voor een bepaald gebied, en bovendien goed te bepalen zijn. Dit zijn de oppervlaktepercentages van de verschillende landgebruiksfuncties, die relatief eenvoudig uit de lokale GBKN-bestanden af te leiden zijn. Ten derde de gebiedsgebonden parameters die moeilijk of niet voorafgaand aan de modellering te bepalen zijn, zoals de hoeveelheid lekkage naar het riool of de uitwisseling grondwater – oppervlaktewater.

In dit project is de werkwijze geweest om de eerste parametersgroep zo goed mogelijk te kalibreren op het Prinseneiland, en de gevonden waarden toe te passen in de Rivierenbuurt en Arnhem-Oost. De tweede parametersgroep kon zoals gezegd worden afgeleid voor elk afzonderlijk gebied. De derde parametersgroep kon alleen kwalitatief worden geschat, en dan alleen nog relatief ten opzichte van het Prinseneiland. Van de Rivierenbuurt is bijvoorbeeld bekend dat de riolering veel ouder is dan op het Prinseneiland, waardoor wellicht de lekkage van grondwater naar het riool hoger is. Maar hoeveel hoger is niet bekend; er is dan ook bijna geen ontkomen aan om deze derde groep parameters alsnog in een lokale, 'kleine' kalibratie in het desbetreffende toepassingsgebied aan te passen. Dit is dan ook gedaan voor de Rivierenbuurt en Arnhem-Oost.

Gegevensbeschikbaarheid is bepalend voor nauwkeurigheid uitkomsten

De toepassing van het waterbalansmodel wordt vooral beperkt door de beschikbaarheid van gegevens, meer dan door onvolkomenheden in het model zelf. En dan niet zozeer de beschikbaarheid in absolute zin, maar de verhouding tussen beschikbaarheid en complexiteit van randvoorwaarden (watersysteem, ondergrond, rivierinvloeden, onttrekkingen e.d.). Deze verhouding ligt in een gebied als de Rivierenbuurt (veel informatie beschikbaar) gunstiger dan in Arnhem-Oost (minder informatie en complexe randvoorwaarden).

In nabije toekomst nauwkeuriger validatie en daarmee betere modellering mogelijk

Om tot een definitieve toetsing van dit waterbalansmodel te komen, zou een validatie moeten plaatsvinden in een stedelijk gebied waar meer bekend is over grondwater-, oppervlaktewater- en riolsysteem dan in de in dit project beschouwde validatiegebieden. Met het steeds meer beschikbaar komen van meetgegevens uit getelemetriseerde en soms gecombineerde monitoringssystemen zal het naar verwachting een kwestie van enkele jaren zijn voordat dit mogelijk is. De resultaten van dit modelonderzoek dragen bij aan de impuls voor deze ontwikkelingen. Tot die tijd is een waterbalansmodel zoals dat in dit project is opgezet bruikbaar voor in ruimte en tijd geaggregeerde scenario-analyses, waarbij orden van grootte van effecten en benodigde waterhoeveelheden worden gekwantificeerd.

Model wordt doorontwikkeld

De modelcode is geschreven in MATLAB. Dit maakt de huidige versie van het model niet gebruiksvriendelijk. Deltares zal onderzoeken of de opgedane ervaringen en ontwikkelde concepten op termijn kunnen worden overgebracht naar haar opensource modellen voor stedelijk waterbeheer.

7.2 Waterbalans van de casegebieden

Effecten zijn bepaald o.b.v. meteo van representatief gestelde droogtejaren

Ook in het huidige klimaat komen nattere en drogere jaren voor. Voor het simuleren van de effecten van droogte op de waterbalans is gebruik gemaakt van een gemiddeld, droog (kans 1/10 per jaar) en extreem droog jaar (kans 1/100 per jaar). Voor het simuleren van een gemiddeld jaar is het gevalideerde model gevoed met meteorologische gegevens van het jaar 1967. Voor het simuleren van een droog jaar gegevens uit 1989 en voor een extreem droog jaar wordt de data van het jaar 1976 gebruikt. De voor deze analyse gebruikte meteorologische data is afkomstig uit het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI). Er is voor deze jaren gekozen omdat zij ook als karakteristieke jaren zijn gebruikt in de knelpuntenanalyse van het Deelprogramma Zoetwater. Voor het bepalen van de effecten van klimaatverandering is gebruik gemaakt van de cijfers uit de Deltascenario's Stoom (W+ klimaatcijfers KNMI'06 scenario's) en Rust (G klimaatcijfers) voor 2050.

Inherent aan het gebruik van droogtejaren i.p.v. langjarige tijdreeksen is dat de meteorologische patronen gedurende de jaren van elkaar verschillen. Zo onderscheidt het droge jaar 1989 zich pas vanaf september van het gemiddelde jaar. Dit uit zich zowel in het totale neerslagoverschot als in de spreiding van de neerslag over het jaar. Het extreem droge jaar 1976 heeft al vanaf april een veel lager neerslagoverschot dan de droge en gemiddelde situatie. Met deze verschillen moet rekening worden gehouden bij het interpreteren van de modeluitkomsten en het trekken van conclusies.

7.2.1 Rivierenbuurt, huidig klimaat

De in deze studie uitgevoerde analyse op de Rivierenbuurt is representatief voor historische op houten palen gefundeerde vooroorlogse stedelijke gebieden in Laag Nederland. Hierbij geldt als kanttekening dat de Rivierenbuurt met zand is opgehoogd, terwijl veel andere stedelijke gebieden in Laag-Nederland een kleiiger bodemprofiel hebben. Dit heeft gevolgen voor de extrapoleerbaarheid van de kwantitatieve modeluitkomsten voor de Rivierenbuurt, maar niet voor de extrapoleerbaarheid van het model zelf en de gevolgde methodiek.

Transpiratie door vegetatie is geen bepalende factor voor optreden hittestress

De transpiratie neemt toe in droge jaren vanwege de grotere potentiële verdamping. De beschikbaarheid van bodemvocht is ook bij grotere droogte voldoende en niet limiterend voor de hoeveelheid transpiratie.

Grondwaterpeil daalt, waterbehoefte en aanvulling vanuit oppervlaktewater neemt toe

De afname van de infiltratie en de toename van de transpiratie vertalen zich naar een afname van de percolatie, een dalend grondwaterpeil, en een negatieve bergingsverandering. De grondwaterstand in de Rivierenbuurt zakt iedere zomer onder het peil in het oppervlaktewater, ook in een gemiddelde situatie. Dit betekent dat het grondwater in de Rivierenbuurt iedere zomer wordt aangevuld door het oppervlaktewater, en 's winters vice versa. In de droge en extreem droge jaren zorgt de grondwaterstandsdeling ervoor dat er méér water uit het oppervlaktewater naar het grondwater stroomt.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie.

Situatie	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
Huidig, droog	-0,01	6.300	7.300	24.000
Huidig, extreem droog	-0,31	70.000	94.000	68.000

NB. Waterbehoefte = de hoeveelheid water die eenmalig aan het systeem moet worden toegevoegd om het laagst voorkomende grondwaterpeil en bodemvochtgehalte in het klimaatscenario aan te vullen tot het niveau van het laagst voorkomende peil en bodemvochtgehalte in de huidige situatie. Dit is gelijk aan het verschil in bodemvochtgehalte, plus het verschil in grondwaterstand tussen de beschouwde situaties. Eenheid: m³. Er is onderscheid gemaakt in een lage en een hoge waterbehoefte (marge), afhankelijk van de grootte van de bergingscoëfficiënt die wordt aangenomen voor de berekening van de aanvulling van de grondwaterstand.

De 'waterbehoefte' en 'toename aanvulling' die in de tabel zijn aangeduid, heffen elkaar niet op. Beide balanstermen duiden op een watervraag ten opzichte van de gemiddelde situatie in het huidige klimaat. In een extreem droog jaar bijvoorbeeld, verbruikt de Rivierenbuurt 68.000m³ meer oppervlaktewater dan gemiddeld. Dit verbruik belast de watervraag voor stedelijk oppervlaktewaterpeilbeheer. En daarbovenop is er een resterende watervraag van tussen de 70.000 en 94.000 m³ als gevolg van een afname van het bodemvochtgehalte en de grondwaterstands daling. Om aan deze vraag te voldoen zullen additionele maatregelen moeten worden ingezet: vasthouden van hemelwater en/of actief aanvoeren van oppervlaktewater.

Bodemopbouw wijk bepalend voor flux tussen grondwater en oppervlaktewater

Aanvankelijk was een geringere aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater verwacht. Zowel een gevoeligheidsanalyse op deze parameter als een nadere analyse van grondwaterstanden in de Rivierenbuurt hebben echter geen aanleiding kunnen geven om een lagere uitwisseling te kunnen aannemen. De oorzaak ligt hoogstwaarschijnlijk bij de zandige, relatief goed doorlatende ophooglaag in de Rivierenbuurt.

7.2.2 Rivierenbuurt, Deltascenario's

Situatie onder G scenario (Rust) vergelijkbaar met huidig klimaat

De verschillen tussen huidig klimaat en G scenario zijn voor de droge en extreem droge situatie sterk gelijkend. Deze gelijkenissen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het kleine aandeel onverhard oppervlak in het stedelijk gebied, waardoor de werkelijke verdamping niet veel toe kan nemen bij de wat grotere potentiële verdamping uit het G scenario.

Onder W+ (Stoom) grondwaterstands daling, meer waterbehoefte, meer aanvulling

Zoals verwacht vertonen de resultaten voor het W+ scenario grote verschillen met het huidige klimaat. Bepalend daarvoor is de sterke afname van neerslag en toename van verdamping in dit scenario. Ondanks de toename van de aanvulling vanuit het oppervlaktewater (in het extreem droge jaar met maar liefst 50%), daalt de grondwaterstand onder gemiddelde omstandigheden in het zomerhalfjaar structureel meer dan 10 centimeter. Dit is voor de Rivierenbuurt een significante toename in de blootstelling.

Van additionele maatregelen wordt veel gevergd onder droge jaren in W+

Het is gezien de effecten zeker wenselijk om hemelwater aan te wenden voor het beperken van de waterbehoefte. Wanneer de gestegen waterbehoefte volledig dient te worden ingevuld met additionele maatregelen zouden deze in een extreem droog jaar circa 50% meer water moeten opleveren dan in het huidige klimaat.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van eenzelfde droogtejaar in het huidige klimaat.

Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,02	3.800	5.000	600
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,12	28.000	38.000	14.000
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,16	36.000	49.000	36.000

Handhaving oppervlaktewaterpeil essentieel, additionele maatregelen benodigd

De modelresultaten tonen dat er onder droge omstandigheden een aanzienlijke waterflux bestaat tussen het oppervlaktewater en het grondwater. Daling van de grondwaterstand, als gevolg van het neerslagtekort, leidt tot instroom van dit oppervlaktewater.

De toename van instroom kan het verlies aan grondwater (t.o.v. een gemiddelde situatie) op jaarbasis niet compenseren, maar bedraagt in een extreem droog jaar nog altijd zo'n 42 tot 50% van het grondwaterverlies in zowel het huidig klimaat als onder W+. Daarmee is dit beslist geen te verwaarlozen waterbalanscomponent.

Geconcludeerd wordt dat peilbeheer en het beschikbaar hebben van voldoende water voor peilbeheer momenteel al belangrijk is voor de beheersing van de grondwaterstanden in de Rivierenbuurt en dat in de toekomst zeker ook zal blijven. Met handhaving van het huidig peil alleen kan het effect van een droger klimaat echter beslist niet volledig worden gecompenseerd. Ook in de droge jaren onder het huidig klimaat is dat al niet het geval.

7.2.3 Arnhem-Oost, huidig klimaat

Modellering Arnhem-Oost complexer dan modellering Prinseneiland en Rivierenbuurt

Arnhem-Oost verschilt op veel punten sterk van Prinseneiland en de Rivierenbuurt: de (gedeeltelijke) ligging op de hellende rand van de stuwwal van de Veluwe, de daarmee verband houdende tragere reactietijd van het grondwatersysteem en natuurlijke afwatering door beken, maar ook de aanwezigheid van wadi's en gescheiden rioolstelsels en de invloed van rivierwaterstanden in delen van het gebied. Er zijn ook grote verschillen tussen de situatie in het hoog gelegen deel van Arnhem-Oost (stuwwal) en het laag gelegen deel (poldersysteem, rivierengebied).

Relatief veel infiltratie van hemelwater

In vergelijking met de Amsterdamse wijken vindt er meer infiltratie van regenwater plaats. Een belangrijke oorzaak hiervan is een groter aandeel onverhard gebied en zandiger ondergrond. Een andere oorzaak is dat het verharde oppervlak deels is aangesloten op een gescheiden riolering met infiltratievoorzieningen.

Grondwaterstand in Arnhem-Laag vooral beïnvloed door waterpeil in rivier

De flinke grondwaterstands daling in het extreem droge jaar in Arnhem-Laag wordt vooral veroorzaakt door lagere waterpeilen in de Nederrijn. De hieruit voortvloeiende waterbehoefte wordt maar voor een klein deel gecompenseerd door een toename in de aanvulling vanuit het stedelijke oppervlaktewater.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie, Arnhem-Oost Laag.

Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (sloten) (m3)
Huidig Droog	-0,18	83.000	263.000	114
Huidig Extreem Droog	-0,72	420.000	1.139.000	101.000

In Arnhem-Oost Hoog daalt transpiratie en beïnvloedt dit ontwikkeling hittestress

Een belangrijk verschil tussen Arnhem-Oost Hoog en Laag is de ontwikkeling van het bodemvochtgehalte in het extreem droge jaar. Dit blijft in Laag ondanks de grondwaterstands daling op peil maar daalt in Hoog. Dit heeft in Hoog een verminderde transpiratie tot gevolg, wat een factor vormt in de verhoging van de kans op hittestress.

In Arnhem-Oost Hoog verhoogde kans droogval beken

In een extreem droog jaar neemt de drainage van ondiep grondwater naar het oppervlaktewater (het bekensysteem) af. Dit betekent dat de kans op droogval van het bekensysteem iets toeneemt.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, gemiddelde situatie, Arnhem-Oost Hoog.

Situatie	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (beken) (m3)
Huidig Droog	0,05 (stijging)	0	0	0
Huidig Extreem Droog	-0,18	375.000	553.000	0

7.2.4 Arnhem-Oost, Deltascenario's

Verwaarloosbare effecten onder G-scenario (Rust)

De verschillen tussen huidig klimaat en G-scenario zijn verwaarloosbaar. Een iets hogere neerslag houdt een iets hogere transpiratie ongeveer in evenwicht. Opvallend in het G-scenario is de afname van de aanvulling van grondwater vanuit het oppervlaktewater. Dit komt doordat het waterpeil in de Nederrijn in dit scenario hoger ligt dan in de huidige situatie.

Extreem droog in huidig klimaat is gelijk aan gemiddelde situatie onder W+ (Stoom)

De verschillen tussen gemiddeld W+ en gemiddeld huidig klimaat zijn van eenzelfde orde grootte als de verschillen tussen een gemiddelde en extreem droge situatie in het huidige klimaat. In beide gebieden dalen de grondwaterstanden. In Arnhem-Oost Laag neemt hierdoor de aanvulling van uit het oppervlaktewater toe, maar dit is niet genoeg om de grondwaterstands daling te voorkomen.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, Arnhem-Oost Laag.

Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (sloten) (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	0,08 (stijging)	0	0	0
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,46	293.000	749.000	19.000
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,35	212.000	559.000	90.000

Alleen in Arnhem-Oost Hoog leidt waterbehoefte tot meer kans hittestress

In Arnhem-Oost Hoog resulteert de grondwaterstands daling in een dalend bodemvochtgehalte en daarmee op een verhoging van de kans op hittestress. In Arnhem-Oost Laag is dit niet het geval.

Toename van kans op droogval beken in Arnhem-Oost Hoog

In Arnhem-Oost Hoog neemt de drainage van ondiep grondwater naar het bekensysteem structureel af. De afname is bescheiden en van eenzelfde orde grootte als de afname in een extreem droog jaar in het huidige klimaat, maar is gedurende het hele jaar aan de orde. In de door de beken gevoede vijvers neemt de verdamping toe, wat consequenties heeft voor de waterstand en waterkwaliteit.

Een relevante kanttekening bij deze conclusie is dat de beken worden gevoed door uittredend diep Veluwegrondwater (sprengen). Deze voeding blijft naar verwachting bij gemiddelde omstandigheden ook onder een W+ scenario op peil. Afhankelijk van het aandeel sprengwater in het afvoerdebiet is toename van droogval in meer of mindere mate aan de orde.

Daling grondwater, waterbehoefte en toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater, ten opzichte van het huidige klimaat, Arnhem-Oost **Hoog**.

Scenario	Daling grondwater (m)	Waterbehoefte laag (m3)	Waterbehoefte hoog (m3)	Toename aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater (beken) (m3)
G Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	0,03 (stijging)	0	0	0
W+ Gemiddeld t.o.v. huidig gemiddeld	-0,24	458.000	704.000	0
W+ Extreem droog t.o.v. huidig extreem droog	-0,22	458.000	681.000	0

7.3 Gevoeligheid in casegebieden

Of moet worden gereageerd op bedreigende effecten van klimaatverandering hangt voor een belangrijk deel af van de gevoeligheid van de in de wijken aanwezige objecten en functies. Aan de hand van een generieke checklist van objecten die gevoelig zijn voor blootstelling aan veranderingen in de waterhuishouding is per casegebied nagegaan welke knelpunten wel/niet kunnen worden verwacht.

7.3.1 Rivierenbuurt

Droogte wordt geen knelpunt voor groen

Er zijn geen aanwijzingen dat het groen in de Rivierenbuurt te lijden krijgt onder droogte. Wateroverlast (hoge grondwaterstanden, plasvorming) vormt wel een probleem.

Hittestress door het warmte eilandeffect wordt een punt van zorg

De mate van verharding van de wijk is hierbij de voornaamste oorzaak. In de wijk treden geen watertekorten op die de transpiratie van groen beduidend zullen beperken. Toename van hittestress zal daarom niet optreden door een daling in de transpiratie van het momenteel aanwezige groen.

Wegen, kabels en leidingen zijn niet gevoelig

De overige infrastructuur is niet gevoelig voor de variaties in de waterbalans. In de droge klimaatscenario's is er een niet-significante extra zetting te verwachten.

Rivierenbuurt is voornamelijk gevoelig voor risico van paalrot en wateroverlast

In het huidige klimaat is de Rivierenbuurt voornamelijk gevoelig voor het risico van paalrot met als oorzaak de (cumulatieve) droogstand in de zomer en nazomer. Daarnaast is er een wateroverlastprobleem in achtertuinen door te hoge grondwaterstanden in de wintermaanden en een tekort aan waterafvoercapaciteit tijdens piekbuien, welke voornamelijk in het zomerhalfjaar optreden.

De additionele negatieve gevolgen van een G klimaatscenario zijn beperkt, doordat de waterbalans (en dus de resulterende grondwaterstand) niet veel verschilt van die bij het huidige klimaat.

In de W+ scenariosimulaties blijkt dat voor een gemiddeld jaar een verlaging van de zomergrondwaterstand plaatsvindt met circa 12 cm. Hierdoor wordt ook de periode van

droogstand langer. In de droge en extreem droge W+ jaren is dit effect nog versterkt, wat een versnelling van toename in cumulatieve droogstand tot gevolg heeft, en toename van de risico's van funderingsschade.

Het overgrote deel van de funderingen is waarschijnlijk in een redelijk tot goede staat. Het handhaven van een grondwaterstand boven de fundering betekent hier in de meeste gevallen een aanzienlijke levensduurverlenging, van meerdere decennia.

Riolering is verouderd, maar niet uitzonderlijk gevoelig

Het rioolstelsel is oud en op veel plaatsen lek. In een gemiddeld jaar is de drainage praktisch gelijk aan helft van percolatie naar het grondwater, in een extreem droog jaar zelfs ongeveer gelijk. De situatie in de Rivierenbuurt is niet uitzonderlijk. Er is sprake van schades die behoren bij een normale levensduur cyclus voor het riool. Herstel van de riolen kan een aanmerkelijke bijdrage leveren aan het voorkomen van droogstand. Hier ligt een goede 'meekoppelkans' voor het vergroten van de klimaatbestendigheid van de wijk. Kanttekening daarbij is dat dit herstel verstandig wordt uitgevoerd. Zo kan herstel dat gepaard gaat met de aanleg van een (groter) zandcunet bijvoorbeeld tot een ongewenste, plaatselijke daling van de grondwaterstand leiden.

7.3.2 Arnhem-Oost

Droogte lijkt voor groen geen knelpunt te zijn

In het groenbeheer van Arnhem zijn nooit schades aan groen als gevolg van verdroging geconstateerd. Problemen met verdroging van groen bestaan niet of de effecten van droogte op groen worden niet als probleem ervaren. Deze conclusie is gebaseerd op ervaringen uit de relatief droge jaren die zich onder het huidige klimaat hebben voorgedaan.

Door de hoge groendichtheid in Arnhem-Oost Hoog kan de verhoogde kans op natuurbranden onder het W+ scenario een aandachtspunt worden. Een relatie met water is dan de beschikbaarheid van bluswater.

In Arnhem-Oost Hoog vormt afname transpiratie een factor in toename hittestress

In de stadsdelen met veel bebouwing en verharding kan hittestress ontstaan. Water is alleen indirect van invloed op hitte(bestrijding) in Arnhem: het is noodzakelijk voor bestaand groen en eventuele additionele vergroening. De uitkomsten van de waterbalansmodellering tonen dat in Arnhem Laag geen problemen omtrent de beschikbaarheid van (grond)water zullen rijzen, ook niet onder het W+ scenario. In Arnhem-Oost Hoog is wel sprake van een dalend bodemvochtgehalte en daarmee van een verhoging van de kans op hittestress.

Beken vallen vaker, langer en over groter traject droog

In Arnhem-Oost Hoog is onder het W+ scenario een grondwaterstands daling te verwachten van circa 0,5 meter, onder gemiddelde omstandigheden. De dalende grondwaterstand heeft een nadelig effect op de beken: de kans op droogval neemt toe. Dit heeft gevolgen voor de ecologie van de beken en kan leiden tot watertekorten in de vijvers, en daarmee tot nadelige effecten op de waterkwaliteit.

Bebouwing is niet gevoelig voor droogte effecten

Vanwege andere bodemkenmerken en constructietypen zijn in Arnhem-Oost geen 'gevoelige' houten paalfunderingen. Ook is er geen problematiek omtrent bodemdaling en zetting. De huidige gevoeligheid van funderingen is gering. Er zijn o.b.v. dit onderzoek geen risico's voor bebouwing door een droger klimaat aan te duiden.

Bebouwing is wel gevoelig voor wateroverlast

De bebouwing is gevoeliger voor wateroverlast – voornamelijk in kelders - die in Arnhem Hoog voortkomt uit oppervlakkige afstroming na hevige neerslag en in Arnhem Laag wordt veroorzaakt door opkwellend grondwater als gevolg van hoge rivierwaterstanden. Maatregelen n.a.v. mogelijke klimaatverandering dienen zich hierop te focussen.

Functioneren van wegen is alleen gevoelig voor extreme neerslag

De gevoeligheid van infrastructuur in relatie tot grondwaterstandsverlaging (en derhalve zettingsgerelateerde aspecten) is van ondergeschikt belang. Gevoeligheden gekoppeld aan (extreme) neerslag zijn wel bepalend. Dit geldt voor zowel Arnhem-Oost Laag als Arnhem-Oost Hoog. Dit uit zich in meer wateroverlast op wegen en bij onderdoorgangen. Dit is voor Arnhem-Oost Laag belangrijk in het kader van de ontsluitingsroutes. Tevens leidt toename van de neerslagintensiteit tot meer kans op erosie van taluds.

7.4 Maatregelen voor Rivierenbuurt**Bodemvocht is niet limiterend voor aanplant groen t.b.v. beperking hittestress**

Er is vanuit het oogpunt van de beschikbaarheid van bodemvocht geen beletsel voor de inzet van meer groen in de strijd tegen hittestress. Vanzelfsprekend moet hierbij dan wel rekening worden gehouden met andere factoren die de levensvatbaarheid bepalen, zoals het voorkomen van te natte omstandigheden en bewortelingsruimte. Bovendien moet de positie van groen secuur worden gekozen t.o.v. bebouwing, zodat de waterbehoefte van bomen niet zorgt voor een daling van grondwaterstanden onder funderingen.

Geschikte maatregelen voor beperking grondwateronderlast

- 1 Vergroten van infiltratie van hemelwater door poreuze verharding, infiltratievoorzieningen, afkoppelen van regenwaterafvoer.
- 2 Opzet van het oppervlaktewaterpeil rondom de buurt.
- 3 Aanvoer van oppervlaktewater via een infiltratie-drainage systeem, met waar nodig aansluiting op een infiltratie-drainage systeem op pandniveau.

Vergroten infiltratie hemelwater gekwantificeerd

Dit is doorgerekend met het balansmodel. Hierbij is aangenomen dat een combinatie van maatregelen heeft gezorgd voor een verdubbeling van de infiltratie ter plaatse van verhard oppervlak.

Meer infiltratie van hemelwater vermindert de aanvulling vanuit oppervlaktewater

De extra percolatie leidt tot minder aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater. Deze aanvulling wordt gedreven door het peilverschil tussen grondwater (lager) en oppervlaktewater (hoger). Een groter verschil betekent meer aanvulling, en het peilverschil wordt door de maatregel beperkt.

Grondwaterstand tot 10 cm omhoog door infiltratie hemelwater, waterbehoefte daalt

De uitwerking van de maatregel kan inzichtelijk worden gemaakt t.o.v. verschillende referentiesituaties. Navolgende tabel geeft de uitwerking weer t.o.v. de situatie zonder maatregel in een vergelijkbaar klimaat en onder vergelijkbare meteorologische omstandigheden.

Stijging grondwaterstand, afname waterbehoefte en afname aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater met inzet van maatregel, ten opzichte van scenario zonder de maatregel.

Scenario	Stijging grondwater door maatregel, (m)	Afname waterbehoefte door maatregel, laag (m3)	Afname waterbehoefte door maatregel, hoog (m3)	Afname aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater door maatregel (m3)
Huidig Gemiddeld + M1	0,10	21.000	29.000	18.000
Huidig Extreem Droog + M1	0,08	17.000	23.000	25.000
W+ Gemiddeld + M1	0,10	21.000	29.000	19.000
W+ Extreem droog + M1	0,07	15.000	20.000	20.000

Door hemelwaterinfiltratie onder 'W+ gemiddeld' gedurende zomerhalfjaar benadering van huidige situatie

Onderstaande tabel toont het effect van de maatregel t.o.v. de situatie onder het huidige klimaat. Daarmee wordt inzichtelijk in hoeverre met de maatregel de huidige situatie kan worden gehandhaafd. Met maatregel daalt de grondwaterstand onder W+ in een gemiddeld jaar slechts met 0,02 m en is de resterende waterbehoefte en aanvulling vanuit het oppervlaktewater relatief gering.

Scenario	Verandering grondwaterstand t.o.v. huidig klimaat zonder maatregel	Waterbehoefte t.o.v. huidig klimaat zonder maatregel, laag	Waterbehoefte t.o.v. huidig klimaat zonder maatregel, hoog	Aanvulling grondwater vanuit oppervlaktewater t.o.v. huidig klimaat zonder maatregel
W+ Gemiddeld + M1	0,02m daling	7.000m3 meer waterbehoefte	9.000m3 meer waterbehoefte	5.000m3 minder aanvulling nodig
W+ Extreem droog + M1	0,09m daling	21.000m3 meer waterbehoefte	29.000m3 meer waterbehoefte	16.000m3 meer aanvulling nodig

Hemelwaterinfiltratie compenseert effecten van droogte in bescheiden, maar voor Rivierenbuurt in significante mate

Onderstaande tabel toont het effect van de maatregel onder, en ten opzichte van, verschillende scenario's. De tabel geeft weer hoe de grondwaterstand wordt t.o.v. de grondwaterstand zonder maatregel, in een gemiddeld jaar, in het huidige klimaat.

Samenvattend kan worden gesteld dat de maatregel in absolute zin een bescheiden effect heeft. Echter, circa 10 cm grondwaterstandsverhoging is zeker geen verwaarloosbaar resultaat voor de situatie in de Rivierenbuurt. De maatregel draagt beslist een 'steentje bij'.

Verandering van grondwaterstand bij huidig en W+ klimaat, en in verschillende droogtejaren, t.o.v. de grondwaterstand in het huidige klimaat, in een gemiddeld jaar (cursief aangeduid).

klimaat	droogtejaar	met/zonder maatregel	GW peil t.o.v. huidig gemiddeld [m]
huidig	gemiddeld	M1	0,10
<i>huidig</i>	<i>gemiddeld</i>		<i>0,00</i>
huidig	droog		-0,01
W+	gemiddeld	M1	-0,02
W+	gemiddeld		-0,12
huidig	extreem droog	M1	-0,23
huidig	extreem droog		-0,31
W+	extreem droog	M1	-0,40
W+	extreem droog		-0,47

Vergroting infiltratie hemelwater leidt onder natter klimaatscenario en in huidig klimaat in winterhalfjaar tot verhoogde kans op overlast

De maatregel heeft een keerzijde. In het huidige winterhalfjaar, en wanneer het klimaat zich volgens een natter scenario ontwikkelt, leidt een strategie die alleen infiltratievoorzieningen bevat tot een niet gewenste stijging van de grondwaterstand. Ook de toename van de dynamiek van de grondwaterstand is niet gewenst.

In de praktijk is daarom een combinatiepakket van maatregelen nodig: infiltratiebevordering én aftoppen van te hoge grondwaterstanden door draingageverbetering.

Tijdelijke (6 maanden) peilopzet oppervlaktewater heeft minder effect dan infiltratie hemelwater

Voor de Rivierenbuurt is het effect doorgerekend van een eenmalige en tijdelijke verhoging van het oppervlaktewaterpeil rondom de Rivierenbuurt met 0,2 m gedurende het groeiseizoen (van begin april tot begin oktober).

De tijdelijke opzet van het oppervlaktewaterpeil levert een zeer beperkt compenserend effect (enkele centimeters grondwaterstandsverhoging). Een algemene, voor de hand liggende conclusie met betrekking tot deze maatregel is dat de hoeveelheid omringend oppervlaktewater bepalend is voor het effect van deze maatregel: hoe kleiner de verhouding tussen gebiedsoppervlak en natte omtrek van het omringende oppervlaktewater, hoe groter het potentiële effect. Daarnaast kan de weerstand van oevers, beschoeiingen, kademuren en dergelijke van grote invloed zijn; dit varieert sterk van plaats tot plaats. In de Rivierenbuurt is deze weerstand niet groot, gezien de nu al aanzienlijke uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater. De voornaamste oorzaak van het beperkte effect schuilt in het tijdelijke karakter van de maatregel. De periode is te kort om voor een substantiële aanvulling te zorgen. Dit in tegenstelling tot het permanente karakter van infiltratievoorzieningen.

Effect van infiltratie hemelwater en peilopzet is onvoldoende, aanvoer oppervlaktewater bijschakelen

In het merendeel van de Rivierenbuurt is de waterdekking bij de gemiddeld hoogste grondwaterstand nu reeds minder dan de gewenste 0,4 m boven de fundering. In de zomer is de waterbehoefte dermate groot dat de gemodelleerde maatregelen de verdieping van de grondwaterstand in de droge huidige en W+ zomers wel ten dele compenseren, maar

daarmee de droogstand van de funderingen niet opheffen. Verder zorgt de grotere infiltratie in de winter voor een ongewenste hoge grondwaterstand.

Wanneer wordt gestreefd naar het afdoende dempen van de blootstelling aan te lage grondwaterstanden is dus meer nodig. Voor het voorkomen van droogstand moet de grondwaterstand worden aangevuld worden met water uit het oppervlaktewatersysteem, dat de wijk in wordt getransporteerd middels 'infiltratiedrains'.

Meekoppelen met vervanging riolering drukt kosten van maatregelen in openbare ruimte in hoge mate

Bij het combineren van de aanleg van infiltratiedrains met de aanleg van nieuwe riolering zullen de totale kosten enkele miljoenen euro's bedragen. Aparte aanleg van infiltratiedrains kost naar verwachting het dubbele. Bij een levensduur van 60 jaar bedragen de aanleg en onderhoudskosten maximaal 8,4 miljoen Euro. Ter vergelijking, binnen 25 jaar bedragen de voorziene kosten voor funderingsherstel ook zonder klimaatverandering al circa 37 miljoen Euro. De totale kosten van de aanleg van infiltratiedrains in de publieke ruimte, inclusief onderhoud, zijn daarmee behoorlijk lager zijn dan de potentiële kosten van het herstel van funderingen.

Maatregelen in openbare ruimte voorkomen schades nooit volledig

Uit de modellering van de maatregel 'vergroten infiltratie hemelwater' blijkt dat deze maatregel een voor de Rivierenbuurt niet te verwaarlozen effect heeft, en daarom zinnig is om te nemen, maar onvoldoende compensatie biedt om herhaalde droogstand te voorkomen. Door de additionele aanleg van infiltratiedrains wordt het naar verwachting wel mogelijk om voldoende water in het gebied te krijgen en een gewenste ontwateringsdiepte te handhaven. In de publieke ruimte wordt middels de maatregelen een aanmerkelijke inspanning verricht om (de mogelijkheid voor particulieren te creëren om) schades te voorkomen. Schades kunnen echter nooit volledig worden uitgesloten. De maatregelen zullen niet overal in de wijk even effectief blijken en ook de gevoeligheid van de panden varieert. Er zal daarom altijd in enige mate funderingsherstel noodzakelijk zijn.

Overheid creëert condities die het nemen van maatregelen door particulieren mogelijk maakt

Een optimaal resultaat wordt bereikt als maatregelen tegelijk in de openbare ruimte en bij panden door huiseigenaren worden getroffen. Hieraan gaat bewustwording van eigenaren vooraf. Huiseigenaren moeten in staat worden gesteld hun verantwoordelijkheid te nemen.

Gezien de behoefte aan oppervlaktewater als bron van de aanvulling van de grondwaterstand kunnen de goede houten funderingen op de lange termijn alleen worden beschermd als de gemeente en het waterschap de waterinfrastructuur verbeteren. Voorwaarde is dan dat in de droogste zomers altijd voldoende water aangevoerd kan worden vanuit het oppervlaktewater. Dit vereist een gegarandeerd oppervlaktewaterpeil. Een beleidsmatig gevolg zou zijn dat stedelijk gebied hoog wordt vermeld in de Verdringingsreeks, bij 'het voorkomen van onomkeerbare schade'.

Op de eigenaren rust de plicht ervoor te zorgen dat de aanvulling ook de achterkant van de panden bereikt. Lokaal onderzoek en monitoring zal moeten uitwijzen welke maatregelen hiervoor moeten worden getroffen. Eigenaren kunnen door het aanleggen van infiltratiedrains naar de achtertuinen tevens wateroverlast voorkomen.

Aanbeveling realisatie maatregelen

Al het bovenstaande leidt tot de volgende aanbeveling: ga vanaf nu aan de slag met het bevorderen van hemelwaterinfiltratie en bouw in de komende jaren geleidelijk aan een netwerk van infiltratiedrains in de openbare ruimte door de aanleg hiervan mee te koppelen met rioolherstel. Communiceer publieke inspanning met eigenaren en informeer hen over eigen verantwoordelijkheid en wat zij zelf kunnen ondernemen.

Hemelwaterinfiltratie dempt watervraag stad, infiltratiedrains vergroten watervraag

Het bevorderen van hemelwaterinfiltratie, waarmee lokaal water in de ondergrond van de wijk wordt geborgen, vermindert in principe de watervraag die door een wijk wordt gesteld aan het lokale oppervlaktewater en, in het verlengde hiervan, aan het regionaal peilbeheer. Echter, uitgaande van een situatie waarin een schadegevoelige wijk is voorzien van infiltratiedrains zal juist gedurende droge perioden de watervraag van die wijk juist groter zijn dan nu het geval is.

Intermezzo: invloed van maatregelen op regionaal oppervlaktewaterpeilbeheer

De cijfers in de tabellen geven aan hoeveel extra water door de wijk wordt gevraagd ('waterbehoefte'). Deze vraag kan worden geïnterpreteerd als de hoeveelheid water die additionele maatregelen voor de wijk moeten opbrengen. Ter vergelijking: een Olympisch zwembad bevat 2.500 m³ water.

Wanneer meer water in de wijk wordt vastgehouden (bijv. door middel van hemelwaterinfiltratie) dat anders op het oppervlaktewater zou worden geloosd, en/of oppervlaktewater via infiltratiedrains de wijk in wordt getransporteerd, heeft dit consequenties voor de waterbalans van het beheersgebied waarin de wijk ligt: in de regel zal hierdoor de netto beschikbaarheid van water voor regionaal oppervlaktewaterpeilbeheer afnemen. De regionale impact hiervan kan momenteel niet exact worden gekwantificeerd vanwege het ontbreken van regionale cijfers over de watervraag van het stedelijk gebied (zie voor toelichting hierop 'Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool' (Deltares, maart 2013)).

Om toch gevoel te krijgen voor de impact die het inwilligen van de waterbehoefte van het stedelijk gebied kan hebben op de regionale waterbeschikbaarheid, kan aan de hand van de resultaten voor de Rivierenbuurt de volgende 'sigarendoos' redenering worden gevolgd:

- Als referentie wordt de situatie genomen in een gemiddeld jaar, onder het huidige klimaat. Op jaarbasis is in die situatie de bergingsverandering in het grondwater en de uitwisseling grondwater – oppervlaktewater ongeveer in balans (zie Figuur 5.1 'Huidig Gemiddeld').
- Gedurende het zomerhalfjaar is er in die situatie wel een daling van de grondwaterstand. Deze komt op het toppunt van de waterbehoefte circa 0,5 meter lager te liggen dan het oppervlaktewaterpeil (-0,4 mNAP). Dit peilverschil zorgt voor aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater (zie Figuur 3.10). De grondwaterstanddaling is te wijten aan de toename van de verdamping in combinatie met de daling van de neerslaghoeveelheid (het neerslagtekort).
- In de Knelpuntenanalyse DPZW (Deltares, 2012b) is de verdamping in het stedelijk gebied representatief gesteld voor het waterverbruik door de stad. 82% van de verdamping vindt plaats in het zomerhalfjaar (bron: www.knmi.nl). Voor het volledige oppervlak stedelijk gebied in Nederland is het verbruik dan 1.230 miljoen m³ water. Voor het totale oppervlak stedelijk gebied in de zoetwaterregio waarvan de

Rivierenbuurt deel uitmaakt (Noord-Holland in de 'DPZW blokkendoos' (Deltares, 2013)) is dat 87,5 miljoen m³ water. Ter vergelijking: voor landbouwgebied is het verbruik 10 maal zo groot (Deltares, 2012b).

- Uit de waterbalansberekeningen blijkt dat de verdamping in de Rivierenbuurt in het huidige klimaat in een gemiddeld zomerhalfjaar circa 239 mm bedraagt (82% van 292 mm, zie Figuur 5.1), oftewel 455.000 m³ (totaal oppervlak Rivierenbuurt is circa 1,9 km²). Analoog aan de systematiek in de Knelpuntenanalyse kan deze verdamping als referentieverbruik worden gehanteerd.
- Aan de hand van de modeluitkomsten kan vervolgens worden bepaald hoeveel procent het verbruik toeneemt t.o.v. de referentiesituatie wanneer middels maatregelen die referentiesituatie dient te worden hersteld. De toename van het verbruik is dan gelijk aan de gemodelleerde toename van de waterbehoefte plus de toename van de aanvulling van het grondwater door oppervlaktewater.
- In een extreem droog jaar, in het huidige klimaat, is die toename van het waterverbruik door de Rivierenbuurt na inzet van maatregelen 36%. In een extreem droog jaar onder een W+ klimaat is de toename van het waterverbruik 54%.
- Wanneer, voor de beeldvorming, deze toename wordt geëxtrapoleerd naar het gehele stedelijke gebied in de regio Noord-Holland, betekent dit een toename van het verbruik met respectievelijk 31,5 en 47 miljoen m³. Wanneer het doel is de grondwaterstand op het peil van het oppervlaktewater te brengen, is nog meer water nodig.
- Dit zijn zeer substantiële hoeveelheden op de totale waterbalans van de regio, die niet zonder meer kunnen worden gefaciliteerd. Een situatie waarin de watervraag van het gehele stedelijk gebied in een regio met bovengenoemde percentages stijgt is echter beslist geen realistisch eindbeeld. De stijgingspercentages zijn desalniettemin van dien grootte dat het zinnig is per geval te beoordelen of het voor maatregelen benodigde water ook daadwerkelijk in de omgeving beschikbaar is.

Bovenstaande rekenmethodiek is een aanzienlijke simplificatie van de werkelijkheid. De aanname dat de verdamping representatief is voor het totale waterverbruik van de stad, is te eenvoudig gesteld. Dit blijkt immers ook uit de complexiteit van het in dit project geconstrueerde waterbalansmodel. De vermelde percentages zijn daarom indicatief.

7.5 Maatregelen voor Arnhem-Oost

Geen directe noodzaak voor maatregelen tegen droogte

Hitte kan wel aanleiding zijn voor maatregelen. Wanneer daarbij wordt gekozen voor meer groen neemt de waterbehoefte van het gebied in principe toe. In Arnhem-Oost Hoog zou dit een aandachtspunt kunnen worden aangezien hier een grondwaterstandsval wordt voorzien en beken langduriger droog vallen. Er zijn momenteel echter geen aanwijzingen in Arnhem dat het groen niet zou kunnen functioneren onder de omstandigheden van een droger klimaat, dat er een 'faalpunt' wordt bereikt.

Gevoeligheid voor blootstelling aan wateroverlast vraagt wel maatregelen

Maatregelen en acties tegen wateroverlast in kelders:

- Monitoring van overlast meldingen t.b.v. vaststelling locaties en omvang overlast
- Drainage/pompsysteem in kelders
- Profilering maaiveld
- Infiltratievoorzieningen op kritieke plaatsen.

Maatregelen tegen wateroverlast op wegen/onderdoorgangen:

- Grotere capaciteit riolering
- Meer periodiek inspectie en onderhoud van de werking van het riool
- Infiltratievoorzieningen op kritieke plaatsen.

Erosie door extreme neerslag:

- Frequenter onderhoud van erosie locaties
- Drainage aanleggen
- Zwaardere ontwerpnormen voor extreme neerslag.

Algemene maatregelen wateroverlast:

- Monitoring van grondwaterstand en relatie met neerslag
- Monitoring van relatie van schademeldingen aan riool, water op straat en neerslag
- Verzwaren normering ontwerpgebui t.b.v. riolering, infiltratie en erosieonderhoud.

Vergroten hemelwaterinfiltratie gekwantificeerd

Analoog aan de Rivierenbuurt is voor Arnhem-Oost met het balansmodel doorgerekend wat het effect is van een verdubbeling van de infiltratie ter plaatse van verhard oppervlak.

Hemelwaterinfiltratie compenseert droogte effecten in gering mate

Alleen in Arnhem-Oost Hoog is sprake van een lichte stijging van de grondwaterstand. Er is daardoor ook een toename van de beekafvoer, die de afname van de beekafvoer als gevolg van het W+ scenario enigszins compenseert.

De belangrijkste oorzaak voor het beperkte effect is vermoedelijk dat een significant deel van de riolering in de huidige situatie al is afgekoppeld en aangesloten op infiltratievoorzieningen. Ook het reeds relatief grote aandeel onverhard oppervlak beperkt de toegevoegde waarde van de maatregel.

Hemelwaterinfiltratie vergroot transpiratie door vegetatie in Arnhem-Oost Hoog marginaal

In Arnhem-Oost Laag verandert de transpiratie niet als gevolg van de maatregel, omdat de verdamping toch al niet werd gelimiteerd door het bodemvochtgehalte. In Arnhem-Oost Hoog neemt de transpiratie wel iets toe, zij het marginaal. Blijkbaar komt de extra infiltratie vooral ten goede aan percolatie naar het grondwater en niet aan het bodemvocht.

Hemelwaterinfiltratie niet effectief voor bestrijden droogte, maar wel voor beperking wateroverlast

Het geringe compenserend effect tegen droogte, en het ontbreken van gevoeligheid voor droogte in Arnhem-Oost, leidt tot de conclusie dat vanuit dit oogpunt geen basis voor de maatregel bestaat. Vanuit het oogpunt van bestrijding van wateroverlast, wat wel aan de orde is in Arnhem-Oost, is vergroting van de infiltratie wel degelijk zinnig. De geringe compensatie van droogte lift dan mee.

8 Referenties

Bergström, S. (1976), Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI Report RHO 7, Norrköping, pp. 134.

Breuer, L., Eckhardt, K., Frede, H.G. (2003), Plant parameter values for models in temperate climates, Ecological Modelling, vol. 169, no. 2-3, pp. 237–293.

Climate Proof Cities consortium, oktober 2011. Fysieke bouwstenen voor de knelpuntenanalyse nieuwbouw en herstructurering. TNO-060-UT-20111-01826.

Deltaprogramma, Deelprogramma Nieuwbouw & Herstructurering (2012). Maatregelenmatrix (deel 1 en deel 2), overzicht met 155 klimaatmaatregelen: fysieke maatregelen die genomen kunnen worden ter voorkoming van overlast door water, droogte en hitte en maatregelen die schade bij een eventuele overstroming kunnen beperken.

Deltares, maart 2012. Schades door watertekorten en –overschotten in stedelijk gebied. Quick scan van beschikbaarheid schadegetallen en mogelijkheden om schades te bepalen. Deltares projectnummer 1205463.

Deltares, 2012. Zoetwatervoorziening in Nederland. Aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw.

Deltares, 2012b. Zoetwatervoorziening in Nederland aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw 2e (gecorrigeerde) druk.

Deltares, maart 2013. Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool.

Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P., Pfister, L. (2007), A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling, Water Resour Res, 43(3).

Gerrits, A.M.J. en Savenije H.H.G. Interception. In: Peter Wilderer (ed.) Treatise on Water Science, vol. 2, pp. 89–101 Oxford: Academic Press, 2011.

Gerrits, A.M.J. and Savenije, H.H.G. (invited) Forest floor interception. In Levia, D.F., Carlyle-Moses, D.E. and Tanaka, T. (Eds.), Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions. Ecological Studies Series, No. 216, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2011.

De Graaf R. (2009), Innovations in urban water management to reduce the vulnerability of cities, PhD Thesis, TU Delft.

Shuttleworth, W. J. Maidment, D. R. (Ed.) Handbook of Hydrology Chapter 4 *McGraw-Hill*, 1993, 4.1-4.53.

Ven, F.H.M. van de (1989), Van neerslag tot rioolloop in vlak gebied. Thesis. Van Zee tot Land 57, Rijkswaterstaat, directie Flevoland. ISBN 90-369-1060-9.

Ven, F.H.M. van de (2005). Dictaat CT5510 Watermanagement in Urban Areas. Technische Universiteit Delft.

Wareco (2004). Actief grondwaterbeheer voorkomt droogstand houten paalfunderingen. Land + Water. Nr. 5, Mei, 2004.

9 Bijlage A: Terminologie

In dit rapport worden begrippen gebruikt die afkomstig zijn uit de systematiek voor risico analyse van klimaatverandering. Deze termen zijn overgenomen uit de Fysieke bouwstenen voor de knelpuntenanalyse nieuwbouw en herstructurering (CPC, oktober 2011). In deze bijlage wordt uitgelegd wat deze begrippen inhouden en hoe zij aan elkaar zijn gerelateerd.

De mondiale klimaatverandering heeft een aantal *effecten*. Deze effecten worden bijvoorbeeld uitgedrukt als de verandering van gemiddelde hoeveelheid neerslag, aantal dagen met veel neerslag, verandering in gemiddelde temperaturen in de zomer en de winter, of een toename van het aantal zomerse of tropische dagen. Effecten van klimaatverandering hebben de potentie om schade te veroorzaken, maar dat hoeft niet.

Dreigingen zijn klimaat en weer gerelateerde gebeurtenissen die direct of indirect de mogelijkheid hebben om schade toe te brengen aan mensen, goederen en landschappen. Een voorbeeld hiervan is de daling van grondwaterstanden. Als er sprake is van een dreiging wil dit nog niet zeggen dat er ook schade (een *gevolg*) op zal treden. Dat hangt af van de drie hierna volgende begrippen.

Blootstelling is de mate waarin elementen in contact kunnen komen met een bepaalde dreiging. De wortels van een boom kunnen bijvoorbeeld worden blootgesteld aan grondwaterstands daling.

NB. Het waterbalansonderdeel van dit project is gericht op het onderzoeken van de *blootstelling* aan met het stedelijk watersysteem samenhangende dreigingen. In de in dit rapport gebruikte term 'grondwateronderlast' zijn blootstelling en dreiging in één woord verenigd.

Gevoeligheid is de mate waarin een systeem, organisme of object kan worden verstoord door de blootstelling. Gevoeligheid hangt bijvoorbeeld af van de manier waarop iets is gebouwd of het soort organisme of het soort object. Een pand dat op houten palen is gebouwd is bijvoorbeeld gevoeliger voor een structurele grondwaterstands daling dan een pand dat op betonnen palen is gebouwd. Als synoniem voor gevoeligheid wordt ook wel de term *kwetsbaarheid* gebruikt.

Adaptatievermogen is de mate waarin een systeem, organisme of object in staat is zich aan te passen aan de gevolgen van klimaatsverandering.

Een *gevolg* is de resultante van de combinatie van dreiging, blootstelling, gevoeligheid en adaptatievermogen. Door het verminderen van één of meerdere van de vier componenten kunnen de gevolgen een systeem, organisme of object worden verminderd.

De factor *kans* speelt op meerdere fronten een rol. Er is een kans dat het klimaat zich op een bepaalde manier ontwikkelt, maar er is vervolgens ook een kans dat die ontwikkeling leidt tot een specifieke dreiging en een mate van blootstelling. Ook in de mate van gevoeligheid speelt kans een rol. Een voorbeeld is de kans dat een dijk breekt bij blootstelling aan een bepaalde waterstand.

Risico is de resultante van kans en gevolg. Als we het hebben over het risico van water op straat, dan gaat het tegelijkertijd om de kans dat intensieve regenbuien optreden die niet door

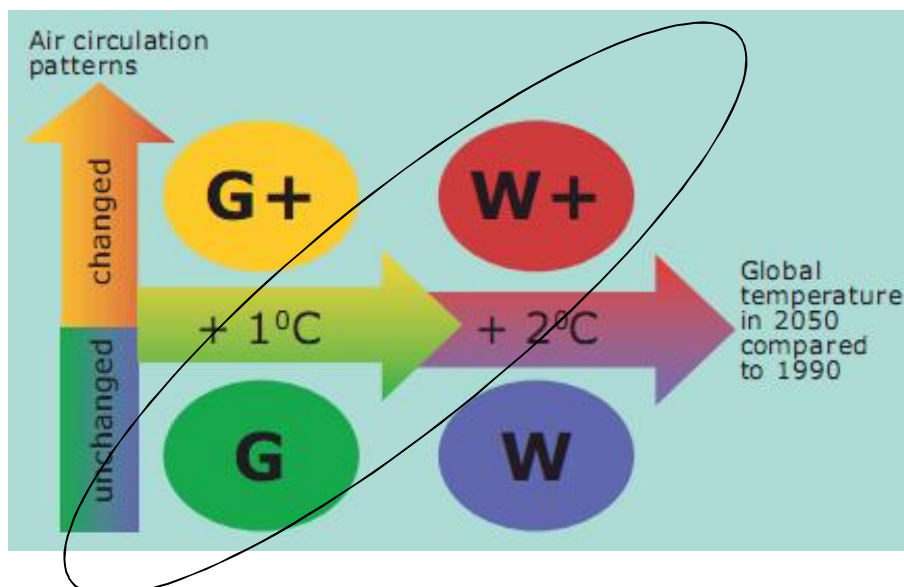
het afvoersysteem kunnen worden verwerkt, en om de schade die hierdoor aan mensen en hun omgeving of hun investeringen wordt aangericht.

10 Bijlage B: Deltascenario's

Binnen het Nationale Deltaprogramma zijn door Deltares, Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en het KNMI vier scenario's ontwikkeld, waarmee de toekomstige opgaven voor het (nationale) waterbeheer worden verkend. De scenario's zijn gebaseerd op twee sleutelonzekerheden, ontwikkelingen die niet of nauwelijks te beïnvloeden zijn, maar wel belangrijk zijn voor de mogelijke opgaven en kansen voor het watersysteem en de waterketen:

- Klimaatverandering – snel of langzaam?; met name van belang om inzicht te krijgen in de hoeveelheid water 'die op ons af komt' (veel/weinig).
- Sociaal-economische ontwikkeling – groei of krimp?; met name van belang om inzicht te krijgen in de vraag naar zoetwater en ruimtelijke ontwikkelingen in het beheersgebied (in relatie tot o.a. verharding, toenemende behoefte aan waterveiligheid en beperking van wateroverlast).

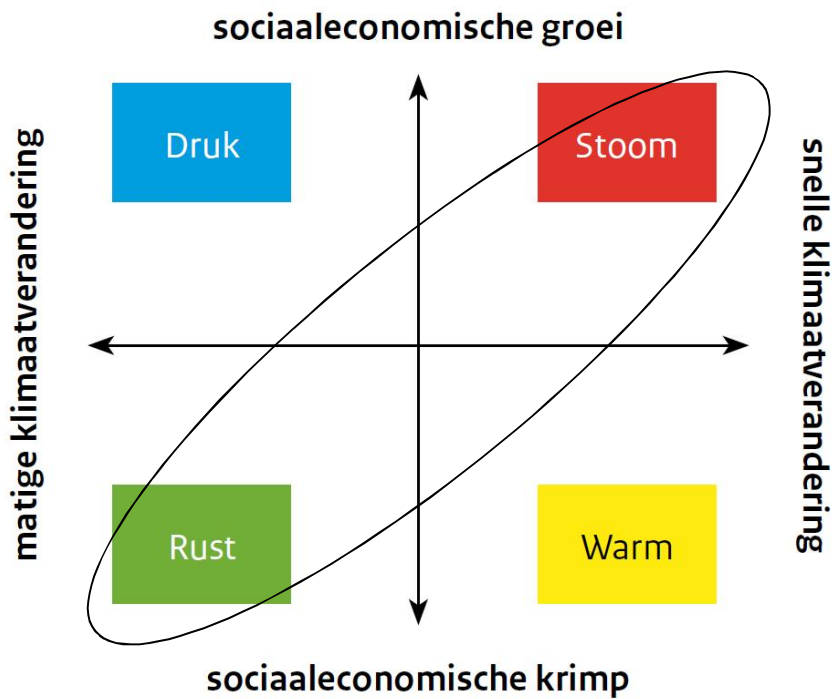
Door deze ontwikkelingen te combineren, zijn vier 'compacte' scenario's gecreëerd. De scenario's helpen om de bandbreedte in de opgaven en kansen te verkennen, om na te denken over ontwikkelingen die in de toekomst mogelijk op ons af zouden kunnen komen, maar geen van de scenario's is waarschijnlijker dan een van de andere. In onderstaande figuren zijn de vier scenario's compact weergegeven en onderscheiden naar enkele kernvariabelen. De ellipsen bevatten de scenario's die in dit project zijn gebruikt: Stoom en Rust. Deze scenario's zijn ook in het deelprogramma Zoetwater gebruikt voor scenarioberekening omdat zij het meest onderscheidend zijn t.a.v. effecten op de watervoorziening. In Tabel 10.1 zijn de kentallen voor de scenario's opgenomen. De getallen m.b.t. meteo en rivierafvoer zijn toegepast in de modelberekeningen van dit project.



Figuur 10.1 In Deltascenario's verwerkte KNMI 2006 klimaatscenario's



Figuur 10.2 In Deltascenario's verwerkte WLO 2006 scenario's voor sociaal economische ontwikkelingen



Figuur 10.3 Deltascenario's

Tabel 10.1 Overzicht van kentallen Deltascenario's

Klimaatverandering	Zichtjaar	referentie	STOOM		WARM		RUST		VOL	
		2000	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
gem. afvoer Rijn in februari	(m ³ /s) ¹	2.900	3.400	4.000	3.400	4.000	3.100	3.200	3.100	3.200
gem. afvoer Rijn in september	(m ³ /s)	1.800	1.300	900	1.300	900	2.000	2.100	2.000	2.100
gem. afvoer Maas in februari	(m ³ /s)	480	530	590	530	590	500	520	500	520
gem. afvoer Maas in september	(m ³ /s)	89	48	30	48	30	92	94	92	94
zeespiegelstijging	(cm)	-	35	85	35	85	15	35	15	35
extreem hoge afvoer Rijn 1 / 100 jaar	(m ³ /s)	12.000	14.000	17.000	14.000	17.000	13.000	14.000	13.000	14.000
extreem hoge afvoer Maas 1 / 100 jaar	(m ³ /s)	2.900	3.200	3.600	3.200	3.600	3.000	3.200	3.000	3.200
extreem lage afvoer Rijn 1 / 10 jaar	(m ³ /s)	630	520	420	520	420	650	670	650	670
extreem lage afvoer Maas 1 / 10 jaar	(m ³ /s)	18	10	6	10	6	18	18	18	18
gemiddelde neerslaghoeveelheid winter			+ 14%	+ 28%	+ 14%	+ 28%	+ 4%	+ 7%	+ 4%	+ 7%
gemiddelde neerslaghoeveelheid zomer			- 19%	- 38%	- 19%	- 38%	+ 3%	+ 6%	+ 3%	+ 6%

Sociaaleconomische ontwikkeling	Zichtjaar	referentie	STOOM		WARM		RUST		VOL	
		2000	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
aantal inwoners NL	(miljoen)	16	20	24	15	12	15	12	20	24
economische groei	(% per jaar)		2,6	2,0 - 2,6	0,7	0 - 0,5	0,7	0 - 0,5	2,6	2,0 - 2,6
verstedelijking	(% oppervlak)	16	20	25	17	10	17	10	20	25
landbouwareaal	(% oppervlak)	67	59	70	62	67	62	67	59	70
natuur	(% oppervlak)	17	21	5	21	23	21	23	21	5

veel klimaatverandering (W+)	
matige klimaatverandering (G)	
hoge ruimtedruk (Global Economy, en na 2050 Groei van bevolking en economie)	
lage ruimtedruk (Regional Communities, en na 2050 Krimp van bevolking en economie)	

Omschrijving deltasenario Stoom

In het scenario Stoom gaan een hoge economische en bevolkingsgroei samen met een grote klimaatverandering. De temperatuur stijgt en de gemiddelde neerslag zal toenemen in de winter, maar afnemen in de zomer. Als gevolg hiervan zal de waterafvoer van de rivieren sterk fluctueren. De zeespiegel stijgt met ca. 85 cm in eeuw tijd. Rond 2050 is dat ongeveer 35 cm.

De bevolkingsomvang in Nederland neemt met ongeveer 25 % toe mede door economische immigranten. In 2100 zouden er in dit scenario 25 miljoen mensen in Nederland wonen. De economie groeit jaarlijks. De verstedelijking neemt sterk toe evenals de verspreiding met als resultaat bebouwing in / aan de randen van bestaande natuurgebieden en de open agrarische landschappen (o.a. groene hart). Er is geen ruimte voor nieuwe natuurgebieden. In de landbouw tekent zich een tweedeling af tussen grootschalige, industriële bedrijven en multifunctionele bedrijven gericht op lokale consumenten. Doordat de brandstofprijzen laag zijn en de economie sterk groeit vindt pas op het einde van de eeuw en slechts gedeeltelijk een mondiale transitie naar hernieuwbare energiebronnen plaats. Wat betreft governance is er in dit scenario sprake van meer privaat initiatief en verantwoordelijkheid in het waterbeheer. Waterbeheerders werken samen in een publiek-privaat metropolitaan netwerk en sturen als kaderstellende partner op randvoorwaarden (bijvoorbeeld via certificering, monitoring en auditing).



Deltascenario Rust

In Rust gaan een lage economische en bevolkingsgroei samen met een geringe klimaatverandering. De temperatuur stijgt ook bij geringe klimaatverandering meer dan het mondiale gemiddelde en leidt tot een zeespiegelstijging in de Noordzee van zo'n 15 cm in 2050. De kans op zomerse hittegolven en langere droogteperiodes neemt toe. De winters worden gemiddeld wat milder. De gemiddelde neerslaghoeveelheid neemt licht toe.

Doordat ons land de concurrentie met het buitenland niet goed aankan, is de economische groei lager dan in de EU en de rest van de wereld. Er vindt een transitie naar duurzame regionale economieën plaats, mede aangedreven door de hoge brandstofprijzen. Ook vindt meer hergebruik van grondstoffen plaats. In Nederland neemt de bevolking met ca. 10 % af, deze krimp begint vanaf ongeveer 2025. In 2100 zouden er in dit scenario nog ongeveer 12 miljoen mensen in Nederland wonen. Door deze ontwikkelingen ontstaat er meer ruimte voor landbouw en natuur. Dat geldt ook voor de Randstad, waar de verstedelijking naar verhouding het sterkst blijft. Het areaal aan landbouwgrond blijft ongeveer gelijk, maar de landbouw is meer gericht op lokale en regionale productie, dicht bij de consumenten en met kortere ketens. Op de overgang tussen natuur en landbouw in de buurt van de natuurgebieden ontstaan meer extensieve en verbrede vormen van landbouw, waarbij veel sprake is van agrarisch natuurbeheer. Waterbeheerders voeren de eigen kerntaken sober en doelmatig uit. Overheden werken samen bij het beheer.



11 Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland en Rivierenbuurt

11.1 Beschikbare informatie en metingen

Voor het kwantificeren van de waterbalans van het Prinseneiland is gebruik gemaakt van data van Waternet en het KNMI. De data bestaat uit meetreeksen over twee perioden. De eerste serie meetreeksen beslaat de jaren 2010 en 2011. De tweede serie meetreeksen is tijdens het project gemeten en beslaat grofweg de periode september tot (eind meetperiode) 2012.



Figuur 11.1 Meetlocaties Waterbalans op het Prinseneiland. Vierkant = meteostation, cirkels = peilbuizen.

11.1.1 Regenmetingen

Gedurende het project is de neerslag op het Prinseneiland door Waternet gemeten met een tipping bucket. De opstelling van de tipping bucket (zie Figuur 11.1) voldoet niet aan de gestelde eisen voor regenmetingen, maar is de best mogelijke in het gebied. Door het niet voldoen aan de vereisten dienen de metingen met de nodige zorgvuldigheid gebruikt te worden. Aan het begin van de meetperiode waren er technische problemen, waardoor pas vanaf begin oktober regenmetingen beschikbaar zijn. Naast de metingen van Waternet zijn de neerslagmetingen van de KNMI neerslagstations in Amsterdam en Schiphol beschikbaar. Voor de periode 2010 tot 2011 zijn dit de gebruikte neerslagmetingen. Verder is data van deze stations gebruikt om de neerslagmetingen van de tipping bucket op het Prinseneiland te verifiëren. Het neerslagstation in Amsterdam bevindt zich op de Oostelijke Eilanden ten

oosten van het Centraal Station. Om 08:00 's ochtends wordt de neerslagsom gevallen over de voorgaande vierentwintig uur gemeten door het aflezen van een meetbeker. Het neerslagstation op Schiphol meet neerslagsommen elektronisch. Hierdoor is het mogelijk om neerslagsommen over kortere tijdspannen te meten. De bruikbaarheid van de KNMI data voor de waterbalans van het Prinseneiland is vastgesteld aan de hand van een 'Residual mass analysis', 'double mass analysis' en de 'bivariate linear correlation coëfficiënt'. Uit deze analyses blijkt dat de dagwaarden van beide stations een grote mate van correlatie vertonen. Er valt echter 's zomers meer neerslag op Schiphol en 's winters meer in Amsterdam. Over het hele jaar genomen valt ongeveer 22% meer neerslag in Amsterdam dan op Schiphol (meetperiode 2010 – 2011, 10 % meer over periode 1971 – 2011). Door deze structurele verschillen in neerslagpatronen is besloten de data uit Amsterdam te gebruiken voor de modellering. Door de gebruikte meetmethode op het KNMI station in Amsterdam is het nodig de 'modeldag' te laten beginnen om 08:00. De resulterende dagwaarden in de modeloutput zullen hierdoor veranderen, de patronen in de output blijven echter hetzelfde.

11.1.2 Riolering

De debieten van het rioleringsgemaal op het Prinseneiland worden door Waternet met een debietmeter in het gemaal zelf gemeten. Deze data is beschikbaar gesteld over de periode van begin 2010 tot eind 2012. De frequentie van de data bedraagt vijf minuten. Voor het model is deze data geaggregeerd tot dagwaarden. Verder zijn het Basisrioleringsplan en rapporten van rioleringsinspecties uit 2005 voorhanden.

Uit deze informatie blijkt dat lekkages in het hoofdsysteem op dit moment onwaarschijnlijk zijn vanwege de geringe leeftijd van de buizen. De verdraaiingen in de aansluiting tussen enkele buizen en inspectieputten in het zuiden van het eiland, gevonden bij de inspecties in 2005, zullen hier waarschijnlijk weinig verandering in brengen doordat dit bovenstrooms in het stelsel plaats vindt en vanwege de kleine afstand tussen de gemiddelde grondwaterstand en de onderkant van de buizen.

11.1.3 Landgebruik

Voor de inventarisatie van het landgebruik heeft Waternet een deel van de Grootschalige Basiskaart van Amsterdam beschikbaar gemaakt. Waternet heeft verder een luchtfoto van het eiland uit 2011 ter beschikking gesteld. Het LGN is als basis voor landgebruiks-informatie binnen het stedelijk gebied niet gedetailleerd genoeg.

11.1.4 Grondwaterstanden

Er zijn twee reeksen grondwaterstandmetingen over een langere periode beschikbaar. De eerste bestaat uit metingen van het freatische grondwater over de periode 1994 - 2011 in de Galgenstraat op het midden van het Prinseneiland. De tweede meetreeks bestaat uit metingen van het grondwaterpeil in de eerste zandlaag. Deze metingen zijn beschikbaar over de zelfde periode en zijn gedaan ter hoogte van Planciusstraat 50, Amsterdam. Dit meetpunt bevindt zich ruwweg driehonderd meter ten noordwesten van het Prinseneiland.

Beide metingreeksen bestaan uit handmetingen, waardoor er slechts enkele (minder dan tien) metingen per jaar beschikbaar zijn. Hierdoor is de trend in de grondwaterstand over een lange periode wel zichtbaar, maar zijn de variaties in grondwaterstand over een kortere periode niet te zien.

Om deze variaties over een korte periode inzichtelijk te maken zijn aan het begin van het project zes peilbuizen met divers geplaatst. Vier van deze meetpunten zijn grofweg op de hoeken van het eiland geïnstalleerd. De overige twee meetpunten zijn in de achtertuinen van de woonblokken geplaatst om het effect van begroeiing op de grondwaterstand te meten. Zie figuur X voor de exacte locaties van de meetpunten.

Een eerste analyse van de data laat zien dat de grondwaterstijgingen na een regenbui onder elementverharding grofweg de helft is van de grondwaterstijging onder onverhard gebied als gevolg van dezelfde bui. Verder is in de metingen te zien dat de grondwaterstand in de achtertuinen van de woonblokken significant hoger is dan de grondwaterstanden aan de voorkant van de huizen.

11.1.5 Potentiële verdamping

Voor het simuleren van de optredende verdamping en transpiratie is informatie nodig over de potentiële verdamping en transpiratie. Hiervoor is gebruik gemaakt van de beschikbare meetgegevens van het KNMI meetstation op Schiphol. Met deze meetgegevens is de potentiële verdamping over de dag berekend volgens de formule van Penman.

11.1.6 Drinkwateraanvoer

Waternet heeft een datareeks met de aanvoer van drinkwater naar heel de stad Amsterdam over de periode 2010-2012 beschikbaar gesteld. Vanwege het ontbreken van een meetpunt voor alleen het Prinseneiland is in overleg besloten de drinkwateraanvoer naar een groter gebied te gebruiken. Hierbij is gekozen voor heel de stad Amsterdam, omdat data over een langere periode beschikbaar is en omdat het een goed beeld geeft van het watergebruik van een 'gemiddelde' Amsterdamer. Het ontbreken van de detail in het watergebruik op het Prinseneiland wordt voor lief genomen.

11.2 Te modelleren processen

11.2.1 Landgebruiksfuncties

Het meest in het oog springende verschil tussen een landelijk en een stedelijk gebied is de grote heterogeniteit van het stedelijk gebied. Deze heterogeniteit wordt veroorzaakt door het grote aantal functies dat op een klein oppervlak vervuld wordt en de ingrepen in de omgeving die hiertoe gedaan zijn. In het SWB-model wordt deze heterogeniteit gemodelleerd door het maaiveld in vier landgebruiksfuncties te verdelen:

- Verhard oppervlak ('paved'): wegen, stoepen, parkeerplaatsen, etc.
- Onverhard oppervlak ('unpaved'): tuinen, perken, plantsoenen, etc.
- Bebouwde omgeving ('built'): huizen, kantoren, bedrijfsgebouwen, schuurtjes, etc.
- Stedelijk oppervlaktewater ('water'): grachten, vijvers, etc.

Voor het verdelen van de neerslag over de landgebruiksfuncties wordt gebruik gemaakt van het relatieve aandeel van de functies in het onderzoeksgebied. Hiervoor worden de oppervlaktefracties van de functies ten opzichte van het hele onderzoeksgebied berekend. De fracties worden in het model gebruikt om het belang van de processen op een landgebruiksfunctie voor de hele waterbalans te kwantificeren.

De landgebruiksfuncties op het maaiveld kunnen verder worden gedifferentieerd naar het proces waar het grootste deel van de resulterende neerslag aan deel neemt (afwateringstype). Men kan onderscheid maken tussen stroming naar een gemengd riool, naar een gescheiden riool, naar het regionaal oppervlaktewater ('Extern') en infiltratie naar de onverzadigde zone ('Niet gerioleerd'). Een voorbeeld van stroming naar het regionaal oppervlaktewater is een dak dat direct afwatert op een oppervlaktewater.

Tabel 11.1 Gebiedskennmerken van het Prinseneiland.

Landgebruiksfunctie		Afwatering (m3)				Totaal	Bomen
		Gemengd riool	Gescheiden riool	Niet gerioleerd	Extern		
Functie	Verhard	6792	0	3467	181	10439	1490
	Onverhard	0	0	6948	0	6948	1252
	Bebouwd	13438	0	127	3047	16613	150
	Water	0	0	0	0	0	0
	Totaal	20230	0	10542	3228	34000	2892

Tabel 11.2 Gebiedskennmerken van het Prinseneiland omgezet naar gebiedsfracties.

Landgebruiksfuncties [-]		Afwatering (x 100%)				Totaal	Bomen
		Gemengd riool	Gescheiden riool	Niet gerioleerd	Extern		
Functie	Paved	0,20	0,00	0,10	0,01	0,31	0,044
	Unpaved	0,00	0,00	0,20	0,00	0,20	0,037
	Built	0,40	0,00	0,00	0,09	0,49	0,004
	Water	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
	Total	0,60	0,00	0,31	0,09	1,00	0,085

Het hoeft echter niet zo te zijn dat alle neerslag op een landgebruiksfunctie met een bepaald afwateringstype aan dat proces deel neemt. Het kan zo zijn dat een deel van de neerslag via een ander proces deel neemt. Om hiervoor te corrigeren worden voor alle landgebruiksfuncties en afwateringstypen afvoerparameters gedefinieerd. Deze afvoerparameters bepalen hoeveel van de neerslag op een landgebruiksfunctie met een hoofdafwateringstype aan een proces deel neemt (de som is één). In het voorbeeld in Tabel 11.3 gaat 85% van de netto neerslag op verhard oppervlak aangesloten op het gemengde riool ook naar het gemengde riool en infiltreert 15% van die netto neerslag in de grond.

Tabel 11.3 Voorbeeld van afvoerparameters

Afvoerparameters		Gemengd riool			
		Gemengd riool	Gescheiden riool	Infiltratie	Extern
Landgebruik type	Verhard	0,85	0	0,15	0
	Onverhard	0	0	1	0
	Bebouwd	1	0	0	0
	Water	-	-	-	-

Al met al moeten $3 \times 4 \times 4 = 48$ afvoerparameters gedefinieerd worden. Het merendeel van deze afvoerparameters hebben echter de waarde 0 of 1, waardoor het definiëren van de parameters vereenvoudigd wordt. Daarnaast kunnen parameters onderling gecorreleerd zijn (bv. percentages onverhard en verhard). Door de 48 afvoerparameters die kunnen worden veranderd is het mogelijk om elke denkbare situatie in het model in te voeren zonder uitgebreide aanpassingen in het model te hoeven doen.

Om het aantal inputparameters te verminderen wordt per landgebruiksfunctie een oppervlaktegewogen gemiddelde van de afvoerparameters bepaald. Hierdoor blijven er 12 gewogen afvoerparameters als invoer voor het model over. Met deze parameters wordt de resulterende neerslag die op de landgebruiksfuncties is gevallen over de vier hierboven genoemde afvoerprocessen verdeeld.

11.2.2 Neerslag

Van de neerslag die op de bij het maaiveld horende landgebruiksfuncties valt, verdampt een deel voordat het aan andere processen deel kan nemen. Deze verdamping bestaat uit verdamping van water van natte oppervlakken, uit plassen op het terrein en interceptie door kleinere planten. De potentiële verdampingsenergie die hiervoor wordt gebruikt wordt van het potentieel afgetrokken om de energiebalans kloppend te houden.

Daarna wordt de netto neerslag na het verdampingsproces over de vier gedefinieerde afwateringstypen verdeeld.

11.2.3 Interceptieverdamping vanaf bomen

Het eerste proces dat neerslag ondergaat is interceptie. Interceptie is het proces waarbij een deel van de neerslag wordt afgevangen door vegetatie of een ander oppervlak boven het maaiveld, vanwaar het afgevangen water kan verdampen (Gerrits, 2010). Door interceptie verdampt een deel van de neerslag dus voordat het aan een ander proces in de hydrologische cyclus deel kan nemen. Vooral bomen hebben een grote interceptie capaciteit, waardoor zij een grote invloed kunnen hebben op de waterbalans.

In stedelijk gebied is echter geen ononderbroken bladerdek aanwezig. Hierdoor komt interceptie door bomen slechts lokaal voor. Daarbij komt dat er zich vaak meer bladerdek boven één type landgebruik bevindt dan boven de anderen. Hierdoor komt er op dat type landgebruik minder neerslag (doorval) dan op de andere typen terecht, waardoor de omvang van de andere processen enorm beïnvloed kan worden. Om deze redenen wordt interceptie door bomen als een apart proces gemodelleerd. Hierbij wordt de doorval naar oppervlakte ratio verdeeld over de oppervlakken die zich onder de bomen bevinden en opgeteld bij de neerslag die op plekken zonder bomen viel. De resulterende netto neerslag bereikt vervolgens het maaiveld.

11.2.4 Het stedelijk oppervlaktewater

Het stedelijk oppervlaktewater is gemodelleerd als een lineair reservoir. De neerslag die op het als stedelijk oppervlaktewater aangeduide maaiveld valt wordt naar dit reservoir geleid. Uit dit reservoir vindt open water verdamping, uitwisseling met het stedelijk grondwater en het regionaal grondwater plaats.

11.2.5 De onverzadigde zone

De delen van de resulterende neerslag op het maaiveld die infiltreren in de bodem worden naar het reservoir van de onverzadigde zone geleid. Verder komt eventueel sproeiwater voor de tuinen en lekkage vanuit de drinkwaterleidingen en de riolering in dit reservoir terecht. Vanuit het onverzadigde zone reservoir vindt stroming naar en van het stedelijk grondwater (de verzadigde zone) plaats door middel van percolatie en capillaire werking.

Ook komt het door planten getranspireerde water uit dit reservoir. Bij het berekenen van de transpiratie wordt de reeds gebruikte energie voor verdamping verdisconteerd in de potentiële gewas verdamping. Hierdoor kan er niet meer verdamping optreden dan er aan energie beschikbaar is.

11.2.6 Het stedelijk grondwater (de verzadigde zone)

Aanvulling van het stedelijk grondwater vindt plaats door percolatie vanuit de onverzadigde zone. Door capillaire werking stroomt er water terug naar de onverzadigde zone. Verder vindt er uitwisseling van water plaats met het regionaal oppervlaktewater, het stedelijk oppervlaktewater en eventueel met een lekke riolering. Bij uitwisseling tussen deze drie reservoirs wordt het verschil in stijghoogte als drijvende kracht gebruikt. Door het verschil in stijghoogte te nemen is de uitwisseling niet alleen afhankelijk van het stedelijk grondwaterpeil, maar ook van de peilen in de andere reservoirs. Naast deze uitwisseling vindt er ook kwel of wegzijging naar het regionaal grondwater plaats.

11.2.7 Het rioleringsstelsel

Het rioleringsstelsel in een onderzoeksgebied kan bestaan uit een gemengd of een gescheiden systeem of een combinatie van beiden.

In een gemengd systeem wordt de droogweerafvoer (het afvalwater) samen met de neerslag afgevoerd naar de waterzuivering. Deze afvoer is gemodelleerd als een pomp met een maximale capaciteit. Mocht de instroom naar het gemengde rioolreservoir groter zijn dan de pompcapaciteit plus de berging van het stelsel, dan vindt er een overstort naar het regionaal oppervlaktewater plaats.

In een gescheiden systeem wordt de droogweerafvoer (het afvalwater) apart naar de waterzuivering gepompt. Het regenwater dat naar het gescheiden systeem stroomt wordt via het regenwaterriool naar een oppervlaktewater of een infiltratievoorziening geleid.

Als beide systemen voorkomen worden ze ook allebei gemodelleerd. De afvoeren naar de waterzuivering worden vervolgens bij elkaar opgeteld. De droogweerafvoer wordt over beide systemen verdeeld. De verdeelsleutel hiervoor maakt deel uit van de invoer van het model.

11.3 Invoer modelparameters en datareeksen

11.3.1 Interceptieverdamping vanaf bomen

In het SWB-model wordt getracht de plaatselijkheid van interceptie door bomen te simuleren door dit als apart proces te modelleren én door onderscheid te maken in het landgebruik onder de bomen. Hierdoor kan de invloed van de interceptie door bomen boven een type oppervlak concreet gemaakt worden.

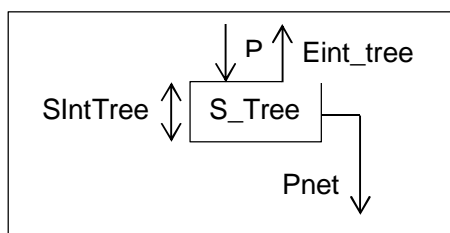
In het SWB-model wordt de interceptie door bomen gemodelleerd met een drempelproces, waarbij pas doorval ('*Pnet*') optreedt als de bergingscapaciteit van de vegetatie ('*SIntTree*') wordt overschreden. Vervolgens kan van het geborgen water op de vegetatie ('*S_Tree*') interceptieverdamping ('*Eint_tree*') plaats vinden. Er kan echter nooit meer water verdampen dan de potentiële verdamping ('*Ep*'). Waarden voor de bergingscapaciteit van vegetatie

kunnen gevonden worden in Breuer et al (2003). In het model zit een simpel functie om de interceptiecapaciteit over het jaar te laten variëren, zodat het effect van het aan- en afwezig zijn van het bladerdek voelbaar wordt.

Voor het door bomen overhangen deel (fractie) van een type landgebruik ('*frac_veg_paved*', '*frac_veg_unpaved*', '*frac_veg_water*', '*frac_veg_built*' totaal '*frac_veg*') van het stedelijk gebied geldt:

$$P_{net} = \max(P - S_{IntTree}, 0) \quad (7.1)$$

$$E_{int_tree} = \min(S_Tree, E_p) \quad (7.2)$$



De neerslag die vervolgens op het verharde, onverharde, open water, en bebouwd gebied valt is de som van de doorval plus de neerslag die direct op het oppervlakte is gevallen. De verdeling over de vier landgebruik typen gebeurt aan de hand van de oppervlaktefracties ('*frac_paved*', '*frac_unpaved*', '*frac_water*', '*frac_built*' voor de neerslag naast de bomen en '*frac_veg_paved*', '*frac_veg_unpaved*', '*frac_veg_water*', '*frac_veg_built*' voor de doorval).

$$P_{net_x} = P \times (frac_x - frac_veg_x) + P_{net} \times frac_veg_x / frac_veg \quad (7.3)$$

11.3.2 Verdamping vanaf het maaiveld

Vanaf het maaiveld vindt verdamping van natte oppervlakken, uit plassen en interceptie door kleinere planten plaats. Deze verdamping is afhankelijk van de netto neerslag die op het oppervlak valt en de eigenschappen van het oppervlak. Voor de landgebruik typen verhard, onverhard en bebouwd zijn parameters gedefinieerd die de verdampingscapaciteit van het oppervlak weergeven ('*S_x_int*').

Van de Ven (2005) identificeerde verwarming van oppervlakken door de zon voorafgaand aan de interceptie als een proces dat de interceptie door het oppervlak vergroot. Om hiervoor te kunnen corrigeren zijn factoren ('*ec_x*') toegevoegd, waarmee de potentiële verdamping en daarmee de optredende interceptie kan worden vergroot.

$$E_{int_x} = \min(S_x, E_p \times ec_x \times frac_x, S_x_int) \quad (7.4)$$

De voor deze verdamping gebruikte energie wordt afgetrokken van het potentieel om de energiebalans kloppend te houden.

11.3.3 Afvoerprocessen op het maaiveld

Het water dat valt op het verharde, onverharde en bebouwde oppervlak kan afstromen naar de gemeente of gescheiden riolering, direct afstromen naar het oppervlakte water of infiltreren in de ondergrond. Deze verdeling wordt bepaald door de parameters '*c_x*', '*s_x*', '*r_x*' en '*i_x*',

welke geschat dienen te worden voor de combinaties van landgebruik typen en afvoertypen. De waterbalans studie van Van de Ven (2005) kan gebruikt worden voor een eerste orde schatting. Vanwege het behoudt van massa geldt:

$$c_x + s_x + r_x + i_x \equiv 1 \quad (7.5)$$

Afvoer naar de gemengde riolering

Van de neerslag dat op het verharde, onverharde en bebouwde oppervlak ('S_x', 'berging' op het maaiveld) valt zal een deel ('c_{paved}', 'c_{unpaved}', 'c_{built}') afgevoerd worden naar de waterzuivering via het gemengde riool ('Q_{cs}').

$$Q_{cs} = \sum c_x \times S_x \quad (7.6)$$

Afvoer naar de gescheiden riolering

Bij de stroming naar het gescheiden systeem gebeurt hetzelfde. Een deel van de 'berging' ('S_x') op het maaiveld, aangegeven met de parameters 's_{paved}', 's_{unpaved}' en 's_{built}', stroomt naar het regenwaterriool van het gescheiden stelsel ('Q_{ss}').

$$Q_{ss} = \sum s_x \times S_x \quad (7.7)$$

Oppervlakkige stroming naar open water

Een ander deel van het water dat valt op het verharde, onverharde en bebouwde oppervlak ('S_x') zal direct afstromen naar het open water ('R'). De hoeveelheid wordt berekend met de parameters 'r_{paved}', 'r_{unpaved}' en 'r_{built}'.

$$R = \sum r_x \times S_x \quad (7.8)$$

Infiltratie naar de onverzadigde zone

Een ander deel van het water dat valt op het verharde, onverharde en bebouwde oppervlak ('S_x') zal infiltreren naar de onverzadigde zone ('I'). De hoeveelheid wordt berekend met de parameters 'i_{paved}', 'i_{unpaved}' en 'i_{built}'.

$$I = \sum i_x \times S_x \quad (7.9)$$

11.3.4 Het stedelijk oppervlaktewater

Vanuit het stedelijk oppervlaktewater kan water stromen naar het stedelijk grondwater ('I_{water_ugw}'). Deze stroming is gemodelleerd aan de hand van een lineair reservoir. De stroming is afhankelijk van het verschil in stijghoogte tussen het oppervlakte- en grondwater en een parameter 'i_{water_ugw}'. De parameter 'i_{water_ugw}' werkt als de evenredigheidsconstante van een exponentiële functie. Indien er geen uitwisseling plaats vindt dient deze parameter op nul gezet te worden.

$$I_{water_ugw} = (H_{ugw} - H_{water}) \times i_{water_ugw} \times frac_{water} \quad (7.10)$$

Verder is het mogelijk dat het stedelijk grondwater direct in verbinding staat met het regionaal grondwater. Om deze stroming te modelleren is gebruik gemaakt van een lineair reservoir. De stroming is afhankelijk van het verschil in stijghoogte tussen het stedelijk oppervlakte- en regionaal grondwater en een parameter 'i_{water_rgw}'. Indien er geen uitwisseling plaats kan vinden dient deze parameter op nul te worden gezet.

$$I_{water_rgw} = (H_{rgw} - H_{water}) \times i_{water_rgw} \times frac_{water} \quad (7.11)$$

Vanuit het oppervlaktewater kan verdamping optreden. De hoeveelheid verdamping is afhankelijk van de potentiële verdamping (' E_p ') en de berging in het oppervlaktewater (' S_{water} '). Het is mogelijk om de verdamping te corrigeren voor aanwezige schaduw en andere verdamping reducerende of te vergroten met de factor ' ec_{water} '.

$$Ea_{water} = \min(S_{water}, E_p \times ec_{water} \times frac_{water}) \quad (7.12)$$

11.3.5 De onverzadigde zone

De waterstromen naar de onverzadigde zone (' I_n ') bestaan uit infiltratie vanaf het maaiveld, sproeiwater en lekkage vanuit de drinkwaterleidingen en de riolering. Deze influx sijpelt vervolgens deels door naar de verzadigde zone. Dit gebeurt deels snel via stroming door macroporiën en deels langzaam door stroming door de poriënmatrix.

De stroming door de macroporiën wordt gemodelleerd door een deel van de instroom in de onverzadigde zone in dezelfde tijdstap door te sturen naar de verzadigde zone. Voor het bepalen van het aandeel wordt gebruik gemaakt van de formule hieronder uit het FLEX model (Fenicia et al. 2006).

In deze schematisering zit een S-vormige relatie tussen de verzadigingsgraad (' S_{uz}/UZ_{max} ') van de onverzadigde zone en de snelle component van de percolatie. Deze schematisering zorgt voor een grote, snelle afvoer van de infiltratie tijdens een hoge verzadigingsgraad van de onverzadigde zone en een kleinere, snelle percolatie tijdens een lage verzadigingsgraad. In de schematisering is de grootte van de afvoer, de parameter ' Cr ', afhankelijk van de verzadigingsgraad van de onverzadigde zone en de vormparameters alfa en beta.

$$Cr = \frac{1}{1 + e^{\frac{S_{uz} - UZ_{max}}{beta} + alfa}} \quad (7.13)$$

Het aandeel van de instroom dat niet meteen naar de verzadigde zone wordt gestuurd ($1 - Cr$) blijft in de onverzadigde zone. Dit water kan naar de verzadigde zone stromen door de langzame percolatie component. Deze component is gemodelleerd met een lineair verband tussen de uitstroom en de verzadigingsgraad van de onverzadigde zone. De maximale grootte van deze flux wordt gedefinieerd met de parameter ' P_{max} '.

$$perc = Cr \times I_n + \frac{S_{uz}}{UZ_{max}} \times P_{max} \quad (7.14)$$

De capillaire opstijging van water uit de verzadigde zone naar de onverzadigde zone (' CR_{ugw} ') is gemodelleerd met een evenredig verband tussen maximaal optredende capillaire werking en $1 -$ de verzadigingsgraad van de onverzadigde zone. De maximaal optredende capillaire werking wordt gedefinieerd met de parameter ' c_{ugw} '.

$$CR_{ugw} = c_{ugw} \times \left(1 - \frac{S_{uz}}{UZ_{max}} \right) \quad (7.15)$$

De transpiratie van water uit de onverzadigde zone door planten (' E_t ') wordt gemodelleerd als een drempelproces (Shuttleworth, 1993 en Fenicia et al., 2007). De hoeveelheid transpiratie is afhankelijk van de potentiële gewasverdamping (' E_{crop} ') een gewasfactor (' ec_{crop} ') en de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht (' S_{uz}/UZ_{max} '). De gewasfactor wordt gebruikt om de potentiële gewasverdamping, die berekend is voor een standaardgewas onder optimale omstandigheden, om te rekenen naar de potentiële verdamping van de planten in het gebied. De optredende transpiratie is lager dan deze potentiële verdamping doordat de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht minder is dan optimaal.

$$E_t = E_{crop} \times ec_{crop} \times \min \left(\frac{S_{uz}}{UZ_{max}} \times \frac{1}{L_p}, 1 \right) \times frac_{unpaved} \quad (7.16)$$

De potentiële transpiratie wordt bepaald door van de potentiële verdamping de inmiddels al verbruikte verdampingsenergie af te trekken. Van de potentiële verdampingsenergie is immers al energie gebruikt voor de interceptieverdamping en de verdamping:

$$T_p = E_p - E_{int_tot} - E_{a_tot} \quad (7.17)$$

11.3.6 Het stedelijk grondwater

Vanuit het stedelijk grondwater kan er water stromen naar het regionaal oppervlakte water (' $Drain_{ugw_rw}$ ') en eventueel naar een lekke riolering (' $Drain_{ugw_sewer}$ '). De drainage wordt gemodelleerd als een lineair reservoir met evenredigheidsconstanten ' k_{ugw_rw} ' en ' k_{ugw_sewer} '. De drijvende kracht van de stroming is het verschil tussen de stijghoogten in het grond- en oppervlakte water en de riolering. In het model betekent dit dat er met een effectieve vulling van het lineaire reservoir wordt gerekend.

$$Drain_{ugw_rw} = (H_{ugw} - H_{rw}) \times k_{ugw_rw} \quad (7.18)$$

$$Drain_{ugw_sewer} = (H_{ugw} - H_{sewer}) \times k_{ugw_sewer} \quad (7.19)$$

De kwel (of infiltratie) uit het regionale grondwater naar het stedelijk grondwater (' $seep_{inf}$ ') kan als modelinvoer (tijdreëks) worden gegeven. Ook kan de kwel aan de hand van een stijghoogteverschil en een weerstandwaarde (' res_{sf} ') tussen het regionaal en het stedelijk grondwater worden berekend.

$$seep_{inf} = \frac{H_{rgw} - H_{ugw}}{res_{sf}} \quad (7.20)$$

11.3.7 Het gescheiden riool

De netto neerslag van het op het gescheiden riool aangesloten maaiveld wordt naar het regenwaterriool geleid (' Q_{ss} '). Indien (een deel van) het gescheiden riool een overpomp constructie heeft (' $frac_{sep_imp}$ '), wordt een deel van het naar het regenwaterriool

aangevoerde water overgepompt naar het vuilwaterriool (' Q_{clean_dirty} '). De hoeveelheid overgepompt water hangt af van de initiële berging (' D_{SSO} ') in het regenwaterriool en de capaciteit van de overpomp voorziening (' k_{clean_dirty} '). Het water dat niet wordt overgepompt wordt op het regionaal oppervlaktewater geloosd (' Q_{SSO} ').

$$Q_{clean_dirty} = \min(S_{sep}, k_{clean_dirty}, Storage_{clean}) \quad (7.21)$$

$$Q_{SSO} = \max(\frac{frac_sep_imp}{Q_{ss}} \times Q_{ss} - D_{SSO}) + (1 - \frac{frac_sep_imp}{Q_{ss}}) \times Q_{ss} \quad (7.22)$$

In het vuilwaterriool komt het deel van de droogweerafvoer (' Q_{dry} ') terecht dat op het gescheiden riool is aangesloten. De verdeling van de droogweerafvoer over het gescheiden en het gemengde riool wordt gespecificeerd met de parameter ' $frac_{DWF_sep}$ '. Indien er water vanuit het regenwaterriool wordt overgepompt, wordt die hoeveelheid water bij de droogweerafvoer opgeteld. Het water in het vuilwaterriool wordt vervolgens weggepompt naar de waterzuivering (' $WWTP$ ').

$$WWTP = Q_{dry} \times \frac{frac_DWF_sep}{Q_{dry}} + Q_{clean_dirty} \quad (7.23)$$

11.3.8 Het gemengde riool

In het gemengde riool komt het overige deel ($1 - \frac{frac_{DWF_sep}}{Q_{dry}}$) van de droogweerafvoer terecht. Hier komt het naar het gemengde riool stromende regenwater (' Q_{cs} ') en het lekwater uit het stedelijk grondwater (' $Drain_{ugw_sewer}$ ') bij. Er kan echter ook water het riool uit lekken. Deze lekkage wordt gemodelleerd aan de hand van een lineair reservoir, waarbij het verschil in stijghoogte tussen de riolering en het stedelijk grondwater en de parameter ' k_{sewer} ' de stroming bepalen. De lekkage (' $Leakage$ ') wordt naar de onverzadigde zone geleid.

Indien er meer water het gemengde riool in stroomt dan kan worden overgepompt of geborgen (' $D_{overflow}$ '), dan treedt er een overstort in werking. Het teveel aan water wordt op het regionaal oppervlaktewater geloosd (' Q_{CSO} ').

$$S_{comb} = Q_{dry} \times (1 - \frac{frac_DWF_sep}{Q_{dry}}) + Q_{cs} + Drain_{ugw_sewer} \quad (7.24)$$

$$Q_{CSO} = \max(S_{comb} - D_{overflow}, 0) \quad (7.25)$$

$$Leakage = \max(S_{comb} - Q_{CSO}, 0) \times k_{sewer} \quad (7.26)$$

Het water overige water uit het gemengde systeem wordt vervolgens naar de zuivering gepompt. De pompcapaciteit wordt aangegeven met de parameter ' k_{wwtp} '. Dit debiet wordt opgeteld bij het debiet van het vuilwaterriool van het gescheiden stelsel.

$$WWTP_{both} = WWTP + \min(S_{comb} - Leakage, k_{wwtp}) \quad (7.27)$$

11.3.9 Data-invoer en visualisatie

De modelparameters en datareeksen worden ingevoerd in een Excel sheet. In deze Excel sheet zijn verschillende tabbladen aangebracht om de invoer te structureren. Verder biedt Excel de mogelijkheid om de waarden van ingevoerde parameters te checken op redelijkheid.

Het effect van het veranderen van sommige parameters wordt meteen gevisualiseerd in een figuur, zodat de invloed van de verandering op het model sneller inzichtelijk wordt.

Ook is het mogelijk om in een apart tabblad ruwe data weg te zetten en deze na enkele bewerkingen in een input-tabblad te zetten.

11.4 Kalibratie Prinseneiland

11.4.1 Aanpak en uitgangspunten

Doelparameters

Als doelparameters voor de modelkalibratie worden grondwaterstanden en rioleringsdebieten gebruikt. Het rioleringsdebiet is representatief voor het hele onderzoeksgebied, de grondwaterstanden daarentegen alleen voor een klein gebied in de buurt van het meetpunt. Hierdoor is het niet mogelijk om op beide processen tegelijkertijd te kalibreren, maar is de kalibratie opgesplitst in een sessie rioleringsdebieten en een sessie grondwaterstanden. Er is separaat gekalibreerd op elk grondwatermeetpunt; de kalibratie op de grondwaterstand in de Galgenstraat is met name gebruikt om de optimale waarde voor de afvoer coëfficiënt voor verhard oppervlak te schatten. De grondwaterstanden in de meetpunten op de binnenterreinen zijn gebruikt om de optimale waarde voor de parameter afvoercoëfficiënt voor onverhard oppervlak te schatten. De resultaten van alle kalibratiesessies worden met elkaar vergeleken en verwerkt tot een 'optimale' parameter set. De prestatie van deze parameterset wordt vervolgens beoordeeld door validatie van het model.

Beoordeling kalibratieresultaat

Voor het beoordelen van de modelprestaties bij verschillende parametersets worden twee beoordelingscoëfficiënten gebruikt. Dit zijn de Nash-Sutcliffe coëfficiënt voor het bepalen van de prestaties op het gebied van timing en hoge waarden en de Log Nash-Sutcliffe coëfficiënt voor de prestaties van het model op het gebied van lage waarden. Beide beoordelingscoëfficiënten worden voor zowel de simulatie van de grondwaterstanden en de rioleringsdebieten bepaald. Hoe dichter de beoordelingscoëfficiënt bij 1 ligt, hoe beter de simulatie. De formules van de coëfficiënten worden gegeven in Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland. De afweging welke parameter is gebruikt is uiteindelijk op expert-judgement gemaakt.

Kalibratieparameters

Het bepalen van de waarden van de modelparameters kan op een aantal manieren gebeuren. Sommige parameters kunnen nauwkeurig worden vastgesteld aan de hand van beschikbare informatie over het gebied. Zo kunnen de landgebruiksfracties worden bepaald met de Grootchalige Basiskaart (GBKN) van het gebied en de kenmerken van het rioleringsstelsel kunnen uit het Basisrioleringsplan (BRP) worden gehaald.

Andere parameters zijn moeilijk of niet te bepalen met beschikbare informatie en kunnen alleen bepaald worden door kalibratie. Kalibratie is het zodanig instellen van de modelparameters dat een (sub)optimale modelprestatie wordt bereikt. Kalibratie kan handmatig of door middel van een algoritme gedaan worden.

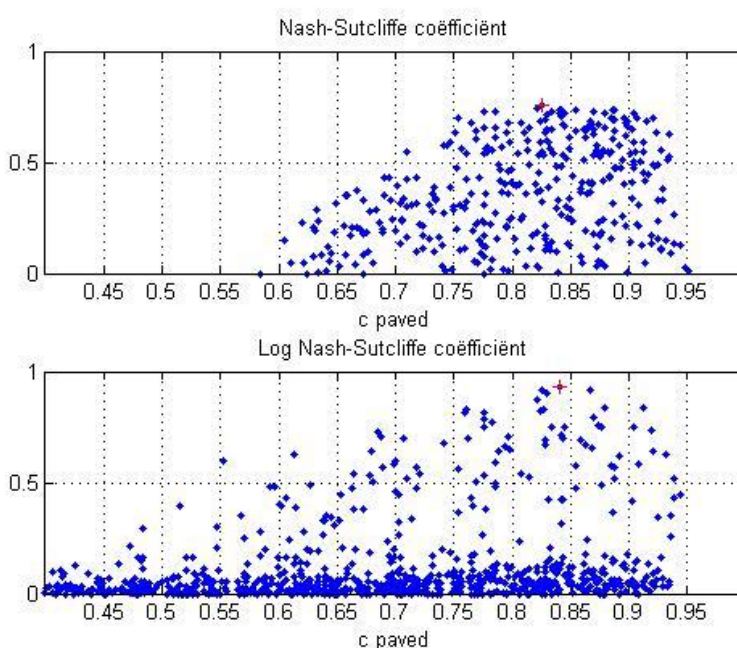
Voor de modelparameters die niet of moeilijk te schatten zijn is een kalibratie uitgevoerd door het uitvoeren van een Monte-Carlosimulatie. In een Monte-Carlosimulatie wordt hetzelfde model een groot aantal keren doorgelopen met verschillende sets van parameterwaarden. De

optimale set parameterwaarden wordt bepaald aan de hand van berekende prestatieparameters.

Gezien het grote aantal modelparameters en de mogelijkheid om het merendeel min of meer vast te stellen met beschikbare informatie, wordt slechts een deel van de modelparameters vastgesteld door middel van kalibratie. De parameters die gekalibreerd zijn om hun optimale parameterwaarde te bepalen zijn: afvoercoëfficiënt verhard oppervlak, infiltratiecoëfficiënt verhard oppervlak, veldcapaciteit, porievolume, berging onverzadigde zone, doorlatendheid grondwater-regionaal oppervlaktewater en doorlatendheid stedelijk grondwater-riolering..

Voor de te kalibreren modelparameters is een Monte-Carlosimulatie met 10.000 simulaties uitgevoerd met het programma MATLAB. De waarden van de modelparameters zijn willekeurig -binnen realistische grenzen- gevarieerd. De Monte Carlo simulatie kan worden beschouwd als een gevoeligheidsanalyse. Figuur 11.2 wordt als voorbeeld de prestatie van het model bij verschillende waarden van de afvoercoëfficiënt van verhard gebied (c_{paved}) getoond. Op de y-as staan de prestaties van de parametersets en op de x-as de waarde van de parameter. Als er een duidelijke 'top' in de blauwe puntenwolk te zien is, betekent dit dat het model met de parameterwaarde horend bij de top de beste prestaties geeft. Hieruit is af te leiden dat het model optimaal presteert bij waarden voor deze parameter tussen 0,75 en 0,90. Met andere woorden: een realistische afvoerfactor voor verhard gebied op het Prinseneiland is 75-90%. Dit komt overeen met de beschikbare literatuurwaarden.

De rode kruisen (+) in de grafieken tonen de parameterwaarden waarbij de beste berekende prestaties zijn bereikt (althans binnen de Monte Carlo set). Uit de figuur blijkt ook dat de optimale modelprestaties redelijk (0,6; Nash – Sutcliffe coëfficiënt) tot goed (0,9; log Nash-Sutcliffe coëfficiënt) zijn. Dat er ook mindere modelprestaties bij deze parameterwaarden voorkomen, wordt veroorzaakt door minder goede instellingen van andere modelparameters.

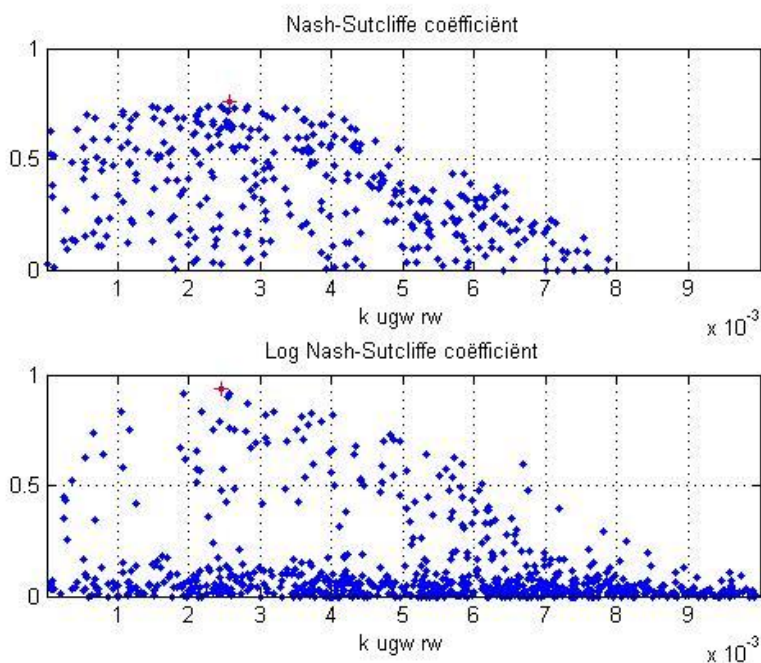


Figuur 11.2 Illustratie Monte Carlo simulatie. Prestatie van het model bij verschillende waarden van de afvoerfactor van verhard gebied (c_{paved}), voor de doelparameter grondwaterstand.

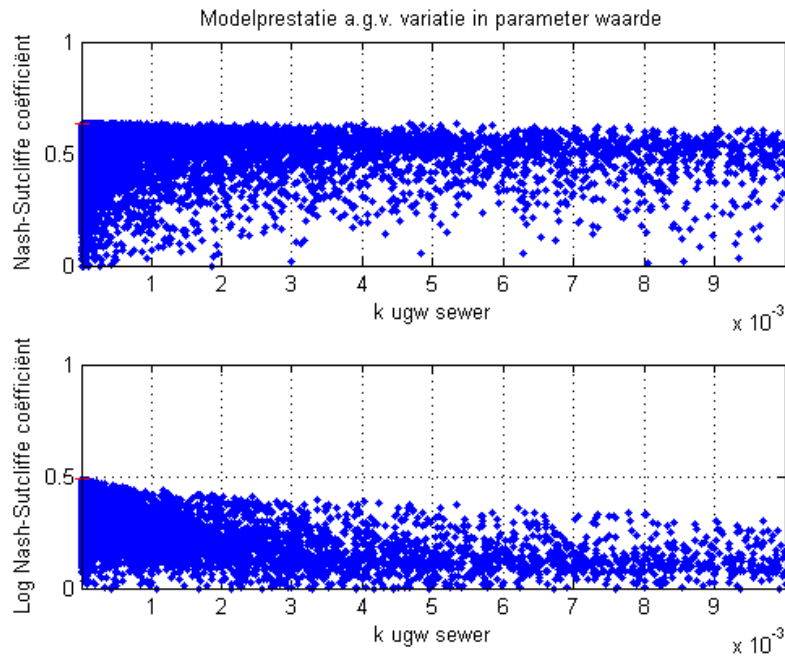
11.4.1 Resultaten kalibratie

Monte Carlo simulaties

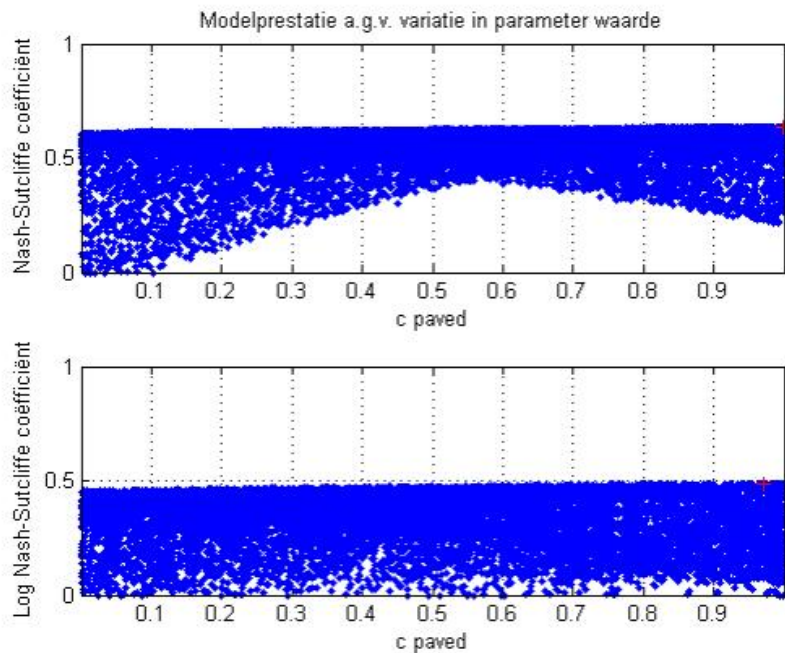
Uit de Monte Carlo simulaties blijkt dat de modelresultaten niet voor alle gekozen kalibratieparameters even gevoelig zijn. Met name het rioleringsdebiet lijkt weinig gevoelig voor de modelparameters. Voor de kalibratie op het rioleringsdebiet wordt bij de optimale parameterset een prestatie van 0,5 a 0,6 behaald, en voor de grondwaterstanden een prestatie van 0,7 tot 0,95. Met het oog op de onderzoeksvragen zijn vooral de parameters afvoercoëfficiënt verhard oppervlak (reeds besproken, zie Figuur 11.2) en uitwisselingscoëfficiënt grondwater-oppevlaktewater, Figuur 11.3) interessant. Uit Figuur 11.3 blijkt dat de modelprestaties snel afnemen boven waarden voor uitwisselingscoëfficiënt grondwater-oppevlaktewater groter dan 0,004. De parameter is daarmee duidelijk begrensd.



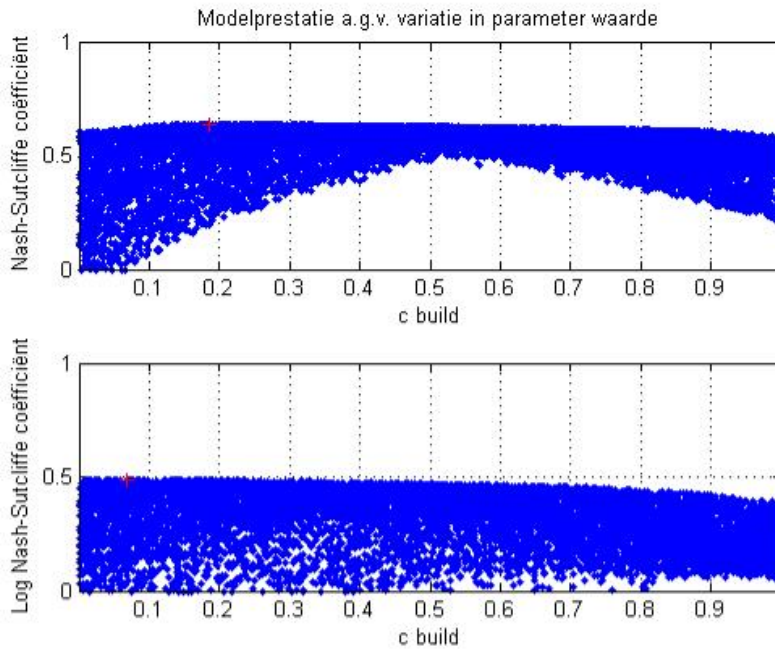
Figuur 11.3 Prestatie van het model bij verschillende waarden van de uitwisselingscoëfficiënt grondwater – oppe vlaktewater voor de doelparameter grondwaterstand.



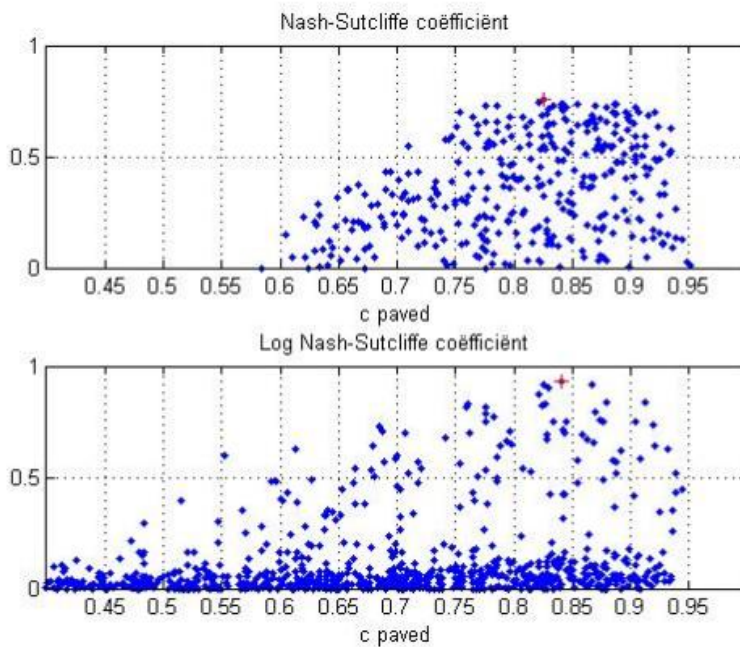
Figuur 11.4 Modelprestatie als gevolg van variatie in de modelparametersets. In de figuur wordt de prestatie van het model tegen de waarde van de parameter 'k_ugw_sewer' getoond. Doelparameter: rioleringsdebiet.



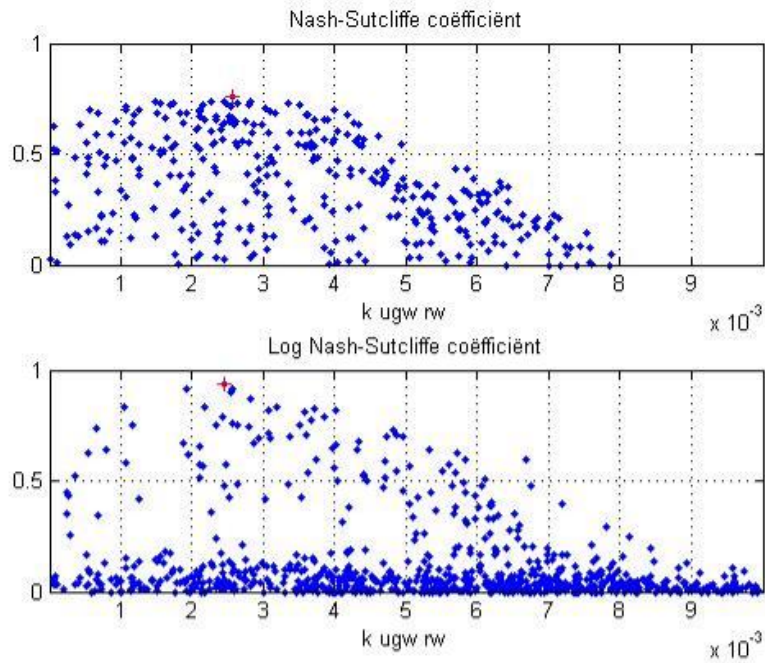
Figuur 11.5 Modelprestatie als gevolg van variatie in de modelparametersets. In de figuur wordt de prestatie van het model tegen de waarde van de parameter 'c_paved' getoond. Doelparameter: rioleringsdebiet.



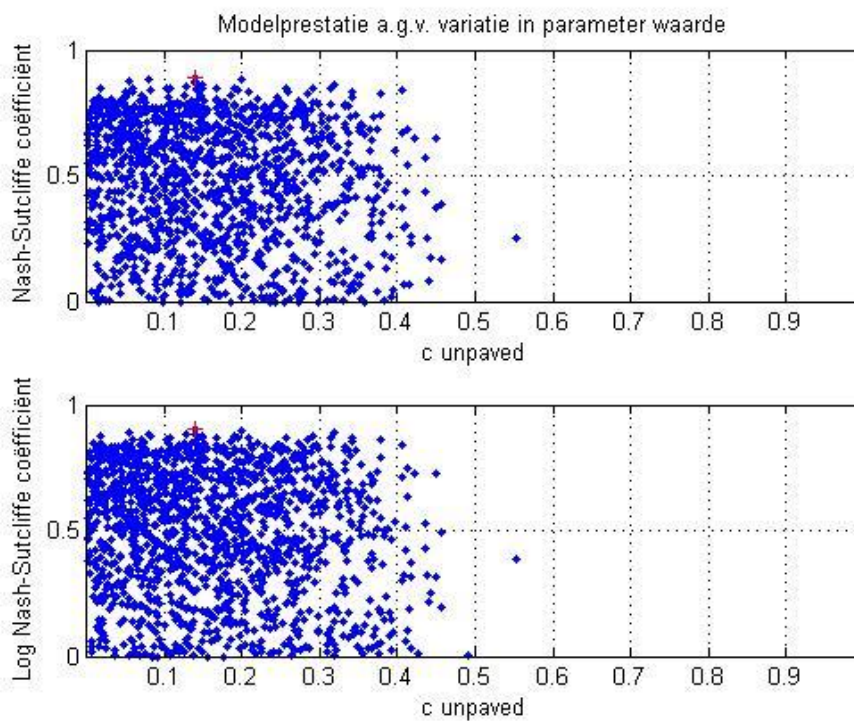
Figuur 11.6 Modelprestatie als gevolg van variatie in de modelparametersets. In de figuur wordt de prestatie van het model tegen de waarde van de parameter 'c_build' getoond. Doelparameter: rioleringsdebiet.



Figuur 11.7 Modelprestatie als gevolg van variatie in de modelparametersets. In de figuur wordt de prestatie van het model tegen de waarde van de parameter 'c_paved' getoond. Doelparameter: grondwaterstand Galgenstraat.



Figuur 11.8 Prestatie van het model bij verschillende waarden van de uitwisselingscoëfficiënt grondwater – oppervlaktewater voor de doelparameter grondwaterstand.

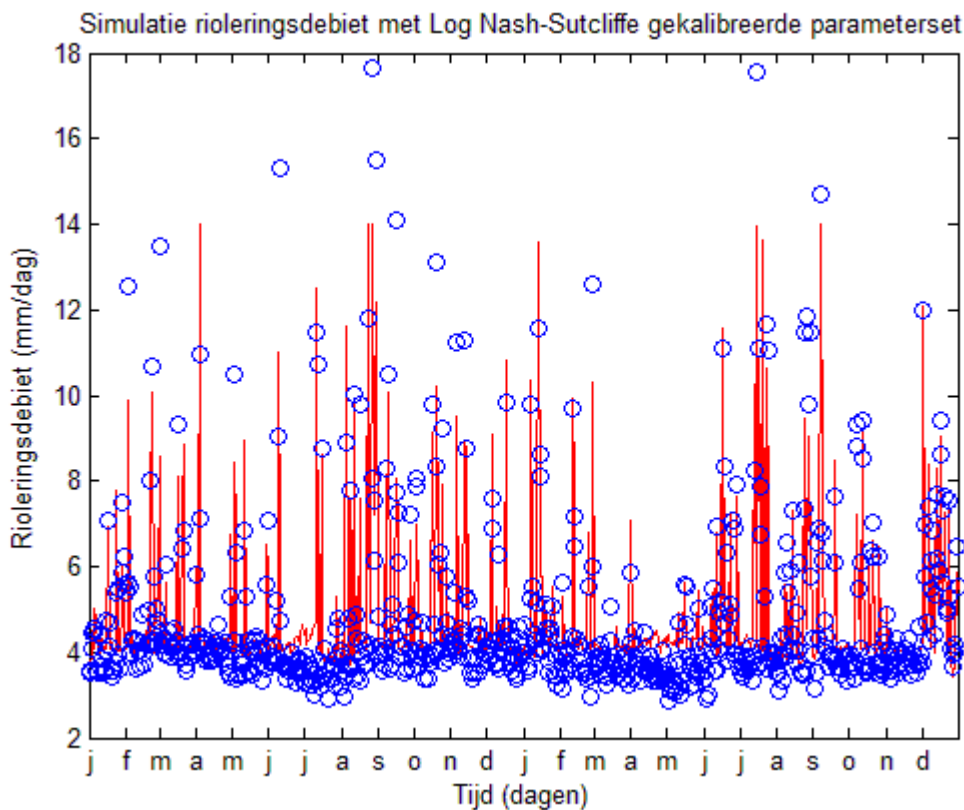


Figuur 11.9 Modelprestatie als gevolg van variatie in de modelparametersets. In de figuur wordt de prestatie van het model tegen de waarde van de parameter 'c_unpaved' getoond. Doelparameter: grondwaterstanden binnenterrein.

Resultaten rioleringsdebieten

Voor de kalibratie van de modelparameters op de rioleringsdebieten worden data van het rioelstelsel op het Prinseneiland over de periode 2010-2011 gebruikt. Figuur 11.10 toont het kalibratieresultaat (log Nash-Sutcliffe coëfficiënt). Het totale volume van de gemodelleerde debieten is 2,9 mm (of 98.6 m³) hoger dan de gemeten riooldebieten over dezelfde periode. Dit is slechts 0,077% van het totaal gemeten debiet (118 m³) over de twee jaar. De gemodelleerde overstort bedraagt 23,8 mm of 809 m³.

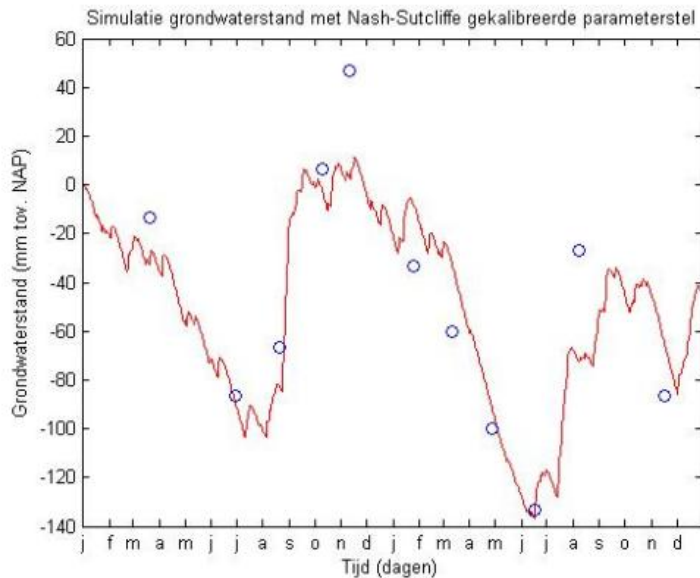
De Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,53, de Log Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,59 en de kwadratisch gemiddelde fout bedraagt 1,42 (mm²/dag²). Uit Figuur 11.10 en de genoemde kengetallen valt op te maken dat het model de rioleringsdebieten redelijk goed simuleert.



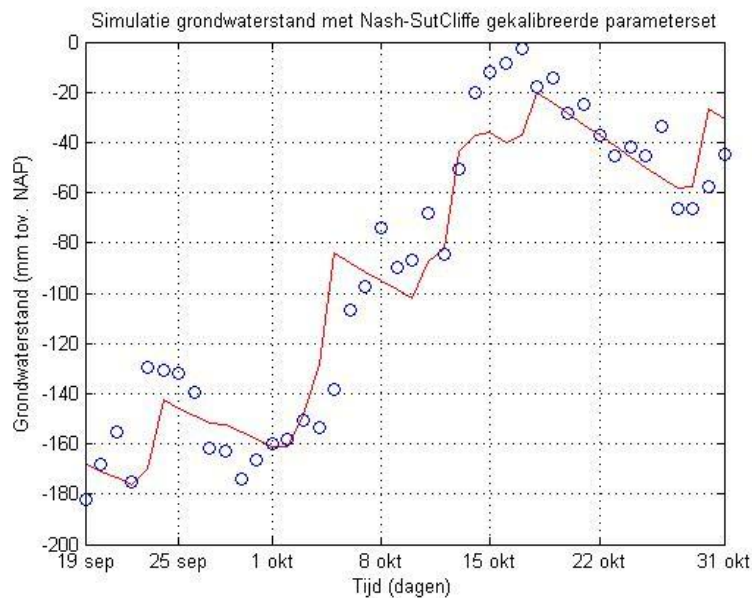
Figuur 11.10 Simulatie van het rioleringsdebiet met de optimale parameter set volgens de log Nash-Sutcliffe coëfficiënt. De streepjes op de x-as geven de eerste dag van de maand aan. (o: metingen, --: model)

Resultaten grondwaterstanden

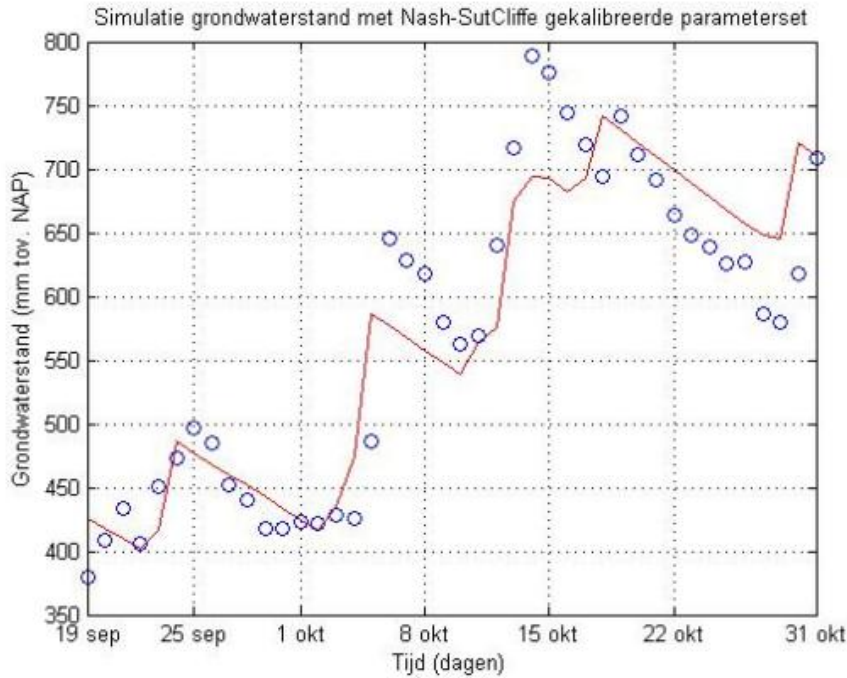
Voor de kalibratie van de modelparameters op de grondwaterstanden wordt gebruik gemaakt van de metingen op het Prinseneiland. Zoals gezegd is de meetreeks in de Galgenstraat (2010-2011) gebruikt voor kalibratie van "c_paved" en de reeksen op de binnenterreinen (najaar 2012) voor "c_unpaved". In Figuur 11.11 en Figuur 11.12 worden de resultaten weergegeven voor de locaties Galgenstraat en het binnenterrein in het noordoosten van het eiland. De resultaten voor de andere meetpunten op binnenterreinen lijken sterk op die in het noordoosten van het eiland. De prestaties voor de Galgenstraat zijn goed (met uitzondering van 1 meting in november 2010), die voor de binnenterreinen wisselend.



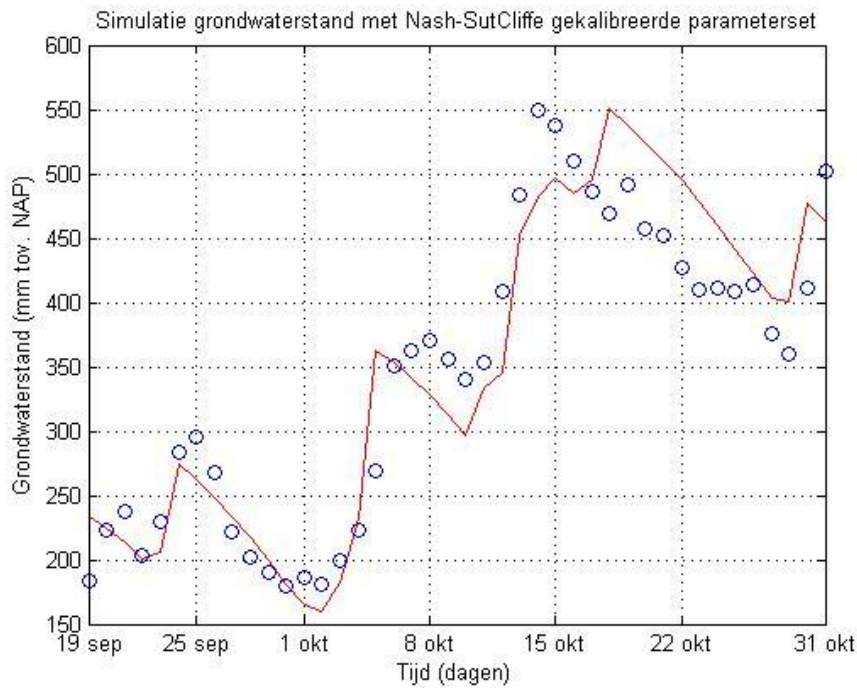
Figuur 11.11 Simulatie van de grondwaterstand in het meetpunt in de Galgenstraat (2010-2011) met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. De streepjes op de x-as geven de eerste dag van de maand aan. (o: metingen, --: model)



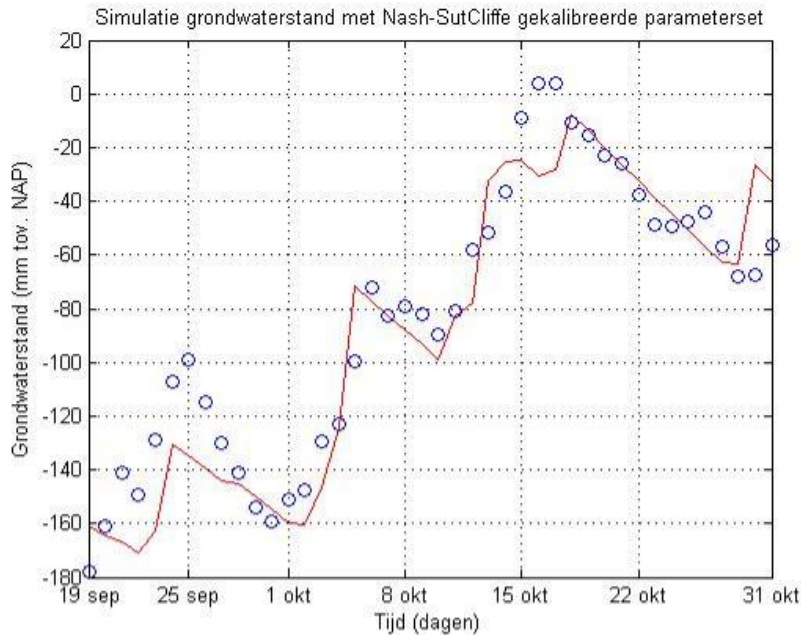
Figuur 11.12 Simulatie van de grondwaterstand in het noordoosten van het eiland (binnenterrein) met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. (o: metingen, --: model)



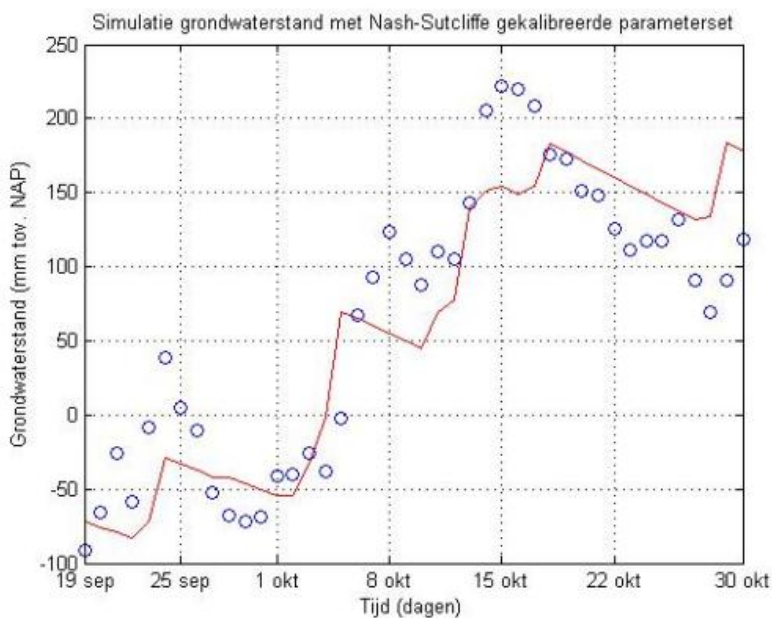
Figuur 11.13 Simulatie van de grondwaterstand in de achtertuin van het noordelijke woonblok op het eiland met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. (o: metingen, -: model)



Figuur 11.14 Simulatie van de grondwaterstand in de achtertuin van het zuidelijke woonblok op het eiland met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. (o: metingen, -: model)



Figuur 11.15 Simulatie van de grondwaterstand in het noordwesten van het eiland met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. (o: metingen, --: model)



Figuur 11.16 Simulatie van de grondwaterstand in het zuidwesten van het eiland met de optimale parameter set volgens de Nash-Sutcliffe coëfficiënt. (o: metingen, --: model)

11.4.2 Conclusies kalibratie

Rioleringsdebiet

De hoogste prestatiecoëfficiënten liggen rond 0,6. Deze bovengrens van de modelprestaties wordt veroorzaakt door de tijdstap van een hele dag. Door deze grove tijdstap verdwijnt

informatie over timing en intensiteit van de neerslag, waardoor allerlei afstromingsprocessen over een kleinere tijdstap niet goed gemodelleerd worden. Zo wordt bijvoorbeeld bij een bui aan het eind van de dag de afvoer over de eerste dag gemodelleerd, terwijl in het echt het merendeel van de afvoer op de volgende dag plaatsvindt.

Bij sommige parameterwaarden treedt ook een minimum prestatiewaarde op. Dit kan deels worden veroorzaakt door de droogweerafvoer vanuit de huishoudens die een groot aandeel heeft in de basisafvoer van de rioleringsdebeten. Een andere mogelijke verklaring is dat het model bij een dergelijke parameterwaarde altijd redelijk goed presteert ongeacht de waarden van de andere parameters.

Uit de figuren blijkt verder dat er geen duidelijke begrenzing van de modelparameters uit de kalibratie komt.

Grondwaterstanden

De kalibratie van de modelparameters op de grondwaterstandsmetingen in de Galgenstraat laat zien dat het model goed presteert over een langere periode. Lagere waarden voor de afstromingscoëfficiënt verhard oppervlak (c_{paved}) en grondwater-oppervlaktewater interactie ($k_{\text{ugw_rw}}$) zou de prestatie van het model op de hogere grondwaterstanden kunnen verbeteren, echter ten koste van de prestaties op de lagere grondwaterstanden.

Kalibratie van de modelparameters op de grondwaterstanden uit de achtertuinen van de twee woonblokken op het Prinseneiland hebben geleid tot de conclusie dat grofweg 50-100% ($1 - c_{\text{unpaved}}$) van de effectieve neerslag infiltreert in de ondergrond.

De gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden hebben ongeveer dezelfde dynamiek. De gesimuleerde grondwaterstand gaat wel sneller omhoog na een regenbui dan de metingen. Een vertragingfunctie voor de stroming door de onverzadigde zone zou hierin verbetering kunnen brengen.

De optimale waarde voor c_{paved} ligt tussen de 0,75 en 0,9. Net als in de praktijk varieert deze van situatie tot situatie.

De modelprestaties worden snel minder bij waarden voor ' $k_{\text{ugw_rw}}$ ' boven 0,004. Dit wijst op een geringe uitwisseling tussen grondwater en oppervlaktewater.

11.4.3 Totaalparameterset Prinseneiland

De separaat geoptimaliseerde modelparametersets voor rioleringsdebiet en grondwaterstand zijn gecombineerd tot een totaalparameterset die als optimaal wordt beschouwd. Hierbij is, indien nodig, licht afgeweken van de gevonden optima om een goede gelijktijdige simulatie van de grondwaterstanden en rioleringsdebeten te krijgen. Deze beoordeling is handmatig gedaan aan de hand van de beoordelingscoëfficiënten en de grafieken met de gemeten en gesimuleerde waarden. De bijbehorende parameterwaarden zijn opgenomen in Bijlage C: Waterbalansmodel Prinseneiland.

Tabel 11.4 Parameterwaarden behorende bij de totaalparameterset voor het Prinseneiland (PE).

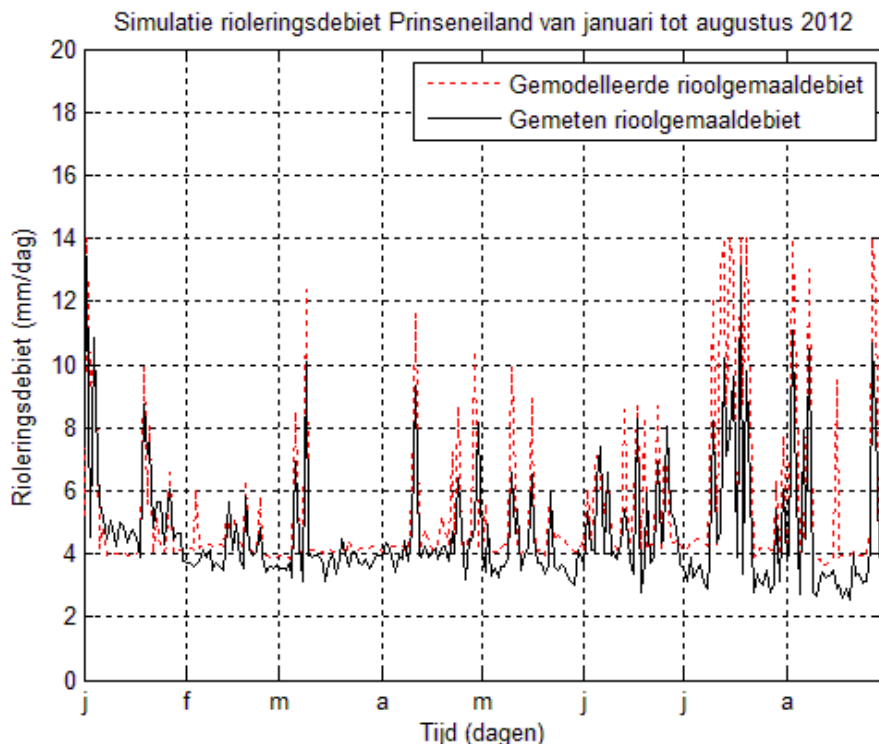
Parameter	Waarden PE
frac_paved	0,31
frac_unpaved	0,20
frac_built	0,49
frac_water	0,00
frac_veg_paved	0,044
frac_veg_unpaved	0,037
frac_veg_built	0,004
frac_veg_water	0,00
frac_veg	0,09
ec_paved	1
c_paved	0,53
s_paved	0,00
r_paved	0,02
i_paved	0,45
ec_unpaved	1
c_unpaved	0,00
s_unpaved	0,00
r_unpaved	0,00
i_unpaved	1
ec_built	1
c_built	0,81
s_built	0,00
r_built	0,18
i_built	0,01
ec_water	1
S_paved_int	2,00
S_unpaved_int	3,00
S_built_int	1,00
DATUM	-2800
PerSIntTreeN1	100
PerSIntTreeN2	180
ec_crop1	0,6
ec_crop2	0,8
SIntTreeN1	0
SIntTreeN2	3
i_water_ugw	0,00
i_water_rgw	0,00
n	0,24
wp_uz	0,1
fc_uz	0,14
UZmax	28
alfa	0,7
beta	0,1
Pmax	0
Lp	0,0032

k_ugw_rw	0,00300
c_ugw	2,00
frac_DWF_sep	0
frac_sep_imp	0
k_ugw_sewer	0
k_sewer	0,0000
k_wwtp	14
k_clean_dirty	0
D_overflow	7,8
D_SSO	0
SEWER	2600

11.5 Validatie Prinseneiland

Rioleringsdebieten

Voor de validatie van het model op de rioleringsdebieten is het hele Prinseneiland in de simulatie meegenomen. De metingen waarop gevalideerd wordt komen van het rioleringsgemaal op het Prinseneiland over de periode januari tot augustus 2012. Het validatieresultaat is weergegeven in Figuur 11.17.



Figuur 11.17 De gesimuleerde en gemeten rioleringsdebieten van het rioleringsgemaal op het Prinseneiland over de periode januari tot augustus 2012 te validatie van het SWB model.

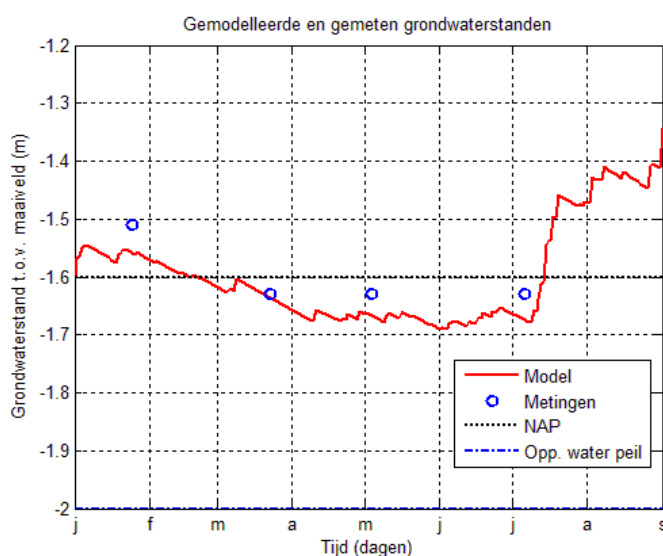
Het totale volume van de gemodelleerde debieten over de simulatieperiode is 173 mm (of 5898 m³) hoger dan de gemeten riooldebieten over dezelfde periode. Dit is 13% meer dan

het totaal gemeten debiet (38.2 m^3) over de periode. Het gemodelleerde overstortvolume bedraagt $29,0 \text{ mm}$ of 986 m^3 .

De Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,26, de Log Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,37 en de kwadratisch gemiddelde fout bedraagt $1,59 \text{ (mm}^2/\text{dag}^2)$. Uit de bovenstaande figuur en de genoemde kengetallen valt op te maken dat het model de rioleringsdebieten niet heel goed simuleert. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de in Figuur 11.19 duidelijk zichtbare daling in het gemeten rioleringsdebiet in de zomer. Doordat de validatieperiode kort is, heeft deze periode met daling relatief veel invloed op de resultaten. Ook valt op dat het model de pieken nu overschat, terwijl deze in de kalibratieperiode juist (ook) onderschat worden. Het verklaren van beide fenomenen is niet mogelijk zonder een diepgaande analyse van de modelresultaten en variaties in de tijd van de invoerparameters.

Grondwaterstanden

Omdat een groot deel van de metingen is gebruikt in de kalibratie heeft de validatie op grondwaterstanden beperkte waarde. Alleen voor het meetpunt Galgenstraat is gevalideerd, en dat op slechts vier meetwaarden in 8 maanden. Toevallige kortdurende invloeden kunnen daardoor een groot effect hebben op de uitkomst. Figuur 11.18 toont het validatieresultaat.



Figuur 11.18 Gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in de Galgenstraat over een deel van het jaar 2012

11.6 Validatie Rivierenbuurt

Voor de validatie van het waterbalansmodel voor de Rivierenbuurt is gebruik gemaakt van rioleringsdebietmetingen en grondwaterstandsmetingen over de periode 2010-2011.

Als werkwijze is gehanteerd dat de geoptimaliseerde totaalparameterset van het Prinseneiland ongewijzigd is overgenomen, met uitzondering van de landgebruiksfracties, aangezien deze nauwkeurig bepaald konden worden voor de Rivierenbuurt op basis van het GBKN. Verder zijn de parameters 'k_ugw_sewer' en 'k_ugw_rw' aangepast, omdat de riolering in de Rivierenbuurt in mindere staat is dan op het Prinseneiland. De parameter 'k_ugw_sewer' is aangepast aan de hand van de basisafvoer van de riolering. De parameter 'k_ugw_rw' is vervolgens aangepast om voor de extra stroming van grondwater naar de

riolering te compenseren. Vanwege de aanpassing van deze parameters is er dan ook geen sprake geweest van een validatie in de strikte betekenis van het woord.

De rioleringsdebieten zijn gemeten in het rioolgemaal aan de Diepenbrockstraat te Amsterdam. Dit gemaal verwerkt het afvalwater van de Rivierenbuurt en van het gebied rond NS Station-Zuid en het WTC. Het regenwater wordt uit de Rivierenbuurt afgevoerd door een regenwaterriool en wordt in principe niet geregistreerd door het rioolgemaal. Doordat niet alleen de Rivierenbuurt op het gemaal loost is het lastig het aandeel uit alleen de Rivierenbuurt te bepalen. Informatie in het basisrioleringsplan (BRP) over de aangenomen debieten uit de bijbehorende sub-gebieden heeft geleid tot een aanname van een aandeel van $1/3^e$ van het gemeten debiet.

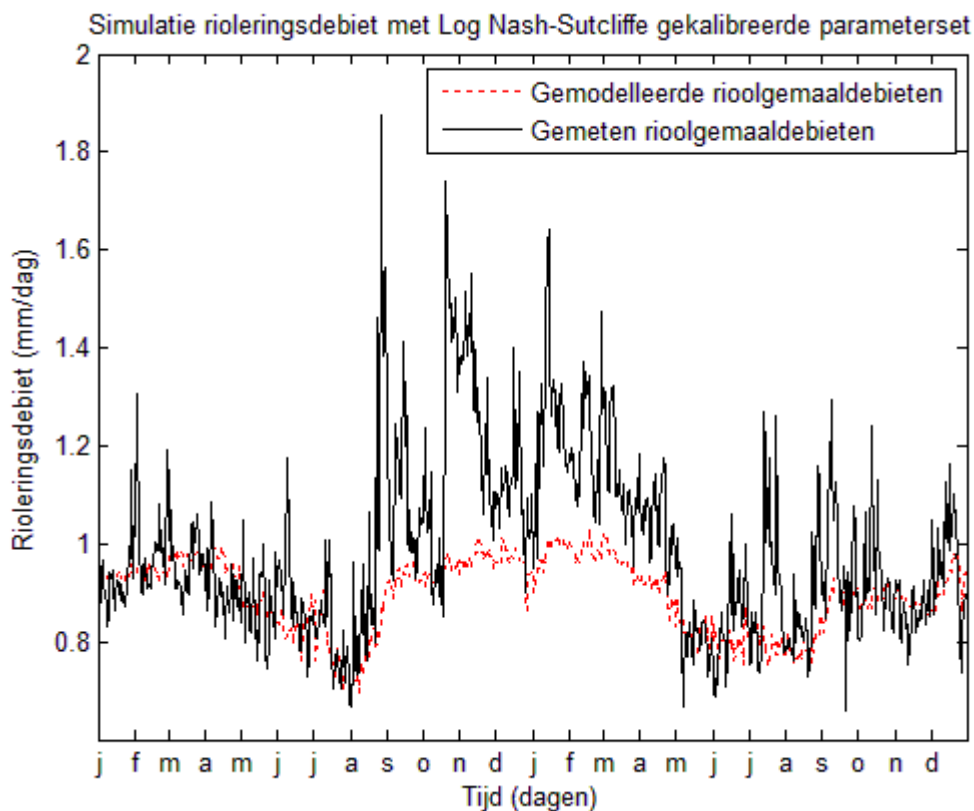
De grondwaterstandsmetingen die gebruikt zijn voor de validatie komen van peilbuis F06008 nabij Rooseveltlaan 97.

Rioleringsdebieten

De validatieresultaten voor het rioleringsdebiet zijn weergegeven in Figuur 11.19. Het totale afvalwaterdebiet over de simulatieperiode is 68.8 mm (of 130.830 m^3) lager dan de gemeten debieten over dezelfde periode. Dit is 11% van het totaal gemeten debiet ($1.375.135 \text{ m}^3$) over de twee jaar.

De Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,05, de Log Nash-Sutcliffe coëfficiënt bedraagt 0,12 en de kwadratisch gemiddelde fout bedraagt 0,18 (mm^2/dag^2). Deze waarden zijn veel kleiner dan voor het Prinseneiland, wat veroorzaakt wordt door het veel kleinere debiet. Uit de resultaten valt op te maken dat het model de lagere debieten goed simuleert.

De hogere rioleringsdebieten en de pieken in de afvoer worden niet goed gesimuleerd. Mogelijke oorzaken hiervoor zijn: (1) toestroming van regenwater vanuit een aangesloten gemengd rioelstelsel buiten de Rivierenbuurt; (2) foutieve aansluitingen in de Rivierenbuurt (regenwater op vuilwaterriool); (3) lekkage van grondwater in het riool tijdens natte perioden. In het eerste geval is de afwijking niet aan de modelinvoer te wijten, in geval van foutieve aansluitingen en lekkage wel, want deze zijn niet als zodanig in het model opgenomen. Voor het Prinseneiland is aangenomen dat lekkage van grondwater naar het riool nihil is.

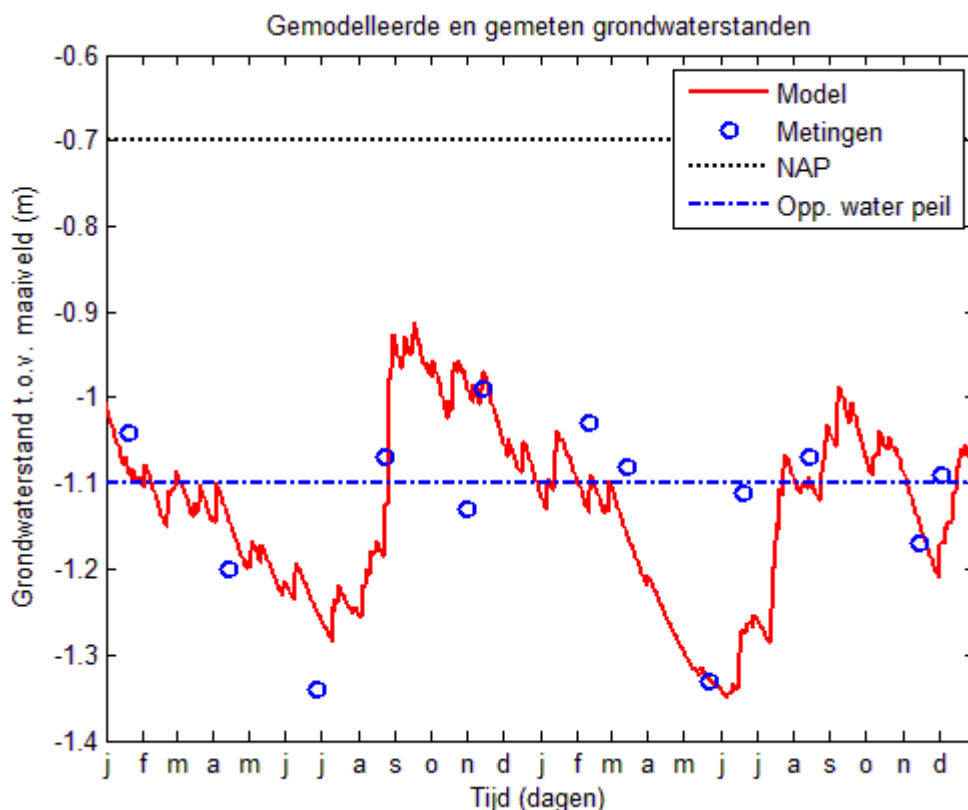


Figuur 11.19 De gesimuleerde en gemeten rioleringsdebieten van het rioleringsgemaal in de Diepenbroekstraat te Amsterdam over de periode 2010-2011. De streepjes op de x-as geven de eerste dag van de maand aan.

Grondwaterstanden

De validatieresultaten voor de grondwaterstand zijn weergegeven in Figuur 11.20. Op basis van de gesimuleerde grondwaterstanden in 2010 en 2011 presteert het model met een Nash-Sutcliffe coëfficiënt van 0,36, een Log Nash-Sutcliffe coëfficiënt van 0,53 en een kwadratisch gemiddelde fout van 82.96 (mm²).

Uit de resultaten blijkt dat het model de dynamiek in de grondwaterstanden over de jaren goed simuleert. Individuele pieken en dalen worden minder goed gesimuleerd. Dit kan worden veroorzaakt door meetfouten, verschillen in neerslag tussen Rivierenbuurt en het meetstation op de Oostelijke Eilanden (m.n. 's zomers), of een voor dit meetpunt niet-optimale parameterisatie van het model.



Figuur 11.20 Gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in de Rooseveltlaan over de periode 2010-2011.
De streepjes op de x-as geven de eerste dag van de maand aan.

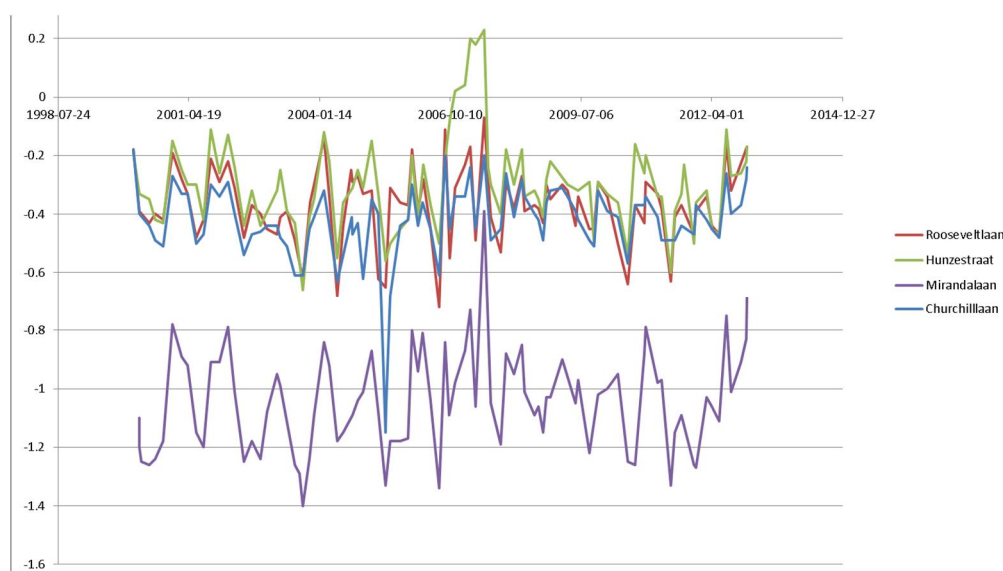
Vooruitlopend op de presentatie van de waterbalans voor de Rivierenbuurt wordt hier alvast opgemerkt dat deze parameterconfiguratie aanleiding geeft tot een uitwisseling grondwater – oppervlaktewater die hoger is dan wat de verwachting was en is. Gezien de beperkte zeggingskracht van een validatie op één grondwatermeetreeks is geprobeerd om zoveel mogelijk onzekerheid rond dit aspect weg te nemen, en de berekende uitwisseling zo goed mogelijk te onderbouwen.

Ten eerste is een gebiedsspecifieke gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de meest kritische parameters: de evenredigheidsconstanten die respectievelijk de lekkage van grondwater naar het riool en de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater bepalen ($k_{\text{ugw_sewer}}$ en $k_{\text{ugw_rw}}$). Het doel hiervan was om na te gaan hoe een grotere of kleinere lekkage naar het riool de uitwisseling grondwater – oppervlaktewater beïnvloedt, en of daarbij even goede modelprestaties worden behaald. Het resultaat is weergegeven in Tabel 11.5. Het blijkt dat zowel een vergroting als een verkleining van de lekkage naar het riool leidt tot meer uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater; in het eerste geval om de grondwaterstand in droge perioden op peil te houden, en in het tweede geval om het gebied in natte perioden voldoende te draineren. Bovendien leidt elk van de alternatieve parameterconfiguraties tot lagere prestatiecoëfficiënten¹. De gevoeligheidsanalyse kan dan ook geen aanleiding geven tot het naar beneden bijstellen van de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater.

Tabel 11.5 Waarden van parameters en resulterende prestatie coëfficiënten voor simulatie grondwaterstanden in de Rooseveltlaan

Lekkage naar riool t.o.v. optimaal	Uitwisseling grondwater – oppervlaktewater (hoger getal = meer uitwisseling)	prestatiecoëfficiënt 1 (Nash-Sutcliffe)	prestatiecoëfficiënt 2 (log Nash-Sutcliffe)
Viervoudig	0,2*	*	*
Dubbel	0,04	0,26	0,03
Optimaal (gebruikt in waterbalans-analyse)	0,004	0,31	0,46
Gehalveerd	0,027	0,31	0,01
Nihil	0,057	0,11	0

Ten tweede is nog eens specifiek gekeken naar de beschikbare meetreeksen van de grondwaterstand. Deze laten zien dat de grondwaterstand in de Rivierenbuurt over het algemeen dicht rond het boezempeil fluctueert, ook op grote afstand van het oppervlaktewater (zie Figuur 11.21). Dit duidt op een niet te verwaarlozen uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater. De oorzaak ligt wellicht in het feit dat tijdens de aanleg de wijk integraal is opgehoogd met schoon zand.



Figuur 11.21 Meetreeksen grondwaterstand, Rivierenbuurt.

12 Bijlage D: Waterbalansmodel Arnhem-Oost

12.1 Beschikbare informatie

In Tabel 12.1 Beschikbare data Arnhem-Oost. Tabel 12.1 zijn de beschikbare data voor Arnhem-Oost weergegeven.

Tabel 12.1 Beschikbare data Arnhem-Oost.

Id. ²	Data	Bron	Benodigd voor:
0	NAP hoogten (gedetailleerde hoogtekaart)	AHN5	Gebiedsanalyse, Input model
0	Isohypsen grondwater	Waterschap Rijn en IJssel/Grondwaterkaart Nederland	Gebiedsanalyse
1	Aantal inwoners	Gemeente Arnhem	Verdeling en controleren input model
1	DWA riolsysteem	Gemeente Arnhem	Input model
2	Lay-out riolering	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse
2	Kenmerkenbladen rioolgemaal	Gemeente Arnhem; Waterschap Rijn en IJssel	Input model
3	Dagreeksen Neerslag	www.knmi.nl	Input model
3	Dagreeksen Verdamping	www.knmi.nl	Input model
3	Dagreeksen Klimaatscenario's	www.knmi.nl	Input model
4	GBKN, Satellietbeelden	Gemeente Arnhem, Google maps	Gebiedsanalyse, Input model (percentages verhard en onverhard)
6	Type riool	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse, input model
7	Kwel en Infiltratiefluxen	Gemeente Arnhem	Input model
8	Gemeentelijk plan riolering 4	Gemeente Arnhem	Staat van het riool
9	Info overstorten	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse
9	Waterbergingsstudie	Waterschap Rijn en IJssel	Gebiedsanalyse
10	Boorstaten, sonderingen en geohydrologische onderzoeken	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse, grondeigenschappen, input model
10	Grondwaterstanden	Gemeente Arnhem, Dinoloket.nl	Input model, verificatie model
11	Beek- en stuwdebieten, info over droogval	Waterschap Rijn en IJssel	Input model
11	Peilbeheer Arnhem, verschillende peilvakken	Waterschap Rijn en IJssel	Input model

² Verwijst naar de originele datawensentabel gebruikt voor de casestudie

11	Lay-out beken en openwaterlopen en stroomrichting	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse
12	Gegevens groen, zowel globaal als losse bomen	Gebiedsverkenning Deltares, Gemeente Arnhem, Google maps	Input model
13	Percentage infiltratie en afvoer gescheiden stelsels	Gemeente Arnhem	Input model
16	AWZI aangesloten gebied	Waterschap Rijn en IJssel	Gebiedsanalyse
17	Grondwateronttrekkingen	Vitens	Input model, gebiedsanalyse
18	Vlakken riolering	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse, input model
19	Winning drinkwater	Vitens	Gebiedsanalyse
19	Drinkwaterberging	Vitens	gebiedsanalyse
19	Leidingsysteem+drukregimes	Vitens	Gebiedsanalyse
20	Waterstanden IJsselkop	Rijkswaterstaat	Input model
21	Waterplan Arnhem II	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse , toekomstvisie gemeente
22	Overzicht verontreiniging grond	Gemeente Arnhem	Gebiedsanalyse

12.2 Beschrijving modelparameters

12.2.1 Oppervlakten landgebruiksfuncties

Tabel 12.2 en Tabel 12.3 bevatten de percentages en oppervlaktes die zijn bepaald op basis van het GBKN. De gegevens zijn niet dekkend voor het hele casegebied. Op basis van een locatiebezoek en luchtfoto's is een inschatting gemaakt van het landgebruik in het ongeclassificeerde deel. Het gaat hier vooral om weiland en grasland, enkele stukken zijn wel verhard. De gemaakte inschatting komt neer op:

- Arnhem-Oost Laag: 80% onverhard, 20%verhard
- Arnhem-Oost Hoog: 90% onverhard, 10% verhard.

Tabel 12.2 Oppervlakten Arnhem-Oost Laag

Type	Oppervlakte (m ²)	percentage
Verhard	2 080 135	29,2%
Onverhard	3 484 823	48,9%
Bebouwd	1 323 407	18,6%
Water	236 681	3,3%
Totaal	7 125 046	100,0%

Tabel 12.3 Oppervlakten Arnhem-Oost Hoog

Type	Oppervlakte (m ²)	percentage
Verhard	1 385 323	20,6%
Onverhard	4 280 043	63,6%
Bebouwd	992 212	14,8%
Water	68 136	1,0%
Totaal	6 725 714	100,0%

12.2.2 Oppervlakte overhang bomen

Een verdere onderverdeling kan gemaakt worden aan de hand van de percentages vegetatie per type oppervlak (verhard, onverhard, bebouwd en water). Binnen de bebouwde kom zijn ongeveer 11.000 bomen, waarvan een groot deel straatbomen. Voor de modelparameterisatie van de interceptieverdamping is aan de hand van Google Maps een nadere analyse gemaakt. Hierbij is voor beide deelgebieden gekeken hoe groot de overhang van de bomen is per landgebruiksfunctie. Dit is gedaan op basis van het meten van de diameter van 25 bomen per deelgebied en daarvan het gemiddelde te nemen. Het resultaat van de analyse is weergegeven in Tabel 12.4 en Tabel 12.5.

Tabel 12.4 Oppervlakte overhang bomen Arnhem-Oost Laag

Arnhem-Oost Laag	Verdeling bomen	aantal bomen	Gem. overhang/boom (m ²)	Oppervlakte overhang (m ²)
Verhard	25,0%	1524	54	81777
Onverhard	70,0%	4268	-	350000
Bebouwd	5,0%	305	43	13034
	100,0%	6097		

Tabel 12.5 Oppervlakte overhang bomen Arnhem-Oost Hoog

Arnhem-Oost Hoog	Verdeling bomen	aantal bomen	Gem. overhang/boom (m ²)	Oppervlakte overhang (m ²)
Verhard	20,0%	1187	54	63683
Onverhard	70,0%	4155	-	856000
Bebouwd	10,0%	594	43	25374
	100,0%	5935		

12.2.3 Riolering

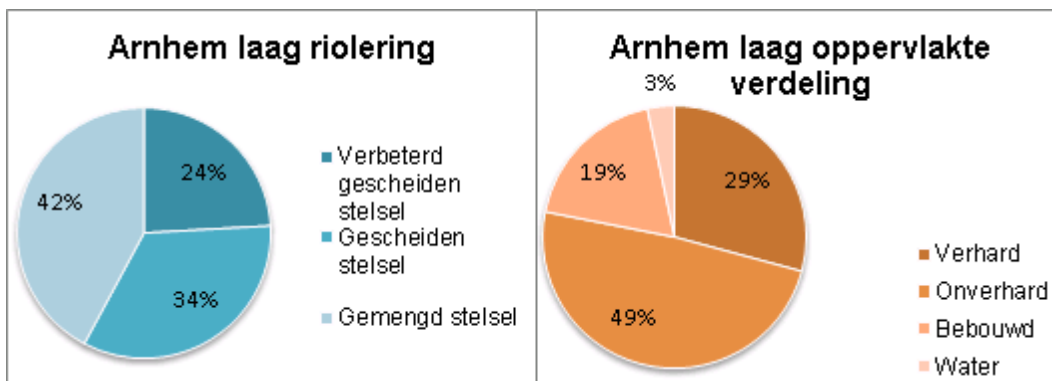
Tabel 12.6, Tabel 12.7, Figuur 12.1 en Figuur 12.2 geven de geschatte oppervlakten met gescheiden en gemengde rioolstelsel weer, en de daaraan gekoppelde oppervlakten aan landgebruiksfuncties³.

Tabel 12.6 Verdeling riolering Arnhem-Oost Laag

Gecorrigeerd	Verhard (m ²)		Bebouwd (m ²)		Onverhard (m ²)	Water (m ²)
Verbeterd gescheiden stelsel	365 114	17,6%	454 549	34,3%	0	0
Gescheiden stelsel	770 778	37,1%	378 744	28,6%	0	0
gemengd stelsel	944 243	45,4%	490 114	37,0%	0	0
Totaal	2 080 135		1 323 407		0	0

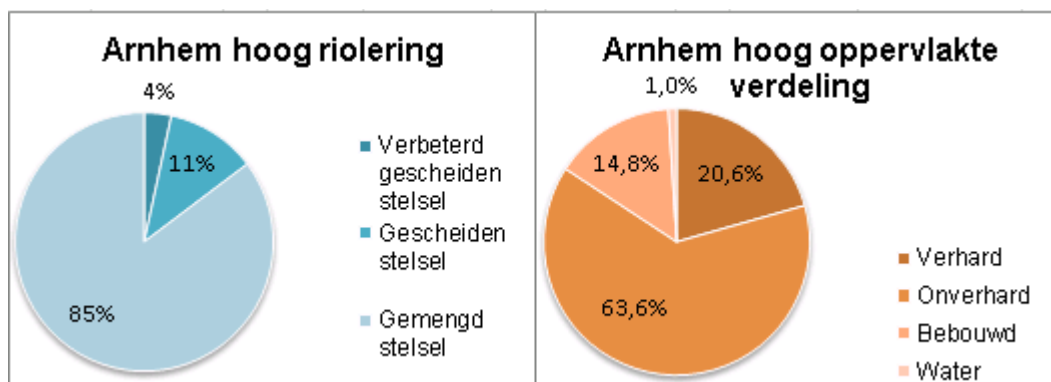
Tabel 12.7 Verdeling riolering Arnhem-Oost Hoog

Gecorrigeerd	Verhard (m ²)		Bebouwd (m ²)		Onverhard (m ²)	Water (m ²)
Verbeterd gescheiden stelsel	15 785	1,1%	64 546	6,5%	0	0
Gescheiden stelsel	160 928	11,6%	108 639	10,9%	0	0
gemengd stelsel	1 208 610	87,2%	819 027	82,5%	0	0
Totaal	1 385 323		992 212		0	0



Figuur 12.1 Riolering Arnhem-Oost Laag; Oppervlakte verdeling Arnhem-Oost Laag.

³ Bron: Gemeente Arnhem



Figuur 12.2 Riolering Arnhem-Oost Hoog; Oppervlakte verdeling Arnhem-Oost Hoog.

Door verdere combinatie van de gegevens over landgebruiksfuncties en rioolstelsels is de in Tabel 12.8 en Tabel 12.9 weergegeven indeling afgeleid, ten behoeve van het waterbalansmodel.

Tabel 12.8 Input oppervlakten Arnhem-Oost Laag (m²)

Landgebruik [m ²]		Waterafvoer					Bomen
		Gemengd	Gescheiden	Niet aangesloten	Extern	Totaal	
Landgebruik	Verhard	944243	442192	693701	0	2080135	82000
	Onverhard	0	0	3484823	0	3484823	350000
	Bebouwd	490114	492423	340869	0	1323407	13000
	Water	0	0	236681	0	236681	0
	Totaal	1434357	934615	4756074	0	7125046	445000

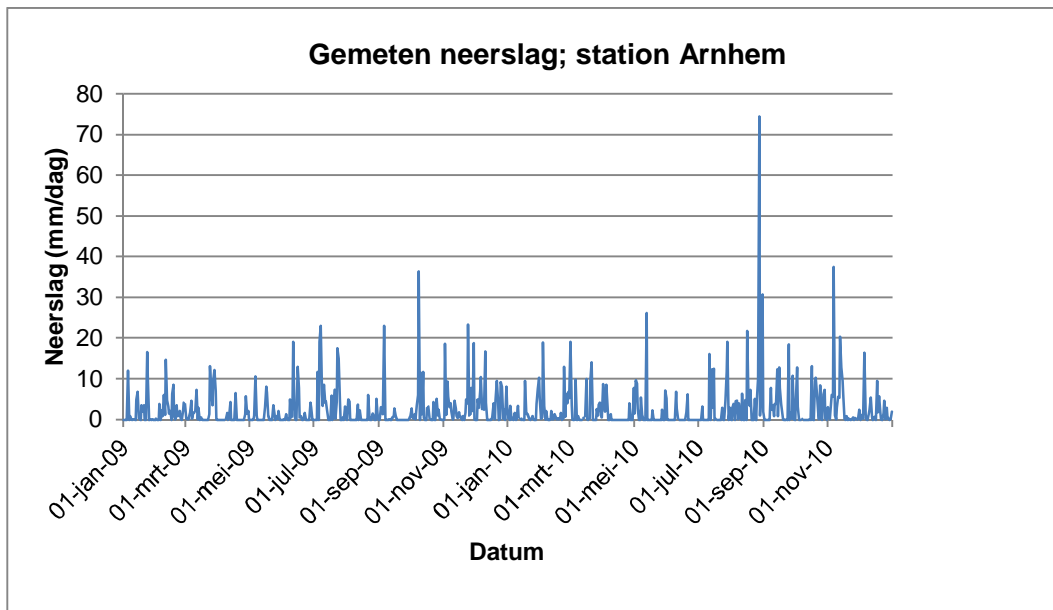
Tabel 12.9 Input oppervlakten Arnhem-Oost Hoog (m²)

Landgebruik [m ²]		Waterafvoer					Bomen
		Gemengd	Gescheiden	Niet aangesloten	Extern	Totaal	
Landgebruik	Verhard	1208610	31877	144835	0	1385323	63682
	Onverhard	0	0	4280043	0	4280043	856008
	Bebouwd	819027	75410	97776	0	992212	25374
	Water	0	0	68136	0	68136	0
	Totaal	2027637	107287	4590790	0	6725714	945064

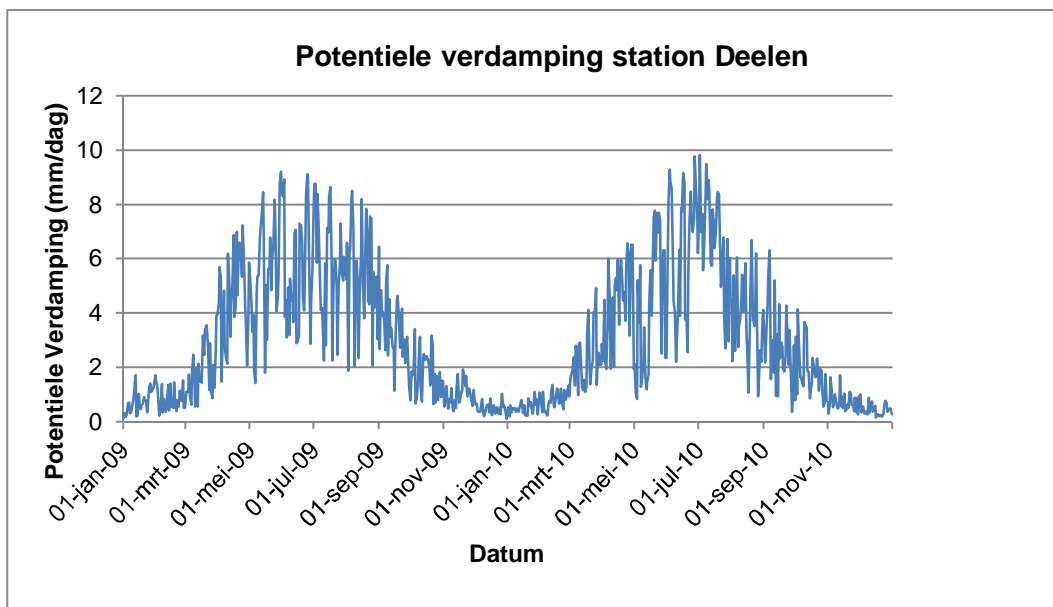
In Arnhem-Oost Laag is meer oppervlak aangesloten op gescheiden rioolstelsels dan in Arnhem-Oost Hoog. Voor het model is aangenomen dat de riolering 1.5 meter onder maaiveld ligt. De capaciteit van het vuilwaterriool is afgeleid uit de door de gemeente Arnhem verstrekte gegevens. Er is een correctiefactor van 0,5 toegepast voor neerslagperiodes korter dan 24 uur.

12.2.4 Neerslag en verdamping

Voor de meteorologische invoer van het waterbalansmodel is gebruik gemaakt van de KNMI-stations Arnhem (neerslag) en Deelen (verdamping). Zie Figuur 12.3 en Figuur 12.4. Het gaat hierbij om de potentiële verdamping. De actuele verdamping wordt door het model uitgerekend en is onderverdeeld in interceptieverdamping en transpiratie door vegetatie.



Figuur 12.3 Neerslag op KNMI-station Arnhem 2009-2010⁴



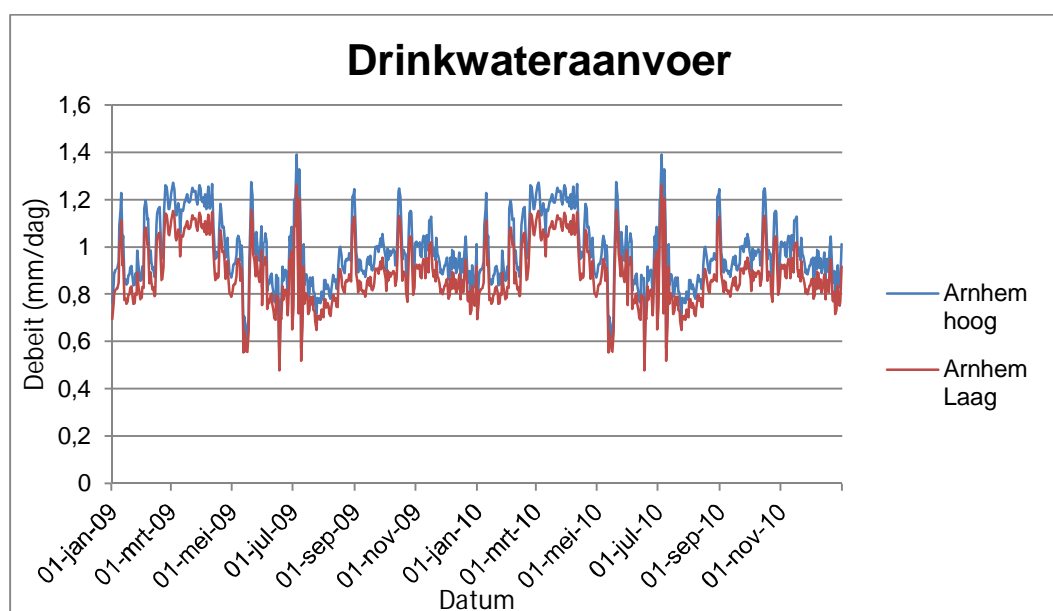
Figuur 12.4 Potentiële verdamping op KNMI-station Deelen 2009-2010⁵

⁴ Bron: KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT (KNMI)

⁵ Bron: KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT (KNMI)

12.2.5 Drinkwateraanvoer

Voor de drinkwateraanvoer is een tijdreeks gebruikt die beschikbaar is gesteld door waterbedrijf Vitens. Het is bekend dat het verlies van het geleverde water ongeveer 5% bedraagt; dit is verwerkt in het model. De aangeleverde cijfers hebben betrekking op heel Arnhem-Oost. Aan de hand van het aantal inwoners per deelgebied is een verdeling gemaakt over Hoog en Laag. De gegevens hebben betrekking op 2012. Aangenomen is dat de cijfers voor 2009 en 2010, de validatiejaren van het model, identiek zijn. Het resultaat van deze aanname is weergegeven in Figuur 12.5. De aanvoer kan aanzienlijk verschillen per dag en varieert van 0,5 mm tot 1,4 mm per dag. In vergelijking met Prinseneiland is de hoeveelheid drinkwater in mm waterschijf veel lager. De oorzaak is de lagere bewonersdichtheid in Arnhem. Daardoor is het gemiddelde verbruik per m² ook lager.



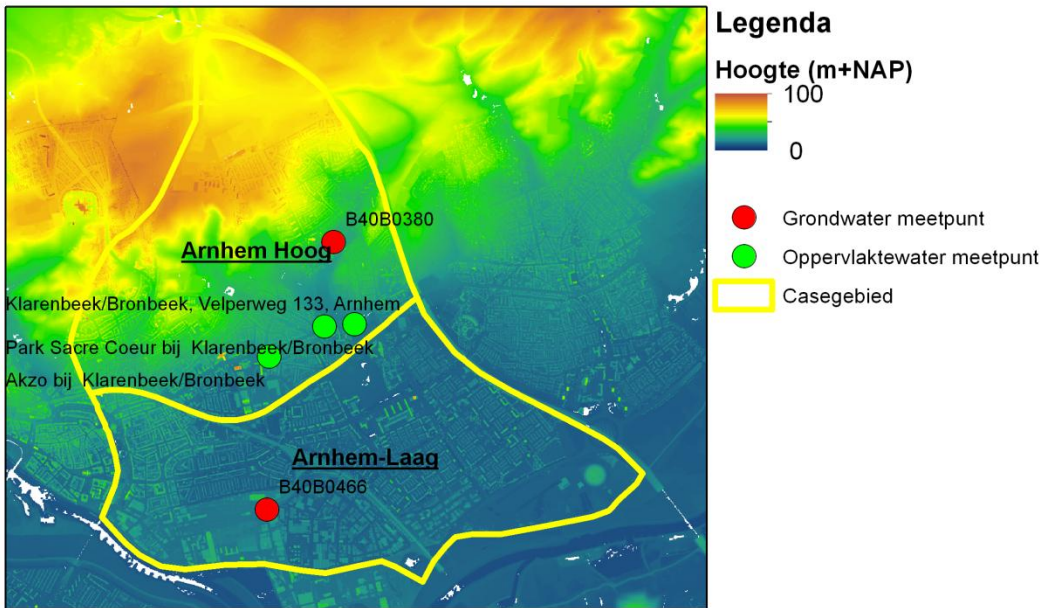
Figuur 12.5 Gemeten drinkwateraanvoer⁶

12.2.6 Beekafvoeren

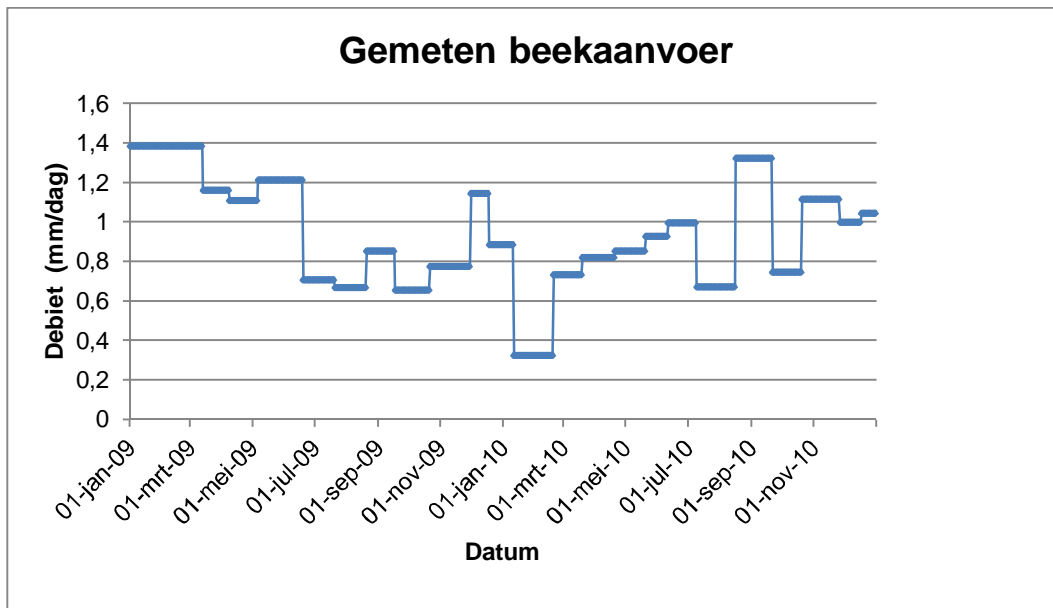
De debieten van de beken die door Arnhem-Oost stromen (het complex Klarenbeek-Molenbeek-Beek op de Paasberg-Bronbeek) zijn gebruikt ter validatie van de gesimuleerde beekafvoeren van Arnhem-Oost Hoog. De debietmeetpunten van Waterschap Rijn en IJssel liggen bij benadering op de grens tussen beide deelgebieden (zie Figuur 12.6).

Van belang is dat een deel van het invanggebied van de beken buiten het modelgebied Arnhem-Oost ligt. De afvoer van de beken zal daarmee iets hoger zijn dan het model voorspelt. Doordat aan de bovenstroomse zijde geen meetgegevens beschikbaar zijn is niet te zeggen hoeveel hoger. De debieten zijn eens per maand gemeten, er is aangenomen dat deze constant blijven tot aan het eerstvolgende meetmoment (zie Figuur 12.7). Het gemiddelde van deze beekaanvoer is ca. 0,9 mm/dag.

⁶ Bron: Vitens



Figuur 12.6 Debiet- en grondwatermeetpunten Arnhemse beken, Waterschap Rijn en IJssel en DINOLoket.

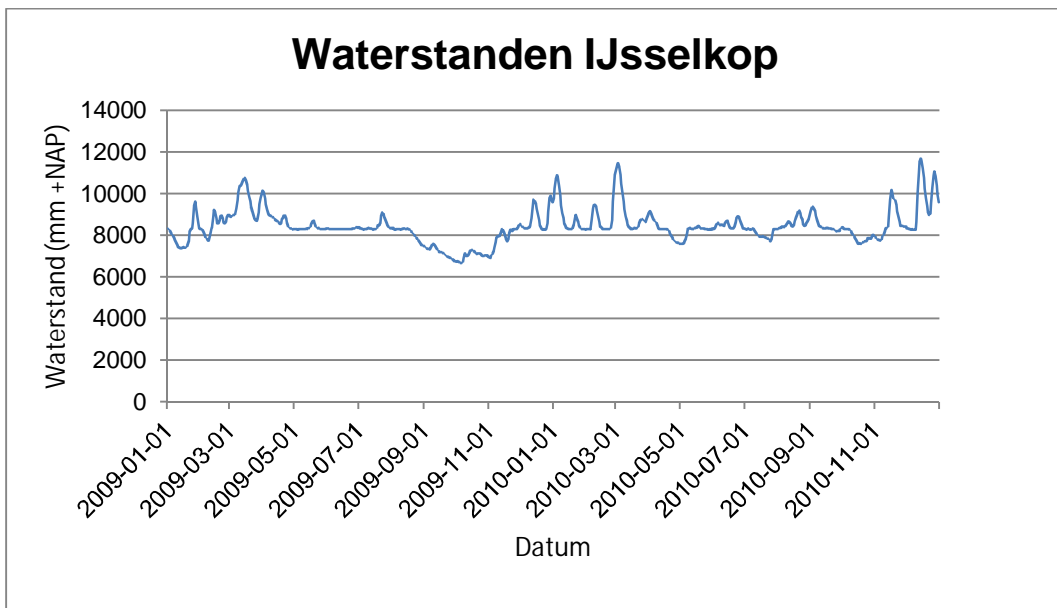


Figuur 12.7 Maandelijkse beekaanvoeren Arnhem-Oost Hoog, aannemende dat het debiet constant blijft tot het eerstvolgende meetmoment.⁷

⁷ Bron: Waterschap Rijn en IJssel

12.2.7 Rivierstanden

De rivierwaterstand ter plaatse van het Rijkswaterstaat-meetpunt IJsselkop, de splitsing van de IJssel en de Neder-Rijn, is meegenomen als tijdsafhankelijke randvoorwaarde in het model. De rivierwaterstand varieert van ongeveer 7 m+NAP tot 11.5 m+NAP, zie Figuur 12.8.



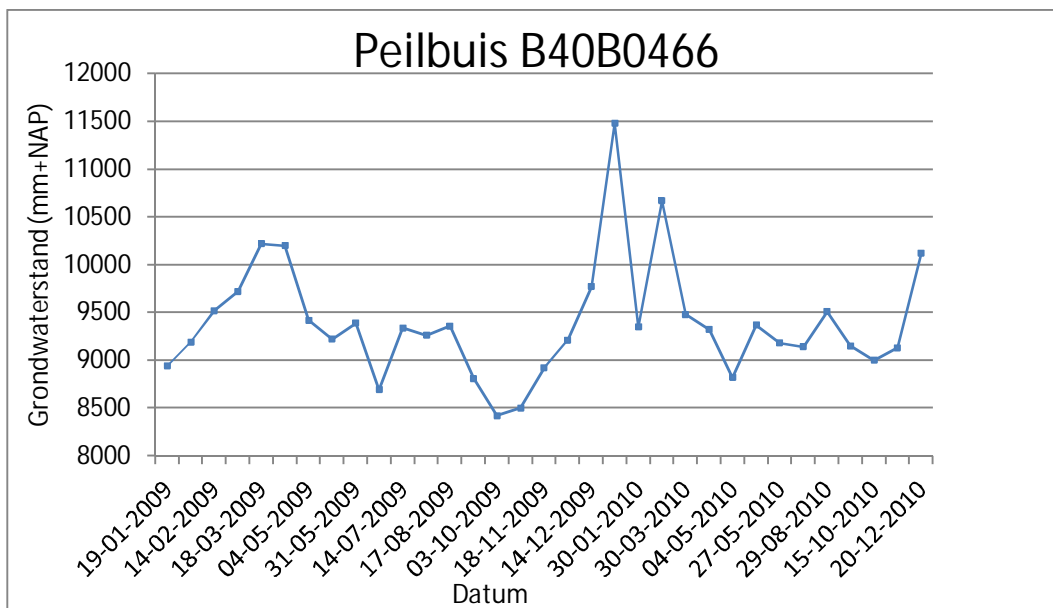
Figuur 12.8 . Waterstanden IJsselkop 2009-2010⁸

12.2.8 Grondwaterstanden

De beschikbaarheid van tijdreeksen van de grondwaterstand in de gewenste periode en op de gewenste diepte in Arnhem is beperkt. Er is wel een goed beeld van de ruimtelijke variatie van de grondwaterstand, dankzij de beschikbaarheid van veel grondwateronderzoeken bij de gemeente Arnhem.

Voor Arnhem-Oost Laag is de reeks van DINO-peilbuis B40B0466 gebruikt. Zie Figuur 12.6 voor de ligging van de peilbuis en Figuur 12.9 voor het gemeten grondwaterstandsverloop in 2009 en 2010. Voor zover de meetfrequentie van de grondwaterstanden het toelaat is er een verband waarneembaar tussen hoge rivierwaterstanden te IJsselkop en hoge grondwaterstanden. Dit is waarschijnlijk ook de oorzaak van de voor Nederlandse begrippen hoge grondwaterdynamiek in Arnhem-Oost Laag: tussen 8.5 m+NAP en 11.5 m+NAP.

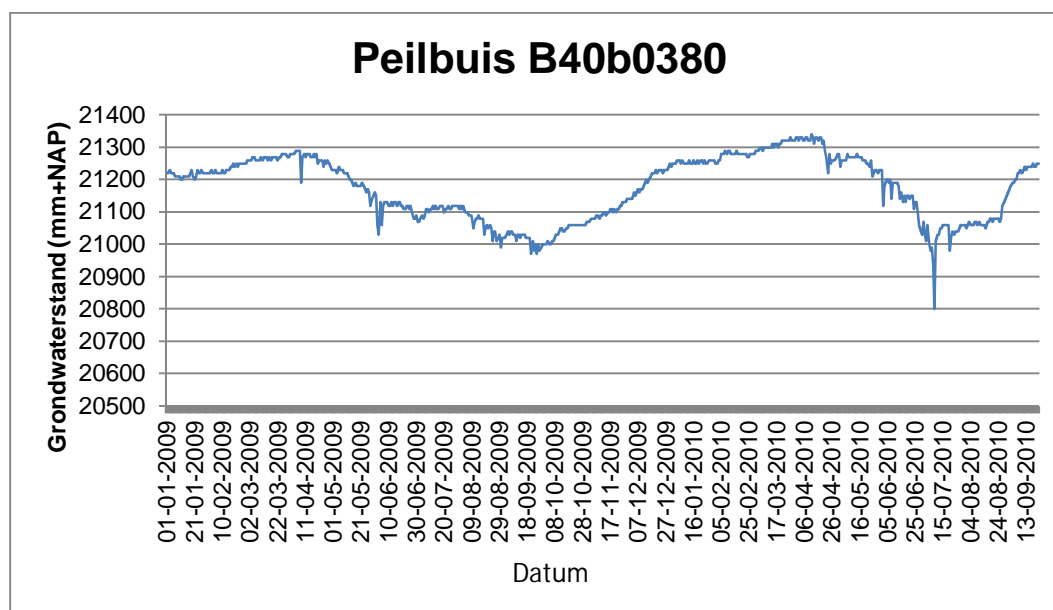
⁸ Bron: Rijkswaterstaat



Figuur 12.9 Grondwaterstand peilbuis B40B0466 in Arnhem-Oost Laag ⁹

In Arnhem-Oost Hoog is de ruimtelijke variatie in de grondwaterstand veel groter dan in Laag. Dit wordt veroorzaakt door schijngrondwaterspiegels en de sterk variërende afstand tot lokale en regionale drainagemiddelen. Het is dan ook niet mogelijk om te valideren op een gebiedsgemiddelde grondwaterstand. De gevolgde werkwijze is om een oppervlaktewaterpeil (c.q., beekpeil) in het model in te voeren dat representatief is voor de hoogteligging van de (enige) beschikbare peilbuis, en de berekende grondwaterstand te vergelijken met de betreffende meetreeks. Het gaat om DINO-peilbuis B40B0380 (ligging zie Figuur 12.6, meetreeks zie Figuur 12.10). De maaiveldhoogte ter plaatse van deze peilbuis is 24.4 m+NAP; de locatie ligt daarmee ongeveer op een gemiddelde maaiveldhoogte in het gebied. Het is de enige peilbuis in Arnhem-Oost Hoog waarvoor in de periode 2009-2010 metingen beschikbaar zijn, helaas met uitzondering van de laatste 3 maanden van 2010.

⁹ Bron: Dinoloket.nl



Figuur 12.10 Grondwaterstand peilbuis B40B0380 in Arnhem-Oost Hoog¹⁰

12.2.9 Geohydrologische parameters

Voor de onderrandvoorwaarde van het model is een inschatting van de hydraulische weerstand van de relevante scheidende laag alsmede het stijghoogteverschil over deze laag nodig. De benodigde informatie is ontleend aan geohydrologische onderzoeken van de gemeente Arnhem, REGIS en meetreeksen van diepe peilbuizen (DINOLoket).

Hetzelfde geldt voor de lineaire recessie waarden. Deze zijn ook afgeschat en gekalibreerd.

12.2.10 Samenvatting parameterwaarden Arnhem-Oost

In Tabel 12.10 en Tabel 12.11 zijn de in het waterbalansmodel Arnhem-Oost gehanteerde parameterwaarden weergegeven.

Tabel 12.10 Parameterwaarden Arnhem-Oost Laag 2009-2010

Parameter	Value	Description
frac_paved	0,29	fraction paved area of total area
frac_unpaved	0,49	fraction unpaved area of total area
frac_build	0,19	fraction build up area of total area
frac_water	0,03	fraction water bodies area of total area
frac_veg_paved	0,012	fraction vegetation over paved area of total area
frac_veg_unpaved	0,049	fraction vegetation over unpaved area of total area
frac_veg_build	0,002	fraction vegetation over build up area of total area
frac_veg_water	0,00	fraction vegetation over water body area of total area
frac_veg	0,06	fraction vegetation
ec_paved	0,78742	fraction E_a/E_p for paved surface
c_paved	0,39	Precipitation discharge fraction from paved surface to sewer system
s_paved	0,18	

¹⁰ Bron: Dinoloket.nl

r_paved	0,00	Precipitation runoff fraction from paved surface to water bodies
i_paved	0,43	Precipitation infiltration fraction from paved surface to unsat. zone
ec_unpaved	1	fraction Ea/Ep for unpaved surface
c_unpaved	0,00	Precipitation discharge fraction from unpaved surface to sewer system
s_unpaved	0,00	
r_unpaved	0,00	Precipitation runoff fraction from unpaved surface to water bodies
i_unpaved	1	Precipitation infiltration fraction from unpaved surface to unsat. zone
ec_build	0,62791	fraction Ea/Ep for build up area
c_build	0,37	Precipitation discharge fraction from build up area to sewer system
s_build	0,37	
r_build	0,00	Precipitation runoff fraction from build up area to water bodies
i_build	0,26	Precipitation infiltration fraction from build up area to unsat. zone
ec_water	1	fraction Ea/Ep for water surface
S_paved_int	0,58	Interception capacity of paved surfaces
S_unpaved_int	1,47	Interception capacity of unpaved surfaces
S_build_int	0,19	Interception capacity of build surfaces
DATUM	-20000	New datum of model (mm tov NAP)
PerSIntTreeN1	100	Nr. of days with first interception capacity trees at start of period
PerSIntTreeN2	180	Nr. of days with second interception capacity trees after period N1
ec_crop1	0,6	Crop factor to account for plant resistance to transpiration in first veg. per.
ec_crop2	0,8	Crop factor to account for plant resistance to transpiration in sec. veg. per.
SIntTreeN1	0	Interception capacity trees over first period (mm)
SIntTreeN2	3	Interception capacity trees over second period (mm)
i_water_ugw	0,1	Recession value from urban water to urban groundwater
i_water_rgw	0,00	Recession value from urban water to regional groundwater
n	0,35	porosity of top ground layer
wp_uz	0,14	Wilting point of unsaturated zone (1 = pores + solids)
fc_uz	0,28	Field capacity of unsaturated zone (1 = pores + solids)
UZmax	140	maximum storage capacity of unsaturated zone (mm)
alfa	0,6	
beta	0,3	Parameter governing the fast percolaton component
Pmax	1	Paramter governing the slow percolation component
k_ugw_rw	0,00300	recession value from urban groundwater to regional water bodies [1/d]
c_ugw	2	Maximum capillary rise from urban groundwater to unsaturated zone [L/T]
frac_DWF_sep	0,58	
frac_sep_imp	0,88	
k_ugw_sewer	0	recession value leakage to sewer <=1 [1/d]
k_sewer	0,0100	recession value leakage from sewer system <=1 [1/d]
k_wwtp	21,2	Sewer pump discharge capacity [L/T]
k_clean_dirty	0,39352	Clean to dirty sewer discharge capacity [L/T]
D_overflow	23,0742	Combined Sewer overflow threshold [mm]
D_SSO	3,52469	Separate sewer outflow threshold [mm]
SEWER	28500	level in mm with respect to DATUM
H_water_target	29000	Target level of surface water with respect to DATUM

Tabel 12.11 Parameterwaarden Arnhem-Oost Hoog 2009-2010

Parameter	Value	Description
frac_paved	0,21	fraction paved area of total area
frac_unpaved	0,64	fraction unpaved area of total area
frac_build	0,15	fraction build up area of total area
frac_water	0,01	fraction water bodies area of total area
frac_veg_paved	0,009	fraction vegetation over paved area of total area
frac_veg_unpaved	0,127	fraction vegetation over unpaved area of total area
frac_veg_build	0,004	fraction vegetation over build up area of total area
frac_veg_water	0,00	fraction vegetation over water body area of total area
frac_veg	0,14	fraction vegetation
ec_paved	0,97699	fraction Ea/Ep for paved surface
c_paved	0,74	Precipitation discharge fraction from paved surface to sewer system
s_paved	0,02	
r_paved	0,00	Precipitation runoff fraction from paved surface to water bodies
i_paved	0,24	Precipitation infiltration fraction from paved surface to unsat. zone
ec_unpaved	1	fraction Ea/Ep for unpaved surface
c_unpaved	0,00	Precipitation discharge fraction from unpaved surface to sewer system
s_unpaved	0,00	
r_unpaved	0,00	Precipitation runoff fraction from unpaved surface to water bodies
i_unpaved	1	Precipitation infiltration fraction from unpaved surface to unsat. zone
ec_build	0,924	fraction Ea/Ep for build up area
c_build	0,83	Precipitation discharge fraction from build up area to sewer system
s_build	0,08	
r_build	0,00	Precipitation runoff fraction from build up area to water bodies
i_build	0,10	Precipitation infiltration fraction from build up area to unsat. zone
ec_water	1	fraction Ea/Ep for water surface
S_paved_int	0,41	Interception capacity of paved surfaces
S_unpaved_int	1,91	Interception capacity of unpaved surfaces
S_build_int	0,15	Interception capacity of build surfaces
DATUM	0	New datum of model (mm tov NAP)
PerSIntTreeN1	100	Nr. of days with first interception capacity trees at start of period
PerSIntTreeN2	180	Nr. of days with second interception capacity trees after period N1
ec_crop1	0,6	Crop factor to account for plant resistance to transpiration in first veg. per.
ec_crop2	0,8	Crop factor to account for plant resistance to transpiration in sec. veg. per.
SIntTreeN1	0	Interception capacity trees over first period (mm)
SIntTreeN2	3	Interception capacity trees over second period (mm)
i_water_ugw	0,08	Recession value from urban water to urban groundwater
i_water_rgw	0,00	Recession value from urban water to regional groundwater
n	0,4	porosity of top ground layer
wp_uz	0,1	Wilting point of unsaturated zone (1 = pores + solids)
fc_uz	0,25	Field capacity of unsaturated zone (1 = pores + solids)
UZmax	1000	maximum storage capacity of unsaturated zone (mm)
alfa	1.0	
beta	0,4	Parameter governing the fast percolation component
Pmax	1	Parameter governing the slow percolation component
k_ugw_rw	0	recession value from urban groundwater to regional water bodies [1/d]

c_ugw	0,2	Maximum capillary rise from urban groundwater to unsaturated zone [L/T]
frac_DWF_sep	0,15	
frac_sep_imp	0,75	
k_ugw_sewer	0	recession value leakage to sewer ≤ 1 [1/d]
k_sewer	0,0010	recession value leakage from sewer system ≤ 1 [1/d]
k_wwtp	21,2	Sewer pump discharge capacity [L/T]
k_clean_dirty	0,04786	Clean to dirty sewer discharge capacity [L/T]
D_overflow	24,0067	Combined Sewer overflow threshold [mm]
D_SSO	3,06381	Separate sewer outflow threshold [mm]
SEWER	23500	level in mm with respect to DATUM
H_water_target	18000	Target level of surface water with respect to DATUM

12.3 Validatie Arnhem-Oost

Arnhem-Oost verschilt op veel punten sterk van Prinseneiland en de Rivierenbuurt: de (gedeeltelijke) ligging op de hellende rand van de stuwwal van de Veluwe, de daarmee verband houdende tragere reactietijd van het grondwatersysteem en natuurlijke afwatering door beken, maar ook de aanwezigheid van wadi's en gescheiden rioolstelsels en de invloed van rivierwaterstanden in delen van het gebied. Zie paragraaf 2.3 voor een gebiedsbeschrijving en Bijlage D: Waterbalansmodel Arnhem-Oost voor een uitgebreide beschrijving van de beschikbare en gebruikte gebiedsinformatie en voor de bij de modelparameterisatie gevolgde procedures.

Voor de validatie van het waterbalansmodel voor Arnhem-Oost is gebruik gemaakt van metingen van beekafvoeren en grondwaterstanden in de periode 2009-2010. Er zijn onvoldoende gegevens beschikbaar voor een adequate, tijdsafhankelijke validatie op riooldebieten of uitslagdebieten vanuit het lokale oppervlaktewatersysteem op de Rijn. Ook voor de grondwaterstanden zijn slechts twee peilbuizen beschikbaar. De spaarzame beschikbaarheid van gegevens beperkt op voorhand de waarde van de validatie, gezien de ruimtelijke heterogeniteit van een aantal randvoorwaarden (dikte onverzadigde zone, beekpeilen).

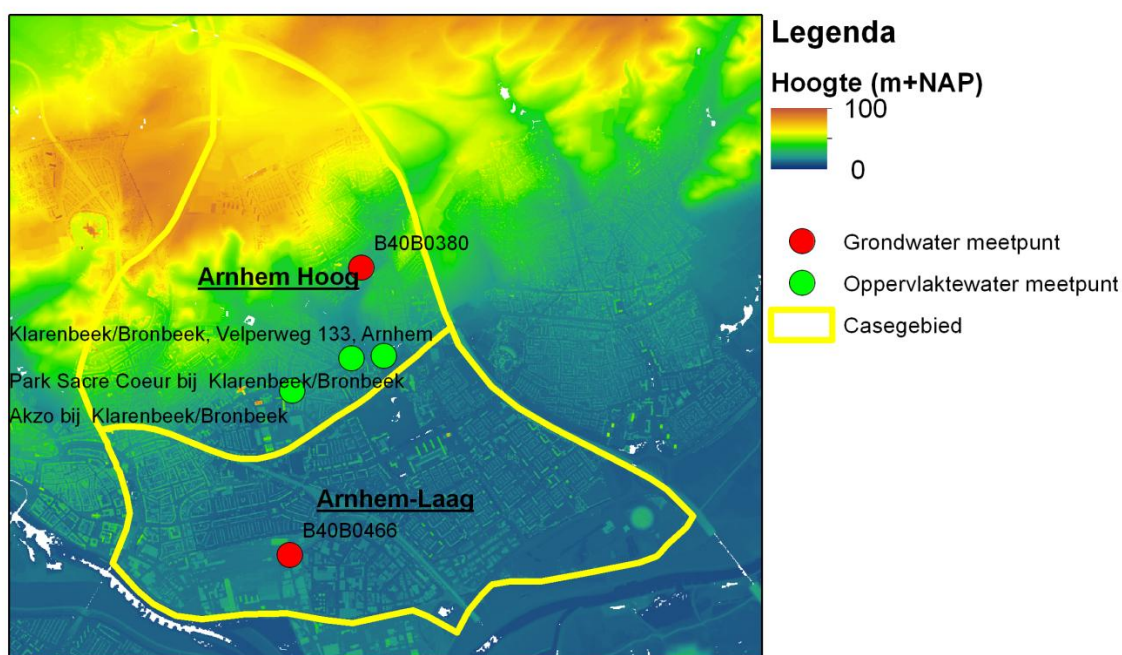
Anders dan in de Amsterdamse studiegebieden is voor Arnhem-Oost alleen een kwalitatieve validatie op basis van visuele inspectie uitgevoerd. De modelprestaties zijn niet gekwantificeerd door middel van de (log-)Nash-Sutcliffe coëfficiënt. Daarvoor waren te weinig gegevens beschikbaar.

Binnen Arnhem-Oost bestaan grote verschillen in maaiveldligging en waterhuishoudkundige kenmerken. Om het gebied modelleerbaar te maken is het gebied verdeeld in homogene eenheden (Figuur 12.11, en zie paragraaf 0 voor uitgebreide toelichting op modelbegrenzing). Deze indeling is primair gebaseerd op de wijze van afwatering: vrij afwaterend door beken versus peilbeheerst in singels, met uitwatering op de Rijn door middel van gemalen. Omdat daarmee impliciet ook wordt ingedeeld op basis van hoogteligging, zijn de deelgebieden Arnhem-Oost Hoog en Laag gedoopt. Een alternatieve indeling onderscheidt ook nog een overgangsgebied tussen hoog en laag. Dit overgangsgebied bleek echter zo gecompliceerd, met scheef gestelde kleilagen en schijnwaterspiegels, dat het de vraag is of dit sowieso goed te modelleren is. Daarom, en vanwege de beperkte beschikbaarheid van gegevens op fijnere schaalniveaus, is gekozen om het aantal deelgebieden tot twee te beperken.

Voor zowel Arnhem-Oost Hoog als Laag zijn waterbalansen afgeleid, waarbij de uitvoer van Hoog is gebruikt als invoer voor Laag. Voor de fluxen over de grenzen tussen de deelgebieden is gebruik gemaakt van gemeten oppervlaktewaterdebieten en grondwaterstanden.

De scheiding tussen Hoog en Laag is gekozen ter hoogte van de spoorlijn Arnhem-Deventer, op basis van:

- Overgang vrij afwaterend naar poldersysteem
- Geen doorkruising van gescheiden of gemengde stelsels
- Geen doorkruising van buurten (hetgeen het bepalen van waterketenkenmerken relatief eenvoudig houdt)
- Beperkte invloed van bovenstroomse beïnvloedingsgebieden
- Duidelijke geologische verschillen
- Overgang hellend naar vlak gebied.



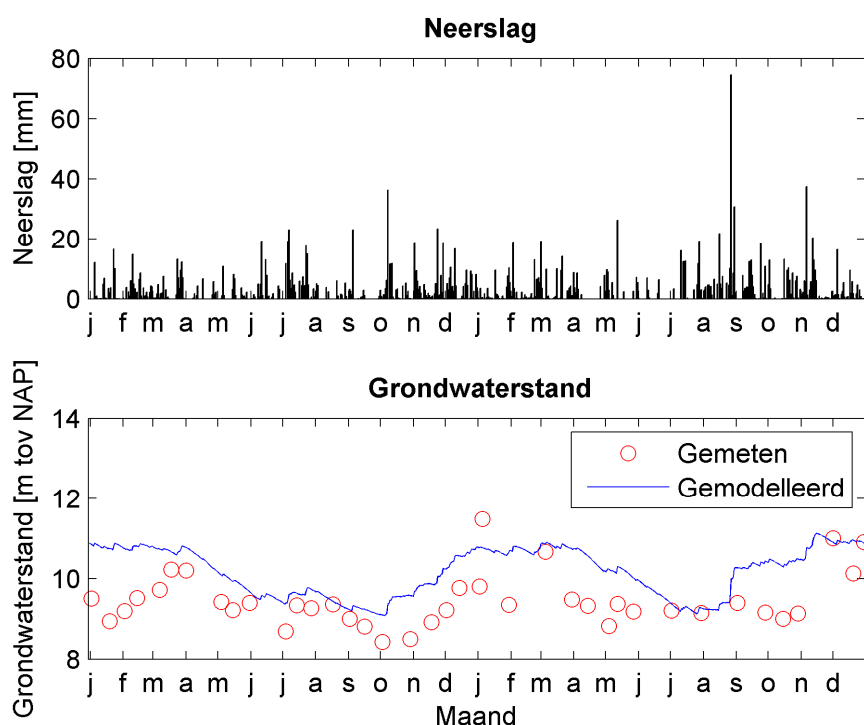
Figuur 12.11 Deelgebieden Arnhem-Oost en meetlocaties van de validatiegegevens (grondwaterstanden en beekafvoeren). Ondergrond: maaiveld (AHN2).

Per deelgebied zijn de benodigde parameterwaarden afgeleid voor het opstellen van de waterbalansen. Daar waar de eenheden van de invoerdata niet overeenkomen met de grenzen van het interessegebied zijn op basis van het oppervlak en het aantal inwoners de parameterwaarde van elk van de deelgebieden geschat. en gedetailleerde beschrijving van de afleiding van parameterwaarden is te vinden in Bijlage D: Waterbalansmodel Arnhem-Oost.

Resultaten Arnhem-Oost Laag

Voor Arnhem-Oost Laag is een validatie uitgevoerd op de grondwaterstand in peilbuis B40B0466. Figuur 12.12 toont de gemodelleerde en gemeten grondwaterstand in Arnhem-Oost Laag. De grondwaterstand is in het model structureel iets hoger. Het is niet te zeggen in

hoeverre dit te wijten is aan een suboptimale modelparameterisatie of aan lokale omstandigheden die maken dat de grondwaterstand in de peilbuis lager is dan het gemiddelde voor Arnhem-Oost Laag. Door de ligging van de beschouwde peilbuis dicht bij de Rijn en IJssel is er mogelijk sprake van een grotere invloed van rivierstanden dan het model aanneemt voor de gebiedsgemiddelde situatie. Bemoedigend en waardevol is dat de grondwaterstandsdynamiek wel correct wordt gesimuleerd, met name in het tweede modeljaar (2010). De prestaties in 2010 zijn belangrijker dan in 2009, dat als inrekenjaar voor het model moet worden beschouwd gezien de traagheid van het grondwatersysteem in Arnhem-Oost als geheel.



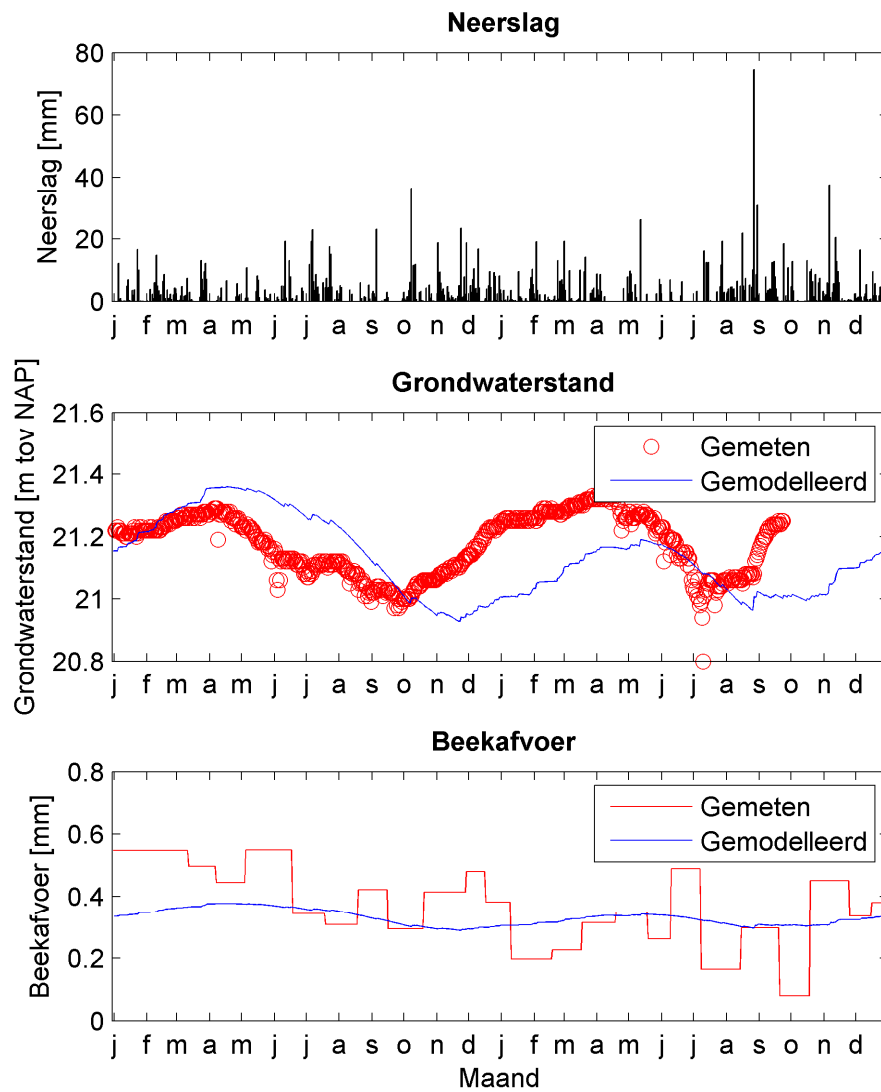
Figuur 12.12 Neerslag en grondwaterstand gemodelleerd en gemeten in Arnhem-Oost Laag voor 2009-2010.

Resultaten Arnhem-Oost Hoog

Voor Arnhem-Oost Hoog is een validatie uitgevoerd op de grondwaterstand in peilbuis B40B0380 en de afvoer van het complex Klarenbeek-Molenbeek-Beek op de Paasberg-Bronbeek. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 12.13.

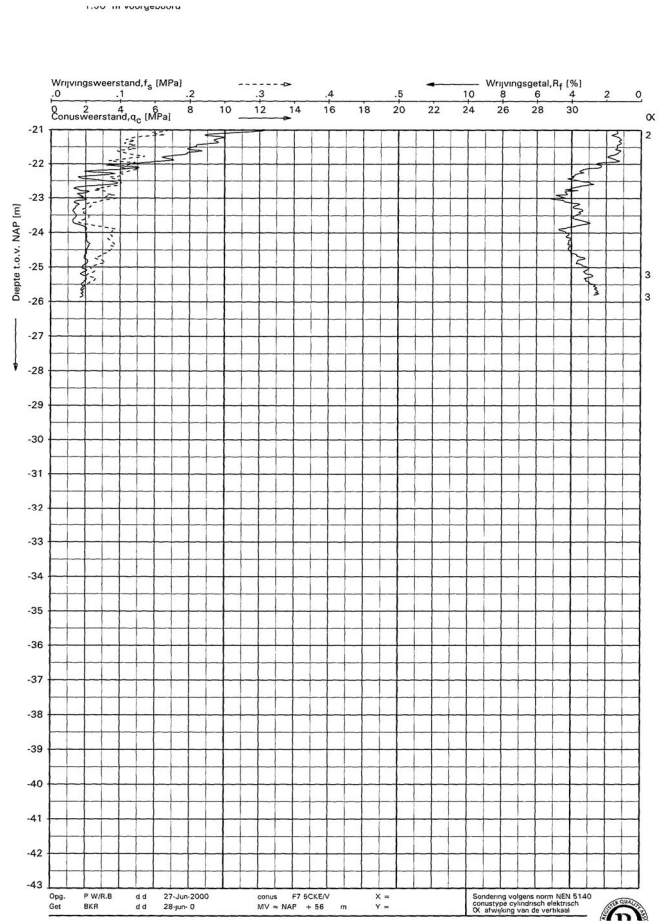
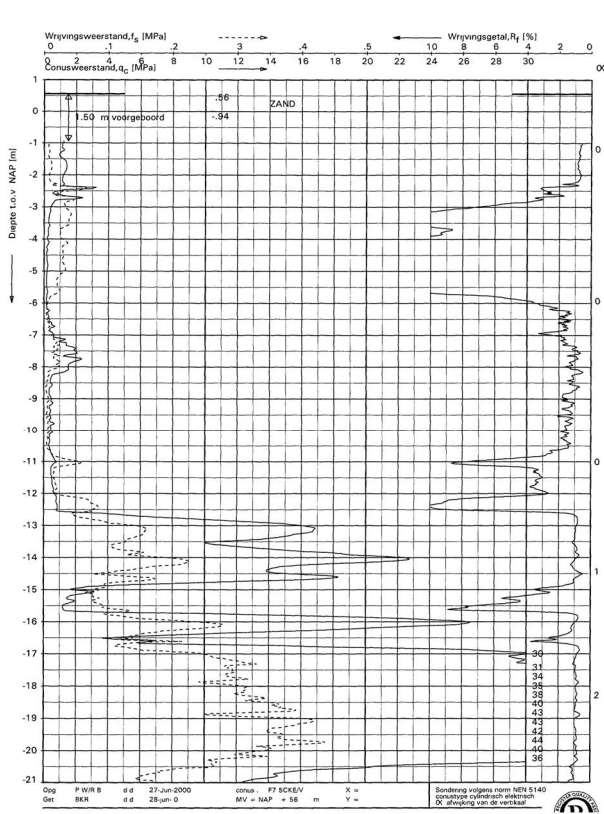
Zowel in de gemiddelde grondwaterstand als in de grondwaterdynamiek valt op dat de timing niet overeenkomt. Het lijkt alsof het model steeds verder achterop raakt bij de metingen. Vermoed wordt dat de parameterisatie van de onverzadigde zone en/of de uitwisseling met het regionale grondwatersysteem hierin een rol spelen. Meer duidelijkheid hieromtrent kan alleen worden verkregen door meer meetgegevens, een nadere analyse van de modelresultaten en eventueel een gevoeligheidsanalyse zoals uitgevoerd voor Prinseneiland.

Over de prestaties voor de beekafvoeren kan niet veel gezegd worden, anders dan dat de orde van grootte goed gesimuleerd wordt. Een duidelijk patroon is moeilijk te herkennen in de gemeten beekafvoeren, terwijl in de gemodelleerde beekafvoeren een seizoenspatroon is te herkennen. Op basis van de grondwaterdynamiek mag dit ook verwacht worden.

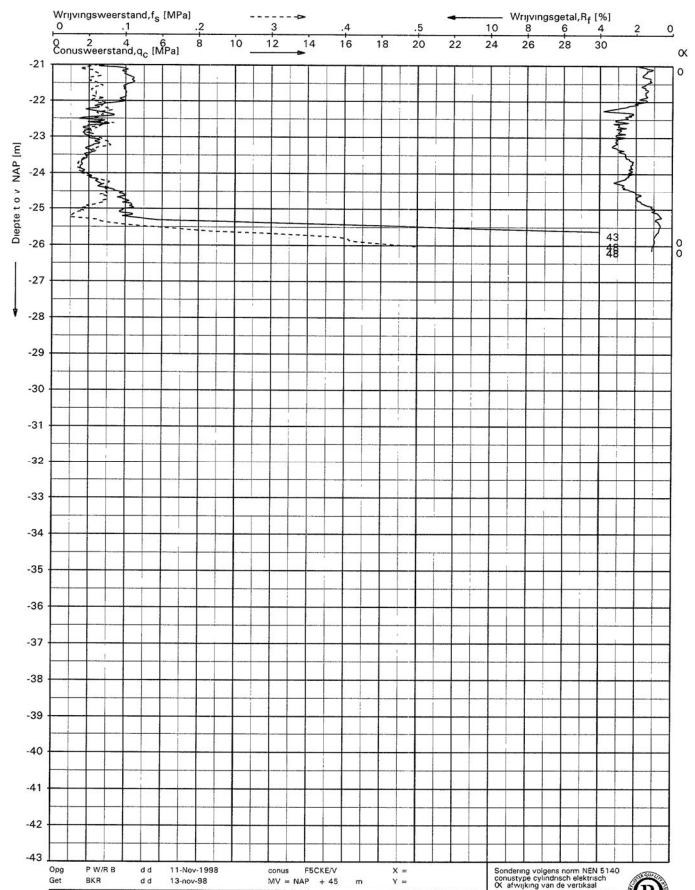
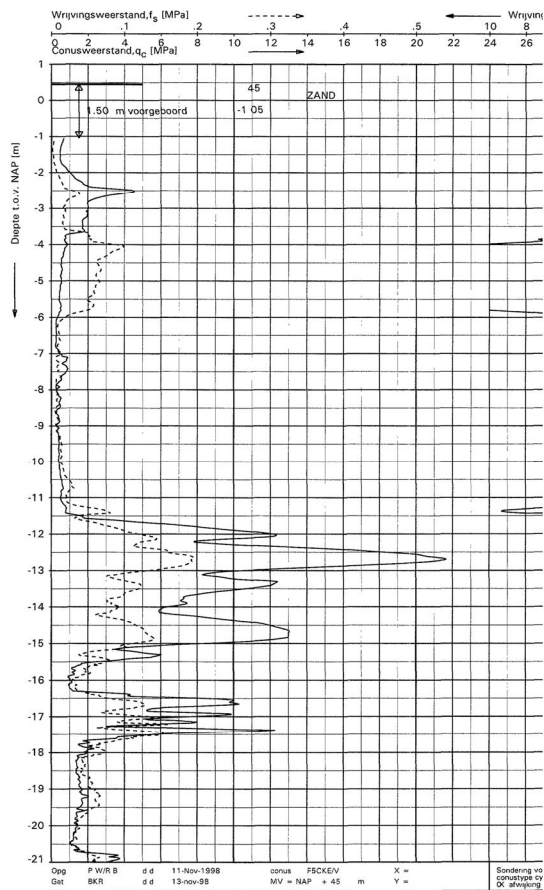


Figuur 12.13 Neerslag en grondwaterstand gemodelleerd en gemeten in Arnhem-Oost Hoog voor 2009-2010.

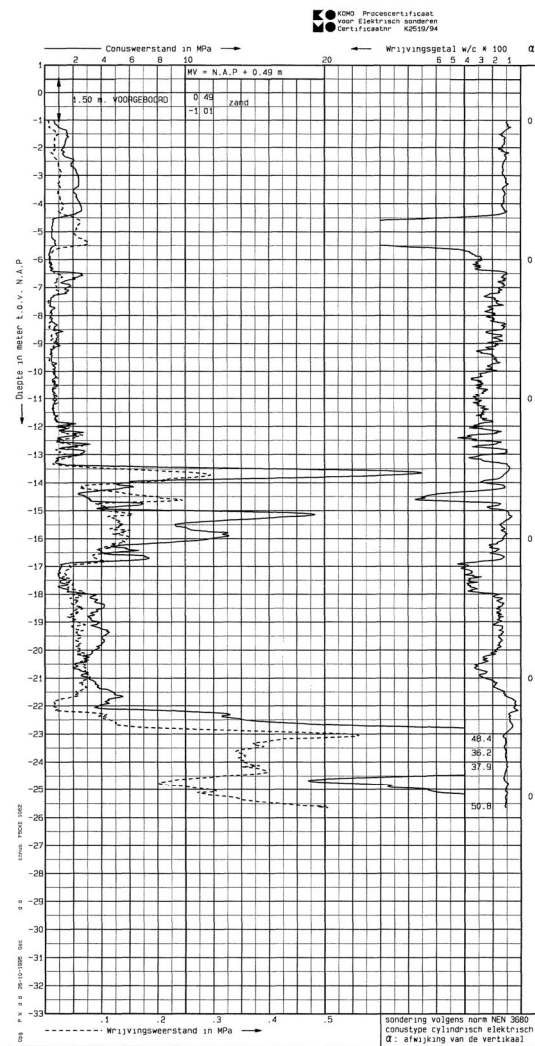
13 Bijlage E: Sonderingen Rivierenbuurt



Sondering S25G01857



Sondering S25G06443



Sondering S25G01191

14 Bijlage F: Overzicht modelparameters waterbalansmodel

Verklaring categorieën	A = procesparameter, kunnen ongewijzigd worden overgenomen uit dit rapport, tenzij uit lokale gegevens blijkt dat aanpassingen gewenst zijn	A
	A* = idem, echter schaling per fractie landgebruikstype nodig om tot modelinvoerwaarde te komen	A*
	B = gebiedsparameter, goed te bepalen op basis van beschikbare gegevens en (eventueel) een beperkt aanvullend veldonderzoek	B
	C = gebiedsparameter, niet of moeilijk te bepalen op basis van beschikbare gegevens	C

Parameter	Uitleg	Categorie
frac_paved	Fractie gebied verhard	B
frac_unpaved	Fractie gebied onverhard	B
frac_built	Fractie gebied bebouwd	B
frac_water	Fractie gebied oppervlakte water	B
frac_veg_paved	Fractie gebied verhard en overhangen door bomen	B
frac_veg_unpaved	Fractie gebied onverhard en overhangen door bomen	B
frac_veg_built	Fractie gebied bebouwd en overhangen door bomen	B
frac_veg_water	Fractie gebied oppervlakte water en overhangen door bomen	B
frac_veg	Fractie gebied overhangen door bomen	B
ec_paved	Verdampingscompensatiefactor verhard gebied	A*
c_paved	Fractie netto neerslag op verhard gebied naar gemengde riolering	A*
s_paved	Fractie netto neerslag op verhard gebied naar gescheiden riolering	A*
r_paved	Fractie netto neerslag op verhard gebied naar oppervlaktewater	A*
i_paved	Fractie netto neerslag op verhard gebied naar ondergrond	A*
ec_unpaved	Verdampingscompensatiefactor onverhard gebied	A*
c_unpaved	Fractie netto neerslag op onverhard gebied naar gemengde riolering	A*
s_unpaved	Fractie netto neerslag op onverhard gebied naar gescheiden riolering	A*
r_unpaved	Fractie netto neerslag op onverhard gebied naar oppervlaktewater	A*
i_unpaved	Fractie netto neerslag op onverhard gebied naar ondergrond	A*
ec_built	Verdampingscompensatiefactor bebouwd gebied	A*
c_built	Fractie netto neerslag op bebouwd gebied naar gemengde riolering	A*
s_built	Fractie netto neerslag op bebouwd gebied naar gescheiden riolering	A*
r_built	Fractie netto neerslag op bebouwd gebied naar oppervlaktewater	A*
i_built	Fractie netto neerslag op bebouwd gebied naar ondergrond	A*
ec_water	Verdampingscompensatiefactor stedelijk oppervlaktewater	A*
S_paved_int	Interceptiecapaciteit verhard gebied	A
S_unpaved_int	Interceptiecapaciteit onverhard gebied	A

S_built_int	Interceptiecapaciteit bebouwd gebied	A
DATUM	Model referentieniveau	B
PerSIntTreeN1	Begin groeiseizoen	A
PerSIntTreeN2	Lengte groeiseizoen	A
ec_crop1	Gewastranspiratiefactor over eerste periode	A
ec_crop2	Gewastranspiratiefactor over tweede periode	A
SIntTreeN1	Interceptiecapaciteit bomen over eerste periode	A
SIntTreeN2	Interceptiecapaciteit bomen over tweede periode	A
i_water_ugw	Evenredigheidsconstante stroming stedelijk oppervlaktewater naar stedelijk grondwater	C
i_water_rgw	Evenredigheidsconstante stroming stedelijk oppervlaktewater naar regionaal grondwater	C
n	Porositeit van de grond	B
wp_uz	Verwelkingspunt van de onverzadigde zone	B
fc_uz	Veldcapaciteit van de onverzadigde zone	B
UZmax	Maximale bergingscapaciteit van de onverzadigde zone	B
alfa	Vormparameter snelle percolatie component	C
beta	Vormparameter snelle percolatie component	C
Pmax	Maximum stroming langzame percolatie component	C
Lp	Vormparameter gewastranspiratie reductie a.g.v. watertekort	A
k_ugw_rw	Evenredigheidsconstante stroming stedelijk grondwater naar regionaal oppervlakte water	C
c_ugw	Maximum stroming capillaire opstijging	B
frac_DWF_sep	Fractie afvalwater huishoudens naar gescheiden stelsel	B
frac_sep_imp	Fractie gescheiden stelsel verbeterd uitgevoerd	B
k_ugw_sewer	Evenredigheidsconstante stroming stedelijk grondwater naar riolering	C
k_sewer	Evenredigheidsconstante lekkage van riolering naar onverzadigde zone	C
k_wwtp	Maximale pompdebiet gemengde riolering	B
k_clean_dirty	Maximaal overpompdebiet verbeterd gescheiden rioleringsstelsel	B
D_overflow	Effectieve berging in gemengd rioleringsstelsel	B
D_SSO	Effectieve berging in regenwaterriool verbeterd gescheiden stelsel i.v.m. overpompen	B
SEWER	Referentieniveau rioleringsstelsel (BOB)	B