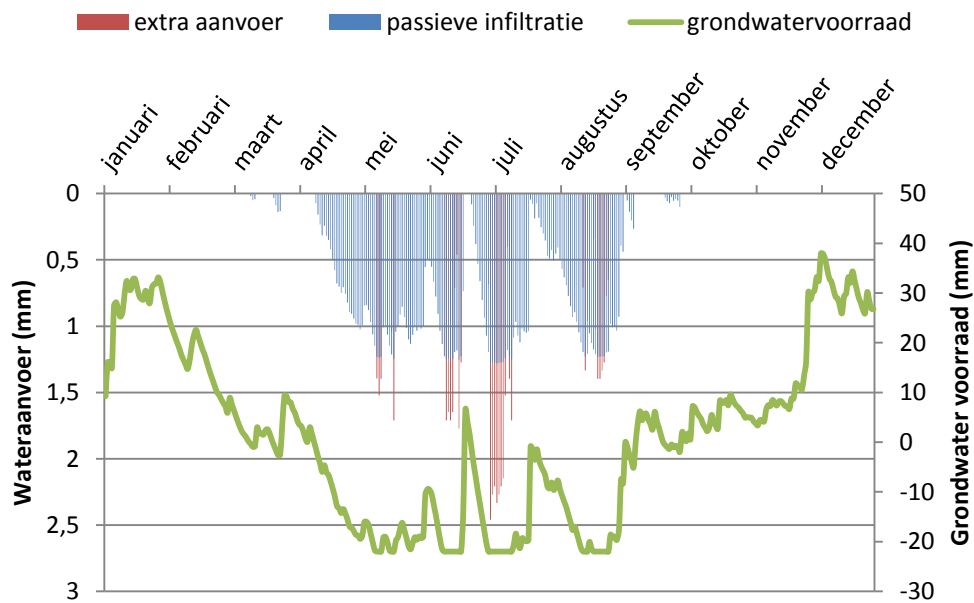


# Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden



16 oktober 2013



## Colofon

Titel:	Studie naar de huidige en toekomstige waterbehoefte van stedelijke gebieden
Status:	Definitief
Versie:	Revisie 2
Opdrachtgever:	Ministerie van Infrastructuur & Milieu, DG Ruimte en Water Deltaprogramma: Deelprogramma Nieuwbouw en Herstructurering Postbus 20901 2500 EX Den Haag
Begeleidingscommissie	Dhr. Han Frankfort Dhr. Christiaan Wallet Dhr. Tjaart Vos Dhr. Ruud Theunissen Dhr. Dolf Kern
Auteurs:	Dr. ir. R.E. de Graaf ir. B. Roeffen ing. T. den Ouden ing. B. Souwer
Datum:	16 oktober 2013

Contactgegevens:  
DeltaSync BV  
Dr. ir. Rutger de Graaf  
Molengraaffsingel 12-14  
2629 JD Delft  
rutger@deltasync.nl  
Telefoon: 015-2561872/ 06-16308790  
KVK Delft nr. 28117488 ING BANK 667.576.924  
BTW nr. NL1869.46.491.B01



## Samenvatting

### Inleiding

In het Deltaprogramma, en meer specifiek in de Deelprogramma's Nieuwbouw & Herstructurering en Zoetwater, is al langere tijd behoefte aan meer inzicht in de watervraag van stedelijk gebied. Ook is meer kennis gewenst over de extra watervraag die nodig is voor het handhaven van een juist grondwaterpeil. Dit is van belang om schade aan funderingen en aan stedelijke boven- en ondergrondse infrastructuur te voorkomen. Daarom is in deze studie de watervraag van de stad, de externe watervraag en de extra externe watervraag ten gevolge van actief grondwaterpeilbeheer bestudeerd, zowel in de huidige situatie als in de toekomst.

### Aanpak, toepasbaarheid en beperkingen

In deze studie zijn gebiedspecifieke processen en factoren zo veel mogelijk buiten beschouwing gelaten om een algemeen beeld te verkrijgen van de stedelijke watervraag. Dit betekent dat alleen die processen en factoren zijn meegenomen die in alle steden spelen. Dankzij deze aanpak konden de onderzoeksvragen van deze studie worden beantwoord. Tegelijkertijd is de toepasbaarheid van de resultaten in specifieke gebiedsstudies op lokaal niveau beperkt. Hiervoor is lokale gebiedskennis en een meer gedetailleerdere analyse nodig.

### Stedelijk gebied in Nederland

Het stedelijk gebied in Nederland beslaat 14% van het totale oppervlak. In dit gebied woont tweederde van de Nederlandse bevolking. Het stedelijk gebied bestaat voor 33% uit verharding.

### Watervraag van de stad

De totale watervraag van het totale stedelijke gebied in Nederland bedraagt  $4.2 \text{ km}^3$  in een gemiddeld jaar. Dit komt overeen met 812 mm per jaar indien deze hoeveelheid water over het volledige stedelijke gebied van heel Nederland zou worden uitgesmeerd. Uit dit onderzoek blijkt dat de watervraag bijna drie keer zo hoog is dan de  $1.5 \text{ km}^3$  waarvan in het deelprogramma Zoetwater wordt uitgegaan. De watervraag in het stedelijk gebied is per  $\text{m}^2$  ruim 35% hoger dan de watervraag van het landelijke gebied. De stedelijke watervraag is circa 18% van de totale watervraag van  $23 \text{ km}^3$  van Nederland als geheel. Wanneer stedelijke verdamping afgezonderd wordt beschouwd dan bedraagt de watervraag  $1.9 \text{ km}^3$ . Dit is 27% hoger dan waar in het deelprogramma Zoetwater van wordt uitgegaan.

### Externe watervraag van de stad

Gemiddeld over het gehele jaar valt er voldoende neerslag om de watervraag van de stad te compenseren. In de zomer is de verdamping echter groter dan de neerslag. Hierdoor ontstaat een externe watervraag. De externe watervraag is dat deel van de watervraag dat niet door lokale neerslag of vanuit lokale waterberging gedekt kan worden. Voor een gemiddelde stad in Laag Nederland bedraagt deze externe vraag 36-147 mm in een gemiddeld jaar. De externe watervraag van een gemiddelde stad in Hoog Nederland bedraagt 0 - 36 mm in een gemiddeld jaar.

### **Externe watervraag als gevolg van actief grondwaterpeilbeheer**

De hoeveelheid extra water die in Laag Nederland nodig is om ten opzichte van een gemiddeld jaar de peilfluctuatie van het grondwater in een droog jaar en zeer droog jaar niet toe te laten nemen (van belang om schade te voorkomen) bedraagt:

- In een droog jaar gemiddeld 55 mm. Dit is een toename van ca. 60-100% ten opzichte van een gemiddeld jaar.
- In een zeer droog jaar gemiddeld 102 mm. Dit is een toename van 100 à 200 % ten opzichte van een gemiddeld jaar.
- Zelfs wanneer deze extra hoeveelheid water zou worden aangevoerd naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om relatief kleine hoeveelheden water, namelijk 0.16 km<sup>3</sup> (droog jaar) en 0.3 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar), ten opzichte de totale waterbalans van Nederland. Deze vraag doet zich echter voor in de zomermaanden van het jaar, waarin de waterbeschikbaarheid al onder druk staat.

### **Externe watervraag als gevolg van actief grondwaterpeilbeheer bij klimaatverandering**

De toename in watervraag in Laag Nederland voor het vasthouden van grondwaterpeilen van een gemiddeld jaar in een zeer droog jaar in de toekomst bij klimaatverandering bedraagt:

- 107 mm gemiddeld in een zeer droog jaar in G scenario. Dit is 2 à 3 keer zo hoog als in een gemiddeld jaar.
- 156 mm gemiddeld in een zeer droog jaar in het W+ scenario. Dit is 2.5 à 4 keer zo hoog als in een gemiddeld jaar.
- Ook in dit geval gaat het om relatief kleine totale hoeveelheden ten opzichte van de nationale waterbalans. Zelfs wanneer deze extra hoeveelheid water zou worden aangevoerd naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om 0.31 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar, G) en 0.45 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar, W+). Deze vraag doet zich echter voor in de zomermaanden van het jaar, waarin de waterbeschikbaarheid al onder druk staat.

### **Conclusies en aanbevelingen**

In kubieke kilometers ten opzichte van de totale Nederlandse watervraag (23 km<sup>3</sup>) is de toename ten gevolge van actief grondwaterpeilbeheer beperkt, maar de grote concentratie van deze vraag binnen enkele maanden van het jaar, plus het feit dat deze vraag juist optreedt in een periode dat de waterbeschikbaarheid onder druk staat maakt dat deze extra externe stedelijke watervraag bepaald niet verwaarloosd kan worden. Uit de recent uitgevoerde knelpuntanalyse zoetwater blijkt dat er in Nederland ook zonder de extra watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer in droge jaren in de toekomst op meerdere plaatsen tekorten kunnen optreden. Een extra watervraag vanuit de stad zal dit probleem verder vergroten, zeker in de sterk verstedelijkte regio's in Laag Nederland. Daarom wordt aanbevolen de stedelijke watervraag mee te nemen als standaardcomponent van alle landelijke watermanagement studies. Hiervoor is het nodig dat er meer kennis wordt ontwikkeld over de stedelijke watervraag en specifiek de stedelijke verdamping en stedelijke grondwaterberging. Verder wordt aanbevolen de ontwikkeling van technieken voor actief grondwaterpeilbeheer te bevorderen.

## Inhoudsopgave

<b>Colofon</b> .....	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Inleiding</b> .....	<b>9</b>
1.1 Achtergrond.....	9
1.2 Doelstelling van het project.....	9
1.3 Onderzoeksvragen .....	10
1.4 Definitie stedelijke watervraag .....	10
1.5 Afbakening en aanpak .....	11
<b>2. Landgebruik van een gemiddelde stad</b> .....	<b>13</b>
2.1 Definitie van een stad.....	13
2.2 Afbakening Hoog Nederland en Laag Nederland .....	15
2.3 Landgebruik .....	16
<b>3. Vergelijking met landelijk gebied</b> .....	<b>19</b>
3.1 Watervraag stedelijk gebied in eerder onderzoek .....	19
3.2 Componenten van stedelijke watervraag.....	19
3.3 Stedelijke verdamping.....	20
3.4 Afvoer afvalwater naar rioolwaterzuivering.....	24
3.5 Afvoer hemelwater naar rioolwaterzuivering.....	24
3.6 De totale stedelijke watervraag.....	25
3.7 Conclusies .....	25
<b>4. Externe stedelijke watervraag</b> .....	<b>27</b>
4.1 Neerslagoverschotten en -tekorten .....	27
4.2 Ondergrens externe stedelijke watervraag.....	28
4.3 Bovengrens externe stedelijke watervraag.....	29
4.4 Conclusies .....	31
<b>5. Waterberging en de externe stedelijke watervraag</b> .....	<b>33</b>
5.1 De invloed van waterberging .....	33
5.2 De omvang van waterberging in de stad .....	35
5.3 Externe watervraag van een gemiddelde stad .....	37
5.4 Benadering extra watervraag actief grondwaterpeilbeheer.....	38
5.5 Conclusies externe stedelijke watervraag.....	38
<b>6. De externe stedelijke watervraag bij actief grondwaterpeilbeheer</b> .....	<b>41</b>
6.1 Interactie tussen grondwater en oppervlaktewater .....	41
6.2 Varianten van actief grondwaterpeilbeheer.....	42
6.3 Conclusies actief grondwaterpeilbeheer.....	47
<b>7. Mogelijke effecten van klimaatverandering</b> .....	<b>49</b>
7.1 Invloed op maximale externe watervraag.....	49
7.2 Actief grondwaterpeilbeheer en klimaatverandering .....	49
7.3 Conclusie klimaatverandering .....	52
<b>8. Overzicht, toepassing en beperkingen</b> .....	<b>53</b>
8.1 Overzicht resultaten.....	53
8.2 Implicaties van de resultaten .....	54
8.3 Kritische reflectie op de resultaten.....	55
<b>9. Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>57</b>
9.1 Conclusies .....	57
9.2 Aanbevelingen .....	58
<b>Bijlagen</b> .....	<b>59</b>
<b>Referenties</b> .....	<b>72</b>





## 1. Inleiding

### 1.1 Achtergrond

Stedelijk gebied is één van de negen gebruiksfuncties die in het zoetwaterdossier worden onderscheiden. In het Deltaprogramma, en meer specifiek in de Deelprogramma's Nieuwbouw & Herstructurering en Zoetwater, is al langere tijd behoefte aan meer inzicht in de watervraag van stedelijk gebied. Dit is van belang omdat onderkend wordt dat vele functies in stedelijk gebied afhankelijk zijn van voldoende zoet water. Een tekort aan zoet water in stedelijk gebied kan leiden tot grote schades. De watervraag van stedelijk gebied is echter moeilijk apart te kwantificeren, want het maakt onderdeel uit van de regionale watervraag voor doorspoeling en peilbeheer (van oppervlaktewater). Daarnaast is ook de watervraag, of de extra watervraag voor het handhaven van een juist grondwaterpeil, van belang om schade aan funderingen te voorkomen. Voor zover dit door actieve infiltratie van oppervlaktewater wordt bereikt, leidt dit tot een extra watervraag aan het oppervlaktewater. In diverse onderzoeken zijn bovenstaande thema's nader onderzocht en zijn gedeeltelijke antwoorden op bovenstaande de vragen geleverd:

- Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares, 2012
- Fysieke bouwstenen voor de knelpuntenanalyse nieuwbouw en herstructurering, Climate Proof Cities, 2011
- Schades door watertekorten en –overschotten in stedelijk gebied, Deltares, 2012
- Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool, Deltares, 2013
- Naar een bestendige stedelijke waterbalans, Deltares, 2013

De onderzoeken die al zijn gedaan hebben veel waardevolle en praktische kennis opgeleverd. Toch is de ogenschijnlijk eenvoudige vraag: 'hoeveel water heeft een stad eigenlijk nodig?' nog niet te beantwoorden. Wanneer op detailniveau wordt nagedacht over deze vraag dan blijken de benodigde gegevens over de stedelijke waterbalans te ontbreken. Data verzamelen in alle Nederlandse steden om het benodigde landelijke beeld te verkrijgen zou te veel tijd en kosten met zich meebrengen. En wanneer kunnen we eigenlijk spreken van stedelijk gebied? Extrapoleren van de gegevens van één stad is niet betrouwbaar want iedere stad heeft zijn eigen stedenbouwkundige kenmerken en geografische kenmerken. Ook kan de samenhang tussen waterketen en watersysteem complex zijn, net als de interacties tussen het regionale en het stedelijk watersysteem zowel met betrekking tot grondwater als oppervlaktewater. In de toekomst komen hier nog onzekerheden bij met betrekking tot de effecten van klimaatverandering op het watersysteem en de watervraag.

### 1.2 Doelstelling van het project

De doelstelling van het project is om te komen tot inzicht in de waterbehoefte van het stedelijk gebied in Hoog-Nederland en Laag-Nederland, nu en in de toekomst. Voor de toekomstige waterbehoefte van de stad zal gebruik worden gemaakt van de deltasenario's. Het

resultaat van deze studie is meer inzicht in de nationale watervraag van het stedelijk gebied en hoe deze vraag zich verhoudt tot de overige watervragende functies. Daarnaast gaat deze studie in op de mogelijke extra landelijke watervraag die ontstaat wanneer in Laag-Nederland actief grondwaterpeil beheer wordt ingevoerd om schade aan funderingen en infrastructuur te voorkomen in tijden van droogten bij klimaatverandering. Dit is van belang in het kader van het Deltaprogramma en de te nemen Deltabeslissingen.

### 1.3 Onderzoeksvragen

Concrete onderzoeksvragen die in de voorgestelde studie worden onderzocht zijn:

- A. Hoe groot is de watervraag van het stedelijk gebied, uitgesplitst naar Laag Nederland en Hoog Nederland, nu en in de toekomst?
- B. Hoe groot is de extra watervraag van stedelijk gebied bij invoering van actief grondwaterpeilbeheer in stedelijk gebied?

In tabel 1.1 worden deze vragen verder opgesplitst.

**Tabel 1.1:** Onderzoeksvragen en overzicht van de hoofdstukken waar deze vragen worden behandeld.

Onderzoeksvraag	Hoofdstuk
1. Wat is een stad?	2
2. Wat is de watervraag van het stedelijk gebied in Nederland?	3
3. Wat is de invloed van opsplitsen naar Hoog Nederland en Laag Nederland?	2, 5
4. Wat is de ondergrens van externe stedelijke watervraag?	4
5. Wat is de bovengrens van externe stedelijke watervraag?	4
6. Hoe hangt de externe stedelijke watervraag af van waterbergingscapaciteit?	5
7. Hoe hangt de externe stedelijke watervraag af van peilbeheer van grondwater en oppervlaktewater?	6
8. Wat is de invloed van klimaatscenario's?	7

### 1.4 Definitie stedelijke watervraag

De waterbalans van een stad dient als basis voor het bepalen van de watervraag. Al het water dat een stad verlaat, leidt tot een stedelijke watervraag. Tabel 1.2 geeft een samenvatting van de componenten van de waterbalans. Het deel van deze watervraag dat niet door lokale berging, kwel of lokale regenval kan worden gedekt is de externe stedelijke watervraag.

**Tabel 1.2:** Componenten van de stedelijke waterbalans onderverdeeld naar wateraanbod en watervraag.

In (wateraanbod)	Uit (watervraag)
Neerslag	Verdamping
Kwel	Inzijging naar diepere grondwater
Externe aanvoer drinkwater	Afvoer hemelwater naar afvalwaterzuivering
Externe aanvoer industriewater	Afvoer afvalwater naar afvalwaterzuivering
Inlaat vanuit regionaal oppervlaktewater	Afvoer water naar regionaal oppervlaktewater
Verandering berging	

## 1.5 Afbakening en aanpak

In deze studie wordt gestreefd naar een balans tussen nauwkeurigheid en representativiteit. Alleen die factoren en processen die in alle Nederlandse steden een rol spelen worden meegenomen. Andere factoren, hoe interessant en relevant op sommige locaties zij ook mogen zijn, worden buiten beschouwing gelaten. Omdat de uitkomsten niet gebiedspecifiek zijn, hebben zij noodzakelijkerwijs een theoretisch karakter. Het doel van de studie is dan ook niet om de stedelijke hydrologie zo nauwkeurig mogelijk te beschrijven. Hiervoor zijn al andere zeer gedegen studies verricht. Het doel is meer gericht op het opbouwen van inzicht in de algemene stedelijke watervraag, de belangrijkste invloedsfactoren en het verkrijgen van een beter beeld waar we op landelijke schaal rekening mee moeten houden wanneer actief grondwaterpeilbeheer grootschalig zou worden ingevoerd. Gebiedspecifieke processen en factoren zoals kwel, waterkwaliteit en watervraag voor doorspoeling worden daarom niet meegenomen in deze studie. Ook drinkwatervraag en industriewatervraag komen beperkt aan de orde. Deze componenten worden slechts in beschouwing genomen om een goede vergelijking te maken met de watervraag van het landelijke gebied. Bovendien zijn deze componenten van de watervraag al goed bekend. Tabel 1.3 geeft een overzicht van de componenten die in beschouwing worden genomen in deze studie.

Het geven van een algemeen geldig antwoord op de onderzoeksvraag vereist dat zoveel mogelijk gezocht moet worden naar algemeen geldende verbanden tussen stedelijke kenmerken en de watervraag van een stad. Wanneer teveel gebiedspecifieke kenmerken worden meegenomen dan verliezen de uitkomsten hun representativiteit voor de algemene situatie. De aanpak zal dus zo eenvoudig mogelijk moeten zijn, maar ook niet eenvoudiger dan dat. Daarom wordt het landgebruik van een gemiddelde Nederlandse stad afgeleid en als basis gebruikt voor de analyse.

**Tabel 1.3:** Componenten van de stedelijke waterbalans die worden meegenomen in dit rapport. Drinkwater, industriewater en de afvoer van afvalwater (tussen haakjes aangegeven) komen alleen aan de orde in een vergelijking met de watervraag van het landelijk gebied.

In (wateraanbod)	Uit (watervraag)
Neerslag	Verdamping
Inlaat vanuit regionaal oppervlaktewater	Afvoer hemelwater naar afvalwaterzuivering
Verandering berging	Afvoer water naar regionaal oppervlaktewater
(Externe aanvoer drinkwater)	(Afvoer afvalwater naar afvalwaterzuivering)
(Externe aanvoer industriewater)	



## 2. Landgebruik van een gemiddelde stad

Om antwoord te kunnen geven op de vraag wat de waterbehoefte van een stad is, dient eerst te worden gedefinieerd wat een stad is. In dit hoofdstuk zal allereerst het landgebruik van een gemiddelde stad worden afgeleid.

### 2.1 Definitie van een stad

Volgens het Van Dale woordenboek is een stad: 'uitgebreid, samenhangend geheel van huizen en gebouwen.' Vanuit deze definitie gaat het dus om gebouwen die met elkaar samenhangen, een geheel vormen en tegelijkertijd uitgebreid zijn, dus een zekere schaalgrootte hebben. Platteland wordt in de Van Dale als volgt gedefinieerd als 'het buiten de steden gelegen land.' Platteland is dus gedefinieerd als alles dat geen stad is. Hiermee is de vraag wat een stad is nog niet beantwoord, want wat is uitgebreid? En wanneer hangen gebouwen met elkaar samen en vormen ze een geheel?

Nederland wordt vaak genoemd als één van de meest verstedelijkte landen ter wereld. Dit betekent dat een relatief groot deel van de bevolking in de stad woont. In een internationaal overzicht van landen van de CIA wordt maar liefst 83% van de Nederlandse bevolking ingedeeld bij de stedelijke bevolking.<sup>1</sup> Steden zijn opgebouwd uit wijken. Wijken zijn op hun beurt opgebouwd uit buurten. Het CBS houdt een nationale database bij van alle wijken en buurten van Nederland.<sup>2</sup> Deze zijn op hun beurt geïnclassificeerd op basis van stedelijkheid in een vijftal categorieën. Volgens het overzicht in tabel 2.1 bestaat het stedelijk gebied uit de categorieën 1 t/m 4 en het platteland uit categorie 5. Omdat van alle 2671 wijken in Nederland gegevens beschikbaar zijn over het inwoneraantal, het aantal huishoudens en de oppervlakte, kan het aantal inwoners en percentage stedelijk gebied berekend worden.

**Tabel 2.1:** Classificatie van stedelijkheid volgens het CBS.

Categorie	Dichtheid
<b>1. zeer sterk stedelijk</b>	≥ 2 500 adressen per km <sup>2</sup>
<b>2. sterk stedelijk</b>	1 500– 2 500 adressen per km <sup>2</sup>
<b>3. matig stedelijk</b>	1 000–1 500 adressen per km <sup>2</sup>
<b>4. weinig stedelijk</b>	500–1 000 adressen per km <sup>2</sup>
<b>5. niet stedelijk</b>	< 500 adressen per km <sup>2</sup>

**Tabel 2.2:** Inwoneraantal per categorie van stedelijkheid

Categorie	Aantal wijken	Aantal inwoners	Percentage	Cumulatief percentage
0. geen inwoners	275	0	0%	0%
1. zeer sterk stedelijk	199	3.281.415	20%	20%
2. sterk stedelijk	399	4.433.980	27%	46%
3. matig stedelijk	318	3.289.485	20%	66%
4. weinig stedelijk	430	2.946.265	18%	83%
5. niet stedelijk	1271	2.779.185	17%	100%
<b>Totalen</b>	<b>2671</b>	<b>16.730.330</b>	<b>100%</b>	

**Tabel 2.3:** Oppervlakte per categorie van stedelijkheid. Categorie 1,2 en 3 worden in deze studie samen gedefinieerd als 'de stad' of 'het stedelijk gebied' in Nederland. Nederland omvat het totale landoppervlak plus zoete wateren: 36.750 km<sup>2</sup>)

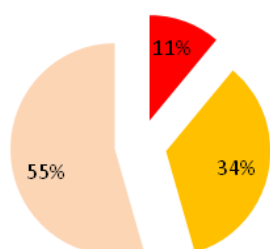
Categorie	Oppervlakte (ha)	Percentage van totaal	Cum. Percentage van totaal wijken	Cum. Percentage Nederland	Dichtheid (won/ha)
0. geen inwoners	275	0%	0%	0%	0
1. zeer sterk stedelijk	59.131	2%	2%	2%	30
2. sterk stedelijk	177.915	5%	7%	6%	11
3. matig stedelijk	278.355	8%	15%	14%	5
4. weinig stedelijk	656.907	19%	33%	32%	2
5. niet stedelijk	2.331.971	67%	100%	95%	0
<b>Totalen</b>	<b>3.504.554</b>	<b>100%</b>			

Tabel 2.2 laat zien dat het cumulatieve inwoneraantal van de categorieën 1 t/m 4 inderdaad 83% van de totale bevolking is. Dit getal stemt dus overeen met het eerdere getal van 83% stedelijke bevolking. Per categorie kan ook het aantal huishoudens, het oppervlak en de bevolkingsdichtheid worden berekend.

Tabel 2.3 laat een aantal opvallende zaken zien. Het totaal aan stedelijk gebied omvat 33% van het oppervlak van alle wijken en 32% van het totaaloppervlak van Nederland. Het verschil wordt veroorzaakt doordat niet al het oppervlak van Nederland is ingedeeld bij wijken. Wanneer we echter goed kijken naar de dichtheid dan is te zien dat categorie 4 bestaat uit wijken met een gemiddelde dichtheid van 2 woningen per hectare. Dit is nauwelijks nog stedelijk te noemen. De overige drie categorieën maken 14% van Nederland uit. Dit percentage komt dicht in de buurt van andere onderzoeken zoals 12.8% stedelijk gebied van Deltares<sup>3</sup> de 12% van de Wageningen Universiteit<sup>4</sup>, de 13% van de landgebruikkartering van CBS uit 2003 die genoemd wordt in de bovengenoemde studie van Deltares, en de 16% die

gehanteerd wordt in de knelpuntanalyse van het deltadeelprogramma *Zoetwater*.<sup>5</sup> Daarom wordt ‘de stad’ of ‘het stedelijk gebied’ in deze studie gedefinieerd als de verzameling van die wijken uit de eerste drie categorieën van tabel 2.3. In deze wijken woont tweederde van de Nederlandse bevolking op slechts 14% van het oppervlak van Nederland. Van deze 14% stedelijk gebied is 7.8% gelegen in Laag Nederland en 6.2% in Hoog Nederland. Het totale areaal stedelijk gebied is als volgt verdeeld.

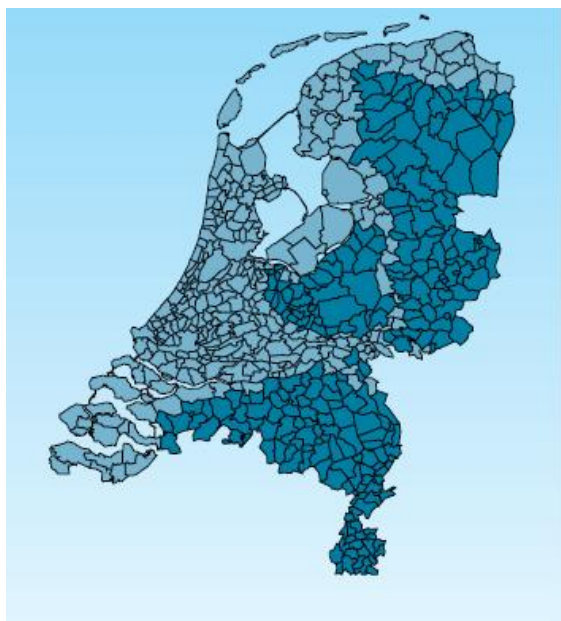
■ 1. zeer sterk stedelijk ■ 2. sterk stedelijk ■ 3. matig stedelijk



**Figuur 2.1:** Onderverdeling van het stedelijk gebied in categorieën van stedelijkheid

## 2.2 Afbakening Hoog Nederland en Laag Nederland

Er wordt in deze studie onderscheid gemaakt tussen steden in Hoog Nederland en steden in Laag Nederland. Hoog Nederland is overwegend gelegen boven de zeespiegel. De ondergrond bestaat voornamelijk uit zandgronden. Laag Nederland is in belangrijke mate gelegen onder de zeespiegel en heeft over het algemeen een ondergrond van veen en klei.



**Figuur 2.2:** Onderverdeling naar Hoog Nederland (donkerblauw) en Laag Nederland (lichtblauw) volgens het CBS<sup>6</sup>

De onderverdeling naar Hoog en Laag Nederland stemt in grote lijnen overeen met de onderverdeling zoals die ook in het Nationaal Waterplan wordt beschreven. De problematiek van droogvallende houten paalfunderingen speelt in Hoog Nederland niet of nauwelijks omdat bovengenoemde funderingen daar over het algemeen niet zijn toegepast. Omdat in deze studie wordt geredeneerd vanuit de stad, wordt deze indeling van Laag en Hoog Nederland ook in deze studie gehanteerd. In de aangescherpte knelpuntanalyse zoetwatervoorziening wordt een andere opdeling tussen Hoog Nederland en Laag Nederland gehanteerd. In dat geval wordt de opdeling gemaakt vanuit het watersysteem in delen van Nederland met peilbeheerste gebieden (laag) en delen van Nederland die vrij afwateren(hoog).<sup>7</sup>

## 2.3 Landgebruik

Door middel van een GIS analyse van het TOP10NL bestand is het landgebruik van de stad in kaart gebracht. TOP10NL is het digitale topografische basisbestand van het Kadaster en is het meest gedetailleerde product binnen de Basisregistratie Topografie (BRT). In dit bestand is met behulp van de CBS data een uitsnede gemaakt van de wijken van categorieën 1 t/m 3. Figuur 2.3 laat het landelijk overzicht zien van deze wijken. Een detailvoorbeeld van een dergelijke uitsnede, die voor heel Nederland is uitgevoerd is te vinden in figuur 2.4. Dit heeft een totaaloverzicht opgeleverd van het gemiddelde landgebruik van de stad in Nederland.

De GIS analyse biedt ook de mogelijkheid het landgebruik apart te bekijken voor een gemiddelde stad in Hoog Nederland en Laag Nederland. De verschillen zijn echter klein. Het wateroppervlak ligt iets hoger in Laag Nederland, het verhard oppervlak is ongeveer hetzelfde en het onverhard oppervlak ligt iets lager. Vanwege de kleine verschillen is ervoor wordt gekozen om in de rest van het rapport verder te rekenen met het landgebruik van een gemiddelde Nederlandse stad.

**Tabel 2.4:** Landgebruik in een gemiddelde Nederlandse stad

Terreintype	Percentage
<b>Verhard</b>	<b>32,6%</b>
Daken	9,9%
Asfaltwegen	5,1%
Klinkerbestrating	6,0%
Privaat verhard	12%
<b>Onverhard</b>	<b>61,6%</b>
<b>Water</b>	<b>5,8%</b>
<b>Totaal</b>	<b>100%</b>



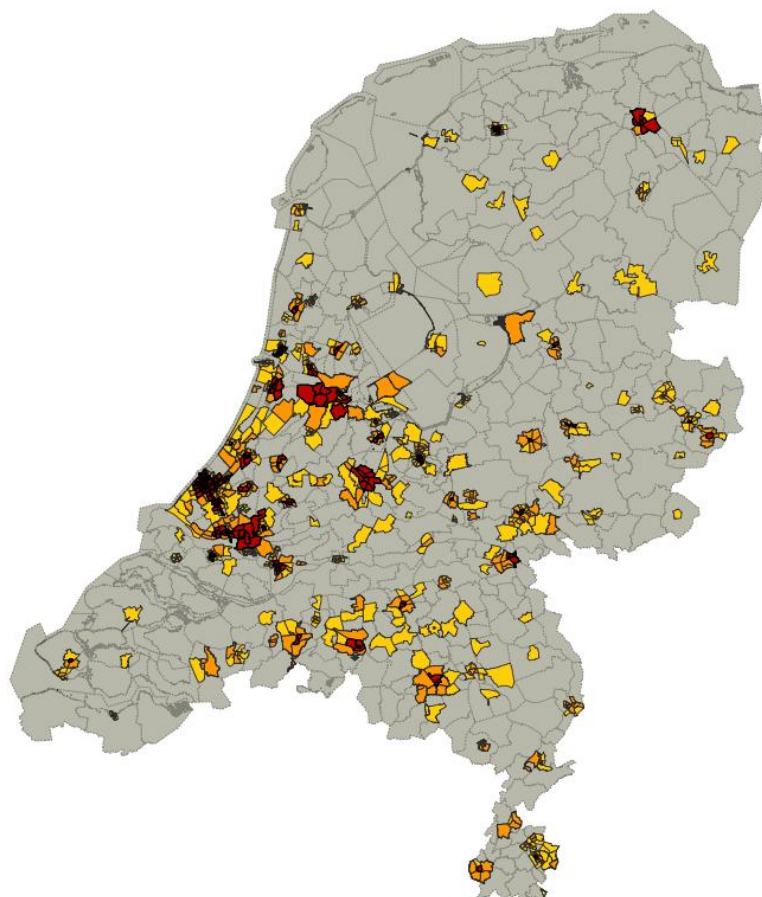
De landgebruik gegevens kunnen worden vergeleken met de gegeven van Rioned.<sup>8</sup> Uit het feitenonderzoek riolering van Rioned blijkt dat de hoeveelheid aangesloten verhard oppervlak gemiddeld per woning 200 m<sup>2</sup> bedraagt. Het aantal huishoudens in categorie 1, 2 en 3 bedraagt 5.2 miljoen, wat leidt tot een totaal op de riolering aangesloten verhard oppervlak van 1036 km<sup>2</sup>. Bij de oppervlaktes uit tabel 2.4 zijn in ieder geval de daken, asfaltwegen en bestrating grotendeels aangesloten op het riool. Samen maken deze oppervlaktes 21% van de gemiddelde stad uit. Voor heel Nederland gaat het dan 1090 km<sup>2</sup>. Dit komt goed in de buurt bij de gegevens van Rioned. Private verharding (tuinen e.d.) is vaak niet aangesloten op de riolering. Zeker bij achtertuinen watert verhard oppervlak meestal af op het onverharde deel van de tuin.

Het percentage verhard oppervlak in de gemiddelde stad lijkt wat aan de lage kant maar kan verklaard worden door het feit dat 55% van het stedelijk gebied bestaat uit categorie 3 (matig stedelijk) met een gemiddelde dichtheid van 5 woningen per hectare. De gemiddelde verhardingsgraad in het stedelijk gebied in Nederland bedraagt circa 40% volgens het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI).<sup>9</sup> Een meer recente studie van Deltares komt tot een verhardingspercentage van 47,1% maar geeft hierbij aan dat dit waarschijnlijk een overschatting is.<sup>10</sup> De tuinen zijn in deze studie als bebouwd meegerekend vanwege de resolutie van het bestand van landgebruik Nederland LGN6 (25x 25 meter).

Beide bovengenoemde percentages liggen aanmerkelijk hoger dan de 32,6% die in dit rapport is gevonden voor verhard oppervlak van een gemiddelde stad in Nederland. Dit kan verklaard worden door de verhardingsgraad van particulier terrein (tuinen e.d.). In dit rapport is voor de verhardingsgraad van tuinen een percentage van 50% aangenomen op basis van een detailstudie van STOWA en Rioned in zes zeer verschillende wijken in Amersfoort.<sup>11</sup> Wanneer we de verhardingsgraad van particulier terrein in deze studie ook op 100% zouden stellen, dan zou de gemiddelde verhardingsgraad in de analyse van dit rapport uitkomen op 44%. Dit komt goed in de buurt van eerdere schattingen. Omdat in de werkelijkheid een aanzienlijk deel van de tuinen uit groen zal bestaan wordt verder gerekend met het berekende verhardingspercentage van 32.6%.

**Tabel 2.5:** Verhard oppervlak in de stad volgens verschillende studies

Studie	Percentage
NHI	40 %
Deltares, 2013	47,1%
Dit rapport	32,6%



**Figuur 2.3:** Uitsnede stedelijke wijken uit categorie 1 t/m 3 van CBS wijken bestand. Rood geeft stedelijkheid 1, oranje is stedelijkheid 2 en geel is stedelijkheid 3.



**Figuur 2.4:** Detailvoorbeeld van GIS uitsnede van wijken 1t/m 3 van Dordrecht.

### 3. Vergelijking met landelijk gebied

In dit hoofdstuk zal worden verkend hoe groot de stedelijke watervraag is en hoe deze vraag zich verhoudt tot de watervraag van het landelijk gebied. Hierbij wordt uitgegaan van de landgebruik gegevens van een gemiddelde Nederlandse stad zoals die in het vorige hoofdstuk bepaald zijn.

#### 3.1 Watervraag stedelijk gebied in eerder onderzoek

In de aangescherpte knelpuntanalyse zoetwatervoorziening van Nederland<sup>12</sup> wordt een inschatting gegeven van het waterverbruik van de stad voor verdamping. Hierbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Verdamping stedelijk onverhard oppervlak (water en groen) is gelijk aan de verdamping van groen en wateroppervlak in het landelijk gebied
- Geen verdamping van verhard oppervlak
- Totaal percentage stedelijk gebied is 16%
- 55% verhard oppervlak

Op basis hiervan wordt in het deelprogramma Zoetwater de watervraag geschat op 1.5 km<sup>3</sup> in een gemiddeld meteorologisch jaar. Dit komt overeen met een waterschijf van 255 mm per jaar in het stedelijk gebied (16% van Nederland). De totale watervraag van Nederland wordt geschat op 23 km<sup>3</sup> voor met name landbouw maar ook drinkwater en industrie. Dit komt overeen met de gegevens van de waterbalans van Nederland in hetzelfde rapport waar verdamping en gebruik samen 23 km<sup>3</sup> per jaar nodig hebben.

Op basis van deze eerste schatting is de stedelijke watervraag 6.5% van de landelijke watervraag terwijl het percentage stedelijk gebied in Nederland volgens dezelfde studie 16% is. Het stedelijk gebied lijkt dus veel minder water nodig te hebben dan de rest van Nederland. De eerste inschatting van stedelijk watervraag lijkt daarom wat aan de lage kant. Wanneer we dezelfde schatting zouden maken met percentage van stedelijk gebied van 14% dat in het vorige hoofdstuk werd gevonden, dan ligt de stedelijke watervraag nog lager, namelijk op 1.3 km<sup>3</sup>.

#### 3.2 Componenten van stedelijke watervraag

In hoofdstuk 1 zijn de componenten van stedelijke watervraag op een rij gezet. Al het water dat uit de stad verdwijnt, is onderdeel van de stedelijke watervraag. Voor zover deze watervraag niet door lokale bronnen of lokale berging kan worden gedekt, leidt deze watervraag ook tot een externe watervraag. Water verdwijnt uit de stad als gevolg van verdamping maar ook door de afvoer van afvalwater en hemelwater naar de rioolwaterzuivering (rwzi) en door middel van afvoer van water naar oppervlaktewater en gemalen.

Om meer inzicht te krijgen in de watervraag van de stad, en hoe deze vraag zich verhoudt tot de watervraag van het platteland, worden de volgende componenten van stedelijke wa-

tervraag nader bestudeerd. Per stap wordt hierbij de eerste schatting van 1.32 km<sup>3</sup> aangescherpt.

1. Stedelijke verdamping
2. Afvoer hemelwater naar rioolwaterzuivering
3. Afvoer afvalwater naar rioolwaterzuivering t.g.v. drinkwatervraag
4. Afvoer afvalwater naar rioolwaterzuivering t.g.v. watervraag industrie

De bovenstaande componenten worden bestudeerd omdat zij geheel of grotendeels plaatsvinden in het stedelijk gebied, en onderscheidend zijn ten opzichte van het landelijk gebied. De afvoer van hemelwater naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie wordt meegenomen omdat dit deel van de regenval uit de stad wordt afgevoerd en dus in de stad niet meer gebruikt kan worden. In tijden van watertekort leidt deze component daarmee tot een externe watervraag van de stad.

Afvoer van afvalwater ten gevolge van drinkwatervraag en industriewatervraag veroorzaken ook een belangrijke component van de stedelijke watervraag. Drinkwatervraag vindt voor 66% plaats in het stedelijk gebied omdat daar 66% van de bevolking woont zoals we in het vorige hoofdstuk hebben kunnen zien. Omdat deze watervraag geconcentreerd is op slechts 14% van het oppervlak van Nederland is er sprake van een grote concentratie van drinkwaterstromen in het stedelijk gebied. Daarom wordt deze component meegenomen. Voor de industrie wordt aangenomen dat 100% plaatsvindt in het stedelijk gebied omdat de meeste industrie in stedelijke gebieden gevestigd is. De industrieën buiten de stad hebben een stedelijk karakter door de grote mate van verharding. Het optellen van de bovengenoemde vier componenten geeft een indicatie hoe de stedelijke watervraag zich verhoudt tot de watervraag in het landelijk gebied. Dit is van belang om meer inzicht op te bouwen in de stedelijke watervraag. De volgende componenten worden niet meegenomen:

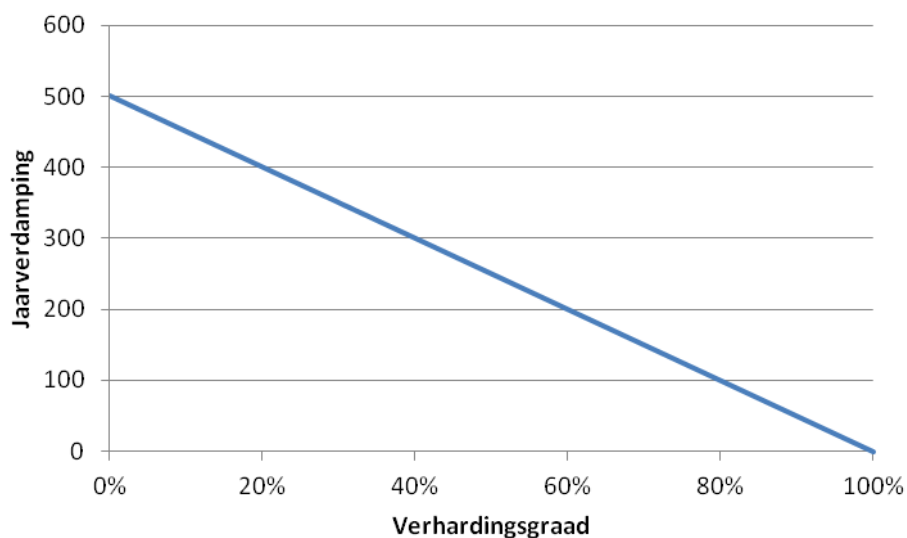
- Inlaat/afvoer regionaal oppervlaktewater
- Inzijging/kwel

Inzijging en kwel kunnen lokaal van zeer groot belang zijn, maar deze processen zijn zeer gebiedspecifiek en spelen niet in alle stedelijke gebieden een belangrijke rol. Inlaat en afvoer van en naar het oppervlaktewater wordt in deze vergelijking nog niet meegenomen omdat er vaak geen duidelijke begrenzing is tussen het oppervlaktewatersysteem van het platteland en het oppervlaktewatersysteem van de stad. Later in dit rapport komt deze component wel aan de orde. In gedetailleerde gebiedspecifieke studies dienen bovenstaande componenten uiteraard wel meegenomen te worden. Voor goede voorbeelden van dergelijke recente gebiedspecifieke studies wordt verwezen naar Hoogvliet et al.(2013)<sup>13</sup> en Rutten (2013).<sup>14</sup>

### 3.3 Stedelijke verdamping

De verdamping van een volledig onverhard oppervlak (landbouwgrond) wordt in de aangescherpte knelpuntanalyse zoetwatervoorziening geschat op 500 mm.<sup>15</sup> De verdamping van volledig verhard oppervlak wordt in hetzelfde document op 0 gesteld. In dat geval kan een lineair verband verondersteld worden tussen verhardingsgraad en verdamping omdat de fractie onverhard oppervlak proportioneel toeneemt met een afnemende verhardingsgraad.

**Schatting 1:** Op basis van figuur 3.1 zou de jaarverdamping van een gemiddelde stad met een verhardingsgraad van 32,6% op jaarbasis **337 mm** bedragen. Dit is dus aanmerkelijk hoger dan de aanvankelijk ingeschatte stedelijke verdamping van 255 mm.



**Figuur 3.1:** Verondersteld verband tussen verhardingsgraad en jaarverdamping afgeleid van gegevens uit de aangescherpte knelpuntenanalyse.

De verdamping van verhard oppervlak is minder groot is dan de verdamping van onverhard oppervlak. Toch is deze verdamping nog steeds substantieel. Zo vonden Van de Ven en Voortman (1985) in Lelystad een verdamping van 112 mm bij een bijna volledig verharde parkeerplaats.<sup>16</sup> Ook internationaal onderzoek laat zien dat uit sterk verharde gebieden minder verdamping optreedt dan uit onverharde gebieden, maar dat deze verdamping niettemin aanzienlijk is. In een studie uit het Verenigd Koninkrijk bleek uit metingen dat op jaarbasis verdamping van een dakoppervlak 19% van de neerslag bedroeg.<sup>17</sup> Ook meer recent experimenteel onderzoek uit het Verenigd Koninkrijk laat dit zien.<sup>18</sup> In de Verenigde Staten werd de stedelijke verdamping in een sterk verhard gebied (>75% verhard) ingeschat op 30% van de jaarlijkse neerslag.<sup>19</sup> In Vancouver, Canada vonden Grimmond en Oke (1991) dat verdamping 38% van de jaarlijkse stedelijke waterbalans bedroeg en in het zomerseizoen zelfs 81%.<sup>20</sup>

**Schatting 2:** Wanneer we een conservatieve aanname doen en de stedelijke verdamping van een volledig verhard oppervlak op grond van bovenstaande gegevens bijstellen naar 100 mm per jaar, en verder een lineair verband veronderstellen tussen verhardingsgraad en stedelijke verdamping, dan bedraagt de stedelijke verdamping voor een gemiddelde stad met verhardingsgraad van 32,6% **370 mm**.

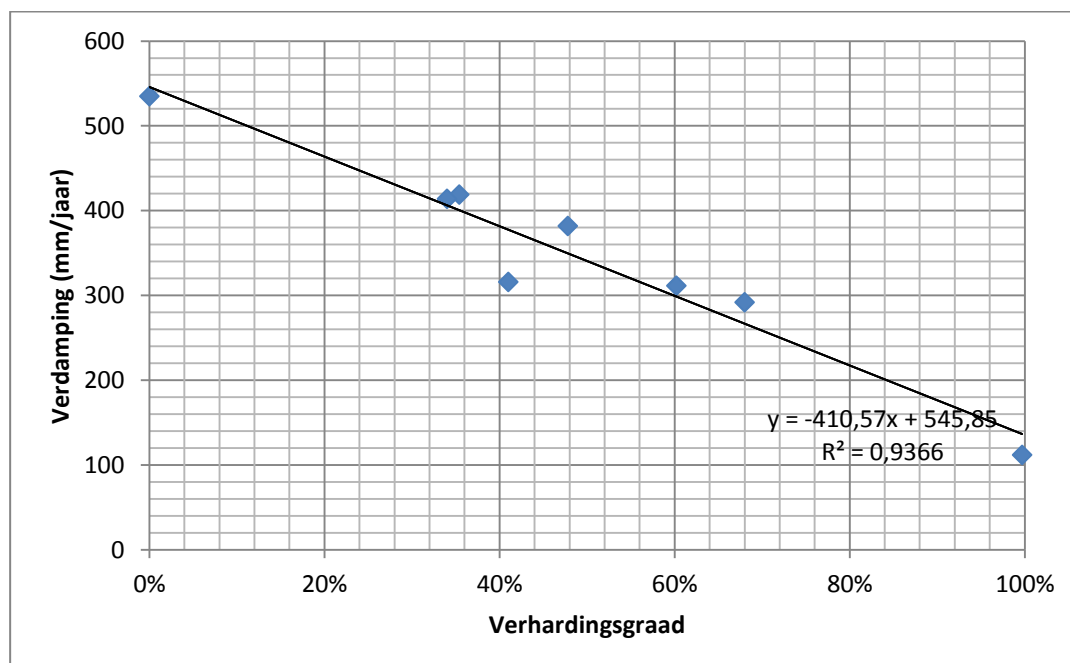
Dat een verdamping van 100 mm bij een volledig verhard oppervlak een conservatieve schatting is wordt ook ondersteund door recente bevindingen in een modelstudie naar de waterbalans van Prinseneiland, Amsterdam.<sup>21</sup> Bij een landgebruikscenario van 100% verhard

oppervlak werd in deze studie een verdamping gevonden van 174 mm op een jaarneerslag van 927 mm.

Om het veronderstelde lineaire verband tussen verhardingsgraad en stedelijke verdamping te toetsen worden een aantal onderzoeken op het gebied van stedelijk waterbeheer nader bestudeerd. Deze onderzoeken zijn gegeven in tabel 3.1. Wanneer de projecten uit tabel 3.1 worden uitgezet in een grafiek dan blijkt een vrij sterke correlatie te bestaan tussen verhard oppervlak en stedelijke verdamping. De determinatiecoëfficiënt  $R^2$  bedraagt 0.94.

**Tabel 3.1:** Stedelijke verdamping en verhardingsgraad in een aantal Nederlandse studies

Locatie	jaarverdamping	Onderzoeker	Percentage verhard
Rivierenbuurt, Amsterdam	292 mm	Hoogvliet et al. (2013)	68 %
Arnhem Oost- Laag	382 mm	Hoogvliet et al. (2013)	47,8%
Arnhem Oost –Hoog	419 mm	Hoogvliet et al. (2013)	35,4%
Lelystad, woonwijk	316 mm	Van de Ven en Voortman (1985)	41%
Lelystad, Parkeerplaats	112 mm	Van de Ven en Voortman (1985)	99.7%
Poptahof, Delft	312 mm	Van Eijk (2002)	60%
De Draai, Heerhugowaard	414 mm	De Graaf (2009)	34%
Landelijk gebied	535 mm	Referentiegewas Comp. voor de Leefomgeving (2013)	0%



**Figuur 3.2:** Onderzocht verband tussen verhardingsgraad en jaarlijkse stedelijke verdamping op basis van de projecten uit tabel 3.1

**Schatting 3:** Op basis van figuur 3.2 zou de verdamping van een gemiddelde stad in Nederland met verhardingsgraad van 32,6% **412 mm** bedragen. De statistische standaardfout van de benadering bedraagt 33.5 mm.

### Conclusie stedelijke verdamping

Er is weinig bekend over stedelijke verdamping. Toch lijkt een stedelijke verdamping van 255 mm te laag op basis van de geanalyseerde literatuur, projecten en de redenering die in dit hoofdstuk is opgezet. De volgende schattingen zijn in dit hoofdstuk gemaakt voor de stedelijke verdamping van een gemiddelde stad met verhardingsgraad van 32.6%.

Schatting 1 is gebaseerd op een verondersteld lineair verband tussen verhard oppervlak en verdamping. Dit verband kan logisch verklaard worden en is ook aannemelijk op basis van de analyse in dit hoofdstuk. Schatting 2 is gebaseerd op hetzelfde verband als schatting 1 met daarbij de observatie dat de stedelijke verdamping van volledig verhard oppervlak groter is dan 0. Deze observatie kan logisch verklaard worden en is verder onderbouwd met gegevens uit de nationale en internationale literatuur. Hierbij is een conservatieve schatting van 100 mm verdamping gedaan van volledig verhard oppervlak. Schatting 3 is gebaseerd op een regressieanalyse met een beperkt aantal punten die bovendien niet onafhankelijk zijn omdat zij deels door dezelfde en soms samenwerkende onderzoekers zijn gevonden. Ook zijn niet alle projecten gebaseerd op metingen van de stedelijke verdamping maar zitten er ook een aantal modelstudies bij. Hoewel het gevonden verband sterk is, maken deze redenen en de gevonden standaardfout dat schatting 3 als indicatie beschouwd moet worden.

Schatting 2 kan daarom beschouwd worden als de meest beschouwbare van de drie schattingen, maar tegelijkertijd wel een voorzichtige schatting. Het kan dus heel goed zijn dat de verdamping van een gemiddelde stad in werkelijkheid groter is dan 370 mm. We zullen daarom de gevoeligheid van de uitkomsten voor afwijkingen van deze schatting later toetsen.

**Tabel 3.2:** Schattingen voor stedelijke verdamping in een gemiddelde Nederlandse stad

<b>Schatting Deelprogramma zoetwater</b>	255 mm
<b>Schatting 1, dit rapport</b>	337 mm
<b>Schatting 2, dit rapport</b>	370 mm
<b>Schatting 3, dit rapport</b>	412 mm

### Aangepaste stedelijke watervraag als gevolg van verdamping

Wanneer de nationale stedelijk watervraag op basis van 370 mm verdamping en een verstedelijkingspercentage van 14 % opnieuw wordt uitgerekend dan geeft dit een resultaat van **1.9 km<sup>3</sup>** voor de jaarlijkse watervraag van het stedelijk gebied als gevolg van stedelijke verdamping. Dit is 27% hoger dan aanvankelijk was geschat.

### 3.4 Afvoer afvalwater naar rioolwaterzuivering

De afvoer van afvalwater is ongeveer gelijk aan de aanvoer van drinkwater en industriewater naar de stad. De totale drinkwatervraag en industriewater vraag worden gegeven in de aangescherpte knelpuntanalyse.<sup>22</sup> Maar liefst 66% van de Nederlandse bevolking woont in steden dus een groot deel van het drinkwater wordt daar gebruikt. De totale drinkwaterproductie is 1.25 km<sup>3</sup>, het stedelijk deel hiervan is 0.825 km<sup>3</sup>. Ook industrie is in grote mate geconcentreerd in stedelijke gebieden en kan worden beschouwd als stedelijke functie. Daarom horen ook deze watergebruikers op te tellen bij de stedelijke watervraag. De totale industriewatervraag is 0.47 km<sup>3</sup> per jaar.

### 3.5 Afvoer hemelwater naar rioolwaterzuivering

Hoogvliet et al.(2013) hebben aangetoond dat ook de afvoer van hemelwater naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) leidt tot afvoer van water uit de stad en daarmee kan leiden tot een extra externe watervraag van de stad.<sup>23</sup> Omdat hemelwater via gemengde en verbeterd gescheiden rioolstelsels wordt afgevoerd naar de rwzi en daarna naar het regionale watersysteem of het hoofdwatersysteem (en niet naar het stedelijk oppervlaktewater) is tijdens droogte extra water nodig voor het peilbeheer van het stedelijk oppervlaktewater. Op een vergelijkbare manier als stedelijke verdamping is afvoer van hemelwater een deel van de stedelijke neerslag dat uit de stad verdwijnt. Het kan lokaal niet meer gebruikt worden. Het is daarom logisch om de afvoer van hemelwater naar de rwzi, net als stedelijke verdamping, op te tellen bij de stedelijke watervraag.

In totaal gaat het om 0.99 km<sup>3</sup> die niet in het stedelijke oppervlaktewater terechtkomt maar wordt afgevoerd naar het regionale watersysteem of naar het hoofdwatersysteem. Het rioolstelsel in landelijke gebieden zal naar verwachting relatief weinig hemelwater afvoeren gezien de zeer lage verhardingsgraad.

Als we bovengenoemde totale hoeveelheid water omslaan naar het totale oppervlakte aan stedelijk gebied in Nederland, dan gaat het om een waterschijf van 192 mm op het totale stedelijke gebied ofwel 25% van de jaarlijkse neerslag. Dit stemt redelijk overeen met een ander onderzoek waaruit blijkt dat 23% van de neerslag in stedelijk gebied wordt afgevoerd naar de riolering.<sup>24</sup>

Afvoer van hemelwater naar de rioolzuivering moet worden afgehaald van de nuttige neerslag in stedelijk gebied, maar hoeft niet één op één van buiten te worden gecompenseerd. Deze component van stedelijke watervraag dus niet per definitie tot een externe stedelijke watervraag. Dit is alleen het geval tijdens droogte. Stedelijke verdamping zal deels gedekt kunnen worden uit lokale neerslag of de lokaal aanwezige waterberging. Dit is echter alleen mogelijk omdat niet al het hemelwater naar de rwzi wordt afgevoerd.

Overigens kan het stedelijk hemelwater dat via de rwzi naar het regionale watersysteem wordt afgevoerd voor sommige landelijk gebieden juist weer een waardevolle bron van water vormen tijdens droogte. Dit geldt ook voor drinkwater dat via de rwzi zijn weg vindt



naar het regionale watersysteem. In andere gevallen wordt dit water via de rwzi direct naar zee afgevoerd.

### 3.6 De totale stedelijke watervraag

Tabel 3.3 laat de aangepaste watervraag van de stad zien. In totaal gaat het om 4.2 km<sup>3</sup> ofwel een waterschijf van 812 mm. Dit is bijna drie keer zo hoog als de aanvankelijk ingeschatte 1.5 km<sup>3</sup>. Hoe verhoudt zich dit tot het waterverbruik van het landelijke gebied? Het totale waterverbruik in Nederland wordt in het deelprogramma zoetwater geschat op 23 km<sup>3</sup> wanneer we hier de stedelijke watervraag van afhalen, dan komen we op een totaal waterverbruik van het landelijk gebied van 18.8 km<sup>3</sup> ofwel een waterschijf van 595 mm per jaar voor het landelijk gebied.

**Tabel 3.3:** Totale stedelijke Nederlandse watervraag vergeleken met watervraag landelijk gebied

	Totale vraag (km <sup>3</sup> )	Totale vraag (mm)	% van totale stedelijke vraag
Stedelijk verdamping	1.91	370	46%
Afvoer afvalwater naar RWZI t.g.v. drinkwatervraag	0.83	160	20%
Afvoer van afvalwater naar RWZI t.g.v. industriewatervraag	0.47	91	11%
Afvoer hemelwater naar RWZI	0.99	162	24%
<b>Totaal stedelijk gebied</b>	<b>4.2</b>	<b>812</b>	<b>100%</b>
Vergelijk landelijk gebied	18.8	595	Nvt
<b>Totaal Nederland</b>	<b>23.0</b>	<b>625</b>	<b>Nvt</b>

Het totaal oppervlak aan stedelijk gebied in Nederland is 5175 km<sup>2</sup>. Als we de watervraag van 812 mm per jaar in een gemiddelde Nederlandse stad opschalen naar heel Nederland, dan is het mogelijk de indicatieve watervraag te berekenen als heel Nederland een stad zou zijn met de kenmerken van een gemiddelde Nederlandse stad. In dat geval zou de totale watervraag 30 km<sup>3</sup> bedragen. Het totaal oppervlak aan landelijk gebied in Nederland is 31.575 km<sup>2</sup>. Als heel Nederland uit platteland bestond dan bedroeg de nationale watervraag 22 km<sup>3</sup>.

### 3.7 Conclusies

De analyse in dit hoofdstuk laat ons zien dat een stad meer water nodig heeft dan het platteland. De ingeschatte vraag in het stedelijk gebied is per oppervlak ruim 35% hoger. In een stad verdampt minder water omdat er minder groen en meer verhard oppervlak is dan op het platteland. Aan de andere kant is er in de stad wel een hogere drinkwatervraag en industriewatervraag vanwege de grote concentratie van bewoners en economische activiteiten. Ook zijn er riolsystemen aangelegd die hemelwater uit de stad afvoeren waardoor dit water niet meer voor stedelijke functies kan worden gebruikt, en tijdens droge perioden extra moet worden aangevoerd.

Hoewel tabel 3.3 een indicatie geeft van de stedelijke watervraag geeft, biedt het geen antwoord op de vraag hoeveel water van buiten de stad moet worden aangevoerd. Drinkwater en industriewater wordt over het algemeen niet onttrokken aan het stedelijk watersysteem maar uit het hoofdwatersysteem zoals de grote rivieren, het IJsselmeer of het grondwatersysteem. In Hoog Nederland bestaat de drinkwatervoorziening voornamelijk uit gezuiverd grondwater. In Laag Nederland wordt overwegend gezuiverd oppervlaktewater gebruikt. Voor de volledigheid zijn deze twee componenten in dit hoofdstuk genoemd als onderdeel van de stedelijke watervraag om een goede vergelijking te kunnen maken met de landelijke watervraag. In het vervolg van dit rapport komen deze componenten niet meer aan de orde omdat we vooral geïnteresseerd zijn in de externe watervraag van het stedelijk watersysteem als gevolg van actief grondwaterpeilbeheer.

In het volgende hoofdstuk wordt de externe watervraag van de stad onderzocht. Dit is het deel van de stedelijke watervraag dat niet door lokale waterberging of lokale neerslag kan worden gedekt en dus van buiten de stad moet worden aangevuld.

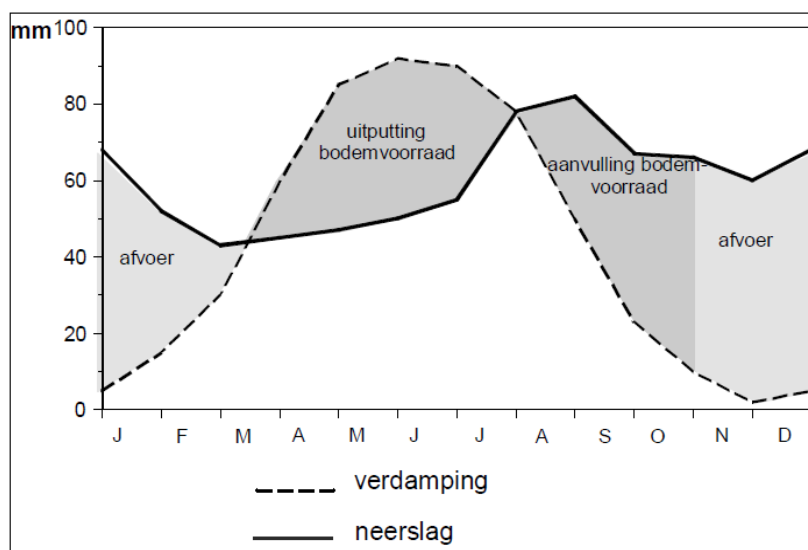
## 4. Externe stedelijke watervraag

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de externe stedelijke watervraag. De onder- en bovengrens van de externe stedelijke watervraag worden berekend.

### 4.1 Neerslagoverschotten en -tekorten

De stedelijke watervraag lijkt in eerste instantie beperkt ten opzichte van de jaarlijkse neerslag. De totale vraag werd in het vorige hoofdstuk geschat op 812 mm terwijl de jaarlijkse neerslag gemiddeld bijna 800 mm bedraagt. Op jaarbasis valt er in een stad dus bijna voldoende regen om de totale watervraag van de componenten van water in de stad (verdamping, drinkwater, industriewater en afvoer naar de rwzi te compenseren. Een stad zou dus zelfvoorzienend kunnen zijn, iets dat in principe ook mogelijk is zoals onderzoek uitwijst.<sup>25</sup>

Toch is dit in de praktijk niet het geval. De belangrijkste reden hiervoor is dat het aanbod van neerslag over het jaar niet gelijkmatig verdeeld is en de verdamping ook niet. In de winter is er een neerslagoverschot, in de zomer een neerslag tekort. Tabel 4.1 laat de neerslag en verdamping zien van langjarige gemiddelden van 15 meetstations van KNMI (2004).



**Figuur 4.1:** Gemiddelde neerslag en potentiële verdamping in Nederland (TU Delft, 2008)

**Tabel 4.1:** Neerslag en verdamping per maand op basis van langjarige gemiddelden van 15 verschillende meetstations (KNMI, 2004)

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	Okt	nov	Dec	Totaal
<b>neerslag h15</b>	65,8	45,1	62,1	42,5	54,7	69,5	66,0	59,5	74,6	77,0	79,1	74,7	770,6
<b>verdamping makink</b>	8,3	15,7	32,9	56,4	85,1	90,2	95,1	83,1	50,3	27,8	11,5	6,5	562,9
<b>neerslag overschot</b>	57,5	29,4	29,2	-13,9	-30,4	-20,7	-29,1	-23,6	24,3	49,2	67,6	68,2	207,7

**Tabel 4.2:** Stedelijke neerslag en verdamping per maand op basis van langjarige gemiddelden van 15 verschillende meetstations (KNMI, 2004) en de analyse uit het vorige hoofdstuk

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	Aug	sep	okt	nov	dec	Totaal
neerslag h15	65,8	45,1	62,1	42,5	54,7	69,5	66,0	59,5	74,6	77,0	79,1	74,7	770,6
Stedelijke verdamping	5,5	10,3	21,6	37,1	55,9	59,3	62,5	54,6	33,1	18,3	7,6	4,3	370
Afvoer naar RWZI	16,4	11,2	15,4	10,6	13,6	17,3	16,4	14,8	18,6	19,2	19,7	18,6	192,5
neerslag overschot	44,0	23,6	25,0	-5,1	-14,8	-7,1	-12,9	-9,9	23,0	39,6	51,9	51,8	208,9

## 4.2 Ondergrens externe stedelijke watervraag

Met de gegevens over verliezen naar de RWZI (25%) en de stedelijke verdamping (66% of 370 mm) uit het vorige hoofdstuk is het mogelijk tabel 4.1 aan te passen voor het stedelijk gebied. Hiermee kan het neerslagoverschot voor de stad berekend worden. De drinkwater en industriewater vraag laten we hierbij buiten beschouwing omdat deze componenten in de praktijk meestal niet vanuit lokale stedelijke bronnen worden geleverd, maar vanuit het hoofdwatersysteem.

Uit tabel 4.2 blijkt dat in een gemiddelde stad het neerslagoverschot ongeveer hetzelfde is als voor Nederland gemiddeld. Ook treedt in dezelfde maanden een neerslag tekort op. Weliswaar wordt 25% van de neerslag afgevoerd naar de riolering, maar omdat verdamping in de stad gemiddeld ca 33% lager ligt zijn de tekorten in de zomer kleiner. Tabel 4.2 laat zien dat er in een gemiddeld jaar voldoende neerslag in een gemiddelde stad in Nederland valt om het waterverbruik (verdamping + afvoer van hemelwater naar de RWZI) te compenseren.

**Tabel 4.3:** Stedelijk wateraanbod, watervraag en externe watervraag op jaarbasis in een gemiddelde Nederlandse stad in het geval van onbeperkte waterberging.

	Watervraag (mm)	Wateraanbod (neerslag) mm	Externe watervraag (mm)
Gemiddeld (1967)	573	853	0
Droog (1989)	562	661	0
Zeer droog (1976)	539	536	0

Het stedelijk neerslagoverschot kan ook berekend worden voor de karakteristieke jaren zoals die in het Deltaprogramma zijn gedefinieerd. Hierbij gaat het om een gemiddeld jaar (1967), een droog jaar (1989) en een zeer droog jaar (1976). Tabel 4.3 laat zien dat er zelfs in

het zeer droge jaar 1976 nog bijna voldoende neerslag is om de watervraag (verdamping en verliezen naar de RWZI) te dekken. Het tekort bedraagt slechts 3 mm en kan goed worden opgevangen door overschotten uit het voorgaande jaar waardoor de berging aan het begin van het jaar goed gevuld is. Dit betekent dat er zelfs in een zeer droog jaar geen externe watervraag van een gemiddelde stad is als er binnen de stad voldoende water geborgen kan worden op verschillen tussen de seizoenen op te vangen.

Met bovenstaande analyse is de ondergrens van de externe stedelijke watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad berekend. **Deze ondergrens bedraagt 0 mm.** De ondergrens is echter alleen van toepassing bij de aanwezigheid van voldoende waterberging in de stad. In dat geval kunnen neerslagoverschotten worden vastgehouden en worden ingezet tijdens droge periodes. Bij de afwezigheid van voldoende waterberging zal water in het winter halfjaar worden afgevoerd vanuit de stad waardoor het niet meer beschikbaar is tijdens de zomer. In de zomer moet dan water extern worden aangevoerd.

### 4.3 Bovengrens externe stedelijke watervraag

In de vorige sectie is de ondergrens van externe stedelijke watervraag in een gemiddelde Nederlandse stad bepaald op 0 mm. In deze sectie zal worden nagegaan wat de bovengrens van externe stedelijke watervraag. Wat zou de watervraag maximaal kunnen zijn?

#### Aanpak

Een theoretische bovengrens van de stedelijke watervraag kan worden berekend als de stedelijke waterbergingscapaciteit op nul wordt gesteld. Om inzicht op te bouwen doen we de theoretische aanname dat we gedurende het gehele jaar het grondwaterpeil en oppervlaktewaterpeil perfect op het streefpeil weten te handhaven door actief peilbeheer. Op iedere dag dat er meer verdamping optreedt dan er nuttige neerslag is, wordt het neerslagtekort direct aangevuld. Door middel van perfecte drainage en afwatering via gemalen worden neerslagoverschotten per dag direct afgevoerd. Uiteraard zal een dergelijke situatie in de realiteit nooit kunnen optreden, maar deze aanpak geeft ons wel inzicht in het maximum van de externe stedelijke watervraag. Bijlage A geeft meer informatie over de berekeningsmethode.

**Tabel 4.4:** Stedelijk neerslagoverschot in een gemiddeld, droog en zeer droog karakteristiek jaar

Stedelijke neerslag	Dagwaarden De Bilt
Stedelijke verdamping	66% van referentieverdamping Dagwaarden De Bilt
Hemelwater naar AWZI	25% van stedelijke neerslag
Kwel of wegzijging	0

#### Resultaten

In lijn met de deltasenario's worden de karakteristieke jaren 1967, 1976 en 1989 gekozen. De dagelijkse watervraag is dan gelijk aan het verschil tussen verdamping minus de nuttige neerslag. De resultaten uit tabel 4.5 laten zien dat in een gemiddelde stad in een gemiddeld jaar de maximale externe waterbehoefte bij perfect peilbeheer 252 mm bedraagt. Uiteraard

betekent dit dat er nog steeds stedelijke gebieden zijn die een hogere theoretische maximumvraag hebben. Bijvoorbeeld steden waar relatief veel water wordt afgevoerd naar de riolering, waar meer verdamping optreedt, of waar inzijing van water plaatsvindt. Hier zullen echter weer andere steden tegenover staan waar het tegenovergestelde het geval is. Bovendien is in de stedelijke gebieden in Hoog-Nederland geen actief grondwaterpeilbeheer mogelijk. De verliezen aan verdamping en rioolafvoer zijn representatief voor een gemiddelde Nederlandse stad. De gegevens van tabel 4.5 kunnen worden gebruikt om de watervraag en de externe watervraag te berekenen van een gemiddelde Nederlandse stad in de drie karakteristieke jaren. De stedelijke watervraag bestaat uit al het water dat uit de stad wordt afgevoerd. Dit moet immers op jaarbasis weer worden aangevuld door middel van regenval of externe aanvoer. De resultaten in tabel 4.6 laten zien dat de watervraag bij de volledige afwezigheid van waterberging veel hoger is dan in een situatie met onbeperkte berging (tabel 4.3). Als gevolg hiervan ontstaat er ook een grote externe watervraag.

**Tabel 4.5:** Waterbalans en externe vraag (aanvoer) bij perfect peilbeheer en volstrekte afwezigheid van lokale waterbergingscapaciteit.

BALANS	Gemiddeld jaar (1967)		Droog jaar (1989)		Zeer droog jaar (1976)	
	(mm)	IN	(mm)	IN	(mm)	IN
Neerslag	853	78%	661	69%	536	63%
Aanvoer	252	23%	321	33%	337	39%
Totaal	1105	100%	982	100%	873	100%
		UIT		UIT		UIT
Verdamping	360	33%	396	40%	383	45%
Afvoer RWZI	213	19%	165	17%	134	15%
Afvoer gemeaal	534	48%	421	43%	335	38%
Totaal	1105	100%	982	100%	873	100%

**Tabel 4.6:** Stedelijke watervraag, wateraanbod en externe watervraag op jaarbasis van een gemiddelde Nederlandse stad. Voorbeeld met perfect peilbeheer en volledige afwezigheid van waterberging

	Maximale watervraag (mm)	Wateraanbod (neerslag) mm	Maximale externe watervraag (mm)
<b>Gemiddeld (1967)</b>	1105	853	252
<b>Droog (1989)</b>	982	661	321
<b>Zeer droog (1976)</b>	873	536	337

**Tabel 4.7:** Externe vraag (aanvoer) bij perfect peilbeheer en volstreekte afwezigheid van lokale waterbergingscapaciteit wanneer dit in het volledige stedelijke gebied van heel Nederland, of alleen Laag Nederland wordt toegepast.

	Maximale externe watervraag (mm)	Maximale externe watervraag heel Nederland (km <sup>3</sup> )	Maximale externe Watervraag alleen Laag Nederland (km <sup>3</sup> )
<b>Gemiddeld (1967)</b>	252	1.28	0.73
<b>Droog (1989)</b>	321	1.65	0.92
<b>Zeer droog (1976)</b>	337	1.74	0.97

Opgeschaald naar het stedelijk gebied van heel Nederland is een waterschijf van 252 mm gelijk aan 1.3 km<sup>3</sup>. Dit is dus de bovengrens voor de extra watervraag voor actief peilbeheer van zowel grondwater als oppervlaktewater in alle stedelijke gebieden samen. Als we er vanuit gaan dat alleen in de steden van Laag Nederland actief grondwaterpeilbeheer wordt toegepast dan gaat het in totaal om 0.73 km<sup>3</sup>. De tabel laat zien dat in een droog jaar en een zeer droog jaar de bovenschatting voor stedelijke watervraag voor perfect peilbeheer aanmerkelijk hoger ligt dan in een gemiddeld jaar. Opgeschaald naar het volledige stedelijk gebied in Laag Nederland bedraagt de externe vraag in een droog jaar 0.92 km<sup>3</sup> en in een zeer droog jaar 0.97 km<sup>3</sup>. Dit is dus extern aangevoerd water dat nodig is om het grondwaterpeil en oppervlaktewaterpeil door het hele jaar heen op een vast peil te handhaven in de stad.

#### 4.4 Conclusies

In dit hoofdstuk is de ondergrens en de bovengrens van de externe stedelijke watervraag bepaald. De externe stedelijke watervraag is gelijk aan de stedelijke watervraag minus de lokale neerslag. Op basis van de analyse tot zover kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De externe watervraag hangt in belangrijke mate af van de waterbergingscapaciteit in een stad.
- De minimale externe watervraag van de stad treedt op wanneer er onbeperkt waterberging aanwezig is. In dat geval is de externe watervraag 0.
- De maximale externe watervraag van een stad treedt op wanneer er geen enkele waterberging aanwezig is en perfect peilbeheer van grondwater en oppervlaktewater wordt toegepast. In dat geval bedraagt de jaarlijkse externe stedelijke watervraag 252 mm (gemiddeld jaar), 321 mm (droog jaar) en 337mm (zeer droog jaar).

De bevindingen van dit hoofdstuk met betrekking tot wateraanbod, watervraag en externe watervraag worden in de tabel 4.8 samengevat. Hierin is te zien dat met de afwezigheid van berging de stedelijke watervraag sterk toeneemt. Omdat het wateraanbod (neerslag) hetzelfde

de blijft, leidt dit tot een grote externe watervraag. Tabel 4.9 toont dezelfde gegevens maar nu in km<sup>3</sup> en opgeschaald naar het stedelijk gebied van heel Nederland.

**Tabel 4.8:** Stedelijke watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad in drie karakteristieke jaren. Bovengrens en ondergrens van externe stedelijke watervraag. Waarden in mm

	Bovengrens watervraag. Waterberging = 0			Ondergrens watervraag. Waterberging onbeperkt		
	Watervraag (mm)	Wateraanbod (neerslag) mm	Externe watervraag (mm)	Water-vraag (mm)	Wateraanbod (neerslag) mm	Externe watervraag (mm)
<b>Gemiddeld (1967)</b>	1105	853	252	573	853	0
<b>Droog (1989)</b>	982	661	321	562	661	0
<b>Zeer droog (1976)</b>	873	536	337	539	536	0

**Tabel 4.9:** Stedelijke watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad in drie karakteristieke jaren. Bovengrens en ondergrens van externe stedelijke watervraag. Opgeschaald naar het volledige stedelijk gebied in Nederland. Waarden in km<sup>3</sup>.

	Bovengrens watervraag. Waterberging = 0			Ondergrens watervraag. Waterberging is onbeperkt		
	Watervraag km <sup>3</sup>	Wateraanbod (neerslag) km <sup>3</sup>	Externe watervraag km <sup>3</sup>	Water-vraag km <sup>3</sup>	Wateraanbod (neerslag) km <sup>3</sup>	Externe watervraag km <sup>3</sup>
<b>Gemiddeld (1967)</b>	5.7	4.4	1.3	3.0	4.4	0
<b>Droog (1989)</b>	5.1	3.4	1.7	2.9	3.4	0
<b>Zeer droog (1976)</b>	4.5	2.8	1.7	2.8	2.8	0



## 5. Waterberging en de externe stedelijke watervraag

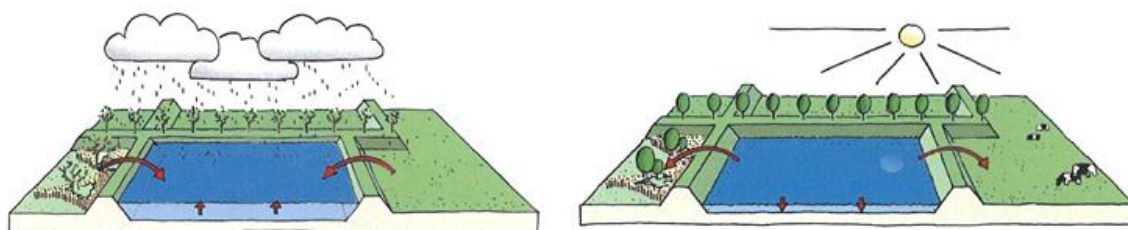
Op het voorgaande hoofdstuk is de bovengrens en ondergrens van de externe stedelijke watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad bepaald. De maximale externe watervraag treedt op als er geen waterbergingscapaciteit is. In dat geval worden zowel grondwaterpeil en oppervlaktewater peil het hele jaar op een constant peil gehandhaafd. Ook is geconstateerd dat de externe watervraag gelijk is aan 0 is als er maar voldoende waterbergingscapaciteit aanwezig is in de stad. In dat geval kunnen we de neerslagoverschotten van de wintermaanden opslaan om deze overschotten vervolgens te gebruiken in de zomermaanden met een neerslagtekort. Dit zijn de maanden waarin de verdamping groter is dan de neerslag. Als de berging voldoende groot is, hoeft in theorie geen water van buiten de stad te worden aangevoerd. De externe watervraag in dus belangrijke mate afhankelijk van de waterbergingscapaciteit in een stad. De vraag hoe groot de waterbergingscapaciteit dan zou moeten zijn en hoe de externe watervraag afhangt van de waterbergingscapaciteit is echter nog niet beantwoord. Deze aspecten zullen daarom hieronder nader bestudeerd worden.

- De invloed van waterberging op de externe stedelijke watervraag
- Waterbergingscapaciteit in de stad
- De resulterende externe stedelijke watervraag

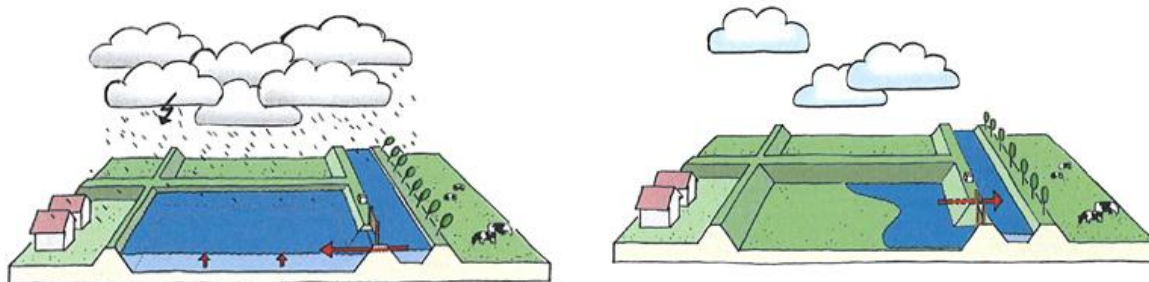
### 5.1 De invloed van waterberging

#### Afbakening waterberging

In dit rapport wordt alleen aandacht besteed aan seizoensberging. Deze vorm van waterberging is gericht op het voorkomen van droogte. Hierbij worden in de winter de neerslagoverschotten opgeslagen. In dit seizoen stijgt het waterpeil. Het opgeslagen water wordt bewaard voor de zomermaanden wanneer de verdamping juist groter is dan de neerslag en het waterniveau daalt. Waterberging bestaat uit grondwater- of oppervlaktewater waarvan het waterpeil kan stijgen en dalen. Andere vormen van waterberging zoals waterberging op straat of in de openbare ruimte kunnen weliswaar een bijdrage leveren aan het voorkomen van wateroverlast (piekberging), maar ze zijn minder geschikt als seizoensberging om verschillen in verdamping en neerslag tussen verschillende seizoenen te overbruggen. De belangrijkste reden hiervoor is de korte tijdsduur waarvoor deze berging wordt ingezet. Daarom wordt waterberging in dit rapport beperkt tot grondwaterberging en oppervlaktewaterberging.



**Figuur 5.1:** Illustratie van seizoensberging in winter en zomer. Doel van deze vorm van waterbergings is het voorkomen van droogte (bron:waterbestendigbouwen.nl)



**Figuur 5.2:** Illustratie van piekberging tijdens en na een intensieve regenbui. Doel van deze vorm van waterberging is het voorkomen van wateroverlast (bron: waterbestendigbouwen.nl)

## Aanpak

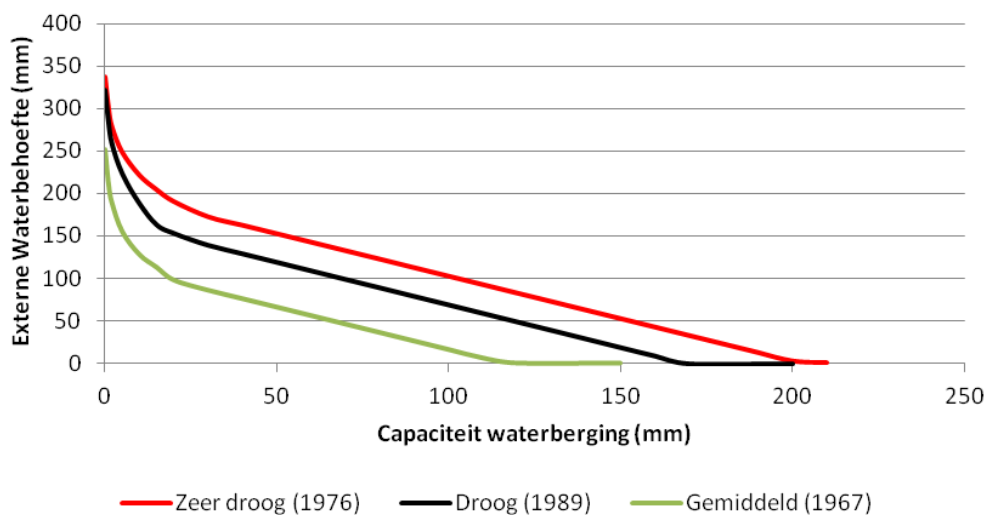
Hieronder zullen we nagaan hoe de watervraag afhangt van de stedelijke waterbergingscapaciteit. De berekeningsmethode is in grote lijnen hetzelfde als bij de berekening van de maximale schatting van de externe watervraag. Het enige verschil is dat er nu een waterberging is toegevoegd waarin per dag wateroverschotten kunnen worden opgeslagen totdat de waterberging vol is, daarna wordt het overschot afgevoerd. Een neerslagtekort wordt gedekt uit de waterberging totdat deze waterberging leeg is, daarna wordt extern water aangevoerd. Deze berekening kan met een tijdreeks van de drie karakteristieke jaren worden uitgevoerd met neerslag en verdamping. De omvang van de waterbergingscapaciteit kan in een serie van berekeningen steeds worden gevarieerd en hiermee kan de relatie tussen waterbergingscapaciteit en de externe watervraag voor verschillende karakteristiek jaren worden berekend. Voor een meer uitgebreide beschrijving van de berekeningsmethode wordt verwezen naar bijlage B. Ook in dit theoretische geval wordt perfect peilbeheer verondersteld.

## Resultaten

Figuur 5.3 geeft de relatie tussen waterbergingscapaciteit en de externe waterbehoefte en geeft hiermee antwoord op de vraag hoe de externe stedelijke watervraag afhangt van de stedelijke waterbergingscapaciteit. Uit de grafiek valt een aantal zaken op te maken.

- Als de waterbergingscapaciteit 0 is dan is de externe waterbehoefte gelijk aan de eerder berekende maximale externe stedelijke waterbehoefte. Verder is de waterbehoefte in een droog jaar hoger dan in een gemiddeld jaar maar kleiner dan in een zeer droog jaar. Dit is zoals verwacht mag worden.
- Het toevoegen van enige waterberging ten opzichte van een situatie zonder waterberging, heeft een snelle daling van de waterbehoefte tot gevolg. Dit kan verklaard worden uit het gegeven dat zelfs een kleine berging het mogelijk maakt om tekorten en overschotten tussen dagen te compenseren. Het neerslagoverschot van de ene dag kan de volgende dag gebruikt worden als er geen neerslag is maar er uiteraard wel verdamping optreedt. Dit heeft een aanzienlijke verlaging van de watervraag tot gevolg ten opzichte van een maximum situatie waar op iedere dag dat er meer verdamping is dan neerslag extern water aangevoerd moet worden.
- Omdat iedere stad wel enige waterbergingscapaciteit heeft zal de externe watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad in werkelijkheid lager liggen dan de eerder berekende maximale externe watervraag.

- Als de bergingscapaciteit groot genoeg is, dan is de externe watervraag gelijk aan 0. Dit stemt overeen met de ondergrens voor externe stedelijke watervraag uit het vorige hoofdstuk.
- De benodigde berging om toe te kunnen zonder externe wateraanvoer is in een zeer droog jaar (202 mm). In een droog jaar bedraagt de benodigde berging 159 mm. In een gemiddeld jaar is 116 mm waterberging nodig.



**Figuur 5.3:** Theoretisch verband tussen waterbergingscapaciteit en externe stedelijke waterbehoefte in een gemiddelde Nederlandse stad in drie verschillende karakteristieke jaren.

## 5.2 De omvang van waterberging in de stad

Nu we meer inzicht hebben hoe de externe stedelijke watervraag afhangt van de waterbergingscapaciteit is de volgende vraag hoeveel water in een stad geborgen kan worden.

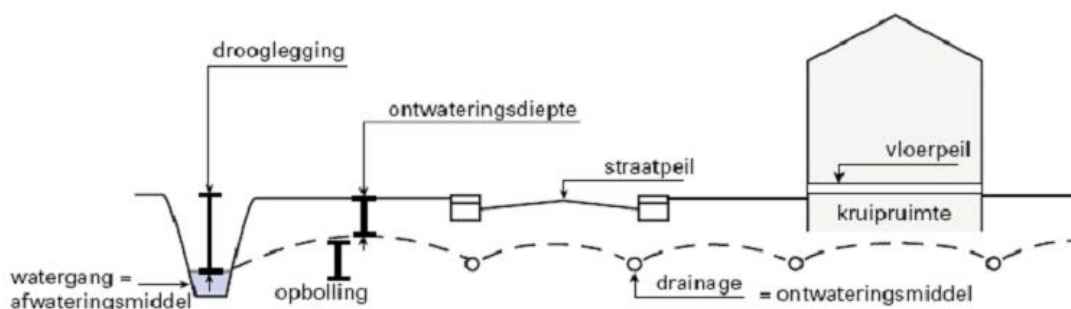
### Mogelijkheden van berging in oppervlaktewater

Nederland is vlak en het waterbeheer is overwegend ingesteld op peilhandhaving door middel van het peilbesluit door waterschappen. Hierdoor zijn de mogelijke peilfluctuaties in oppervlaktewater beperkt. Uit de eerder gevonden CBS landgebruik gegevens kan worden opgemaakt dat de gemiddelde hoeveelheid oppervlaktewater in stedelijk gebied 5.8% bedraagt. In de huidige situatie kan dit oppervlaktewater weinig bijdragen aan seizoenswaterberging door middel van het opvangen van het neerslagoverschot om vervolgens te gebruiken in de zomer. Over het algemeen wordt in Nederland het streefpeil van oppervlaktewater nog steeds strak gehandhaafd door de waterschappen. Het neerslagoverschot dat in het oppervlaktewater terecht komt wordt daarom weggepompt naar het regionale watersysteem. In een droge periode wordt dan water ingelaten. De mogelijkheden op flexibel peilbeheer in te voeren in bestaand stedelijk gebied zijn over het algemeen zeer beperkt. Bij het Hoogheemraadschap van Delfland was er in 2006 bijvoorbeeld slechts in 1% van het beheersgebied sprake van flexibel peilbeheer.<sup>26</sup> Bij de Stichtse Rijnlanden wordt flexibel peilbeheer meegenomen als vaste optie bij de totstandkoming in peilbesluiten. In het stedelijk gebied is echter overwegend sprake van een vast peil.<sup>27</sup>

Het realiseren van 202 mm waterberging in de stad is nodig om zelfs in een zeer droog jaar geen extern water aan te voeren. Is dat een realistische mogelijkheid? Als de berging alleen in het oppervlaktewater gerealiseerd kan worden, dan is bij een gemiddeld oppervlaktewater in de stad van ca. 5,8% op basis van de wijkgegevens CBS zoals beschreven in hoofdstuk 2, een peilfluctuatie vereist van 3.5 meter. Dit is geen haalbare optie. Stel dat het mogelijk is om in 10% van het stedelijk oppervlaktewater flexibel peilbeheer in te voeren met een maximale peilfluctuatie van 0.1 meter. Dit zou overeenkomen met 0.58 mm waterberging uitgesmeerd over het hele stedelijke gebied, dus slechts een fractie van de benodigde 202 mm.

### Mogelijkheden van berging van grondwater

De voorgaande analyse heeft laten zien dat de waterbergingscapaciteit van oppervlaktewater niet voldoende is op de externe watervraag tot nul te reduceren. Ook het grondwater kan echter worden ingezet voor waterberging. Hieruit volgt de vraag hoeveel grondwaterberging er aanwezig is in de stad. Het oppervlakte waar potentieel water kan worden geborgen is veel groter dan bij oppervlaktewater, zo'n 94% van het stedelijk gebied. Grondwaterberging heeft echter een aantal belangrijke verschillen ten opzichte van oppervlaktewaterberging. Grondwater mag zeker in Laag Nederland niet teveel fluctueren. Bij te hoge waterstanden treedt wateroverlast op. Bij te lage waterstanden kan schade aan beplanting optreden, zettingen optreden of houten funderingskoppen droog komen te staan. Voor een uitgebreide analyse van schademechanismen door water overlast en tekorten wordt verwezen naar een recente studie van Deltares.<sup>28</sup> De bergingscapaciteit van grondwater is om bovengenoemde redenen beperkt. Omdat ook de oppervlaktewaterberging beperkt is moet er in de zomer in Laag Nederland water naar de stad worden aangevoerd uit het hoofdwatersysteem (bv de grote rivieren) om het neerslagtekort op te vangen.



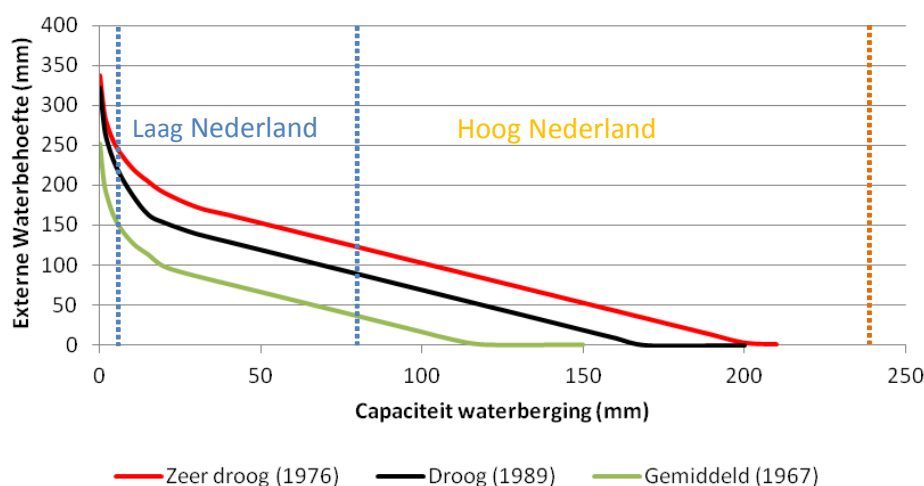
**Figuur 5.4:** Illustratie van grondwaterstand in de winter. Tussen de drainagemiddelen ontstaat een opbolling van de grondwaterstand (bron: gemeente Groningen).

Het grondwater draagt in het stedelijk gebied wel bij aan het bergen van het neerslagoverschot. In Laag-Nederland is er in de winter sprake van een opbolling van de grondwaterstand tussen de drainagebuizen en het oppervlaktewater. Figuur 5.4 laat dit zien. In de zomer is er juist sprake van het tegenovergestelde effect; een uitzakking van de grondwaterstand tussen de drainagebuizen. Het verschil tussen beide peilen bepaalt onder andere de bergingscapaciteit. Hoe meer het peil fluctueert hoe hoger de capaciteit. Hoewel in dat geval

minder water aangevoerd hoeft te worden is de kans op wateroverlast of wateronderlast (te lage waterstanden) juist groter. Voor een analyse van de waterbergingscapaciteit van grondwater is het van belang om de porositeit en bodemvochtkarakteristieken van verschillende bodemtypen in beschouwing te nemen. In de bijlage is hier meer informatie over te vinden.

#### Bergingscapaciteit van grondwater in een gemiddelde Nederlandse stad

Als we op basis van de analyse uit bijlage C voor Laag Nederland uitgaan van een grondwaterpeilfluctuatie 0,3-0,8 meter en een gemiddelde bergingscoëfficiënt van 0.02- 0.10 dan bedraagt de gemiddelde capaciteit voor grondwaterberging in het stedelijk gebied 6-80 mm met een gemiddelde van 43 mm. Voor Hoog Nederland schatten we de peilfluctuatie van het grondwater in op 0.8-1.2 meter met een bergingscoëfficiënt van 0.10-0.20. Dit geeft een geschatte grondwaterbergingscapaciteit van 80-240 mm met een gemiddelde van 160 mm. Wanneer we deze uitgangspunten combineren met de eerder gevonden relatie tussen externe watervraag en waterbergingscapaciteit in figuur 5.3 dan is het mogelijk de externe watervraag van de gemiddelde stad in Hoog Nederland en Laag Nederland in te benaderen. Figuur 5.5 laat het resultaat zien voor Laag Nederland en Hoog Nederland.



**Figuur 5.5:** Inschatting externe watervraag als functie van waterbergingscapaciteit in een gemiddelde stad in Laag Nederland en Hoog Nederland. Interactie met oppervlaktewater is hierin niet meegenomen.

### 5.3 Externe watervraag van een gemiddelde stad

De externe watervraag van een gemiddelde stad in Laag Nederland wordt op basis van de bovenstaande analyse in figuur 5.5 berekend op 36-147 mm in een gemiddeld jaar. De externe watervraag van een gemiddelde stad in Hoog Nederland bedraagt 0 - 36 mm. Oppervlaktewaterberging is vanwege de beperkte bijdrage aan de totale waterbergingscapaciteit van een stad niet meegenomen. Tabel 5.1 laat zien dat waterberging in het grondwater ook in Laag Nederland de externe watervraag sterk vermindert ten opzichte van een situatie zonder berging. Opgeschaald naar heel Laag Nederland is er een totale externe watervraag van 0.13-0.42 m<sup>3</sup>.

**Tabel 5.1:** Relatie tussen geschatte externe watervraag en grondwaterberging in een gemiddelde Nederlandse stad in Laag Nederland en Hoog Nederland in een gemiddeld jaar

Karakteristiek jaar	Laag Nederland (berging=6-80 mm)	Hoog Nederland (berging= 80-240 mm)	Maximale externe vraag zonder waterberging mm
<b>1967 (gemiddeld)</b>	36-147	0-36	252

#### 5.4 Benadering extra watervraag actief grondwaterpeilbeheer

Met de resultaten uit figuur 5.5 kan ook berekend worden hoeveel extra water er nodig is als we in droge en zeer droge jaren de grondwaterpeilen zouden willen handhaven ten opzichte van een gemiddeld jaar. In dat geval mag de berging dus niet verder toenemen ten opzichte van een gemiddeld jaar en is de extra watervraag gelijk aan de verticale afstand tussen de lijnen van de verschillende jaren. Het resultaat geeft een benadering van de extra watervraag van actief grondwaterpeilbeheer. In droge jaren neemt de externe watervraag sterk toe met 53-69 mm. In zeer droge jaren is de toename nog groter namelijk 86-95 mm. Deze extra waterbehoefte is de toename in externe waterbehoefte die nodig is om in droge en zeer droge jaren de peilfluctuatie van het grondwater niet verder toe te laten nemen ten opzichte van een gemiddeld jaar. In Hoog Nederland is de watervraag een stuk kleiner vanwege de veel grotere capaciteit van de waterberging. Wanneer grotere peilfluctuaties van het grondwater mogelijk zijn en dit geen schadelijke gevolgen heeft, dan is er ook in droge en zeer droge jaren geen extra externe watervraag. In de praktijk zal een toename van peilfluctuatie in deze jaren in Hoog Nederland minder bezwaarlijk zijn dan in Laag Nederland omdat in Hoog Nederland de problematiek van droogvallende paalkoppen van houten funderingen minder speelt. In de rest van het rapport zal daarom alleen aandacht besteed worden aan de externe watervraag van het stedelijk gebied in Laag Nederland.

**Tabel 5.2:** De extra externe watervraag een gemiddelde Nederlandse stad in Laag Nederland en Hoog Nederland in een droog jaar en zeer droog jaar wanneer de grondwaterpeilfluctuatie niet mag toenemen ten opzichte van een gemiddeld jaar

Karakteristiek jaar	Watervraag laag Nederland (berging=6-80 mm)	Extra watervraag actief grondwaterpeilbeheer	Watervraag hoog Nederland (berging= 80-240 mm)	Extra watervraag actief grondwaterpeilbeheer
<b>1989 (droog)</b>	89-216	53-69	0-89	0-53
<b>1976 (zeer droog)</b>	122-242	86-95	0-122	0-86

#### 5.5 Conclusies externe stedelijke watervraag

In dit hoofdstuk is afgeleid hoe de externe watervraag afhangt van de stedelijke waterbergingscapaciteit. Vervolgens is een inschatting gemaakt van de stedelijke waterbergingscapaciteit in Hoog Nederland en Laag Nederland. De capaciteit van oppervlaktewaterberging is

zeer beperkt. De capaciteit van grondwaterberging in de stad is een stuk groter. In Laag Nederland bedraagt de grondwaterbergingscapaciteit van een gemiddelde stad naar schatting 6-80 mm. In Hoog Nederland bedraagt deze capaciteit 80-240 mm. Met deze bergingscapaciteiten is in Laag Nederland externe wateraanvoer nodig om de tekorten te dekken. Er is een eerste inschatting van de watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer in een droog en zeer droog jaar gemaakt. Hierbij is het uitgangspunt gehanteerd dat de grondwaterpeilfluctuatie niet mag toenemen ten opzichte van een gemiddeld jaar. De volgende conclusies kunnen worden getrokken

- De externe watervraag van een gemiddelde stad in Laag Nederland is 36-147 mm in een gemiddeld jaar.
- De externe watervraag van een gemiddelde stad in Hoog Nederland bedraagt 0-36 mm in een gemiddeld jaar.
- In Laag Nederland bedraagt de extra watervraag 53-69 mm voor actief peilbeheer van grondwater in een droog jaar, en 86-95 mm in een zeer droog jaar ten opzichte van een gemiddeld jaar.





## 6. De externe stedelijke watervraag bij actief grondwaterpeilbeheer

In het vorige hoofdstuk is onderzocht hoe de externe watervraag van een stad afhangt van vooral de grondwaterbergingscapaciteit. Het is hierbij duidelijk geworden dat de lokale stedelijke grondwaterbergingscapaciteit afhangt van de peilfluctuatie van het grondwater door het jaar heen en de bergingscapaciteit van de bodem. Ook is een eerste benadering gemaakt van de extra externe watervraag ten gevolge van actief grondwaterpeilbeheer. Actief grondwaterpeilbeheer betekent dat we de peilfluctuatie van het grondwater gaan beperken. Hierdoor neemt de bergingscapaciteit af en daarmee de externe watervraag toe. Hoeveel de externe watervraag toeneemt wordt in dit hoofdstuk nader onderzocht.

### 6.1 Interactie tussen grondwater en oppervlaktewater

Bij een vast oppervlaktewaterpeil zal de grondwaterstand in het peilbeheerste deel van Nederland niet in een rechte lijn omhoog en omlaag gaan, maar opbollen en uitzakken tussen oppervlaktewaterlichamen en drainagebuizen. Grondwaterberging in het peilbeheerste deel van Nederland gedraagt zich niet als een afgesloten reservoir waar in het neerslagoverschot kan worden 'bewaard' voor tijden met een neerslagtekort. Grondwater staat in verbinding met oppervlaktewater. Dit betekent dat een deel van de opgebouwde berging steeds zal afstromen naar het oppervlaktewater. Aangezien het peil van het oppervlaktewater over het algemeen vast wordt gehandhaafd, wordt het water dat vanaf het grondwater afstroomt naar het oppervlaktewater verder afgevoerd door pompstations en gemalen naar het regionale watersysteem. Andersom zal water vanaf het oppervlaktewater via de oevers en drainagebuizen infiltreren naar het grondwater als het grondwaterpeil lager ligt dan het oppervlaktewaterpeil. Omdat het oppervlaktewaterpeil op een vast niveau wordt gehandhaafd is in dat geval aanvulling nodig vanuit het regionale watersysteem. Daarmee leidt dit mechanisme tot een externe watervraag van de stad.

#### Aanpak

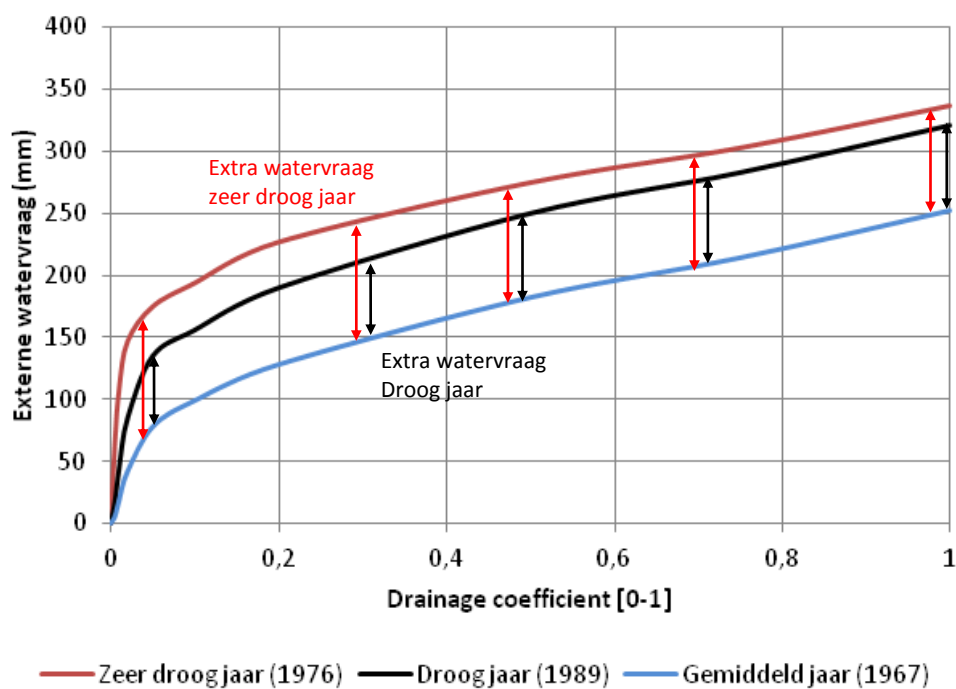
De berekening is in grote lijnen weer hetzelfde als in voorgaande hoofdstukken. Om meer inzicht te krijgen in grondwater-oppervlaktewater interactie wordt de berging uit het vorige hoofdstuk uitgebreid met een koppeling naar het oppervlaktewater volgens de hierboven uitgelegde principes. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar bijlage D. Voor de drie karakteristieke jaren wordt in de berekening de drainagecoëfficiënt steeds gevarieerd waarbij de externe watervraag kan worden afgelezen. Hierbij wordt het uitgangspunt van een niet begrensde bergingscapaciteit van het grondwater gehanteerd en een vast oppervlaktewaterpeil. Dit levert een algemeen verband te beschrijven tussen de drainagecoëfficiënt en de externe watervraag op voor de drie karakteristieke jaren.

#### Resultaten

Figuur 6.1 geeft antwoord op de vraag hoe de externe watervraag in verschillende afhangt van de connectiviteit tussen grondwater en oppervlaktewater (drainagecoëfficiënt). In de grafiek is te zien dat voor een drainagecoëfficiënt van 0 en een onbeperkte waterbergingscapaciteit de externe watervraag gelijk is aan 0. Dit is in lijn met de resultaten uit hoofdstuk

4 waarbij de ondergrens van de externe stedelijke watervraag op 0 werd bepaald. Als de drainagecoëfficiënt gelijk is aan 1, dan is de connectiviteit tussen grondwater en oppervlaktewater 100%. In dat geval wordt dus alle opgebouwde grondwaterberging direct afgevoerd naar het oppervlaktewater en is er geen grondwaterberging. Op dezelfde wijze worden tekorten in de grondwaterberging direct aangevuld vanuit het oppervlaktewater. De externe watervraag is dan maximaal en heeft in dezelfde waarde als de in hoofdstuk 4 berekende bovengrens in de verschillende karakteristieke jaren.

Uit figuur 6.1 kan de gemiddelde afstand tussen de lijnen voor een gemiddeld, droog jaar en zeer droog jaar worden afgelezen. Dit benadert de extra externe watervraag die ontstaat in deze jaren indien actief grondwaterpeilbeheer wordt toegepast. In een zeer droog jaar neemt deze vraag gemiddeld toe met 87 mm. In een droog jaar is de gemiddelde toename 56 mm. Dit stemt redelijk goed overeen met de extra watervraag die eerder werd gevonden in het vorige hoofdstuk voor Laag Nederland in tabel 5.2.



**Figuur 6.1:** Extra watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer in een droog en zeer droog jaar ten opzichte van een gemiddeld jaar.

## 6.2 Varianten van actief grondwaterpeilbeheer

Hieronder zal worden onderzocht hoe deze externe watervraag verandert wanneer de peilfluctuatie van het grondwater beperkt wordt volgens verschillende varianten. Hierbij worden de volgende varianten van actief grondwaterpeilbeheer bestudeerd:

1. De maximale grondwaterpeilfluctuatie van een gemiddeld jaar mag niet toenemen in een droog en zeer droog jaar.
2. De maximale grondwaterpeilfluctuatie in een gemiddeld jaar wordt beperkt.
3. De maximale grondwaterpeilfluctuatie in een gemiddeld jaar wordt beperkt en deze beperking moet worden vastgehouden in een droog en zeer droog jaar.

### **Aanpak**

Voor al deze varianten is dan vervolgens de vraag hoeveel de externe watervraag toeneemt. In essentie betekenen de beschreven varianten dat de grondwaterbergingscapaciteit niet verder mag toenemen of beperkt wordt. De analyse wordt uitgevoerd met drie verschillende drainagecoëfficiënten. Deze coëfficiënten zijn zo gekozen dat de resulterende watervraag realistische waarden oplevert in relatie tot de bandbreedte van stedelijke watervraag zoals die in het vorige hoofdstuk is geschat voor Laag Nederland. Er wordt wederom uitgegaan van perfect peilbeheer.

#### Variant 1: Maximale peilfluctuatie niet verder laten toenemen in een droog en zeer droog jaar.

In variant 1 wordt actief grondwaterpeilbeheer zo ingesteld dat in een droog jaar en zeer droog jaar de fluctuatie in grondwaterberging niet toeneemt ten opzichte van een gemiddeld jaar. Hiertoe wordt eerst de berekening uitgevoerd met een gemiddeld jaar en verschillende drainagecoëfficiënten. Daarna wordt voor een situatie zonder actief grondwaterpeilbeheer het minimale en maximale niveau van de grondwaterberging berekend. Deze waarden worden vervolgens ingevoerd als grenswaarden in de berekening voor een droog en zeer droog jaar. Zodra de grens wordt overschreden wordt extra water aangevoerd of extra drainage toegepast. Vervolgens kan de extra watervraag worden berekend.

#### Variant 2: Beperking peil in een gemiddeld jaar

In variant 2 wordt voor drie verschillende drainagewaarden eerst het minimum en maximum niveau van de grondwatervoorraad berekend. Daarna worden deze waarden als grenswaarde ingevoerd en in stappen verlaagd waarna steeds de extra watervraag wordt berekend. Hieruit ontstaat de relatie tussen beperking van de maximale fluctuatie en de extra watervraag voor verschillende drainagewaarden.

#### Variant 3: Beperking peil in een gemiddeld jaar en deze beperking vasthouden in een droog en zeer droog jaar

Deze variant is feitelijk een combinatie van variant 1 en 2. Er wordt uitgegaan van 50% peilfluctuatie in een gemiddeld jaar. De bovengrens en ondergrens van de grondwaterberging worden vervolgens als grenswaarde ingevoerd in de berekeningen voor een droog en zeer droog jaar.

## Resultaten

### Variant 1: Maximale peilfluctuatie niet verder laten toenemen in droog en zeer droog jaar.

Uit tabel 6.1 blijkt dat het vasthouden van het grondwaterpeil in een droog en zeer droog jaar veel extra water kost. In een droog jaar varieert het afhankelijk van de drainagecoëfficiënt van 50 tot 60 mm extra water. De gemiddelde extra watervraag bedraagt 55 mm. Dit komt goed overeen met de berekende extra watervraag uit dit hoofdstuk en het vorige hoofdstuk in het vorige hoofdstuk. In een extreem droog jaar ligt de extra watervraag tussen de 98 en 109 mm. De gemiddelde extra watervraag bedraagt 102 mm. Dit ligt wat hoger dan eerder berekend in dit hoofdstuk en het vorige hoofdstuk. Een mogelijke verklaring is hiervoor dat de interactie met oppervlaktewater vooral in een zeer droog jaar extra water vraagt. Procentueel is de toename in watervraag vooral groot bij de lage drainagecoëfficiënt. Tabel 6.1 laat dit zien.

**Tabel 6.1:** Extra stedelijke watervraag als de grondwater peilfluctuatie in droge en zeer droge jaren niet verder mag toenemen.

	$C_{dr}= 0,025$			$C_{dr}= 0,05$			$C_{dr}= 0,10$		
	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra
<b>Gemiddeld jaar (1967)</b>	51	0	0%	78	0	0%	99	0	0%
<b>Droog jaar (1989)</b>	101	50	98%	135	57	73%	158	59	60%
<b>Zeer droog (1976)</b>	160	109	214%	176	98	126%	197	98	99%

### Variant 2: Beperking peil in een gemiddeld jaar

Tabel 6.2 laat zien dat de externe watervraag voor beperking van de grondwater peilfluctuatie pas sterk toeneemt bij een zeer grote beperking van de grondwaterberging. In dat geval nadert de externe watervraag het eerder berekende maximum. Bij de lagere drainagewaarden is de procentuele toename van de externe watervraag hoger. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de basisvraag in een situatie zonder actief grondwaterpeilbeheer in deze gevallen een stuk lager ligt.

Hoewel de extra watervraag voor het beperken van de maximale grondwaterpeilfluctuatie in absolute termen wellicht niet zo groot lijkt, kan het zeker ten opzichte van de basisvraag zonder grondwaterpeilbeheer toch gaan om een grote toename. Wel zal het in de praktijk niet zo nuttig zijn om alleen in een gemiddeld jaar de grondwaterpeilfluctuatie te beperken. In een droog jaar treedt in dat geval immers nog steeds schade op. Daarom is het van belang deze beperking ook vast te houden in een droog en een zeer droog jaar. Een interes-

sante vraag is dan hoeveel extra water dit kost ten opzichte van een situatie zonder actief grondwaterpeilbeheer in een gemiddeld jaar. Deze variant wordt hierna bekeken.

**Tabel 6.2:** Extra watervraag bij beperking van de grondwater peilfluctuatie in een gemiddeld jaar

Beperking peilfluctuatie	$C_{dr} = 0,025$			$C_{dr} = 0,05$			$C_{dr} = 0,10$		
	externe watervraag (mm)	Extra externe watervraag (mm)	% extra watervraag	externe watervraag (mm)	Extra externe watervraag (mm)	% extra watervraag	externe watervraag (mm)	Extra externe watervraag (mm)	% extra watervraag
0%	51	0	0%	78	0	0%	99	0	0%
25%	57	6	12%	81	3	4%	101	2	2%
50%	65	14	27%	85	7	9%	105	6	6%
75%	86	35	69%	100	22	28%	124	25	25%
100%	252	201	394%	252	174	223%	252	153	155%

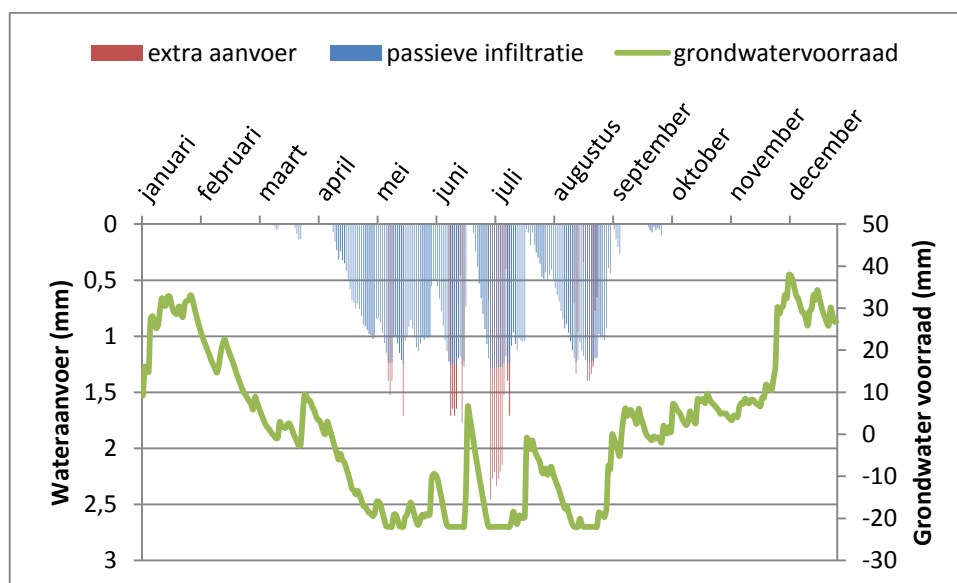
Variant 3: Beperking peil in een gemiddeld jaar en deze beperking vasthouden in een droog en zeer droog jaar

Uit tabel 6.3 kan worden afgelezen dat het beperken van het grondwaterpeil en deze beperking ook vasthouden in droge en zeer droge jaren, veel extra water behoeft. In droge jaren is de gemiddelde extra watervraag 67 mm. De hoeveelheid water die moet worden aangevoerd is vooral in een zeer droog jaar voor de lage waarde van C zeer hoog. De gemiddelde extra toename in een zeer droog jaar is 111 mm.

**Tabel 6.3:** Extra stedelijke watervraag bij een fluctuatie beperking van 50% in een gemiddeld jaar en indien de grondwater peilfluctuatie in droge en zeer droge jaren niet verder mag toenemen.

	$C_{dr} = 0,025$			$C_{dr} = 0,05$			$C_{dr} = 0,10$		
	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm) t.o.v. ref.	% extra	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm) t.o.v. ref.	% extra	Externe watervraag (mm)	Extra vraag (mm) t.o.v. ref.	% extra
<b>Gemiddeld jaar (1967)</b>	65	14	22%	85	7	9%	105	6	6%
<b>Droog jaar (1989)</b>	118	67	131%	143	65	83%	168	69	70%
<b>Extreem droog (1976)</b>	169	118	231%	185	107	137%	206	107	108%

Het extern aangevoerde water bestaat uit aanvulling vanuit het oppervlaktewater in de vorm van passieve infiltratie (via de oevers en drainagebuizen), en extra aanvoer (via berekening of actieve infiltratie van oppervlaktewater). Figuur 6.2 laat zien hoe deze extra watervraag over het jaar verdeeld is voor een drainagecoëfficiënt van 0.025 in variant 3 voor een zeer droog jaar. De grafiek laat zien dat de externe watervraag bijna volledig optreedt in de maanden april t/m september (zomerhalfjaar). In figuur 6.2 is ook de grondwaterberging aangegeven. De totale extra aanvoer bedraagt in dit geval 102 mm voor het gehele jaar. Dit is te zien in tabel 6.4.



**Figuur 6.2:** Variant 3 in een zeer droog jaar. Verdeling van externe watertoevoer door het jaar heen met onderscheid van passieve infiltratie en extra aanvoer.  $C_{dr}=0,025$ .

**Tabel 6.4:** Extra aanvoer, passieve infiltratie en totale externe watervraag voor een zeer droog jaar in variant 3 en  $C_{dr}=0,025$ .

	Passieve infiltratie (mm)	Extra aanvoer (mm)	totaal externe watervraag (mm)
april	4	0	4
mei	17	20	37
juni	12	24	36
juli	14	32	47
augustus	16	26	42
september	2	0	2
<b>totaal</b>	<b>67</b>	<b>102</b>	<b>169</b>

### 6.3 Conclusies actief grondwaterpeilbeheer

In dit hoofdstuk is onderzocht hoe de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater de externe stedelijke watervraag beïnvloedt. In dit hoofdstuk is de relatie tussen de drainage kenmerken en de externe watervraag gepresenteerd voor verschillende karakteristieke jaren. De verschillen tussen deze jaren geven een indicatie van de extra watervraag bij actief grondwaterpeilbeheer. Daarnaast is bestudeerd hoe het beperken van de fluctuatie van het grondwaterpeil leidt tot een extra externe watervraag. Voor grondwaterpeilbeheer zijn drie varianten bestudeerd.

#### Variant 1

Allereerst is bekeken hoeveel extra water nodig is om ten opzichte van een gemiddeld jaar de peilfluctuatie in een droog jaar en zeer droog jaar niet toe te laten nemen ten opzichte van een gemiddeld jaar. De resultaten geven aan dat:

- In een droog jaar gemiddeld 55 mm extra water nodig is.
- In een zeer droog gemiddeld jaar 102 mm extra water nodig is.

#### Variant 2

Als tweede variant is bekeken hoeveel extra water er nodig is om in een gemiddeld jaar de peilfluctuatie te beperken. Hoewel de hoeveelheid in absolute termen wellicht niet zo groot is, kan het procentueel toch een grote toename in watervraag betekenen ten opzichte van een situatie zonder actief grondwaterpeilbeheer.

#### Variant 3

Als laatste variant is bestudeerd hoeveel water nodig is als in een gemiddeld jaar de peilfluctuatie wordt beperkt en deze beperking moet worden vast gehouden in een droog en zeer droog jaar. De resultaten laten zien dat in dat geval de extra waterbehoefte:

- In een droog jaar gemiddeld 67 mm bedraagt.
- In een zeer droog jaar gemiddeld 111 mm bedraagt.





## 7. Mogelijke effecten van klimaatverandering

In dit hoofdstuk zal worden nagegaan wat de invloed is van klimaatverandering op de externe watervraag. In lijn met het Deltaprogramma zullen hiervoor de deltasenario's gebruikt worden. In dit hoofdstuk wordt het meest extreme klimaatscenario (W+) en het meest gematigde scenario (G) toegepast voor het jaar 2050. Voor meer informatie over de klimaatscenario's wordt verwezen naar bijlage E.

### 7.1 Invloed op maximale externe watervraag

Op dezelfde manier als in hoofdstuk 4 is de maximale watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad berekend voor de G en W+ scenario's. Dit levert het resultaat op zoals getoond in tabel 7.1. Opvallend is dat de bovengrens van stedelijke waterbehoefte bij het G scenario iets afneemt ten opzichte van de huidige situatie. Het verschil is echter zeer klein. In het W+ scenario neemt in alle karakteristieke jaren de bovengrens van stedelijke waterbehoefte met zo'n 12% toe. Dit is dus de maximale waterbehoefte in de stad als zowel oppervlaktewater als grondwater het hele jaar op hetzelfde niveau zou worden gehandhaafd.

**Tabel 7.1:** Geschatte bovengrens externe watervraag stedelijke watervraag in 2050 (G en W+)

	Referentie	G	W+
<b>Gemiddeld</b>	252 mm	245 mm	284 mm
<b>Droog</b>	321 mm	318 mm	359 mm
<b>Zeer droog</b>	337 mm	334 mm	377 mm

### 7.2 Actief grondwaterpeilbeheer en klimaatverandering

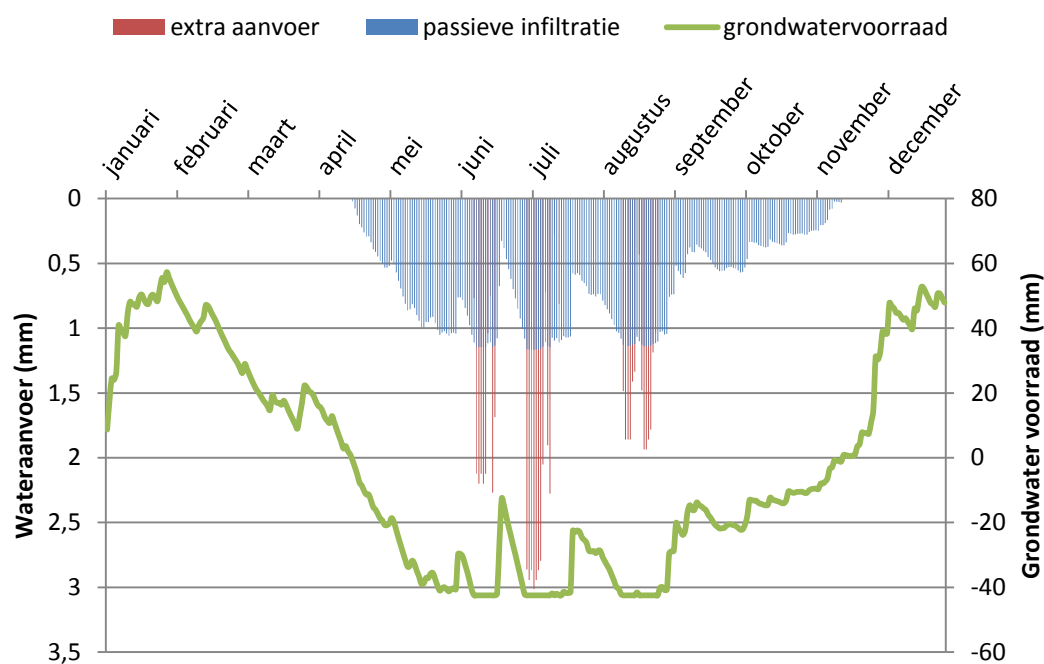
In het vorige hoofdstuk is bij variant 1 bestudeerd hoeveel extra water aangevoerd dient te worden om de grondwaterbergingscapaciteit niet verder toe te laten nemen in een droog een zeer droog jaar. Deze analyse wordt nogmaals uitgevoerd, maar nu voor een zeer droog jaar in het G en W+ klimaatscenario. Ter vergelijking wordt ook een zeer droog jaar in het huidige klimaat weergegeven.

#### Variant 4: Maximale peilfluctuatie niet verder laten toenemen in zeer droog jaar in het G en W+ scenario.

In dit geval mag de peilfluctuatie van het grondwater in een huidig gemiddeld jaar niet verder toenemen in een zeer droog jaar in het G en W+ klimaatscenario. De resultaten zijn samengevat in tabel 7.2. In het G scenario is de extra externe waterbehoefte en opzichte van een gemiddeld huidig jaar 103 tot 114 mm. De gemiddelde toename is 107 mm. Ten opzichte van het huidige zeer droge jaar (1976) is de toename beperkt, circa 5 à 6 mm.

**Tabel 7.2:** Extra stedelijke watervraag wanneer de grondwater peilfluctuatie van een gemiddeld jaar in het huidige klimaat tijdens zeer droge jaren nu en in de toekomst (2050) niet verder mag toenemen.

	$C_{dr}= 0,025$			$C_{dr}= 0,05$			$C_{dr}= 0,10$		
	Externe water-vraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra	Externe water-vraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra	Externe water-vraag (mm)	Extra vraag (mm)	% extra
<b>Gemiddeld jaar (1967)</b>	51	0	0%	78	0	0%	99	0	0%
<b>Zeer droog huidig</b>	160	109	214%	176	98	126%	197	98	99%
<b>Zeer droog G</b>	165	114	224%	181	103	132%	203	104	105%
<b>Zeer droog W+</b>	216	165	324%	232	154	197%	249	150	152%



**Figuur 7.1:** Externe waterbehoefte in een zeer droog jaar in het W+ scenario met actief grondwaterpeil-beheer.  $C_{dr}=0,025$ .

De externe stedelijke waterbehoefte is in het W+ scenario 216-249 met een gemiddelde van 232 mm. De tabel laat zien dat rekening moet worden gehouden met een substantieel hogere stedelijke waterbehoefte indien peilen op het huidige niveau dienen te worden gehandhaafd. Afhankelijk van de lokale drainagekenmerken geven de resultaten van tabel 7.2 aan dat het kan gaan om een extra vraag van 150-164 mm. Gemiddeld bedraagt de extra waterbehoefte voor actief grondwaterpeilbeheer 156 mm ten opzichte van het huidige referentiejaar (1967). Opgeschaald naar het stedelijk gebied van Laag Nederland zou dit een extra watervraag betekenen van 0,45 km<sup>3</sup>. Ten opzichte van het huidige zeer droge jaar (1976) is in het W+ scenario de extra waterbehoefte voor handhaving van de grondwaterpeilen 55 mm.

Figuur 7.1 toont in één grafiek het verloop van de grondwatervoorraad en de externe wateraanvoer voor een  $C_{dr}$  van 0,025 en het W+ scenario. In april komt de grondwatervoorraad onder het niveau van het oppervlaktewater te liggen. Vanaf dat moment treedt passieve infiltratie van oppervlaktewater op via de drainagebuizen en de oevers. Dit is aangegeven met een blauwe kleur in de grafiek. In juni, juli en augustus komt de grondwatervoorraad op een aantal dagen te liggen onder het niveau dat in een gemiddeld jaar optreedt. In dat geval is extra aanvoer nodig door middel van beregening, actieve infiltratie van oppervlaktewater of op een andere manier. Dit is aangegeven in rood. Figuur 7.1 laat zien dat de externe watervraag (passieve infiltratie + extra aanvoer) bijna volledig geconcentreerd is in het zomerhalfjaar (april t/m september). Wanneer de verdeling van deze waterbehoefte over het jaar wordt bekeken dan laat tabel 7.3 zien dat het in juli en augustus kan gaan om een waterbehoefte van meer dan 50 mm, waarvan een aanzienlijk deel door extra aanvoer wordt geleverd en de rest door passieve infiltratie vanuit het oppervlaktewater (via de oevers en drainagebuizen). Opvallend is ook dat de waterbehoefte langer door het jaar aanhoudt ten opzichte van de huidige en er zelfs begin november nog een kleine externe watervraag is.

**Tabel 7.3:** Extra aanvoer, passieve infiltratie en totale externe watervraag voor een zeer droog jaar in klimaat scenario W+ en  $C_{dr}=0,025$  variant 3.

	Passieve infiltratie	Extra aanvoer	totaal externe watervraag
<b>april</b>	4	0	4
<b>mei</b>	27	0	27
<b>juni</b>	26	17	43
<b>juli</b>	30	28	58
<b>augustus</b>	32	22	54
<b>september</b>	17	0	17
<b>oktober</b>	11	0	11
<b>november</b>	3	0	3
<b>totaal</b>	149	68	216

### 7.3 Conclusie klimaatverandering

Wanneer we de resultaten van dit hoofdstuk bekijken komen er een aantal zaken naar voren als het gaat om de effecten van klimaatverandering. De maximale theoretische externe stedelijke watervraag waar we rekening mee moeten nemen neemt beperkt toe met circa 12% in het W+ scenario. Tegelijkertijd laat dit hoofdstuk zien dat het vasthouden van grondwaterpeilen van een gemiddeld jaar in een zeer droog jaar in de toekomst zowel in het G scenario als het W+ scenario veel extra water vergt ten opzichte van de huidige gemiddelde situatie. De toename bedraagt:

- 107 mm in een zeer droog jaar in G scenario
- 156 mm in een zeer droog jaar in het W+ scenario

## 8. Overzicht, toepassing en beperkingen

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de resultaten en ingegaan op de toepasbaarheid en beperkingen van de resultaten.

### 8.1 Overzicht resultaten

Hieronder is een overzicht te vinden van de belangrijkste resultaten van deze studie.

#### Watervraag van de Nederlandse stad

- De watervraag van de gemiddelde Nederlandse stad bedraagt 812 mm.
- Voor het gehele stedelijke gebied in Nederland gaat het om 4.2 km<sup>3</sup>.
- De watervraag van het landelijk gebied bedraagt 595 mm ofwel 18.8 km<sup>3</sup>.

#### De externe watervraag van een gemiddelde Nederlandse stad

- De externe watervraag hangt in belangrijke mate af van de waterbergingscapaciteit in een stad.
- De minimale externe watervraag van de stad treedt op wanneer er onbeperkt waterberging aanwezig is. In dat geval is de externe watervraag 0.
- De externe watervraag van een gemiddelde stad in Laag Nederland bedraagt 36-147 mm in een gemiddeld jaar.
- De externe watervraag van een gemiddelde stad in Hoog Nederland bedraagt 0 - 36 mm in een gemiddeld jaar.

#### Bovengrens van watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer

- De maximale externe watervraag van een stad treedt op wanneer er geen enkele waterberging aanwezig is en 100% perfect peilbeheer van grondwater en oppervlaktewater wordt toegepast. In dat geval bedraagt de jaarlijkse externe stedelijke watervraag 252 mm (gemiddeld jaar), 321 mm (droog jaar) en 337mm (zeer droog jaar).
- Voor het gehele stedelijke gebied van Nederland gaat het dan om 1.3 km<sup>3</sup> (gemiddeld jaar), 1.7 km<sup>3</sup> (droog jaar) en 1.7 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar).

#### Extra watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer

De hoeveelheid extra water die nodig is om ten opzichte van een gemiddeld jaar de peilfluctuatie in een droog jaar en zeer droog jaar niet toe te laten nemen ten opzichte van een gemiddeld jaar bedraagt:

- In een droog jaar gemiddeld 55 mm.
- In een zeer droog jaar 102 mm.
- Opgeschaald naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om 0.16 km<sup>3</sup> (droog jaar) en 0.3 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar).

#### Extra watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer bij klimaatverandering

De toename in watervraag voor het vasthouden van grondwaterpeilen van een gemiddeld jaar in een zeer droog jaar in de toekomst zowel in het G scenario als het W+ scenario

- 107 mm in een zeer droog jaar in G scenario.

- 156 mm in een zeer droog jaar in het W+ scenario.
- Opgeschaald naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om 0.31 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar, G) en 0.45 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar, W+)

## 8.2 Implicaties van de resultaten

Om na te gaan met welke extra watervraag we landelijk rekening moeten houden worden een aantal varianten van landelijk actief grondwaterpeilbeheer geïntroduceerd.

1. Perfect grondwaterpeilbeheer in het volledige stedelijk gebied van heel Laag Nederland. Geen berging aanwezig.
2. Actief grondwaterpeilbeheer in het volledige stedelijk gebied van heel Laag Nederland
3. Actief grondwaterpeilbeheer in 50% van het stedelijk gebied van heel Laag Nederland.
4. Actief grondwaterpeilbeheer in 25% van het stedelijk gebied van heel Laag Nederland

Variante 1 dient als theoretische bovengrens, waar moeten we maximaal rekening mee houden. Variante 2 illustreert de situatie waar in heel Laag Nederland actief grondwaterpeilbeheer wordt ingevoerd waarbij de grondwaterpeilfluctuaties worden beperkt tot het niveau dat optreedt in een gemiddeld jaar. In variante 3 wordt dit in de helft van het stedelijk gebied van Laag Nederland toegepast. Variante 4 geeft de situatie waar voor 25% van het stedelijk gebied in Laag Nederland of ruim 700,000 huishoudens, actief grondwaterpeilbeheer wordt toegepast. Dit komt overeen met de hoeveelheid panden die volgens een recente studie liggen in een gebied waarin blootstelling kan plaatsvinden aan de effecten van grondwateronderlast en die bovendien gebouwd zijn in een periode waarin houten palen werden gebruikt.<sup>29</sup>

**Tabel 8.1:** Extra jaarlijkse nationale watervraag bij verschillende varianten van actief grondwaterpeilbeheer in laag Nederland

	Droog jaar (km <sup>3</sup> )	Zeer Droog jaar (km <sup>3</sup> )	Zeer Droog jaar W+ (km <sup>3</sup> )
<b>Variante 1</b>	0.9	1.0	1.1
<b>Variante 2</b>	0.16	0.3	0.45
<b>Variante 3</b>	0.08	0.15	0.23
<b>Variante 4</b>	0.04	0.073	0.11

In kubieke kilometers op nationale schaal ten opzichte van de totale Nederlandse watervraag (23 km<sup>3</sup>) is de toename beperkt, maar de grote concentratie van deze vraag in een aantal maanden van het jaar, plus het feit dat deze vraag juist optreedt in een periode dat de waterbeschikbaarheid onder druk staat maakt dat deze extra externe stedelijke watervraag bepaald niet verwaarloosd kan worden. Daarnaast is deze analyse opgesteld voor een ge-

middeld stedelijk gebied. Er zullen dus ook stedelijke gebieden zijn waar de waterbehoefte groter is. Op andere plaatsen zal de behoefte lager zijn.

Is het realistisch dat deze hoeveelheden water kunnen worden aangevoerd naar de stad? In bijlage F zijn een aantal mogelijkheden beschreven die toegepast kunnen worden. Vanuit het perspectief van waterkwantiteit kunnen de resultaten in een zeer droog W+ jaar vergeleken worden met de resultaten uit de aangescherpte knelpunt analyse. Hieruit blijkt dat er in Nederland ook zonder de extra watervraag voor actief grondwaterpeilbeheer in de toekomst waarschijnlijk tekorten kunnen optreden. Een extra watervraag vanuit de stad zal dit probleem verder vergroten, zeker in de sterk verstedelijkte regio's in Laag Nederland.

### 8.3 Kritische reflectie op de resultaten

Het doel van deze studie was om meer algemeen inzicht te verkrijgen in de waterbehoefte van stedelijke gebieden. Ook de effecten van actief grondwaterpeilbeheer en klimaatverandering op deze watervraag waren van belang. In deze studie zijn gebiedspecifieke processen en factoren zo veel mogelijk buiten beschouwing gelaten om een algemeen beeld te verkrijgen en antwoord te bieden op de vraag: 'waar moeten we straks op landelijke schaal rekening mee houden?' Dit betekent dat alleen die processen en factoren zijn meegenomen die in alle steden spelen en dat processen en factoren die op specifieke locaties van groot belang kunnen zijn, buiten beschouwing zijn gelaten. Dankzij deze aanpak konden de onderzoeksvragen van deze studie worden beantwoord. Tegelijkertijd is de toepasbaarheid van de resultaten in specifieke gebiedsstudies op lokaal niveau beperkt. Hiervoor is lokale gebiedskennis en een meer gedetailleerdere analyse nodig.

Perfect peilbeheer en de volstrekte afwezigheid van bergingscapaciteit in de stad zullen in de praktijk nooit voorkomen, maar geven wel een goed beeld wat de bovengrens is van de externe stedelijke watervraag. Hiermee beantwoordt deze studie een belangrijke deelvraag van dit onderzoek. De berekening van deze bovengrens is vooral afhankelijk van het neerslagtekort/overschot dat per dag voorkomt. Hierbij zijn aannamen gedaan voor stedelijke verdamping als vast percentage van de verdamping en de verliezen naar de RWZI. Deze aannamen zijn in de vorige hoofdstukken onderbouwd. Dit hoofdstuk heeft ook laten zien dat er ook in zeer droge jaren in principe genoeg neerslag valt om de totale stedelijke watervraag voor verdamping te kunnen dekken met inbegrip van verliezen naar de RWZI. De externe watervraag van een stad is dus vooral afhankelijk van de aanwezige waterbergingscapaciteit van de stad. Met name voor grondwaterbergingscapaciteit is het echter lastig een algemene inschatting te maken vanwege de grote variaties in tijd en plaats. Daarom zijn bandbreedtes gehanteerd voor waterberging en de resulterende watervraag.

In dit rapport zijn geen grondwaterstanden beschreven aangezien dat gedetailleerde lokale informatie zou behoeven, maar alleen veranderingen in grondwatervoorraad. In deze studie is steeds perfect peilbeheer verondersteld. In de praktijk zal het echter niet mogelijk zijn op iedere plek exact de juiste hoeveelheid water aan te voeren om een grondwaterstand boven een bepaalde grenswaarde te houden. Als er teveel aangevoerd wordt treden efficiency verliezen op. Ook kan de grondwaterstand op perceelniveau verschillen. De verdamping is in

de gehele studie als constante fractie van de referentieverdamping verondersteld. In de praktijk zal in de stad de verdamping toenemen bij extra wateraanvoer door beregening of actieve infiltratie van oppervlaktewater. Door dit proces moet vervolgens weer meer water aangevoerd worden. Vanwege de grote mate van veralgemenisering die noodzakelijkerwijs in deze studie is toegepast, kunnen de resultaten niet zonder meer als leidraad dienen voor gebiedspecifieke situaties. Daarvoor zijn gedetailleerdere en meer specifieke studies nodig.

Voor een aantal aannames, uitgangspunten en vereenvoudigingen in dit rapport is een gevoeligheidsanalyse gedaan. Hiervoor is variant 4 van actief grondwaterpeilbeheer als uitgangspunt genomen. Vervolgens is bekeken hoe de totale externe watervraag verandert als bepaalde aannames veranderen. Tabel 8.2 laat zien dat vooral de gevoeligheid voor fouten in de stedelijke verdamping zeer groot is. Het is daarom van groot belang hier meer kennis over op te bouwen om de extra watervraag ten gevolge van actief grondwaterpeilbeheer beter in te kunnen schatten. Het niet in beschouwing nemen van kwel en inzijging heeft ook grote invloed maar deze is beperkt tot die locaties waar deze processen een rol spelen. De gevoeligheid voor fouten in de schatting van afvoer van hemelwater naar de rwzi is relatief klein.

**Tabel 8.2:** Gevoeligheid externe watervraag voor veranderingen in uitgangspunten, aannames en gebiedsafhankelijke factoren

	Externe watervraag	% verandering
<b>Variant 4 (figuur 7.1. en tabel 7.3)</b>	216	
<b>Variant 4, 10% meer stedelijke verdamping</b>	256	+19%
<b>Variant 4, 10% minder stedelijke verdamping</b>	177	-18%
<b>Variant 4, Kwel: 0.5 mm/dag</b>	116	-46%
<b>Variant 4, Inzijging: 0.5 mm/dag</b>	333	+54%
<b>Variant 4, 10% meer afvoer naar RWZI</b>	222	+3%
<b>Variant 4, 10% minder afvoer naar RWZI</b>	210	-3%

Ondanks een aantal vereenvoudigingen heeft dit rapport inzicht opgeleverd aan welke extra watervraag we in een gemiddelde stad moeten denken als actief grondwaterpeilbeheer grootschalig wordt toegepast. De gevonden stedelijke watervraag ligt lager dan de boven-schatting die eerder in dit rapport bepaald is. Toch kan actief grondwaterpeilbeheer leiden tot een relatief grote extra watervraag ten opzichte van een situatie waar deze beheermethode niet wordt toegepast. Dit is in bijzondere mate het geval wanneer de peilfluctuatie van een gemiddeld jaar in droge en zeer droge jaren moet worden gehandhaafd.



## 9. Conclusies en aanbevelingen

Deze studie heeft een aantal conclusies opgeleverd die hierna kort zullen worden besproken.

### 9.1 Conclusies

De volgende conclusies worden getrokken:

- De gemiddelde Nederlandse stad is in deze studie gedefinieerd als de verzameling wijken met stedelijkheid 1,2 en 3 uit het CBS wijkenbestand. Deze wijken omvatten samen 14 % van Nederland en huisvesten 66% van de Nederlandse bevolking. De verhardingsgraad bedraagt 32.6%.
- De verkenning van de waterbehoefte van een gemiddelde stad laat zien dat een stad meer water nodig heeft dan het platteland. De verdamping ligt weliswaar lager, maar er treden ook extra verliezen op zoals afvoer van hemelwater naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie. Daarnaast is de drinkwatervraag en industriewatervraag in hoge mate geconcentreerd in stedelijke gebieden.
- Indien voldoende waterberging in steden gecreëerd zou kunnen worden dan was de externe stedelijke watervraag 0. In principe valt er, ook in een zeer droog jaar, voldoende neerslag, om de stedelijke verdamping te dekken. De hoeveelheid berging is zeker in Laag-Nederland, echter beperkt waardoor er altijd een externe watervraag ontstaat.
- De theoretische maximale watervraag treedt op bij perfect peilbeheer van grondwater en oppervlaktewater. In dat geval is de berging 0 en de externe watervraag maximaal. In een zeer droog jaar (1976) zou in dit geval 337 mm waterschijf moeten worden aangevoerd naar de stad. Opgeschaald naar het volledige stedelijk gebied van Laag Nederland is dit een externe stedelijke watervraag van bijna 1 km<sup>3</sup>.
- De hoeveelheid extra water die nodig is om ten opzichte van een gemiddeld jaar de peilfluctuatie in een droog jaar en zeer droog jaar niet toe te laten nemen ten opzichte van een gemiddeld jaar bedraagt:
  - In een droog jaar gemiddeld 55 mm.
  - In een zeer droog jaar 102 mm.
  - Opgeschaald naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om 0.16 km<sup>3</sup> (droog jaar) en 0.3 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar).
- Om de effecten van klimaatverandering te bestuderen is een variant bestudeerd waarbij de grondwaterpeilfluctuatie ten opzichte van een gemiddeld jaar, in een zeer droog jaar van het G en W+ scenario niet verder mag toenemen. De extra watervraag bedraagt:
  - 156 mm in een zeer droog jaar in het W+ scenario.
  - Opgeschaald naar het volledig stedelijk gebied van Laag Nederland gaat het om 0.45 km<sup>3</sup> (zeer droog jaar, W+).
- In kubieke kilometers op landelijke schaal is de bovenstaande toename beperkt, maar de grote concentratie van deze vraag in een aantal maanden van het jaar, plus het feit dat deze vraag juist optreedt in een periode dat de waterbeschikbaarheid onder druk staat maakt dat deze extra externe stedelijke watervraag bepaald niet verwaarloosd kan worden.

## 9.2 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Watervraag van het stedelijk gebied meenemen als belangrijke component bij landelijke waterbeheer studies.
- Rekening houden met een in sommige gevallen sterke toename (2 tot 3 keer zo hoog) van de externe stedelijke watervraag in zeer droge jaren wanneer actief grondwaterpeilbeheer wordt ingevoerd.
- Uitvoeren van deze studie voor de wijken met stedelijkheid 1 en 2. Dit geeft naast het beeld van de gemiddelde stad, inzicht in de watervraag van dichtbebouwde gebieden.
- Meer onderzoek verrichten naar stedelijke verdamping, aangezien de stedelijke watervraag hier zeer van afhangt.
- Meer onderzoek uitvoeren naar de capaciteit van grondwaterberging in het stedelijk gebied, aangezien dit een grote invloed heeft op de externe stedelijke watervraag.
- Onderzoek verrichten naar de stedelijke watervraag die volgt uit waterkwaliteitsaspecten en processen zoals kwel en doorspoeling.
- Het stimuleren van het ontwikkelen van technieken van actief grondwaterpeilbeheer.

## Bijlagen

### A. Methode berekening maximale watervraag

Voor de drie karakteristieke jaren (1967, 1976 en 189) is per dag de het neerslagoverschot en neerslag tekort berekend van KNMI neerslagstation De Bilt. Omdat de berging op 0 is gesteld leidt een neerslagtekort tot extra aanvoer een neerslagoverschot tot afvoer (drainage).

$$P_{eff}(t) - q_{drainage}(t) + q_{aanvoer}(t) = 0 \quad (A1)$$

$$q_{drainage}(t) = P_{eff}(t) \text{ als } P_{eff}(t) \geq 0 \quad (A2)$$

$$q_{aanvoer}(t) = P_{eff}(t) \text{ als } P_{eff}(t) < 0 \quad (A3)$$

$$P_{eff}(t) = P(t) - q_{rwzi}(t) - E_{stad}(t) \quad (A4)$$

$$q_{rwzi}(t) = 0,25 * P(t) \quad (A5)$$

$$E_{stad}(t) = 0,657 * E_{ref}(t) \quad (A6)$$

Met:

$P_{eff}(t)$	= Effectieve neerslag (mm)
$q_{rwzi}(t)$	= Afvoer regenval naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (mm)
$E_{stad}(t)$	= Stedelijke verdamping (mm)
$E_{ref}(t)$	= Referentieneerslag KNMI station De Bilt (mm)
$P(t)$	= Gemeten neerslag KNMI station De Bilt (mm)
$q_{drainage}(t)$	= Afvoer van water via drainage of wegpompen (mm)
$q_{aanvoer}(t)$	= Externe aanvoer van water (mm)
$t$	= tijdstip (dag)

Met een spreadsheet programma kunnen de termen van de jaarlijkse waterbalans kunnen dan als volgt worden berekend:

$$Neerslag = \sum_{n=0}^{365} P(t) \quad (A7)$$

$$Aanvoer = \sum_{t=0}^{365} q_{aanvoer}(t) \quad (A8)$$

$$Verdamping = \sum_{t=0}^{365} E_{stad}(t) \quad (A9)$$

$$Afvoer RWZI = \sum_{t=0}^{365} Q_{rwzi}(t) \quad (A10)$$

$$Drainage = \sum_{t=0}^{365} q_{drainage}(t) \quad (A11)$$

## B. Methode berekening watervraag en waterberging

De methode is in grote lijnen hetzelfde als bij de berekening van de maximale watervraag. Alleen nu is waterberging toegevoegd

$$S(t + 1) = S(t) + P_{eff}(t + 1) - q_{drainage}(t) + q_{aanvoer}(t) \quad (B1)$$

$$q_{drainage} = S(t) - V_{berging} \text{ als } S(t) \geq V_{berging} \quad (B3)$$

$$q_{drainage} = 0 \text{ als } S(t) < V_{berging} \quad (B4)$$

$$q_{aanvoer}(t) = S(t) \text{ als } S(t) < 0 \quad (B5)$$

$$q_{aanvoer}(t) = 0 \text{ als } S(t) > 0 \quad (B6)$$

$$P_{eff}(t) = P(t) - q_{rwzi}(t) - E_{stad}(t) \quad (B7)$$

$$q_{rwzi}(t) = 0,25 * P(t) \quad (B8)$$

$$E_{stad}(t) = 0,657 * E_{ref}(t) \quad (B9)$$

Met:

$S(t)$	= Totale waterberging (mm)
$P_{eff}(t)$	= Effectieve neerslag (mm)
$V_{berging}$	= Capaciteit waterberging (mm)
$q_{rwzi}(t)$	= Afvoer regenval naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (mm)
$E_{stad}(t)$	= Stedelijke verdamping (mm)
$E_{ref}(t)$	= Referentieneerslag KNMI station De Bilt (mm)
$P(t)$	= Gemeten neerslag KNMI station De Bilt (mm)
$q_{drainage}(t)$	= Afvoer van water via drainage of wegpompen (mm)
$q_{aanvoer}(t)$	= Externe aanvoer van water (mm)
$t$	= tijdstip (dag)

Met een spreadsheet programma kunnen de termen van de jaarlijkse waterbalans kunnen dan als volgt worden berekend voor verschillende waarden van x (capaciteit waterberging):

$$Neerslag = \sum_{n=0}^{365} P(t) \quad (B10)$$

$$Aanvoer = \sum_{t=0}^{365} q_{aanvoer}(t) \quad (B11)$$

$$Verdamping = \sum_{t=0}^{365} E_{stad}(t) \quad (B12)$$

$$Afvoer RWZI = \sum_{t=0}^{365} Q_{rwzi}(t) \quad (B13)$$

$$Drainage = \sum_{t=0}^{365} q_{drainage}(t) \quad (B14)$$

De capaciteit van de berging kan steeds worden gevarieerd waarna de externe watervraag kan worden afgelezen voor verschillende bergingscapaciteiten en verschillende karakteristieke jaren.

## C. Benadering grondwaterberging in gemiddelde Nederlandse stad

Voor een analyse van de grondwaterbergingscapaciteit is het van belang om de porositeit en bodemvocht karakteristieken van verschillende bodemtypen in beschouwing te nemen.

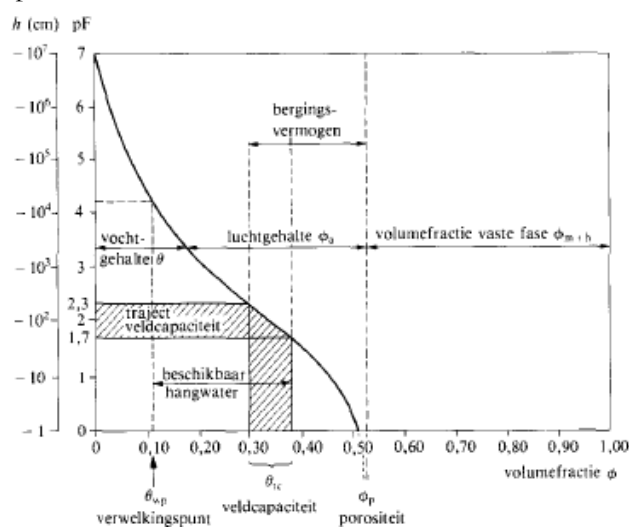
### Porositeit

Allereerst kan alleen de ruimte tussen de bodemdeeltjes benut worden voor waterberging. De bergingscapaciteit wordt voor een deel dus bepaald door de porositeit van de bodem. Voor klei varieert de porositeit tussen 0.41 en 0.67 met een gemiddelde van 0.54, bij zand is de porositeit tussen de 0.29 en 0.4, met een gemiddelde van 0.3.<sup>30</sup> Dit is de fractie van een volume grond die theoretisch maximaal benut kan worden voor waterberging.

### Bodemvocht

In de realiteit is het waterbergend vermogen van de bodem een stuk lager dan de porositeit. Grondwater bestaat uit een verzadigde en onverzadigde zone. In de verzadigde zone zijn de poriën volledig gevuld met water. In de onverzadigde zone zijn de poriën voor een deel gevuld met water en voor een deel met lucht. Binnen de onverzadigde zone zijn verschillende karakteristieke punten voor het bodemvochtgehalte. Veldcapaciteit is het bodemvochtgehalte waarbij al het overtollige grondwater is uitgezakt. De veldcapaciteit is verschillend voor verschillende bodemsoorten. Het verwelkingspunt is het bodemvochtgehalte waarbij planten niet langer meer water uit de grond kunnen opnemen en dus geen water meer verdampen. De verschillende karakteristieke punten kunnen worden uitgezet in een zogenaamde pF curve waar de drukhoogte van het grondwater is uitgezet tegen het vochtgehalte. In deze figuur is ook te zien dat het bergingsvermogen gelijk is aan het verschil tussen het vochtgehalte bij een verzadigde toestand en de veldcapaciteit.

De bergingscapaciteit van de bodem is dus zeer afhankelijk van de bodemvocht karakteristieken die door het seizoen heen variëren en ook nog eens zeer verschillend zijn op verschillende locaties. Voor het doel van deze studie schept dit het probleem dat dit het zeer lastig maakt om algemene uitspraken te doen over de waterbergingscapaciteit van de bodem in de stad. Omdat we hebben gezien dat de externe watervraag sterk afhangt van die bergingscapaciteit maakt dit ook het inschatten van de algemene externe watervraag van een gemiddelde stad zeer lastig. Met behulp van zogenaamde grondwaterbergingscoëfficiënten kan niettemin een poging worden gedaan om de bergingscapaciteit in te schatten.



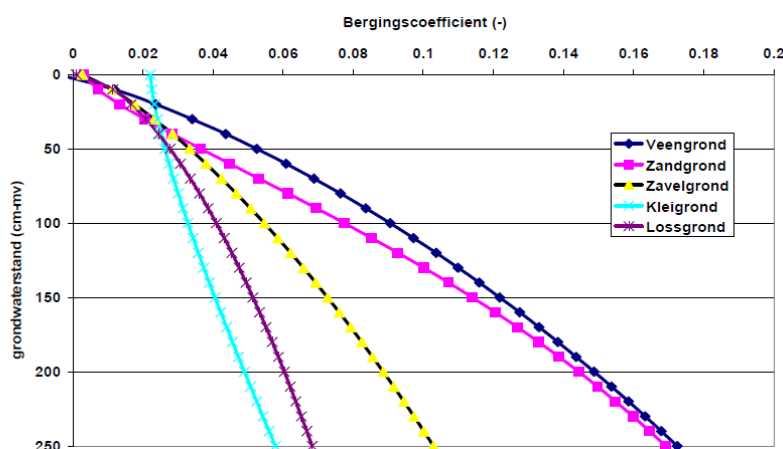
**Figuur A1.** Karakteristiek bodemvocht curve waarin de drukhoogte van het grondwater is uitgezet tegen het bodemvochtgehalte (bron: Cultuurtechnische Vereniging, 1988)

### Bergingscoëfficiënt van grondwater

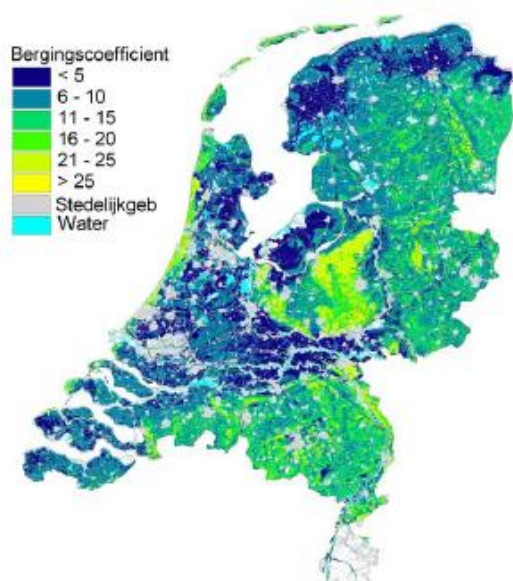
Waar bij oppervlaktewater de bergingscapaciteit gelijk is aan de peilfluctuatie (bergingscoëfficiënt=1) is bij grondwater sprake van een veel lagere bergingscoëfficiënt. De bergingscoëfficiënt is de ratio tussen de verandering van het grondwaterpeil en de verandering in berging. Bij een bergingscoëfficiënt van 0,15 komt bij een grondwaterstand daling van één meter, 15 centimeter water vrij. Andersom zal bij het opslaan van 15 cm water in de bodem de grondwaterstand met een meter stijgen. Ook de bergingscoëfficiënt is echter niet constant maar afhankelijk van de grondsoort, de grondwaterstand, en de grondwaterdynamiek (stijging of daling van de grondwaterstand). Om deze redenen is het niet mogelijk algemene uitspraken te doen over de waterbergingscoëfficiënt van grondwater.

Alterra heeft in een studie naar de watervraag van de groene ruimte de waterbergingscoëfficiënten van verschillende grondsoorten bij verschillende diepten in kaart gebracht.<sup>31</sup> Dit is te zien in figuur A2. Uit deze grafiek is ook op te maken dat de bergingscapaciteit varieert tussen 0 en 0.2 en dat de capaciteit sterk afneemt bij hogere grondwaterstanden. Ook is de bergingscapaciteit een stuk lager dan de porositeit (ruimte die beschikbaar is tussen de bodemdeeltjes). Figuur A2 laat ook zien dat zandgrond heeft een grotere bergingscapaciteit dan kleigrond. Zowel de grondwaterstanden als de grondsoorten verschillen in verschillende delen van Nederland. Door Alterra is de grondwater bergingscoëfficiënt uitgezet op de kaart van Nederland.<sup>32</sup> De figuur laat zien dat de bergingscoëfficiënt in Laag Nederland overwegend tussen de 0 en 10% bedraagt. In Hoog Nederland ligt deze coëfficiënt overwegend tussen de 11 en 20%.

Helaas zijn er voor het stedelijk gebied geen gegevens beschikbaar voor de bergingscoëfficiënt. Aan de ene kant zal in stedelijke gebieden van Laag Nederland de bergingscoëfficiënt wellicht hoger liggen dan de omgeving vanwege de aanwezigheid van ophoogzand dat een hogere bergingscapaciteit heeft dan het klei en veen in het omliggend gebied. Aan de andere kant zal de grondwaterstand onder gebouwen niet vrij kunnen fluctueren in Laag-Nederland. Dit zal de waterbergingscapaciteit weer verlagen ten opzichte van het omliggend gebied. Voor de globale inschatting van de bergingscapaciteit en externe watervraag in deze studie, zullen we er daarom vanuit gaan dat beide aspecten elkaar compenseren en de grondwaterbergingscapaciteit van de stad gelijk is aan dit van het omliggende gebied. De grondwaterbergingscapaciteit kan in dat geval worden geschat door de bergingscoëfficiënt van het grondwater en de jaarlijkse peilfluctuaties van het grondwater met elkaar te vermenigvuldigen.



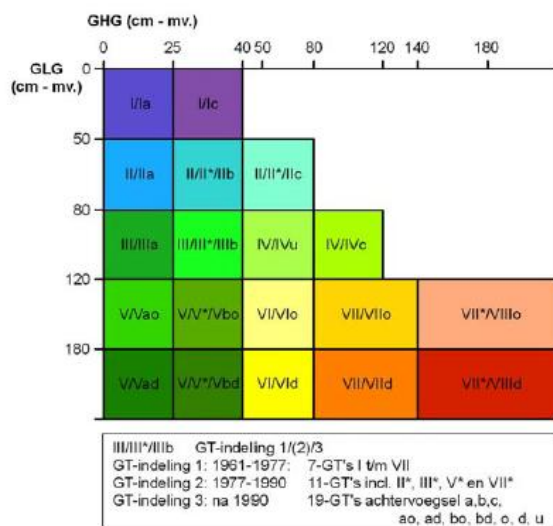
**Figuur A2:** Coëfficiënten van grondwaterberging bij verschillende grondwaterstanden en grondsoorten (bron: Alterra 2009)



**Figuur A3:** Bergingscoëfficiënten van grondwater in procenten verdeeld over Nederland (Alterra, 2005)

Jaarlijkse peilfluctuatie van het grondwater

Nederland is ingedeeld in zogenaamde grondwatertrappen op basis van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) die in een bepaald gebied optreden. Deze trappen zijn weergegeven in figuur A4 en geven een indicatie van de jaarlijkse peilfluctuatie van het grondwater.



**Figuur A4:** indeling in grondwatertrappen op basis van grondwaterregime (Alterra, 2005)

Door Van der Sluijs (1990) zijn de gemiddelde hoogste (GHG) en laagste grondwaterstanden (GLG) voor een groot aantal meetpunten in Nederland geïnventariseerd.<sup>33</sup> Daarna is dit door Van der Gaast en Massop (2003) geactualiseerd.<sup>34</sup> Uit deze gegevens is de gemiddelde jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand af te leiden. In Laag Nederland komen de trappen I t/m IV vaker voor op basis van tabel A1 kunnen we de gemiddelde grondwaterfluctuatie dan inschatten op 0.3-0.8. In

Hoog Nederland komen voornamelijk V t/m VI voor, de gemiddelde grondwaterfluctuatie kunnen we dan inschatten op ongeveer 0.8-1.2 meter. Deze inschattingen kunnen worden vergeleken met de modelberekeningen die in het kader van de aangescherpte knelpuntanalyse zoetwater zijn gedaan.<sup>35</sup> Ook daaruit kan worden opgemaakt hoeveel de grondwaterstand fluctueert door het jaar heen. Deze resultaten laten zien dat In Laag Nederland de fluctuatie van het grondwaterpeil over het algemeen kleiner is dan 1 meter. In Hoog Nederland is de fluctuatie vaak groter dan 1.

**Tabel A1:** Relatie tussen grondwatertrappen en gemiddelde grondwaterstanden (Alterra, 2003)

Gt	GLG (cm)	GHG (cm)	Grondwaterfluctuatie GHG-GLG (cm)
I	5,3	36,5	31,2
II	4,8	65,6	60,8
II*	35,9	73,4	37,5
III	13,3	97,7	84,4
III*	32,7	101,9	69,2
IV	56,7	106,9	50,2
V	16,8	139,7	122,9
V*	33,5	145,6	112,1
VI	62,4	159,2	96,8
VII	105,6	191,1	85,5
VII*	201,1	294,6	93,5



## D. Methode berekening watervraag met waterberging en interactie met oppervlaktewater

Grondwater-oppervlaktewater interactie is een complex proces dat afhankelijk van vele locatiespecifieke factoren die in deze studie niet worden meegenomen. In essentie is grondwaterstroming echter terug te brengen tot het product van potentiaalverschil en weerstand. Welk deel van de grondwaterberging afstroomt, hangt af van het verschil tussen grondwaterniveau en oppervlaktewaterniveau (potentiaalverschil) en de waarde van de drainagecoëfficiënt (weerstand). Dit verband is omschreven in de Wet van Darcy, die wanneer het oppervlaktewaterniveau op 0 wordt gesteld in zijn meest eenvoudige vorm te schrijven is als:

$$q = C_{dr} * S_{gw}$$

Met:

$q$	=	Stroming van grondwater naar oppervlaktewater [mm/dag]
$C_{dr}$	=	Drainagecoëfficiënt ( $\text{dag}^{-1}$ )
$S_{gw}$	=	Grondwaterberging (mm)

De drainagecoëfficiënt drukt de connectiviteit uit tussen grondwater en oppervlaktewater. Bij een drainagecoëfficiënt van 1 wordt de totale hoeveelheid grondwaterberging die op een dag wordt opgebouwd direct afgevoerd naar het oppervlaktewater. De bodem heeft in dat geval geen watervasthoudend vermogen. Bij een drainagecoëfficiënt van 0 is er volstrekt geen verbinding tussen grondwater en oppervlaktewater en wordt de verandering van berging alleen bepaald door het neerslagtekort of overschot. Bij een drainagecoëfficiënt van 0,5 wordt iedere dag 50% van de totaal opgebouwde cumulatieve grondwaterberging afgevoerd naar het oppervlaktewater. Als het niveau van de grondwaterberging lager komt te liggen dan het oppervlaktewater, dan wordt de grondwaterberging met dezelfde fracties aangevuld vanuit het oppervlaktewater.

De grondwaterberging geeft aan hoeveel water er geborgen wordt in de bodem en is dus niet gelijk aan de grondwaterstand. Deze is immers weer afhankelijk van vele gebiedspecifieke factoren zoals de porositeit, bodemvochtgehalte, bergingscoëfficiënt, drainafstand en vele andere factoren. Wel stelt bovenstaande aanpak in zijn meest eenvoudige vorm ons in staat om algemeen inzicht op te bouwen hoe de connectiviteit tussen grondwater en oppervlaktewater de externe watervraag beïnvloedt. Dit inzicht kan vervolgens weer gebruikt worden om te onderzoeken tot welke extra watervraag beperking van de grondwaterberging leidt. Omdat actief grondwaterpeilbeheer in essentie het beperken van grondwaterbergingscapaciteit is, wordt daarmee een belangrijke vraag van deze studie beantwoord.

De methode is in grote lijnen hetzelfde als bij de berekening met waterberging in bijlage B. Er worden echter een aantal componenten toegevoegd. Onderscheid wordt gemaakt tussen reguliere drainage naar het oppervlaktewater en drainage die optreedt wanneer de maximaal toegestane grondwaterberging wordt overschreden. Omdat we uitgaan van perfect peilbeheer worden deze overschrijdingen direct afgevoerd naar het oppervlaktewater. Reguliere drainage naar het oppervlaktewater treedt op zodra het grondwaterpeil hoger komt te liggen dan het vaste oppervlaktewater peil. Infiltratie van het oppervlaktewater naar het grondwater treedt op wanneer het grondwaterpeil lager komt te liggen dan het oppervlaktewaterpeil. Omdat er wordt uitgegaan van actief grondwaterpeilbeheer wordt een minimaal en maximaal niveau van grondwaterberging gespecificeerd. Door deze waarden te variëren kan steeds de extra externe watervraag die ontstaat uit een beperking van toege-

stane grondwaterbergingscapaciteit worden berekend. Ook de drainagecoëfficiënt kan op deze wijze worden gevarieerd zodat het verband tussen de drainagecoëfficiënt en de externe watervraag bekeken kan worden.

#### Berekening bij actief grondwaterpeilbeheer

De berekeningsmethode is in grote lijnen hetzelfde als bij de berekening van externe watervraag en bergingscapaciteit. Er worden echter een aantal componenten toegevoegd. Onderscheid wordt gemaakt tussen reguliere drainage naar het oppervlaktewater en extra drainage die optreedt wanneer de maximaal toegestane grondwaterberging wordt overschreden. Omdat we uitgaan van perfect peilbeheer worden deze overschrijdingen direct afgevoerd naar het oppervlaktewater. Reguliere drainage naar het oppervlaktewater treedt op zodra het grondwaterpeil hoger komt te liggen dan het vaste oppervlaktewater peil. Infiltratie van het oppervlaktewater naar het grondwater treedt op wanneer het grondwaterpeil lager komt te liggen dan het oppervlaktewaterpeil. Zodra de grondwaterberging beneden de vastgestelde grenswaarde komt wordt er extra water aangevoerd. Dit kan worden gerealiseerd met actieve infiltratie van oppervlaktewater of beregening. Door deze waarden te variëren kan steeds de extra externe watervraag die ontstaat uit een beperking van toegestane grondwaterstanddaling en grondwaterstandstijging worden berekend.

$$S_1(t + 1) = S_2(t) + P_{eff}(t + 1) \quad (D1)$$

$$S_2(t) = S_1(t) - q_{drainage1}(t) - q_{drainage2}(t) + q_{inf}(t) + q_{aanvoer}(t) \quad (D2)$$

$$P_{eff}(t) = P(t) - q_{rwzi}(t) - E_{stad}(t) \quad (D3)$$

$$q_{drainage1}(t) = S_1(t) * C_{drainage} \text{ als } S_1(t) > h_{ow} \quad (D4)$$

$$q_{drainage1}(t) = 0 \text{ als } S_1(t) \leq h_{ow} \quad (D5)$$

$$q_{drainage2}(t) = S_1(t) - x_1 \text{ als } S_1(t) > x_1 \quad (D6)$$

$$q_{drainage2}(t) = 0 \text{ als } S_1(t) \leq x_1 \quad (D7)$$

$$q_{infiltratie,ow}(t) = -S_1(t) * C_{drainage} \text{ als } S_1(t) < h_{ow} \quad (D8)$$

$$q_{infiltratie,ow}(t) = 0 \text{ als } S_1(t) > h_{ow} \quad (D9)$$

$$q_{aanvoer}(t) = -(S_1(t) - x_2) \text{ als } S_1(t) - x_2 < 0 \quad (D10)$$

$$q_{aanvoer}(t) = 0 \text{ als } S(t) - x_2 \geq 0 \quad (D11)$$

$$q_{rwzi}(t) = 0,25 * P(t) \quad (D12)$$

$$E_{stad}(t) = 0,657 * E_{ref}(t) \quad (D13)$$

Met:

$S_1(t)$  = Totale waterberging (mm)

$S_2(t)$  = Totale waterberging na aanvoer en drainage (mm)

$P_{eff}(t)$  = Effectieve neerslag (mm)

$q_{rwzi}(t)$  = Afvoer regenval naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (mm)

$E_{stad}(t)$  = Stedelijke verdamping (mm)

$E_{ref}(t)$	= Referentieneerslag KNMI station De Bilt (mm)
$P(t)$	= Gemeten neerslag KNMI station De Bilt (mm)
$q_{drainage1}(t)$	= Afvoer van grondwater naar oppervlaktewater via drainage (mm)
$q_{drainage2}(t)$	= Extra afvoer van grondwater naar oppervlaktewater wanneer maximale grondwaterberging wordt overschreden(mm)
$q_{inf}(t)$	= Passieve infiltratie van oppervlaktewater naar het grondwater
$q_{aanvoer}(t)$	= Externe aanvoer van water (mm)
$t$	= tijdstip (dag)
$x1$	= Maximaal toegestaan waterbergingsniveau (mm)
$x2$	= Minimaal toegestaan waterbergingsniveau(mm)
$h_{ow}$	= Oppervlaktewaterpeil = 0 (mm)

Met een spreadsheet programma kunnen de termen van de jaarlijkse waterbalans kunnen dan als volgt worden berekend voor verschillende waarden van  $x$  (capaciteit waterberging):

$$Neerslag = \sum_{n=0}^{365} P(t) \quad (D14)$$

$$Aanvoer = \sum_{t=0}^{365} q_{aanvoer}(t) + \sum_{t=0}^{365} q_{inf}(t) \quad (D15)$$

$$Verdamping = \sum_{t=0}^{365} E_{stad}(t) \quad (D16)$$

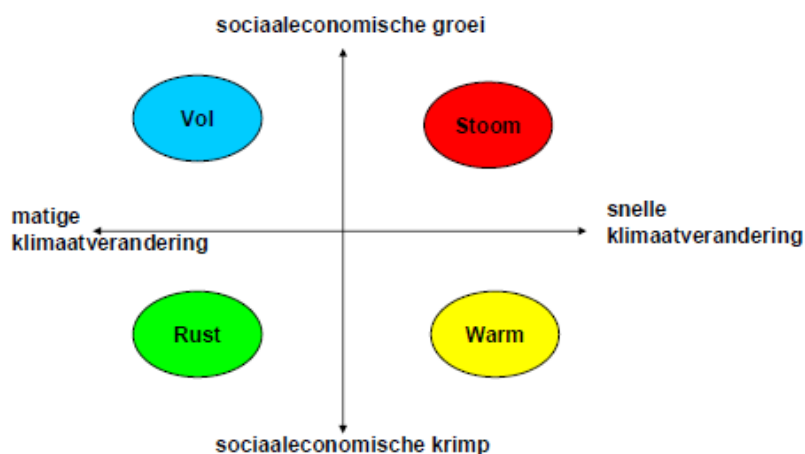
$$Afvoer RWZI = \sum_{t=0}^{365} Q_{rwzi}(t) \quad (D17)$$

$$Drainage = \sum_{t=0}^{365} q_{drainage}(t) \quad (D18)$$

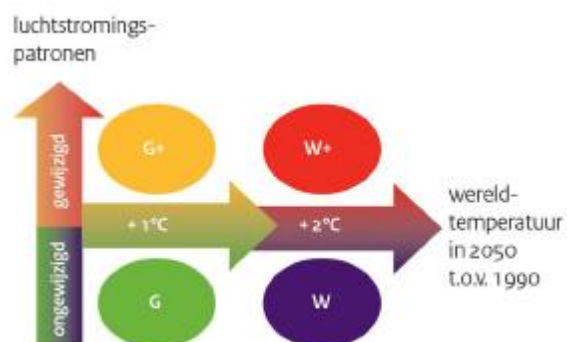
$$\Delta S = S_1(0) - S_2(365) \quad (D19)$$

## E. Deltascenario's

Om de effecten van klimaatverandering en socioeconomische veranderingen te bestuderen zijn in het kader van het Deltaprogramma een viertal scenario's ontwikkeld.<sup>36</sup> In deze scenario's zijn de vier KNMI klimaatscenario's verwerkt. In dit rapport zijn in lijn met het Deltaprogramma twee van de vier KNMI klimaatscenario's gebruikt, namelijk G en W+.



**Figuur A5:** De Deltascenarios die binnen het Deltaprogramma worden gebruikt (Deltares, 2011)



**Figuur A6:** De klimaatscenario's die in de deltasenario's zijn verwerkt (KNMI, 2006)

## F. Inpassingsmogelijkheden grondwaterpeilbeheer

In dit rapport is tot nu toe slechts aandacht besteed aan de waterkwantiteitsaspecten van grondwaterpeilbeheer en de stedelijke watervraag. Hoe het water naar de stad kan worden gebracht en hoe het daadwerkelijk kan worden toegepast is nog niet aan de orde gekomen. Een aantal hoofdrichtingen wordt onderscheiden om de peilfluctuatie van het grondwater te beheersen, waaraan hierna kort aandacht wordt besteed.

- Verbeteren drainage
- Beregening
- Actieve infiltratie van oppervlaktewater
- Infiltreren van regenwater
- Benutting van andere stedelijke bronnen

### Verbeteren drainage

In dit rapport is beschreven hoe de drainagekenmerken de bergingscapaciteit en de externe stedelijke watervraag beïnvloeden. Door de drainage te verbeteren neemt de peilfluctuatie af en de infiltratie vanuit het oppervlaktewater naar het grondwater toe. Hiermee neemt ook de externe watervraag van de stad toe aangezien het peil van het oppervlaktewater moet worden gehandhaafd. Bij het verbeteren van de drainagekarakteristieken gaat het niet alleen om de doorlatendheid, maar ook om de kwaliteit van de ontwateringsmiddelen (drainagebuizen), de drainafstand, de diepteligging van de buizen en drooglegging en de fijnmazigheid van het waternetwerk. Het verbeteren van drainage kan ook een bijdrage leveren aan het voorkomen van wateroverlast. Een belangrijk aandachtspunt is dat problemen vaak zeer lokaal optreden en dat de bodem heterogeen is. Daarom vereist het toepassen van deze oplossingsrichting maatwerk en gedegen lokale gebiedskennis. Ook beheer en onderhoud zijn van groot belang om deze oplossingsrichting op lange termijn effectief te laten zijn.

### Beregening

In de landbouw wordt beregening al grootschalig toegepast. In de stad is dit echter nauwelijks het geval met uitzondering van de irrigatie door particulieren op privaat terrein. Beregening in de stad kan ook een bijdrage leveren aan het bestrijden van hittestress. Gemeenten doen over het algemeen nog niet veel aan beregening. Omdat de watervraag van de stad de watervraag van het platteland niet zoveel ontloopt is het de vraag of beregening ook in de stad niet een effectieve manier zou zijn om schade te voorkomen, net zoals op het platteland het geval is. Uiteindelijk gaat het dan om een economisch vraagstuk. Hoeveel water moet worden aangeleverd tegen welke prijs en hoeveel schade kan hiermee worden voorkomen? Dergelijke afwegingen worden ook in de landbouweconomie gemaakt. Een aandachtspunt is wel hoe het water op de juiste plek kan worden gebracht. Beregening van openbaar groen ligt voor de hand, maar zeker in dichtbebouwd stedelijk gebied is dit niet altijd overal aanwezig. Een andere optie is om particulieren in te schakelen om hun tuinen te beregenen. Dit is een interessante optie aangezien zij het water zeer dicht bij de plek kunnen krijgen waar het uiteindelijk moet zijn, namelijk de fundering. Ook zijn particulieren uiteindelijk belanghebbende. Het is in dat geval wel belangrijk om medewerking te verkrijgen van voldoende particulieren. Ook dient het grondwater goed gemonitord te worden om inzicht te krijgen in de effectiviteit van deze maatregel.

### Actieve infiltratie van oppervlaktewater

Een andere oplossingsrichting voor actief grondwaterpeilbeheer is het onttrekken en infiltreren van oppervlaktewater. In de landbouw staat deze methode bekend als irrigatie. In steden wordt het nog

nauwelijks toegepast, maar in principe zijn dezelfde maatregelen toepasbaar. Veel steden in Laag-Nederland liggen in polders dus de waterdistributie zou met behulp van zwaartekracht plaats kunnen vinden. Omdat de problemen die actief grondwaterpeilbeheer beoogt te voorkomen zeer lokaal optreden, is een fijnmazig distributie netwerk vereist. Net als bij beregening is openbaar groen nodig om te kunnen infiltreren of speciaal aangelegde infiltratiesystemen. In Nederland zijn we er echter ook in geslaagd om met een fijnmazige distributie iedere woning te voorzien van drinkwater tegen redelijk lage kosten per inwoner. Of een dergelijk fijnmazig systeem ook voor oppervlaktewater infiltratie haalbaar is, vereist een economische evaluatie naast een beoordeling of hiervoor voldoende water op lokaal/regionale schaal beschikbaar is tijdens droogte.

### Infiltratie van regenwater

Het afkoppelen van regenwater wordt steeds meer toegepast in steden en deels wordt dit water ook geïnfiltrerd in de bodem. Hoewel deze oplossing kan bijdragen aan het reduceren van de laagste grondwaterstanden, treedt infiltratie van regenwater over het algemeen niet op tijdens een periode dat het nodig is, namelijk tijdens droogte. Ook kan het infiltreren van regenwater leiden tot hogere grondwaterstanden in de winter en daarmee tot meer wateroverlast. Dit vereist dan weer een betere drainage. Dit blijkt ook uit een recente studie voor Amsterdam Prinseneiland van Deltares waarin deze maatregel bestudeerd is.<sup>37</sup>

### Benutting van andere stedelijke bronnen

Benutting van andere stedelijke bronnen die nu nog als 'verliespost' op de stedelijke waterbalans staan zijn grijswater en effluent van de rioolwaterzuivering. Grijswater wordt in ieder huishouden geproduceerd, ook tijdens droogte. Deze bron is dus zeer gedistribueerd aanwezig in de stad. Momenteel wordt grijs water nog overwegend geloosd op het riool maar het zou ook gebruikt kunnen worden om met behulp van een eenvoudig systeem te infiltreren in de tuinen van particulieren. Onder andere in Australië is hier al veel ervaring mee opgedaan.

Effluent van de afvalwaterzuivering zou met behulp van sprinklersystemen op de straten kunnen worden gespreid. Dit wordt onder andere in Japan ingezet om de hittestress en fijnstof in de stad te bestrijden. Groot voordeel is dat dit water op een straat wel infiltreert maar niet zo snel weer verdampt nadat het tussen de stenen door geïnfiltrerd is. Ook is onder een straat vaak goed doorlatend materiaal (zand) aanwezig. Daarnaast zijn straten zo aangelegd dat iedere huis bereikt kan worden, een aspect dat ook van groot belang is voor actief grondwaterpeilbeheer.



**Figuur A7:** Sprinklerleiding voor het besproeien van de weg met effluent, Tokyo, Japan (foto: Rutger de Graaf, 2006)



**Figuur A8:** Infiltratie van grijs water in de particuliere tuin in Perth, Australië (foto: Rutger de Graaf, 2007)

## Referenties

- <sup>1</sup> CIA (2013) The World Factbook. Field listing urbanization.  
<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2212.html>
- <sup>2</sup> <http://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/FE45D7DF-24E8-4DAD-98A3-FA9CCB17D4DB/0/20132012b68pub.pdf>
- <sup>3</sup> Hoogvliet, M. (2013) Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool, Deltares, 2013
- <sup>4</sup> Leduc, W. en R. Rovers (2008) Urban Tissue: the representation of the Urban Energy Potential. PLEA2008 conference on passive and low energy architecture, Dublin.
- <sup>5</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>6</sup> CBS(2000) Nederland in delen. Hoog en Laag. Index.nr 6, juni 2000.  
<http://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/B693D02F-5036-4D89-A6E1-093CED29B31A/0/index1068.pdf>
- <sup>7</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>8</sup> Rioned (2010) Feiten over de riolering. T.b.v. feitenonderzoek in het kader van doelmatigheid waterketen.
- <sup>9</sup> Idem
- <sup>10</sup> Hoogvliet, M. (2013) Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool, Deltares, 2013
- <sup>11</sup> Van Dooren (2009) Regenwater in de tuin? Mooi wel! Rioned en STOWA. ISBN. 978 90 73645 24 0
- <sup>12</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>13</sup> Hoogvliet, M., J. Buma, R. Broelsma, G. de Lange, H. Landwehr, M. Coenders-Gerrits, P. Rutten en P. Landa (2013) Naar een bestendige stedelijke waterbalans. Deltares.
- <sup>14</sup> Rutten, P.J.P. (2013) The urban water cycle: A case study of the Prinseneiland, Amsterdam. MSc. Thesis TU Delft. Deltares.
- <sup>15</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>16</sup> Van de Ven, F.H.M. and Voortman, B.R. (1985) De waterbalans van een stedelijk gebied; ervaringen in twee meetgebieden in Lelystad, H2O 18(1985)8, pp 170 – 176
- <sup>17</sup> Davies, H.A. (1981) the water balance of urban impermeable surfaces. Catchment and process studies. University College London.
- <sup>18</sup> Mansell, M and F. Rollet (2008). The Effect of Surface Texture on Evaporation, Infiltration and Storage Properties of Paved Surfaces. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- <sup>19</sup> FISRWG(1998) Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998.
- <sup>20</sup> Grimmond, C.B.S. and T.R. Oke (1991) An evaporation-interception model for urban areas. Water Resources Research 27(7): 1739-1755
- <sup>21</sup> Rutten, P.J.P. (2013) The urban water cycle: A case study of the Prinseneiland, Amsterdam. MSc. Thesis TU Delft. Deltares.
- <sup>22</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>23</sup> Hoogvliet, M. (2013) Stedelijk gebied in DPZW strategie ontwikkeling tool, Deltares, 2013



- <sup>24</sup> Van de Ven, F.H.M. and Voortman, B.R. (1985) De waterbalans van een stedelijk gebied; ervaringen in twee meetgebieden in Lelystad, H2O 18(1985)8, pp 170 – 176
- <sup>25</sup> De Graaf (2005) Transitions to more sustainable urban water management. MSc Thesis. Delft University of Technology. Delft, the Netherlands.
- <sup>26</sup> Hoogheemraadschap van Delfland (2007) Beleidsnota peilbesluiten. Een nieuwe basis voor peilbesluiten.
- <sup>27</sup> Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (2011). Beleidsnota peilbeheer. Uitgangspunten voor het opstellen en uitvoeren van peilbesluiten en watergebiedsplannen.
- <sup>28</sup> Hoogvliet, M., F. van de Ven, J. Buma, N. van Oostrom, R. Broolsma, T. Filatova, J. Verheijen, P. Bosch (2012) Schades door watertekorten en –overschotten in stedelijk gebied, Deltares, 2012
- <sup>29</sup> Hoogvliet, M., F. van de Ven, J. Buma, N. van Oostrom, R. Broolsma, T. Filatova, J. Verheijen, P. Bosch (2012) Schades door watertekorten en –overschotten in stedelijk gebied, Deltares, 2012
- <sup>30</sup> De Smedt, F. (2013) Grondmechanica. Vrije Universiteit Brussel.
- <sup>31</sup> Van der Gaast, J.W.J. , H. Massop en H. Vroon (2009) Effecten van klimaatverandering op de watervraag in de Nederlandse groene ruimte. Analyse van waterbeschikbaarheid rekeninghoudend met de freatische grondwaterstand en bodem. Alterra. Wageningen.
- <sup>32</sup> Van der Gaast, J.W.J. , H. Massop en G. Heuvelink (2005). Monitoring van verdroging. Methodische aspecten van meetnetoptimalisatie. Alterra. Wageningen.
- <sup>33</sup> Van der Sluijs, P. (1990) Grondwatertrappen. P167-180. In: W.P. Locher en H. de Bakker (red). Bodemkunde van Nederland. Deel1. Algemene Bodemkunde. Malmberg. Den Bosch.
- <sup>34</sup> Van der Gaast, J.W.J. en H. Massop (2003) Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland; bepaling van de GxG en de xG3 voor 1995 op puntlocaties. Alterra. Wageningen.
- <sup>35</sup> Klijn, F, E. van Velzen, J. Termaat en J. Hunink (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland, aangescherpte landelijke knelpunten analyse, Deltares.
- <sup>36</sup> [http://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/4882623/Deltascenario's\\_final.pdf](http://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/4882623/Deltascenario's_final.pdf)
- <sup>37</sup> Hoogvliet, M., J. Buma, R. Broolsma, G. de Lange, H. Landwehr, M. Coenders-Gerrits, P. Rutten en P. Landa (2013) Naar een bestendige stedelijke waterbalans. Deltares.