

8 juli 2015

Bachelor Eindopdracht

Functieanalyse PriceXD

Een onderzoek naar het stedelijk
waterbeheermodel PriceXD

Martijn Krol

Functieanalyse PriceXD

Een onderzoek naar het stedelijk waterbeheermodel PriceXD

Martijn Krol
S1386336

8 juli 2015
Amersfoort

Eindverslag Bachelor Eindopdracht
Bachelor Civiele Techniek
Universiteit Twente

Opdracht uitgevoerd bij:
HydroLogic, Amersfoort

Begeleiders:
Ir. M. Zantvoort
Dr. Ir. P. C. Roos

Samenvatting

PriceXD is een stedelijk waterbeheer model dat berekent hoe water dat een stedelijk gebied instroomt weer tot afvoer komt uit dit gebied. Het model wordt nog doorontwikkeld en over de toevoegingen aan het model die in de laatste versies gedaan zijn, bestaat nog enige onzekerheid. In dit rapport worden deze nieuwe functionaliteiten onderzocht, met als uiteindelijke doel het model beter en breder inzetbaar te maken in de praktijk.

PriceXD is een 2DH-model dat niet apart kan worden gezien van de pre-processing tool GeoGEN. In GeoGEN wordt de aangeleverde geografische data opgeschaald, waarna in PriceXD de daadwerkelijke berekeningen plaatsvinden. Uniek aan GeoGEN is de methode van opschaling waarbij de gegevens van cellen uit een fijn raster gebruikt worden in een grof raster. Hierdoor wordt een relatief hoog detailniveau behouden terwijl er toch veel winst geboekt wordt op het gebied van de rekentijd. Naast de componenten PriceXD en GeoGEN bestaat de wens om het model in de toekomst te koppelen met een rioleringsmodel.

De rekenkundige kern van PriceXD is het oplossen van de ondiepwatervergelijkingen aan de hand van het schema van MacCormack. Daarnaast bepaalt het model zijn eigen tijdstap, door er voor te zorgen dat er altijd aan het CFL-criterium voldaan wordt. De belangrijkste mogelijkheden van uitstroom uit het modeldomein zijn infiltratie, waarvoor de formule van Horton gebruikt wordt, en de in de laatste versie toegevoegde straatkolken.

Uit het onderzoek blijkt dat er in de nieuwste versie van PriceXD problemen bestaan met zowel de instroom als de uitstroom van het modeldomein. Allereerst is de eenheid waarin de neerslag opgegeven wordt in PriceXD, niet de wenselijke eenheid mm/uur. Daarnaast gaat de locatiebepaling van de straatkolken niet goed en leidt de uitstroom door de straatkolken tot een significante volumefout.

Vanwege deze problemen wordt de gevoeligheidsanalyse van PriceXD uitgevoerd met een oudere versie. In deze versie worden straatkolken ingevoerd als landgebruikscellen die een extreem hoge infiltratie toestaan. Hierdoor blijkt PriceXD echter gevoelig voor de resolutie. Daarnaast wordt vanuit de gevoeligheidsanalyse geconcludeerd dat de parameter k in de infiltratieformule van Horton opgegeven dient te worden in uur^{-1} , en niet in s^{-1} . Dit heeft grote implicaties voor de totale infiltratie die plaatsvindt.

Vanuit de bevindingen in de tests en de gevoeligheidsanalyse wordt er geconcludeerd dat het van groot belang is dat er een werkende versie komt waarin straatkolken apart opgegeven kunnen worden, aangezien straatkolken modelleren als infiltratie het model te gevoelig maakt voor de resolutie. Daarnaast dient er een standaard te komen voor een aantal van de infiltratieparameters in de formule van Horton.

Op het moment dat deze verbeteringen worden doorgevoerd zal dit de bruikbaarheid van de modelresultaten significant vergroten, waardoor het model beter en breder in de praktijk ingezet kan worden.

Voorwoord

Voor u heeft u het rapport Functieanalyse PriceXD, dat ik heb geschreven als onderdeel van mijn bachelor eindopdracht. Ik heb de kans gekregen dit rapport te maken bij HydroLogic in Amersfoort als afsluiting van de Bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. De opdracht is uitgevoerd van april tot juni 2015.

Tijdens deze opdracht heb ik de mogelijkheid gehad om mij gedurende tien weken te verdiepen in een stedelijk waterbeheermodel, namelijk het PriceXD model. Ik heb dit als erg interessant ervaren en mede door deze opdracht heb ik besloten om ook een master in de waterrichting te gaan volgen. Daarnaast vond ik ook de ervaring om mijn Bachelor eindopdracht uit te voeren bij een externe organisatie, in tegenstelling tot aan de universiteit, een grote toevoeging. Hierdoor heb ik naast een hoop vakinhoudelijke kennis ook een hoop kunnen opdoen over de dagelijkse gang van zaken in het werkveld.

Een hoop mensen hebben bijgedragen aan dit onderzoek, deze mensen wil ik graag bedanken. Allereerst Marlies Zantvoort en Matthijs van den Brink. Marlies voor de algemene begeleiding gedurende mijn periode bij HydroLogic en het geven van advies en feedback waar nodig. Matthijs wil ik graag bedanken voor de inhoudelijke begeleiding en het vrijmaken van de tijd om mij PriceXD uit te leggen. Verder wil ik ook graag Pieter Roos bedanken voor zijn support en advies als begeleider vanuit de universiteit.

Als laatste wil ik iedereen bij HydroLogic bedanken voor het beschikbaar stellen van deze kans en voor de plezierige tijd die ik de afgelopen tien weken heb gehad.

Amersfoort, 8 juli 2015

Martijn Krol

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	PriceXD	1
1.3	Doelstelling en onderzoeksvragen	2
1.4	Methodologie	2
1.5	Leeswijzer	3
2	Modelopzet	4
2.1	Modelopbouw	4
2.2	Werking GeoGEN	5
2.3	Stroming over het maaiveld	7
2.4	Bepaling van de tijdstap	9
2.5	Afvoer door infiltratie	10
2.6	Afvoer door het riool	11
3	Uitgevoerde tests	14
3.1	Volstromen bak	14
3.2	Locatiebepaling van de kolk	16
3.3	Uitstroom door de straatkolken	18
3.4	Tests aan de hand van de gevoeligheidsanalyse	19
4	Gevoeligheidsanalyse	21
4.1	Methode	21
4.2	Situatiebeschrijving	22
4.3	Resultaten basissituatie	24
4.4	Gevoeligheid voor de initiële infiltratie door de putten en kolken	26
4.5	Gevoeligheid voor de uiteindelijke infiltratie door de putten en kolken	27
4.6	Gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt van de putten en kolken	27
4.7	Nieuwe situatie met k in uur^{-1}	29
4.8	Gevoeligheid voor infiltratie door landgebruik overig	30
4.9	Gevoeligheid voor de resolutie	31
5	Verbetervoorstellen	33
5.1	Noodzakelijke verbeteringen	33
5.2	Mogelijke verbeteringen	34
6	Discussie	35
7	Conclusies	36
7.1	Deelvragen	36
7.2	Hoofdvraag	37
8	Aanbevelingen	38
	Literatuurlijst	39
	Bijlagen	40

Symbolenlijst

Symbol	Verklaring	Eenheid
A	Oppervlakte van een cel	m^2
A_{kolk}	Oppervlakte van een straatkolk	m^2
b	Breedte van een overlaat	m
C	Coëfficiënt van Chézy	$m^{1/2}/s$
d	Waterstand ten opzichte van een overlaat	m
$d_{pipefull}$	Waterstand met een maximaal debiet door een straatkolk	m
$d_{throttle}$	Waterstand met een limiterend debiet door een straatkolk	m
f	Darcy-Weisbach wrijvingscoëfficiënt	-
f_0	Initiële infiltratiesnelheid	mm/uur
f_c	Uiteindelijke infiltratiesnelheid	mm/uur
f_p	Infiltratiesnelheid op een bepaald tijdstip	mm/uur
F	Totaal geïnfiltreerde waterhoogte	mm
g	Zwaartekrachtsversnelling	m/s^2
i	Indexnummer van een cel in de x-richting	-
I	Aantal cellen in de x-richting	-
j	Indexnummer van een cel in de y-richting	-
J	Aantal cellen in de y-richting	-
k	Vervalcoëfficiënt	uur^{-1}
m	Overlaatcoëfficiënt	$m^{1/2}/s$
n	Coëfficiënt van Manning	$s/m^{1/3}$
h	Waterstand	m
Q_{kolk}	Debiet door een straatkolk	m^3/s

Symbool	Verklaring	Eenheid
$Q_{pipefull}$	Maximaal debiet door een straatkolk	m^3/s
$Q_{throttle}$	Limiterend debiet door een straatkolk	m^3/s
r	Resolutie	-
r_{kolk}	Straal van een straatkolk	m
s_{0x}	Verhang in de x-richting	-
s_{0y}	Verhang in de y-richting	-
t	Tijd	s
Δt	De tijdstap van het model	s
$\bar{u}$	Dieptegemiddelde stroomsnelheid in de x-richting	m/s
$\bar{v}$	Dieptegemiddelde stroomsnelheid in de y-richting	m/s
x	Horizontale coördinaat, loodrecht op y	m
Δx	Afmeting van een grove cel	m
y	Horizontale coördinaat, loodrecht op x	m
ψ	Vectorgrootte van de maximum watersnelheid	m/s

1 Inleiding

Tegenwoordig worden neerslaggebeurtenissen steeds extremer (Klomp & Poortinga, 2014). Dit is iets dat speelt van municipaal tot internationaal niveau en waar op elk detailniveau mee omgegaan moet worden. Voor de meeste mensen zullen echter vooral de stedelijke gevolgen van deze neerslagtoename opvallen omdat de gevolgen hiervan veelal te zien zijn, en waarschijnlijk steeds vaker gezien gaan worden, in de openbare ruimte. Deze gevolgen treden op in de vorm van water op straat. Vooral in stedelijke reliëfvrije gebieden is het risico hierop groot (Spijker, Dassen, & Loovers, 2014), maar in elk stedelijk gebied bestaat het risico op water op straat.

1.1 Algemeen

Uiteraard wapenen gemeenten zich tegen het optreden van water op straat. De bekendste manier waarop dit gebeurt, is het riool. Op verschillende plekken in stedelijke gebieden worden straatkolken aangelegd, die water afvoeren waardoor het niet op straat blijft staan. Wat echter blijkt is dat bij extreme neerslaggebeurtenissen er vaak water op straat optreedt terwijl het riool nog niet vol zit (Klomp & Poortinga, 2014). Dit betekent dus dat de inlaatcapaciteit van het riool tekortschiet bij extreme neerslag. Dit kan komen door een gebrek aan straatkolken, maar ook door blokkade van straatkolken door bijvoorbeeld takken en bladeren. Een andere mogelijke oorzaak van water op straat is water dat uit het riool de straat op stroomt op lager gelegen plekken.

Om water op straat effectief aan te pakken moet eerst de precieze oorzaak achterhaald worden. Water op straat is echter het resultaat van een combinatie van boven- en ondergrondse hydrologische processen. Er is dus vaak geen sprake van een enkele oorzaak voor water op straat maar een combinatie van factoren die allen een deel van de oorzaak vormen.

Om overzicht te scheppen in de complexe processen die een rol spelen in de stedelijke hydrologie wordt vaak gebruik gemaakt van modelsimulaties. Deze kunnen inzicht bieden in de zwakke punten van het systeem van waterafwikkeling door het doorrekenen van verschillende situaties. Daarnaast kunnen modellen gebruikt worden voor het bepalen van de effecten van verschillende mogelijke oplossingen. Deze opdracht richt zich op een van deze modellen, namelijk het PriceXD model in combinatie met de pre-processing tool GeoGEN.

1.2 PriceXD

Het PriceXD model is ontwikkeld onder leiding van professor Price in het HydroCity project. Dit project was een samenwerkingsverband tussen onder andere de gemeente Amersfoort, de Netherlands Geomatics & Earth Observation (NEO), HydroLogic, de TU Delft en ook de Universiteit Twente (Spijker et al., 2014).

In principe wordt het model gebruikt om te bepalen hoe neerslag of water dat op een andere manier het modeldomein instroomt tot afvoer komt. Op het moment dat het water niet tot afvoer kan komen en het modeldomein dus niet kan verlaten, wordt gekeken waar het water accumuleert. Op deze manier kan een overzicht gegeven worden van de hoeveelheid water op straat.

Belangrijk om te beseffen is dat het model doorontwikkeld wordt. De versie van het model die momenteel gebruikt wordt is versie 1.2. Het belangrijkste dat in deze versie is toegevoegd is de mogelijkheid om straatkolken in het model te modelleren. Voordat dit kon werden deze geïmplementeerd door op sommige locaties extreme infiltratie toe te staan. De ontwikkeling van PriceXD wordt nog steeds gedaan door professor Roland Price. Hoewel er nog aan het model gewerkt

wordt, wordt PriceXD al wel in de praktijk toegepast. Binnen een aantal projecten is de wens ontstaan om het model stabiel en breder inzetbaar te maken.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

Aangezien PriceXD nog doorontwikkeld wordt, worden er steeds nieuwe functionaliteiten aan het model toegevoegd. Nieuw in versie 1.2 zijn bijvoorbeeld het apart invoeren van straatkolken en een nieuwe methode voor de invoer van instroom het modeldomein in. Er bestaat echter nog enige twijfel over de juiste werking van vooral deze nieuwe toevoegingen aan PriceXD.

De resultaten uit PriceXD zijn een bron van enige onzekerheid, omdat nog niemand de precieze werking van de nieuwste versies onderzocht heeft. In dit onderzoek zal dit wel gebeuren, met als uiteindelijke doel om het model beter en breder inzetbaar te maken in de praktijk. De focus van het onderzoek zal liggen op de functionaliteiten die zijn toegevoegd in de laatste twee versies.

Om deze doelstelling te bereiken zijn onderzoeksvragen opgesteld die gedurende het onderzoek beantwoord zullen worden. De hoofdvraag is:

Hoe werken de verschillende functionaliteiten van het PriceXD model en hoe kan dit model beter in de praktijk toegepast worden?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de volgende vier deelvragen opgesteld.

- *Hoe is PriceXD opgezet?*
- *Zijn de nieuwe toevoegingen aan PriceXD oorzaak van problemen?*
- *Voor veranderingen in welke parameters zijn de modelresultaten gevoelig?*
- *Welke verbeteringen zijn er nodig in het model?*

1.4 Methodologie

Dit verslag richt zich op de werking van PriceXD en de pre-processing tool GeoGEN, met vooral de focus op de nieuwe toevoegingen aan het model. Allereerst zal de focus liggen op de werking van het model. Aan de hand van de in- en outputbestanden, de twee (verouderde) handleidingen, overleg met de ontwikkelaar van het model en met de modelcode als ondersteuning, wordt een overzicht gemaakt van de belangrijkste formules, oftewel de “governing equations” van PriceXD. Hierdoor zal het model niet langer een “black box” zijn, wat noodzakelijk is om de volgende twee vragen te beantwoorden.

Om te testen of de nieuwe toevoegingen van PriceXD naar behoren werken wordt het model getest op een zeer kleinschalige situatie, over het algemeen zijn dit rasters van 10 bij 10 cellen. Dit maakt het mogelijk gerichte tests uit te voeren voor verschillende aspecten van PriceXD.

Vervolgens wordt er een gevoeligheidsanalyse van het model uitgevoerd. Hiervoor voldoet een kleinschalige situatie minder goed. Daarom wordt voor de gevoeligheidsanalyse gebruik gemaakt van de gegevens uit een project waarin PriceXD gebruikt wordt. De gegevens die gebruikt worden zijn afkomstig uit het centrum van Hoogeveen. Een uitgebreidere methodologie voor de gevoeligheidsanalyse is te vinden in paragraaf 4.1.

Vanuit de conclusies van de eerste drie deelvragen kan er worden gekeken naar welke verbeteringen er doorgevoerd kunnen worden in PriceXD. Deze vraag wordt uitgewerkt als een lijst van noodzakelijke en mogelijke verbeteringen aan PriceXD die bij zullen dragen aan de inzetbaarheid van het model.

Kalibratie en validatie van PriceXD vallen buiten de scope van deze opdracht. De resultaten uit de gevoeligheidsanalyse zullen dus niet vergeleken worden met bijvoorbeeld waterstandsmetingen in Hoogeveen. De gevoeligheidsanalyse kan daarentegen wel van grote waarde zijn bij de kalibratie en validatie van PriceXD.

1.5 Leeswijzer

De gestelde onderzoeksvragen dienen als fundering voor de opbouw van het verslag. De vier deelvragen worden beantwoord in de hoofdstukken 2 tot en met 5. Vervolgens wordt het onderzoek kort bediscussieerd in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 bevat de conclusie van het hoofdstuk waarin de gestelde onderzoeksvragen beantwoord zullen worden. Als afsluiting worden er in hoofdstuk 8 enkele aanbevelingen gedaan ten aanzien van het gebruik van PriceXD en eventueel vervolgonderzoek.

Verder bevatten de bijlagen enige achtergrondinformatie over PriceXD en GeoGEN. Daarnaast wordt er in hoofdstuk 4 veelvuldig naar de bijlagen gerefereerd om aanvullende grafische weergaven van bepaalde delen van de gevoeligheidsanalyse te tonen.

2 Modelopzet

Hydrologische modellen voor stedelijke gebieden kunnen geclassificeerd worden naar het aantal ruimtelijke dimensies waarin afstroming gemodelleerd wordt. Allereerst bestaan er 0D-modellen. Dit zijn modellen die geen afstroming via de straat meerekenen (Glasbergen & Moens, 2014). Binnen deze modellen bestaat de aanname dat het neerslagwater direct naar de straatkolken stroomt. Er bestaan ook 1D-modellen, waarbij de straten worden gemodelleerd als open kanalen. Via deze open kanalen stroomt het water af richting het riool. De stroming door het riool kan hierbij ook als 1-dimensionaal worden aangenomen. Wat bij 1D-modellen niet wordt meegenomen is het feit dat het water vaak niet direct richting de putten stroomt. Bij 2D-modellen wordt hier wel rekening mee gehouden. Bij deze modellen wordt realistischer gemodelleerd hoe het water via het maaiveld afstroomt. Het PriceXD model is een 2D-model. De stroming over het maaiveld wordt dus in twee dimensies gesimuleerd. Dit type model wordt ook wel 2DH-model genoemd aangezien er dieptegemiddeld over twee horizontale dimensies wordt gerekend (Kilanehei, Naeeni, & Namin, 2011).

In dit hoofdstuk wordt er ingegaan op de opzet van het model en de interne modelstructuur van GeoGEN en PriceXD. Na een beschrijving van de opbouw van het model worden de werking van GeoGEN en de belangrijkste formules binnen PriceXD toegelicht.

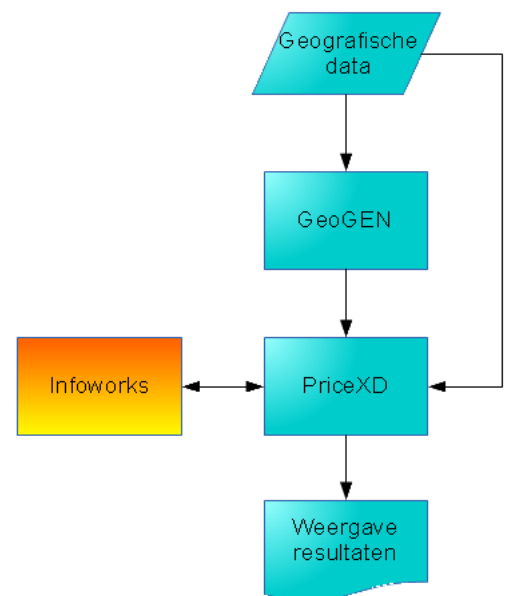
2.1 Modelopbouw

Een schematische weergave van de verschillende stappen die doorlopen worden bij een project met PriceXD is te zien in figuur 2-1. Het PriceXD model kan niet apart worden gezien van de pre-processing tool GeoGEN. De aangeleverde data voor de simulaties wordt eerst voorbereid in GeoGEN voordat er met PriceXD gerekend wordt. Deze voorbereiding heeft vooral te maken met opschaling. Dit verlaagt de resolutie, waardoor er minder rekentijd nodig is. De methode van opschaling wordt verder uitgewerkt in paragraaf 2.2.

PriceXD houdt zich bezig met de instroom van water, wat er met dit water gebeurt binnen het modeldomein en uiteindelijk hoe het water het modeldomein verlaat en als dit niet gebeurt waar het water accumuleert. Hiervoor worden een aantal hydraulische en hydrologische vergelijkingen gebruikt die verderop in dit hoofdstuk worden uitgewerkt.

Naast GeoGEN en PriceXD zal er in de nieuwste versie nog een belangrijk onderdeel van de simulatie van het afvoerproces worden meegenomen, zijnde de stroming door het riool. Dit deel zal plaatsvinden buiten het model. Het idee is om in

PriceXD de locaties van de straatkolken op te geven en te bepalen hoeveel water hier in kan stromen. De simulatie van de stroming binnen de riolering zal uitgevoerd worden met het rioolmodel Infoworks. Aan de hand van deze berekeningen wordt er een iteratie uitgevoerd. De uitkomsten van de berekeningen van Infoworks worden weer gebruikt als input voor PriceXD. Dit dient vooral om te berekenen hoeveel water er weg kan stromen door de riolering. Daarnaast is het ook mogelijk dat op sommige momenten water de straat op stroomt via een aantal straatkolken. Dit zal ook met Infoworks berekend worden. De koppeling met Infoworks zal in eerste instantie handmatig



Figuur 2-1: Schematische weergave verschillende componenten rond PriceXD

gebeuren. Uiteindelijk is het doel een offline koppeling tussen PriceXD en een rioolmodel op te zetten.

PriceXD en GeoGEN hebben geen interface (GUI) waarin parameters kunnen worden opgegeven en instellingen worden aangepast. In plaats daarvan worden de instellingen van het model en de waarden van verschillende parameters opgegeven in een aantal bestanden. Een overzicht van alle verschillende bestanden die gebruikt worden in PriceXD en GeoGEN is te vinden in bijlage A.

Deze bestanden beschrijven de gegevens over de modelrun en over het gebied dat gemodelleerd wordt. De belangrijkste gegevens van dit plangebied worden opgegeven in de vorm van een hoogtekaart en een landgebruikskaart. Aan de verschillende soorten landgebruik worden een aantal parameters gekoppeld. Dit zijn de coëfficiënten voor wrijving en voor infiltratie. Naast deze kaarten zijn de locaties en gegevens van de straatkolken ook input van het model. Verder worden er ook gegevens over de simulatie opgegeven in de bestanden. Dit zijn bijvoorbeeld de simulatieduur, de neerslagreeks en de resolutie waarnaar in GeoGEN opgeschaald wordt.

Zowel PriceXD als GeoGEN zijn geschreven in de programmeertaal Fortran 90. Fortran is een van de oudst bestaande programmeertalen die tegenwoordig vooral gebruikt wordt in wetenschappelijke toepassingen waar veel wiskunde bij gebruikt wordt (Beal, 2015).

2.2 Werking GeoGEN

GeoGEN is de pre-processing tool van PriceXD. Hiermee wordt bedoeld dat de aangeleverde met GIS-software gemaakte rasterinformatie wordt voorbereid zodat het in PriceXD gebruikt kan worden. Het belangrijkste dat in GeoGEN gebeurt, is de opschaling van deze rasterdata.

De rasterdata wordt over het algemeen aangeleverd met een celgrootte van 0,5 bij 0,5 meter (Price, 2014). Deze data zijn zeer gedetailleerd en als het op dit detailniveau in PriceXD gebruikt zou worden levert dat excessief lange reketijden op. Dit is de voornaamste reden dat de rasterdata opgeschaald moet worden.

Daar tegenover staat dat er tegelijkertijd natuurlijk de wens is om het detailniveau zo hoog mogelijk te houden ten behoeve van de nauwkeurigheid van de resultaten.

GeoGEN is ontworpen om de rasterdata voor de berekeningen op te schalen maar toch een zo hoog mogelijk detailniveau vast te houden. Hoe dit wordt gedaan wordt hier uitgewerkt. Voor enige achtergrondinformatie op het gebied van opschaling wordt verwezen naar bijlage B.

2.2.1 Detailbehoud bij opschaling

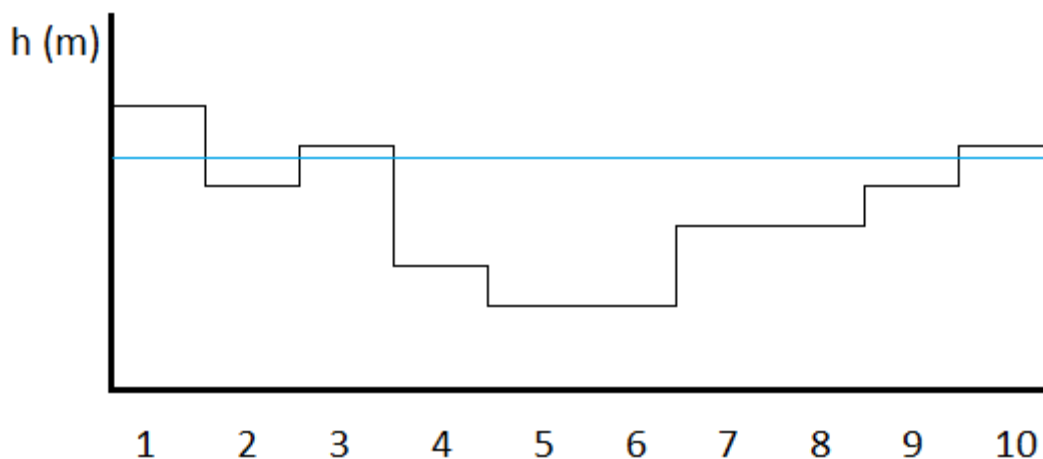
De tijdwinst bij opschaling gaat altijd gepaard met een verlies in het detailniveau van de resultaten. Met GeoGEN wordt dit verlies verminderd door nog steeds gebruik te maken van de gegevens uit de fijne cellen in de grove cellen.

Voor de parameters zoals de wrijvingscoëfficiënt en de parameters voor de infiltratie (zie paragraaf 2.3 en 2.5), wordt bij de opschaling gewerkt met een enkele waarde per grove cel. Deze waarde is simpelweg het gemiddelde uit de fijne cellen die de grove cel bevat (Tiehatten, 2014). Voor de hoogte wordt er echter voor een andere aanpak gekozen, die binnen stedelijke hydrologische modellen uniek is.

In plaats van elke grove cel te modelleren als plat met een bepaalde hoogte van bijvoorbeeld de gemiddelde hoogte van alle fijne cellen, wordt in GeoGEN voor elke grove cel een relatie opgesteld tussen het volume water dat in de cel aanwezig is en de waterstand over de cel ten opzicht van NAP. Deze relatie wordt aangeduid als de volume-diepte relatie (Tiehatten, 2014). Door deze relatie op te

slaan kan bij een bepaald volume water in de cel bepaald worden welke van de fijne cellen geïndeerd zijn en wat de waterstand over deze fijne cellen is. Elke grove cel heeft dus dezelfde gemiddelde waterstand ten opzichte van NAP, maar omdat het fijne raster toch hetgene is dat ingeladen wordt binnen GeoGEN en PriceXD, kan de waterdiepte ten opzichte van het maaiveld voor het fijne raster bepaald worden. Zo kan de inundatiediepte relatief nauwkeurig bepaald worden terwijl er ook op rekenkracht bespaard wordt.

Naast de volume-diepte relatie per cel worden ook voor de west- en zuidgrens van elke cel een oppervlakte-diepte relatie opgesteld en opgeslagen in GeoGEN. Deze relatie wordt opgesteld vanuit een zij aanzicht van de cel van de west- of zuidkant, zoals in figuur 2-2 te zien is. Dit is van belang voor het modelleren van de stroming tussen de verschillende cellen.



Figuur 2-2: Voorbeeld van een zij aanzicht van een grove cel opgebouwd uit 10 fijne cellen.

Vanuit de theoretische waterstand in de cel (de blauwe lijn in figuur 2-2) wordt bepaald welke fijne cellen die bij de grens van de grove cel horen onder water staan. Het oppervlakte dat hier bij hoort wordt voor zowel de west- als zuidgrens van elke cel opgeslagen. De reden dat alleen van deze celgrenzen het dwarsprofiel wordt opgeslagen is dat de oost- en noordgrenzen van een cel over het algemeen zeer sterk overeen zullen komen met de west- of zuidgrenzen van aanliggende cellen. Op deze manier kan geheugen bespaard worden terwijl dit zelden tot significante onnauwkeurigheden zal leiden.

Met deze methode wordt voor elke grens tussen twee grove cellen het wateroppervlak bepaald bij verschillende waterstanden. Deze oppervlakten worden in PriceXD gebruikt om de stromen tussen de cellen te berekenen.

2.2.2 Gevolgen voor de rekentijd

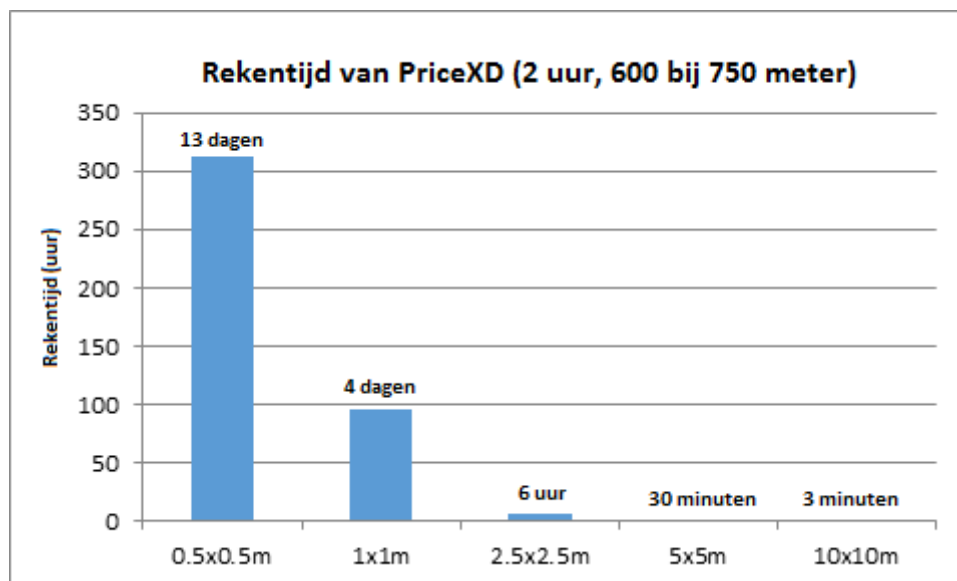
De belangrijkste reden om op te schalen is het verkleinen van de rekentijd van PriceXD. Deze paragraaf zal toelichten hoeveel winst er op de rekentijd behaald kan worden bij opschaling.

Zoals toegelicht in bijlage B is het oppervlak van een cel kwadratisch afhankelijk van de resolutie waarnaar opgeschaald wordt, oftewel van het aantal fijne cellen in de lengte van een grove cel. Op het moment dat het onderzoeksgebied even groot blijft, betekent dit logischerwijs dat het aantal grove cellen omgekeerd kwadratisch afhankelijk is van de resolutie. Als er bijvoorbeeld opgeschaald wordt naar een resolutie 2, dan wordt het aantal cellen in de berekening van PriceXD 4 maal zo klein.

Daarnaast is het zo dat de gebruikte tijdstap in het model niet vooraf bepaald wordt maar tijdens de modelrun berekend en aangepast wordt. Dit wordt in detail uitgelegd in paragraaf 2.4. Een

belangrijke conclusie hieruit is dat de gebruikte tijdstap binnen PriceXD lineair afhankelijk is van de breedte van een cel, oftewel van de resolutie van het raster. Dit betekent dat op het moment dat de resolutie wordt vermenigvuldigd met een factor i , de theoretische rekentijd van het model verkleind wordt met een factor i^3 (i^2 door de afname van het aantal cellen maal i voor de verlenging van de gebruikte tijdstap). Ter verduidelijking zijn in tabel B-1 in bijlage B een aantal mogelijke resoluties te zien met de gevolgen die zij hebben voor de celgrootte en de theoretische rekentijd.

De reden dat de *theoretische* rekentijd genoemd wordt is dat in de praktijk de rekentijd minder zal veranderen dan het beeld dat geschetst wordt. Dit komt doordat het model naast het doorrekenen van de cellen ook tijd besteedt aan bijvoorbeeld het inladen van gegevens en het opslaan van de resultaten. De resultaten van een aantal testberekeningen met betrekking tot de rekentijd uitgevoerd met een eerdere versie van PriceXD zijn te zien in figuur 2-3.



Figuur 2-3: (HydroLogic, 2014) Gevolgen van aanpassingen in resolutie op de rekentijd

Hieruit blijkt inderdaad dat bij een verandering van resolutie met een factor i , de rekentijd nooit met een factor i^3 verkleind wordt. Toch is ook duidelijk te zien dat veranderingen in resolutie wel grote gevolgen hebben voor de rekentijd van het model. Dit betekent dat er veel winst behaald kan worden op de rekentijd door op een grovere resolutie te rekenen. In paragraaf 4.9 wordt onderzocht wat dit voor gevolgen heeft op de modelresultaten.

2.3 Stroming over het maaiveld

Het belangrijkste dat PriceXD doet is het modelleren van de stroming over het maaiveld. De vergelijkingen die hiervoor gebruikt worden zijn de Shallow Water Equations. Zoals gezegd is PriceXD een 2DH-model, wat betekent dat de stroming over het maaiveld in twee ruimtelijke dimensies gemodelleerd wordt. Deze Shallow Water Equations beschrijven deze stroming daarom in een x- en een y-richting.

2.3.1 Oorsprong

De vergelijkingen zijn afgeleid van de bekendere Navier-Stokes vergelijkingen (Thuerey & Hess, 2011). De Navier-Stokes vergelijkingen bestaan uit drie vergelijkingen voor de stroming in drie verschillende richtingen. Naast deze drie vergelijkingen is ook de continuïteitsvergelijking van belang.

De Shallow Water Equations beschrijven net zoals de Navier-Stokes vergelijkingen waterbewegingen maar in dit geval voor een tweedimensionale situatie (Thuerey & Hess, 2011). Dit is gebaseerd op de

aanname dat de diepte veel kleiner is dan de golflengte van de verstoringen in de x- en y-richting. Naast de stromingen in de twee richtingen wordt er in de Shallow Water Equations ook de variabele h meegenomen. Deze variabele geeft de waterstand ten opzichte van de bodem aan.

In de Shallow Water Equations zijn de onafhankelijke variabelen: de tijd t en de tweedimensionale ruimtecoördinaten x en y . De afhankelijke variabelen worden de waterstand h en de dieptegemiddelde stroomsnelheden $\bar{u}$ en $\bar{v}$, in respectievelijk de x- en de y-richting (Moler, 2011).

De vergelijkingen zien er als volgt uit (Price, 2014):

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\bar{u}^2h + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v}h)}{\partial y} &= g * s_{0x} - f \frac{\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{4h} \\ \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v}h)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\bar{v}^2h + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial y} &= g * s_{0y} - f \frac{\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{4h} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

Hierin worden de volgende variabelen gebruikt:

x en y worden gebruikt om de twee verschillende horizontale dimensies aan te duiden.

$\bar{u}$ en $\bar{v}$ zijn de bijbehorende dieptegemiddelde stromingen in deze twee richtingen, in m/s.

t is de tijd in de berekening (zie paragraaf 2.4).

h is de waterdiepte ten opzichte van de bodem.

g is de zwaartekrachtversnellingen, gegeven in m/s².

s_{0x} en s_{0y} beschrijven het verhang in de twee richtingen.

f is de dimensieloze Darcy-Weisbach wrijvingscoëfficiënt.

De eerste twee vergelijkingen zijn afgeleid van het behoud van impuls, de derde vergelijking is afgeleid van het behoud van massa (Moler, 2011). In de eerste twee vergelijkingen moet daarom ook rekening gehouden worden met de krachten door verhang en wrijving, aangezien deze ook invloed hebben op de impulsvergelijkingen. De termen aan de rechterkant van deze vergelijkingen beschrijven allereerst de toegevoegde impuls door het verhang. De tweede term beschrijft het impulsverlies door de wrijving. Hierin is f de dimensieloze Darcy-Weisbach wrijvingscoëfficiënt (Thi, 2008), deze wordt bepaald aan de hand van de constante van Chézy of Manning (Price, 2014).

De derde vergelijking verandert niet aangezien dit een massavergelijking is, verhang en wrijving zullen immers nooit leiden tot een verlies van massa. Daarentegen is deze continuïteitsvergelijking niet helemaal correct aangezien er in de vergelijking geen rekening wordt gehouden met de verschillende mogelijkheden tot in- en uitstroom in het modeldomein (bijvoorbeeld neerslag en infiltratie). Over het algemeen worden de mogelijkheden tot in- en uitstroom van het model apart gezien van de Shallow Water Equations (Price, 2014). De Shallow Water Equations worden gebruikt voor de stroming over het maaiveld en de in- en uitstromen worden op een andere manier in het model verwerkt.

2.3.2 Gebruik binnen PriceXD

In de standaardvorm gelden de Shallow Water Equations op een punt. Binnen PriceXD wordt er echter niet op puntniveau maar op celniveau gerekend. Hiervoor moeten de vergelijkingen worden aangepast zodat ze een volume beschrijven. Dit gebeurt via de eindige elementen methode. Hierbij zijn de gegevens opgesteld in GeoGEN van groot belang. Dit komt doordat stroming binnen PriceXD

alleen kan lopen tussen twee naburige grove cellen. De stroming loopt dus altijd over de celgrens tussen twee cellen, die als de oppervlakte-diepte relatie in GeoGEN is opgeslagen.

Daarnaast gelden er een aantal randvoorwaarden binnen PriceXD die van belang zijn voor de oplossing van de Shallow Water Equations. De belangrijkste randvoorwaarden zijn dat er over het algemeen geen stroming mogelijk is loodrecht op de grens van het modeldomein maar dat tangentiële stroming langs een celgrens wel mogelijk is en ook niet zorgt voor een energieverlies (Price, 2014). Daarnaast zijn er nog een aantal andere randvoorwaarden binnen PriceXD die gelden voor bijvoorbeeld muren of kanalen in het plangebied. Hier wordt in dit verslag niet verder op ingegaan.

2.3.3 Oplossingsschema

Vanwege de complexiteit van de vergelijkingen kunnen de Shallow Water Equations zelden analytisch opgelost worden (George, 2004). In plaats daarvan worden ze numeriek opgelost aan de hand van een oplossingsschema. Het oplossingsschema dat hiervoor in PriceXD gebruikt wordt, is het schema van MacCormack. Dit is een schema dat per tijdstap werkt in twee stappen. In de eerste stap wordt een voorspelling gedaan voor de waarde voor de volgende tijdstap (predictor), en in de tweede stap wordt deze waarde gecorrigeerd (corrector) (Price, 2014). Deze tweestappenmethode is bij uitstek geschikt voor hyperbolische partiële differentiaalvergelijkingen, zoals de Shallow Water Equations (Barba, 2012). Daarentegen kan het schema zorgen voor oscillaties bij het optreden van steile golven, deze zullen echter niet voorkomen zolang PriceXD voor stedelijke projecten wordt gebruikt (Price, 2014).

2.4 Bepaling van de tijdstap

Zoals al kort vermeld in paragraaf 2.2.2 houdt het model geen vaste tijdstap aan. In plaats daarvan wordt de tijdstap gedurende de run van het model aangepast. De voornaamste reden om dit te doen is om tijd te besparen maar tegelijkertijd ook de stabiliteit van de berekeningen te waarborgen (Tiehatten, 2014).

Om de stabiliteit te bepalen moet er voldaan worden aan het CFL-criterium (Courant, Friedrichs, & Lewy, zoals geciteerd in Roos, 2015). Dit criterium is gebaseerd op een vrij simpel gegeven. Gedurende een tijdstap mag water zich nooit verder verplaatsen dan de breedte van één cel. Dit komt doordat, zoals besproken in paragraaf 2.3, de stroming altijd tussen twee naburige cellen plaatsvindt. Als het water zich verder dan de breedte van één cel zou kunnen verplaatsen, dan zou het water in een bepaalde cel zich verder dan alleen naar de vier aangrenzende cellen kunnen verplaatsen. Dit zou vereisen dat er binnen één tijdstap vaker dan eens het MacCormack schema doorlopen wordt, wat vanuit het principe van werken met een tijdstap onmogelijk is.

Het CFL-criterium wordt wiskundig beschreven aan de hand van het Courantgetal.

$$C = |\psi| * \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Hierin is C het dimensieloze Courantgetal

$|\psi|$ is de grootte van de vector die de maximale watersnelheid aangeeft in m/s

Δt is de tijdstap die het model aanhoudt in seconde

Δx is de afmeting van een grove cel in meters

Op het moment dat het Courantgetal kleiner is dan 1, wordt aan het CFL-criterium voldaan (Mendez-Nunez & Carroll, 1993). Immers, dan is Δx altijd groter dan $|\psi| * \Delta t$. Aangezien Δx opgegeven wordt als input voor het model, is de snelheidsparameter $|\psi|$ bepalend voor het berekenen van de tijdstap Δt tijdens een modelrun.

Voor deze snelheid wordt in het model de volgende formule gebruikt.

$$|\psi| = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + \sqrt{g * h}$$

Hierin is de eerste term de totale watersnelheid uitgerekend aan de hand van de stelling van Pythagoras. De tweede term is de snelheid van een golf die zich over het water beweegt. Omdat er gerekend wordt met ondiep water, is de propagatiesnelheid van golven onafhankelijk van de golflengte (Tomczak, 2005). Daarom kan deze formule gebruikt worden waarin g de zwaartekrachtversnelling van over het algemeen $9,81 \text{ m/s}^2$ is en h de waterdiepte in m.

Op het moment dat er niet aan het CFL-criterium wordt voldaan, oftewel wanneer het Courantgetal groter is dan 1, wordt de tijdstap naar beneden bijgesteld. Dit wordt gedaan door de tijdstap te halveren (Price, 2014). Wel zit hier een minimale waarde voor de tijdstap aan verbonden die per modelrun opgegeven kan worden. Als de minimale tijdstap bereikt wordt en het model wil de tijdstap nog verder verlagen, dan zit er waarschijnlijk een fout in een van de opgegeven parameters. Naast de minimale tijdstap kan er ook ingesteld worden dat de tijdstap weer verdubbeld wordt als deze al een bepaalde periode niet verkleind is.

2.5 Afvoer door infiltratie

Voor de infiltratie wordt in het PriceXD model gebruik gemaakt van de formule van Horton. Deze formule ziet er als volgt uit (Abdulkahir, Wuddivira, Abdu, & Mudiare, 2011).

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

De parameters hierin zijn,

f_p is de infiltratiesnelheid op tijdstip t , in mm/uur

f_c is de uiteindelijke infiltratiesnelheid in mm/uur

f_0 is de initiële infiltratiesnelheid in mm/uur

k is een vervalcoëfficiënt in s^{-1}

In paragraaf 3.4.2 wordt echter aangetoond dat de vervalcoëfficiënt k niet in s^{-1} opgegeven dient te worden, zoals de handleiding beschrijft (HydroLogic BV, 2014), maar in uur^{-1} . Het model is echter in eerste instantie gekalibreerd voor s^{-1} dus bij de uitleg van de formule wordt deze eenheid aangehouden.

Als de grond doorlatend is dan liggen de waarden van de infiltratiesnelheden over het algemeen tussen de 0.2 en de 25 mm/uur. De waarde van de vervalcoëfficiënt k ligt dan rond de 0.001 s^{-1} . Deze waarden kunnen echter aangepast worden in de kalibratie van het model.

Deze formule loopt dus van een initiële waarde (f_0), op het moment dat er nog niets geïnfiltreerd is, richting een uiteindelijke contante waarde (f_c). Deze formule is gebaseerd op de aanname dat er een vaste hoeveelheid opslag mogelijk is in de grond onder een cel. Naarmate de grond begint vol te lopen zal de infiltratiesnelheid afnemen. De opslag in de grond wordt langzaam geloosd op het grondwater. Aangezien PriceXD geen koppeling heeft met het grondwater wordt dit gezien als water dat uit het model verdwijnt. Op het moment dat de grondopslag van een cel volledig vol zit is de infiltratiesnelheid gelijk aan de snelheid waarmee water via het grondwater wordt afgevoerd, dit is de betekenis van f_c in de formule van Horton.

Het gebruik van deze methode is relatief simpel en betrouwbaar omdat niet de wateropslag in de grond per cel bepaald hoeft te worden maar er wel rekening wordt gehouden met een afname van de infiltratiecapaciteit gedurende de neerslaggebeurtenis. Wel brengt deze methode enige nadelen

met zich mee. Allereerst houdt de aanname dat de opslag in het grondwater ongelimiteerd is alleen stand bij korte neerslaggebeurtenissen. Bij langere periodes zal de grondwaterstand zo veel stijgen dat dit invloed zal hebben op de infiltratie. Daarnaast is deze formule ook gebaseerd op de aanname dat er altijd meer regen valt dan de infiltratiecapaciteit. De eenheid van de vervalcoëfficiënt k is s^{-1} of uur^{-1} . Ongeacht de juiste eenheid is de infiltratiecapaciteit onafhankelijk van de werkelijk gevallen neerslag maar slechts afhankelijk van de verstreken tijd. In werkelijkheid zal als de infiltratiecapaciteit hoger is dan de neerslag de infiltratiecapaciteit toenemen doordat er meer water op het grondwater geloosd wordt dan dat er infiltreert.

Deze twee punten zorgen er voor dat het model vooral geschikt is voor het doorrekenen van relatief korte en extreme neerslaggebeurtenissen. Bij het doorrekenen van langere perioden met wisselingen in neerslagintensiteiten moet er rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat de modelwaarden voor infiltratie kunnen afwijken van de werkelijke waarden.

Zoals beschreven in bijlage A worden de parameters voor de formule van Horton bepaald per cel aan de hand van de grondsoort of als de grondsoorten niet bekend zijn aan de hand van het landgebruik. Voor de initiële infiltratie zal het landgebruik het meest van belang zijn (door een parkeerplaats zal logischerwijs minder infiltreren dan door een park). Voor de uiteindelijke infiltratiesnelheid en de vervalcoëfficiënt zal de grondsoort echter belangrijker zijn. Het is in PriceXD echter niet mogelijk om dit op deze manier uit te splitsen. Voor de bepaling van de parameters wordt gebruik gemaakt van de grondsoort of het landgebruik.

2.6 Afvoer door het riool

Naast infiltratie zijn er andere manieren waarop water het model kan verlaten. Voor stedelijk waterbeheer zal waarschijnlijk de afvoer door het riool voor het grootste gedeelte van de neerslagafwerking verantwoordelijk zijn. Zoals uitgelegd in paragraaf 2.1 wordt er voor de interne berekeningen van het rioleringsstelsel in de nieuwe versie een koppeling gemaakt tussen PriceXD en een rioleringsmodel. In eerste instantie zal deze koppeling nog handmatig gedaan worden met het rioleringsmodel InfoWorks. Voordat de interne stroming in de riolering berekend kan worden, moet er echter eerst een analyse gedaan worden van de hoeveelheid water die het riool in zal stromen. Deze instroom vindt plaats door de straatkolken, die allen een bepaalde hoeveelheid water opnemen. De formule die gebruikt wordt om deze hoeveelheid water te bepalen, is de overlaatformule. In de basisvorm ziet deze formule er als volgt uit (Vereniging van Producenten van Betonleidingsystemen, 2015).

$$Q_{kolk} = m * b * d^{\frac{3}{2}}$$

De parameters in deze formule zijn,

Q_{kolk} is het debiet dat door de straatkolk heet stroomt in m^3/s

m is een afvoercoëfficiënt afhankelijk van de vorm van de overlaat met eenheid $m^{1/2}/s$

b is de breedte van de overlaat in m

d is de waterstand ten opzichte van de overlaat in m

In PriceXD wordt echter niet de breedte van de kolk opgegeven maar het oppervlak. Dit kan omdat er in PriceXD altijd wordt gerekend met ronde straatkolken. Vanuit dit oppervlak wordt de straal van de straatkolk berekend met $r_{kolk} = \sqrt{\frac{A_{kolk}}{\pi}}$ waarna de omtrek van de kolk, en dus de breedte van de overlaat, wordt bepaald aan de hand van deze straal. Hierdoor zou in PriceXD voor de afvoer van de straatkolken de volgende formule gebruikt moeten worden.

$$Q_{kolk} = m * 2\pi r_{kolk} * d^{\frac{3}{2}}$$

Echter, uit de code van het model blijkt dat het model een andere formule gebruikt, namelijk:

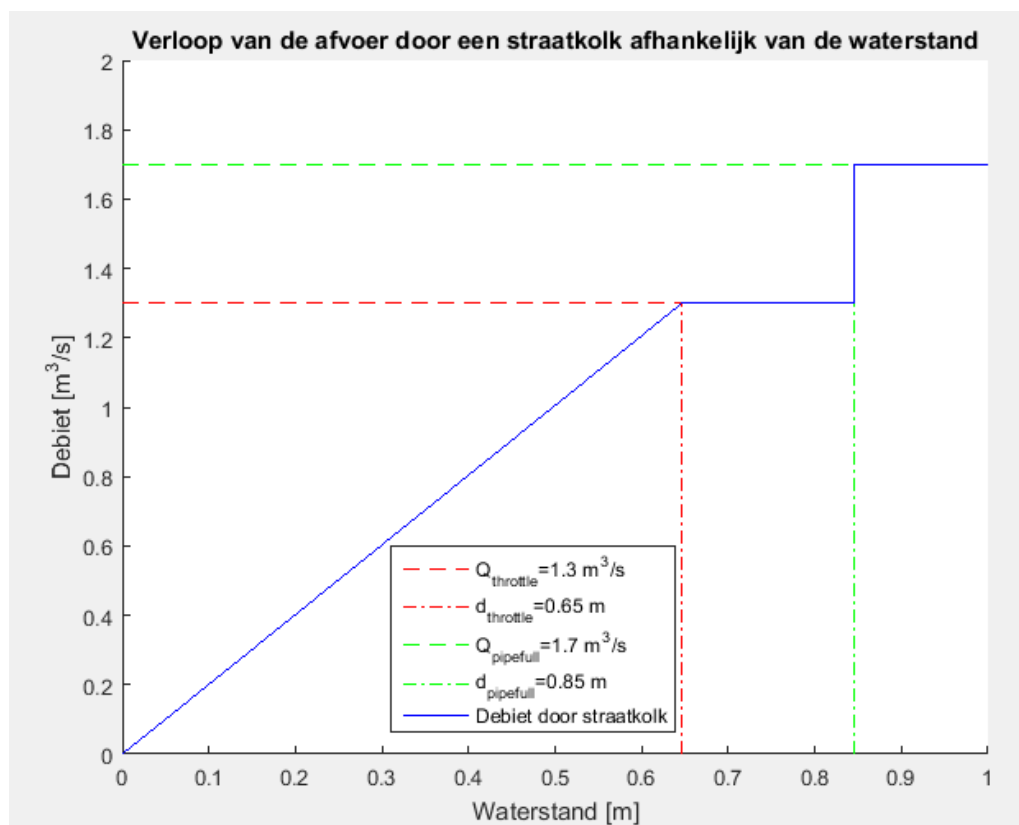
$$Q_{kolk} = m * 2\pi r_{kolk} * d.$$

Dit betekent dat de hoeveelheid water die door het riool wordt afgevoerd consequent verkeerd berekend wordt. Over het algemeen (bij waterstanden lager dan 1 meter) zal de afvoer door het riool overschat worden. Vooral nog is deze formule nog niet aangepast. Ook in versie 1.2.1 wordt deze formule nog gebruikt. Bij de tests voor de uitstroom door de straatkolken (paragraaf 3.3) zal hier rekening mee gehouden moeten worden.

Zoals nader toegelicht in bijlage A worden voor elke straatkolk ook twee debieten opgegeven. Volgens de handleiding en de modelcode gaat het om een debiet waarbij de kolk zichzelf dichtknijpt ($Q_{throttle}$) en het debiet waarbij de rioleringsbuis van de kolk vol zit ($Q_{pipefull}$). Deze debieten worden dus gebruikt om de instroom door een straatkolk te limiteten. Om te bepalen of van een van deze debieten gebruik gemaakt moet worden, wordt de waterstand in de cel van de straatkolk vergeleken met de waterstanden die bij deze debieten horen ($d_{throttle}$ en $d_{pipefull}$). De waterstanden die bij de debieten horen worden in het model uitgerekend. Opvallend is dat hierbij dezelfde verkeerde

formule gebruikt wordt. Oftewel $d = \frac{Q}{2\pi r * m}$ in plaats van $d = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{2\pi r * m}\right)^2}$.

Het model gaat op een vreemde manier om met deze twee opgegeven debieten. Het debiet door de kolk wordt bepaald aan de hand van de (verkeerde) overlaatformule als de waterstand in de cel kleiner is dan $d_{throttle}$. Als de waterstand in de cel tussen $d_{throttle}$ en $d_{pipefull}$ ligt dan wordt gebruik gemaakt van het constante debiet $Q_{throttle}$, en als de waterstand in de cel hoger is dan $d_{pipefull}$ dan wordt $Q_{pipefull}$ gebruikt als de afvoer door de straatkolk.



Figuur 2-4: Verloop van de afvoer door een straatkolk

Figuur 2-4 toont het verloop van het debiet door een straatkolk voor een aantal willekeurige parameters. Het lijkt een vreemde aanname om geen tussenweg mogelijk te maken tussen de twee constante debieten. Daarom wordt aangeraden om deze twee debieten niet te ver van elkaar af te leggen, en hier eventueel zelfs dezelfde waarde voor aan te houden.

Voor de uitstroom door het riool wordt een andere tijdstap aangehouden dan de interne tijdstap van het model. Deze tijdstap is standaard ingesteld op 60 seconde. Waarschijnlijk is voor deze aanpak gekozen omdat als er veel verschillende straatkolken zijn, het elke tijdstap bepalen van de uitstroom een grote invloed kan hebben op de rekentijd. Dit terwijl een grotere tijdstap voor de uitstroom door de kolken waarschijnlijk geen grote invloed heeft op de stabiliteit van de berekeningen.

3 Uitgevoerde tests

Aangezien er veel onduidelijkheid bestaat over de resultaten van PriceXD wordt er op verschillende momenten in de opdracht gebruik gemaakt van een klein raster om het model op te testen. Dit wordt gedaan om de tweede deelvraag van het onderzoek: *“Zijn de nieuwe toevoegingen aan PriceXD oorzaak van problemen?”* te beantwoorden.

Voor versie 1.2 worden deze tests hier uitgewerkt. Dezelfde tests zijn deels uitgevoerd voor versie 1.1 en een geüpdatete versie 1.2, die in het vervolg versie 1.2.1 genoemd wordt. Deze tests worden uitgewerkt in de bijlagen C en D. Daarnaast worden er ook tests in versie 1.1 uitgewerkt in paragraaf 3.4. Dit zijn tests die gedaan worden aan de hand van de resultaten voor de gevoeligheidsanalyse.

3.1 Volstromen bak

In de eerste tests wordt het volstromen van een bak gemodelleerd. Dit wordt gedaan door de parameters uit de infiltratieformule van Horton op nul te zetten en geen kolken toe te voegen aan het oppervlak. Ook wordt er gesteld dat de randen van het modeldomein zijn afgesloten, hier kan dus ook geen water door verdwijnen. Alle mogelijkheden tot uitstroom uit het modeldomein worden op deze manier weggehaald uit de simulatie.

3.1.1 Test 1

In de eerste test wordt er gewerkt met een raster van 10 bij 10 cellen, allen met een celgrootte van 1 bij 1 meter. Het totale oppervlak van het raster is dus 100 m^2 . Alle cellen in het raster hebben dezelfde hoogte van 5 meter ten opzichte van NAP. Om niet alleen PriceXD te testen maar ook GeoGEN wordt het raster in deze simulatie opgeschaald met een resolutie 2. Op dit raster valt een constante neerslag van 10 (met als aangenomen eenheid mm/uur), deze neerslag is constant in plaats en tijd. De simulatieduur van de test is één uur.

Hypothese

Voor deze test is het opstellen van een hypothese uiterst simpel. Met een neerslag van 10 mm/uur, die een uur duurt, zal er een gelijke waterstand over alle cellen zijn van $10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$. De totale hoeveelheid neerslag, die ook in de modelresultaten wordt weergegeven, die dan gevallen is zou gelijk moeten zijn aan $0,01 * 100 = 1 \text{ m}^3$

Resultaat

Na één uur is er een gelijke waterstand in elke cel van 9 meter. Dit komt overeen met de totale gevallen neerslag, deze is volgens de modelresultaten 900 m^3 . Er valt dus 900 keer meer neerslag dan de verwachting was in de hypothese.

3.1.2 Test 2

In de tweede test wordt een volledig gelijke situatie als in de eerste test onderzocht met één belangrijk verschil. De celgrootte wordt ingesteld op 0,5 m in plaats van 1 m. Elke cel heeft dus een oppervlakte van $0,25 \text{ m}^2$, en het totale oppervlakte van het raster is 25 m^2 .

Hypothese

Als de neerslag inderdaad gegeven wordt in mm/uur, zou de waterstand onafhankelijk moeten zijn van de celgrootte. Er wordt daarom opnieuw verwacht dat de waterstand in elke cel 0,01 m is. Hiermee zou de totale hoeveelheid neerslag op $0,01 * 25 = 0,25 \text{ m}^3$ uitkomen.

Resultaat

Na de modelrun van één uur, is de waterstand in elke cel 36 meter. Dit komt opnieuw niet overeen met de hypothese, maar wat opvallender is, is het feit dat de waterstand ook niet hetzelfde is

gebleven als in de eerste test. Het resultaat van deze test komt dus ook niet overeen met de verwachting dat de waterstand onafhankelijk is van de celgrootte.

De waterstand komt wel overeen met de totale hoeveelheid neerslag. Deze is hetzelfde als bij de eerste test, opnieuw 900 m^3 .

3.1.3 Conclusie

Het lijkt erop dat de waterstand wel afhankelijk is van de celgrootte, wat niet zou moeten als de neerslag in mm/uur wordt opgegeven. Daarentegen lijkt het totale neerslagvolume wel onafhankelijk te zijn van de celgrootte. Om dit te verifiëren is er ook nog een test uitgevoerd met een celgrootte van 2 meter. Dit resulteerde opnieuw in een totale neerslag van 900 m^3 , wat in dit geval een waterstand van 2,25 m in elke cel gaf.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de neerslag zeker niet in mm/uur opgegeven wordt, maar in een andere eenheid. De volgende tests zullen gericht zijn op het bepalen van deze eenheid.

3.1.4 Test 3

In deze test wordt de neerslag ingesteld op 20 (eenheid onbekend). De neerslag wordt dus verdubbeld ten opzichte van de eerste twee tests. Voor de rest zijn de parameters gelijk aan de eerste test, de celgrootte is dus 1 m.

Hypothese

Met een verdubbeling van de regenval zouden ook de waterstand in elke cel en de totale hoeveelheid neerslag moeten verdubbelen ten opzichte van de eerste test.

Resultaat

Na een uur is de waterstand in elke cel 18 meter, en is het totale neerslagvolume 1800 m^3 . De hypothese van deze test is dus volledig juist, aangezien dit precies een verdubbeling is ten opzichte van de eerste test.

3.1.5 Test 4

In deze test wordt niet de celgrootte, maar het aantal cellen in het raster aangepast. In plaats van een raster van 10 bij 10 wordt nu een raster van 20 bij 20 gebruikt. Voor de rest worden opnieuw dezelfde parameters als bij test 1 gebruikt. Er liggen dus 400 cellen in het raster, waardoor het totale oppervlakte van het raster 400 m^2 wordt.

Hypothese

Als de totale hoeveelheid neerslag onafhankelijk is van de celgrootte is het aannemelijk dat deze wel afhankelijk is van het aantal cellen in het raster, aangezien het onwaarschijnlijk lijkt dat het gebruikte raster helemaal geen invloed heeft op de regenval. Aangezien er in dit raster 4 keer zo veel cellen zijn als in de eerste test, is de verwachting dat ook de totale neerslag met een factor 4 zal verhogen, deze zal dan 3600 m^3 worden.

Resultaat

Na de modelrun van een uur is de totale hoeveelheid regenval zoals verwacht 3600 m^3 , dit komt opnieuw kloppend overeen met de gelijke waterstand in elke cel van 9 m.

3.1.6 Conclusie

Aan de hand van de resultaten van de vier tests (tabel 3-1) is duidelijk te zeggen dat de neerslag niet in de verwachte mm/uur wordt opgegeven.

Tabel 3-1: Resultaten van de vier uitgevoerde tests

* Eenheid wordt onderzocht

Test	Celgrootte [m]	Raster	Neerslag *	Waterstand [m]	Totaal Volume [m ³]
1	1	10x10	10	9	900
2	0,5	10x10	10	36	900
3	1	10x10	20	18	1800
4	1	20x20	10	9	3600

In plaats daarvan verandert de totale hoeveelheid neerslag alleen als het aantal cellen verandert. Dit doet vermoeden dat de neerslag in de vorm van volume/tijdseenheid/cel wordt opgegeven. Er is hier echter geen logische invulling voor die klopt met de resultaten van de uitgevoerde tests.

De enige enigszins logische verklaring is dat de eenheid m³/uur/cel is, waarbij de uitkomsten om een bepaalde reden gereduceerd worden met 10%. Aan de hand van deze conclusie is er een nieuwe versie van het model beschikbaar gekomen (versie 1.2.1), deze versie wordt getest in bijlage C.

3.2 Locatiebepaling van de kolk

In een volgende test is er wel getracht om een uitstroombemogelijkheid in de simulatie op te nemen. Door een kolk op verschillende locaties binnen het raster te plaatsen kan onderzocht worden hoe het water via de kolk het modeldomein verlaat. Bij de opschaling in GeoGEN blijkt de locatie van de kolk in het grove raster echter vaak onjuist. Na tests met verschillende locaties van de kolk wordt geconcludeerd dat er fouten zitten in de formules die de locaties van de straatkolken bepalen binnen GeoGEN. De formules die GeoGEN hiervoor gebruikt zijn:

$$\text{newi} = \text{mhCls}(\text{nm}) / \text{ResolutionDom} + 1$$

$$\text{newj} = \text{mhRws}(\text{nm}) / \text{ResolutionDom} + 1$$

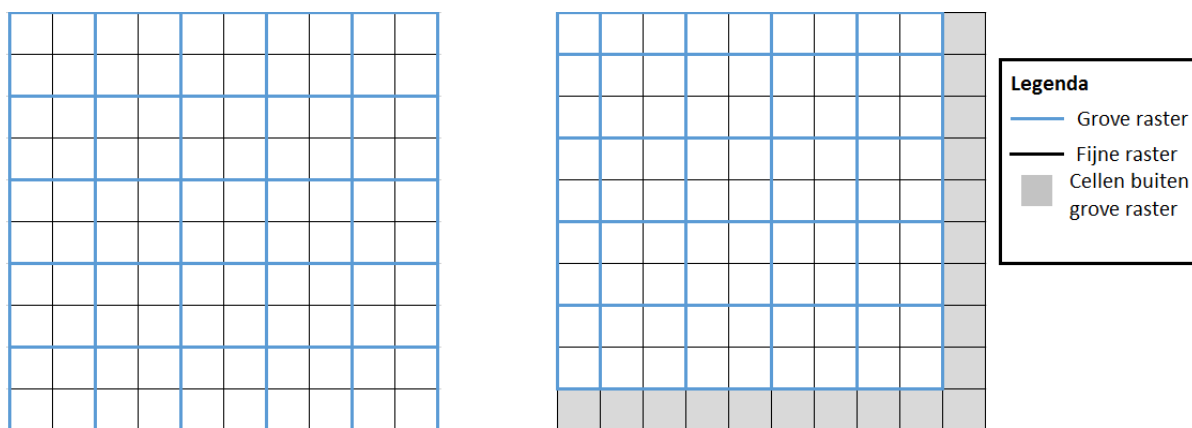
Hierin staan newi en newj voor respectievelijk de nieuwe indexnummers in de x- en y-richting van de straatkolk in het grove raster. ResolutionDom staat voor de resolutie, en mhCls en mhRws zijn het kolom en rijnummer van de straatkolk in het fijne raster, dat opgegeven wordt in drainconnectdata.txt.

De formules die hiervoor gebruikt horen te worden zijn

$$\text{newi} = (\text{mhCls}(\text{nm}) - 1) / \text{ResolutionDom} + 1$$

$$\text{newj} = (\text{mhRws}(\text{nm}) - 1) / \text{ResolutionDom} + 1$$

Door het gebruik van de verkeerde formules legt GeoGEN het raster voor de straatkolken in feite op de verkeerde plek over het fijne raster, zoals te zien in figuur 3-1.



Figuur 3-1: a. Verwachte raster

b. Raster waarin GeoGEN de straatkolken plaatst

Zoals te zien plaatst GeoGEN het raster van cellen te veel naar linksboven, het belangrijkste gevolg hiervan is dat als een straatkolk binnen de grijze cellen in figuur 3-1b valt (cellen met een fijne x- of y-coördinaat 10), deze niet wordt meegenomen in het grove raster en dus ook niet gebruikt wordt bij een berekening met PriceXD.

Om te testen of GeoGEN alleen de coördinaten van de straatkolken verkeerd weergeeft, of ook fouten maakt bij het bepalen van de hoogtes en landgebruiken wordt de volgende test uitgevoerd.

3.2.1 Test GeoGEN

Als GeoGEN niet alleen voor de putten, maar ook voor bijvoorbeeld de kaart van de gemiddelde hoogte fouten maakt door het raster verkeerd te plaatsen dan is dat vrij simpel te achterhalen met een test waar een simpel raster gebruikt wordt dat vergelijkbaar is met de eerste tests.

5	5	4	4	3	3	2	2	1	1
5	5	4	4	3	3	2	2	1	1
4	4	3	3	2	2	1	1	2	2
4	4	3	3	2	2	1	1	2	2
3	3	2	2	1	1	2	2	3	3
3	3	2	2	1	1	2	2	3	3
2	2	1	1	2	2	3	3	4	4
2	2	1	1	2	2	3	3	4	4
1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
1	1	2	2	3	3	4	4	5	5

Figuur 3-2: Fijn hoogteraster voor de test van GeoGEN

Het raster dat voor deze test gebruikt wordt is te zien in figuur 3-2. Zoals te zien staan er gelijke waarden in blokken van vier bij elkaar. Door dit op te schalen met een resolutie 2 kan bepaald worden of de gelijke hoogtewaarden in dezelfde grove cel komen te liggen.

Hypothese

Als GeoGEN het raster verkeerd legt zullen er in het opgeschaalde raster veel waarden liggen die gemiddeld worden tussen twee verschillende hoogtewaarden. De verachting is echter dat dit niet gebeurt aangezien er al lang geen aanpassingen zijn gedaan aan deze functie, en fouten hierin dus al eerder ontdekt hadden moeten worden. Er wordt dus verwacht dat er alleen gehele getallen in het opgeschaalde raster moeten voorkomen.

Resultaat

Het opgeschaalde raster is te zien in figuur 3-3. Hieruit blijkt dat de hypothese correct is en er in deze test geen fouten gemaakt worden bij het bepalen van de gemiddelde hoogten van de grove cellen. Hieruit wordt aangenomen dat er ook geen fouten gemaakt worden bij de andere functies binnen GeoGEN en dat er alleen in de nieuw toegevoegde functie van de locatiebepaling van de straatkolken fouten in de formules zitten.

5	4	3	2	1
4	3	2	1	2
3	2	1	2	3
2	1	2	3	4
1	2	3	4	5

Figuur 3-3: Resulterende raster na opschaling

3.3 Uitstroom door de straatkolken

Ondanks de fouten in de plaatsbepaling van de straatkolken kan er als nog onderzocht worden hoe het water door de straatkolken uit het modeldomein stroomt. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de verkeerde formule die het model gebruikt voor het debiet door de straatkolk, zoals besproken in paragraaf 2.6.

3.3.1 Test uitstroom voor de straatkolken

Voor deze test wordt hetzelfde raster en dezelfde neerslagparameters gebruikt als bij test 1. Het enige verschil is het toevoegen van een straatkolk in cel (5,5) van het fijne raster, hierdoor valt deze kolk in grove cel (3,3). De gegevens van de kolk zijn $A=0.2 \text{ m}^2$, $m=0.8 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $Q_{throttle}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{pipefull}=125 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie paragraaf 2.6). $Q_{throttle}$ en $Q_{pipefull}$ zijn hierin zo hoog dat ze nooit een rol zullen spelen binnen deze berekening. De tijdstap die gebruikt wordt voor het bepalen van de uitstroom door de straatkolk is ingesteld op de standaardwaarde van 60 seconde. Tijdens deze test wordt er niet alleen gekeken naar de situatie aan het eind van de modelrun, maar wordt elk kwartier de situatie geanalyseerd.

Hypothese

Er zal waarschijnlijk nog wel water in het domein staan maar omdat er geen realistisch maximaal debiet is bepaald dat door de straatkolk kan, zal deze waterstand een stuk lager zijn dan de 9 meter die bij test 1 behaald werd. Ook zal er geen gelijke waterstand in elke cel meer zijn, omdat al het water nu op één plek het modeldomein verlaat. In cel (5,5) en de andere cellen die in grove cel (3,3) liggen wordt verwacht dat de waterstand het laagst is, aangezien het water hier de cel verlaat.

Resultaat

Gedurende alle vier de meetmomenten ligt de waterstand in alle cellen tussen de 0,15 en 0,35 meter. Het is dus duidelijk dat het toevoegen van een straatkolk een grote invloed heeft op de waterstand in het modeldomein. De waterstanden in de cellen na een uur zijn te zien in tabel 3-2.

Tabel 3-2: Waterstanden in de cellen na 1 uur in meters.

0.2503	0.2503	0.2387	0.2387	0.1814	0.1814	0.1929	0.1929	0.2849	0.2849
0.2503	0.2503	0.2387	0.2387	0.1814	0.1814	0.1929	0.1929	0.2849	0.2849
0.2599	0.2599	0.1872	0.1872	0.2525	0.2525	0.2333	0.2333	0.2631	0.2631
0.2599	0.2599	0.1872	0.1872	0.2525	0.2525	0.2333	0.2333	0.2631	0.2631
0.2130	0.2130	0.2236	0.2236	0.3012	0.3012	0.2564	0.2564	0.1678	0.1678
0.2130	0.2130	0.2236	0.2236	0.3012	0.3012	0.2564	0.2564	0.1678	0.1678
0.2113	0.2113	0.1309	0.1309	0.2396	0.2396	0.2783	0.2783	0.1524	0.1524
0.2113	0.2113	0.1309	0.1309	0.2396	0.2396	0.2783	0.2783	0.1524	0.1524
0.3475	0.3475	0.1536	0.1536	0.1955	0.1955	0.2698	0.2698	0.2774	0.2774
0.3475	0.3475	0.1536	0.1536	0.1955	0.1955	0.2698	0.2698	0.2774	0.2774

Opvallend is dat de grove cel waarin de kolk ligt (de grijze cellen in tabel 3-2) de op één na hoogste waterstand heeft. Dit is vreemd aangezien deze grove cel de straatkolk bevat. Voor de andere tijdstippen lag de waterstand van deze cellen meer rond het gemiddelde, al was deze nooit het laagst. Verder is er ook geen duidelijk patroon te herkennen in de waterstanden terwijl er wel zeer veel verschil in de waterstanden zit.

PriceXD geeft ook weer hoe veel water er door de straatkolken uit het domein verdwijnt. Na een uur is dit 1754 m^3 . Dit terwijl er maar 900 m^3 valt. Daarnaast is er na een uur ook nog 23 m^3 aanwezig in het modeldomein. Dit geeft een volumefout van -877 m^3 . Het model geeft aan dat deze volumefout er is in de output, maar maakt daar tijdens de modelrun geen melding van.

Een van de redenen dat deze grote volumefout ontstaat, kan zijn dat de tijdstap waarin de uitstroom die door het riool plaatsvindt niet gelijk is aan de interne tijdstap van het model. De 60 seconde die hier aangehouden wordt is misschien te lang waardoor er eventueel op sommige momenten meer water wordt afgevoerd dan er in het model aanwezig is.

3.3.2 Verkleinen tijdstap uitstroom

In deze test wordt de tijdstap die gebruikt wordt voor de uitstroom door de straatkolken gelijkgesteld aan de kleinste interne tijdstap van het model. Tijdens de vorige test was deze 0,1 seconde. Voor de rest wordt er niets veranderd ten opzichte van de vorige test.

Hypothese

Verwacht wordt dat deze aanpassing grote gevolgen zal hebben op de volumefout die er in de vorige test optrad. In dat geval zal het uitstroomvolume ongeveer gelijk moeten zijn aan het neerslagvolume van 900 m^3 , aangezien het volume binnen het modeldomein aan het eind van het uur vrij klein is.

Resultaat

Na een uur was het volume dat door de straatkolk naar buiten was gestroomd opnieuw 1754 m^3 . Het aanpassen van de tijdstap was dus compleet zonder gevolgen. Wel staat in het outputbestand van de uitstroom door de straatkolken de uitstroom per 0.1 seconde beschreven. Waarschijnlijk bepaalt de opgegeven tijdstap dus alleen hoe de uitstroom door de manholes opgeschreven, en heeft deze niets met de berekeningen te maken. Hiervoor wordt dus in tegenstelling tot wat eerst werd aangenomen wel de interne tijdstap van het model gebruikt.

3.3.3 Conclusie

Vooralsnog kan er geen verklaring gevonden worden voor de oorzaak van de problemen met de uitstroom door de straatkolken. Zowel de waterstanden (veel fluctuaties zonder een duidelijk patroon) als het totale uitstroomvolume (significante volumefout) zijn redenen om aan te nemen dat straatkolken nog niet naar behoren werken in deze versie.

3.4 Tests aan de hand van de gevoeligheidsanalyse

De volgende twee tests zijn uitgevoerd als reactie op opvallende resultaten bij de gevoeligheidsanalyse, uitgevoerd in hoofdstuk 4. Voor een chronologisch verloop van het rapport dient deze paragraaf overgeslagen te worden tot na de resultaten van de gevoeligheidsanalyses voor k en de resolutie (paragraaf 4.6 en 4.9). Aangezien deze tests als reactie op de gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd, worden deze tests dus beide uitgevoerd in versie 1.1.

3.4.1 Test eenheid k

Om de correcte eenheid van k in de formule van Horton te zoeken wordt teruggegrepen op een raster van 10 bij 10 cellen. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de eenheid in de handleiding (Price, 2014) in s^{-1} waarschijnlijk niet juist is (zie paragraaf 4.6). Daarnaast is het ook onlogisch om de parameter in deze eenheid op te geven aangezien er zeer kleine waarden moeten worden ingevuld (tot nu toe werd er gewerkt met 0.001) en de andere twee parameters van de formule van Horton in mm/uur en niet in mm/s worden opgegeven.

Om de eenheid van k te achterhalen wordt een test opgesteld waarin er een constante neerslag valt op een raster van 10 bij 10 cellen met een celgrootte van 1 meter. Alle cellen in dit raster hebben dezelfde hoogte en hetzelfde landgebruikstype. De Horton-parameters van dit landgebruik zijn: $f_0 = 10 \text{ mm/uur}$, $f_c = 5 \text{ mm/uur}$ en $k = 1 \text{ uur}^{-1}$. De neerslag wordt ingesteld op 100 mm/uur , zodat er altijd meer water aanwezig is in het modeldomein dan kan infiltreren. De simulatieduur van deze test is twee uur.

Hypothese

Zoals blijkt uit de berekening in bijlage E infiltreert er volgens de formule van Horton met deze parameters 14 mm in twee uur. Als de eenheid van k inderdaad uur^{-1} is, dan zal het totaal geïnfiltreerde volume $0,014 * 100 = 1,4 \text{ m}^3$. De waterstand in elke cel na twee uur wordt hierdoor $2 * 100 - 14 = 186 \text{ mm}$.

Resultaat

Na twee uur is het totaal geïnfiltreerd volume $1,4 \text{ m}^3$ en de waterstand in elke cel 185 mm. Het totaal geïnfiltreerd volume voldoet dus volledig aan de hypothese en de waterstand zit er zo dicht bij dat dit kan worden afgeschreven aan afrondingsfouten. De hypothese wordt dus bevestigd.

3.4.2 Conclusie

Aangezien de hypothese klopt kan er met voldoende zekerheid geconcludeerd worden dat k inderdaad opgegeven dient te worden in uur^{-1} en niet in s^{-1} . In de gevoeligheidsanalyse moeten de waarden voor k daarom aangepast worden. Dit geldt niet alleen voor de putten en kolken maar ook voor alle andere typen landgebruik.

3.4.3 Test infiltratie bij opschaling

Om de hypothese te testen dat de infiltratie zeer afhankelijk is van de resolutie wordt opnieuw gebruik gemaakt van een klein raster. Bij deze test wordt een vergelijkbare situatie doorgerekend met twee verschillende resoluties, en worden de verschillen vergeleken.

Het betreft opnieuw een situatie met een raster van 10 bij 10 cellen met een celgrootte van 1 m. 99 van deze cellen hebben een infiltratiecapaciteit van 1.0 mm/uur, deze infiltratiecapaciteit is constant in de tijd. De cel met indexnummer (5,5) heeft een constante infiltratiecapaciteit van 1000 mm/uur. De neerslag wordt constant ingesteld op 100 mm/uur. De totale neerslag is dus significant hoger dan de infiltratiecapaciteit. Deze situatie wordt doorgerekend met een simulatieduur van één uur met de resoluties 1 en 2.

Hypothese

Er zullen geen schattingen gemaakt worden van de infiltratievolumes voor de situaties met de verschillende resoluties, aangezien niet goed bepaald kan worden hoe het model reageert op het feit dat de infiltratiecapaciteit van cel (5,5) hoger is dan de neerslag. Daarentegen is de hypothese wel dat het infiltratievolume bij resolutie 2 hoger zal zijn dan bij resolutie 1, aangezien dit ook blijkt uit de gevoeligheidsanalyse voor de resolutie. Waar echter het neerslagvolume ook varieerde bij de gevoeligheidsanalyse zal dat nu naar verwachting niet zo zijn aangezien er nu geen sprake is van cellen met een nodata-waarde.

Resultaten

Bij de test met resolutie 1 was het neerslagvolume 10 m^3 , waarvan $0,2 \text{ m}^3$ geïnfiltreerd was. Bij resolutie 2 viel er ook in totaal 10 m^3 , maar bij deze resolutie was het totale infiltratievolume $0,5 \text{ m}^3$. De testresultaten komen dus volledig overeen met de hypothese. Bij verschillende resoluties blijft het neerslagvolume gelijk, maar het infiltratievolume neemt toe bij grovere resoluties.

3.4.4 Conclusie

De hypothese is bevestigd dus het patroon dat naar voren kwam bij de gevoeligheidsanalyse is ook terug te vinden in deze test. Het infiltratievolume is sterk afhankelijk van de resolutie. Bij resoluties 1 en 2 verschilt de infiltratie zelfs een factor 2,5. Dit feit heeft grote gevolgen voor de bruikbaarheid van de modelresultaten.

4 Gevoeligheidsanalyse

Vanwege de problemen met de nieuwere versies van PriceXD, is er besloten om de gevoeligheidsanalyse uit te voeren in versie 1.1. Zoals bepaald in bijlage D klopt in deze versie de eenheid van de neerslag. Daarentegen is het niet mogelijk om straatkolken direct aan het model toe te voegen en worden deze opgenomen in het landgebruik.

4.1 Methode

De gevoeligheidsanalyse zal gebruik maken van de gegevens van een project dat met PriceXD wordt uitgevoerd. In dit project wordt PriceXD gebruikt om de afvoer van regenwater in het centrum van Hogeveen te bepalen.

Vanwege het grote aantal parameters is het niet mogelijk om voor elk van de verschillende parameters binnen PriceXD en GeoGEN een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. De focus zal liggen op parameters die aangepast kunnen worden bij de kalibratie van het model. Dit omdat er op deze manier effectiever gekalibreerd kan worden. Daarnaast zal de gevoeligheid getest worden van parameters waarbij het onduidelijk is of de basissituatie hier goed op is afgesteld.

De parameters waarvoor de gevoeligheid onderzocht wordt zijn:

- De initiële infiltratie van de kolken (f_0)
- De uiteindelijke infiltratie van de kolken (f_c)
- De vervalcoëfficiënt van de infiltratie door de kolken (k)
- De initiële infiltratie door het landgebruik “overig” (f_0)
- De resolutie (r)

Voor deze parameters zullen de waarden gevarieerd worden binnen een bepaalde range om te kijken wat dit voor reacties geeft in de modelresultaten. De gevolgen van deze veranderingen zullen op twee manieren worden weergegeven. Allereerst numeriek, door de infiltratie- en eindvolumes te vergelijken. Deze volumes worden per modelrun bepaald door PriceXD. Daarnaast zal ook de verdeling van het resulterend volume worden opgemerkt. Hierbij ligt de focus op de locaties in Hogeveen waar het meeste water accumuleert.

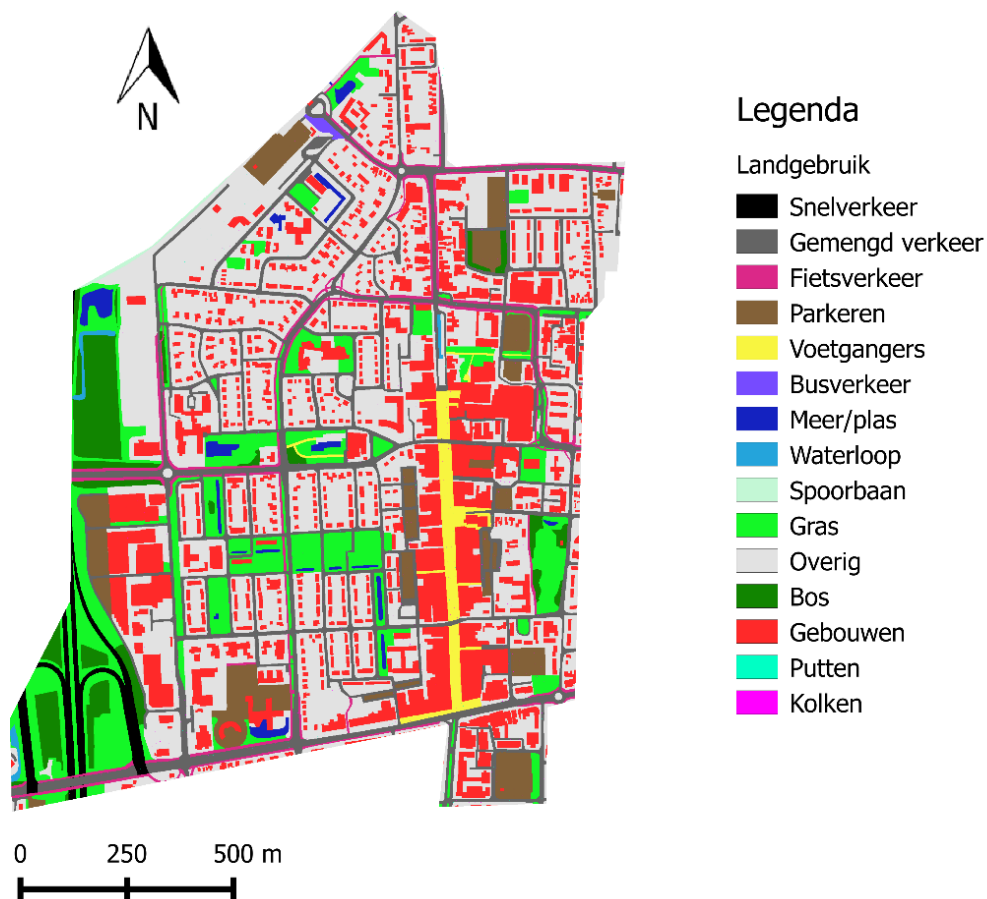
Om te bepalen welke waarden voor de parameters getest moeten worden, wordt de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd vanaf een basissituatie. Deze basissituatie gebruikt over het algemeen de gegevens die ook gebruikt zijn voor de uitvoering van het project in Hogeveen. Een belangrijke verandering is echter de neerslag. In de gevoeligheidsanalyse wordt een constante neerslag van 10 mm/uur die 2 uur duurt gebruikt. Ook wordt er om de rekentijd laag te houden een resolutie van 20 gebruikt. Er wordt dus opgeschaald naar een raster van 10 bij 10 meter.

Voor de infiltratiewaarden van de kolken is er in eerste instantie gebruik gemaakt van de waarden uit het project van Hogeveen. Deze waren: $f_0 = 16000$ mm/uur, $f_c = 999$ mm/uur en $k = 0.001$ s⁻¹. Voor de projectsituatie zijn alle infiltratieparameters te vinden in bijlage F. Na een test voor de gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt k vanaf deze projectsituatie (uitgevoerd in bijlage G) bleek dit echter een te hoge infiltratiecapaciteit te geven. Daarom wordt er in bijlage G een basissituatie opgesteld met hierin de volgende infiltratiewaarden voor de kolken: $f_0 = 1000$ mm/uur, $f_c = 500$ mm/uur en $k = 0.001$ s⁻¹. Deze waarden zullen in de gevoeligheidsanalyse als basis dienen, vervolgens wordt er steeds één parameter gevarieerd om hiervan de gevolgen vast te stellen en zo de gevoeligheid voor die parameter te bepalen.

4.2 Situatiebeschrijving

De aanleiding van het project in Hogeveen was de wateroverlast in Hogeveen die plaatsvond op 5 juli 2012. Er viel toen lokaal 30 mm neerslag in 1 uur, waardoor water op straat ontstond (Klomp & Poortinga, 2014). De reden dat er wordt gekozen om de gevoeligheidsanalyse op dit project te baseren is de kwaliteit van de gegevens van dit project. Het projectgebied wordt gemodelleerd op een raster van 2887 bij 3766 cellen, met een celgrootte van 0,5 bij 0,5 meter. Het plangebied is dus ongeveer 1,5 bij 2 km groot. Het plangebied is echter niet volledig rechthoekig waardoor het qua oppervlakte ongeveer 2 km² is.

Het plangebied van dit project beslaat het centrum en een paar omliggende woonwijken van Hogeveen. Aan de Noordwestkant wordt het plangebied begrensd door een spoorlijn, en ook het treinstation van Hogeveen valt deels binnen het plangebied. De kaart van het landgebruik (surfacecovervalue.asc) is te zien in figuur 4-1.



Figuur 4-1: Landgebruikskartaal Hogeveen

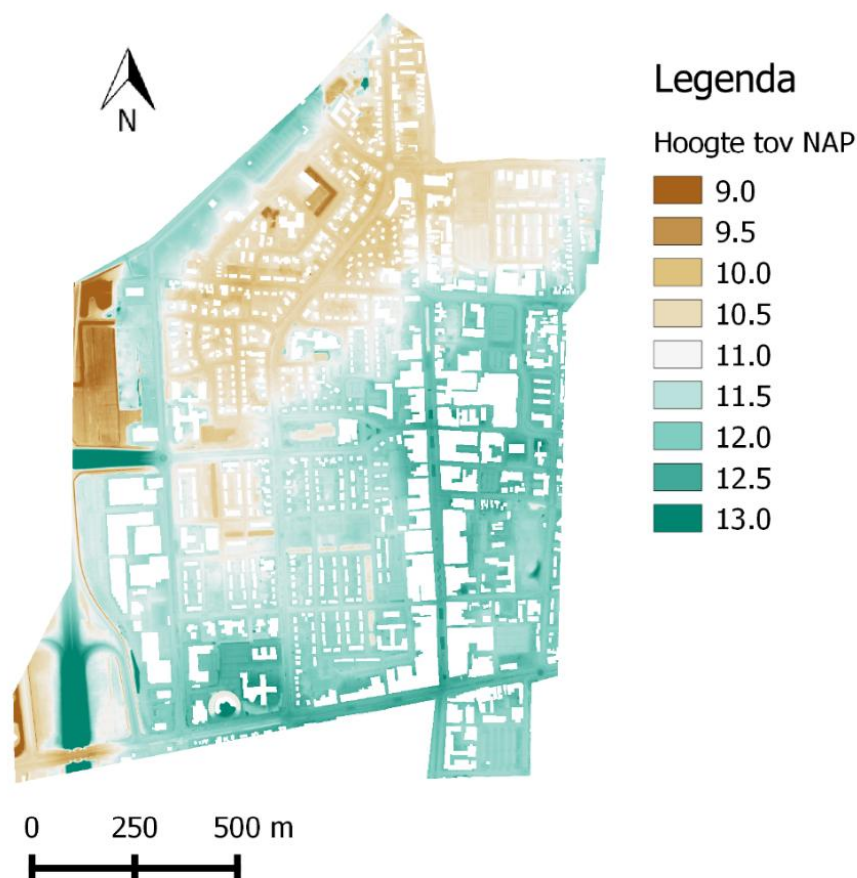
Er wordt in dit project geen gebruik gemaakt van het grondtype van Hogeveen, dus worden de parameters voor de formule van Horton bepaald aan de hand van het landgebruik. In de legenda van figuur 4-1 zijn putten en kolken opgenomen. Deze zijn in de figuur zelf niet duidelijk te zien omdat dit over het algemeen enkele cellen zijn, maar ze zitten wel in het raster. In totaal zijn er 1349 putten en 4259 kolken in het plangebied. Dit zijn echter ook de putten en kolken die wel binnen de rechthoek

van 2887 bij 3677 vallen, maar niet binnen het plangebied. Hierdoor is een deel van de putten en kolken omringd door cellen met een Nodata-waarde. Deze putten en kolken zijn niet toegankelijk dus hebben ze verder geen invloed op de berekeningen.

In werkelijkheid stroomt water alleen door de kolken de riolering in. Het is echter vaak zo dat alleen de putten in een rioleringsmodel zijn opgenomen, dan wordt er aangenomen dat water door de putten naar binnen stroomt. Om het niet onnodig ingewikkeld te maken worden in de berekeningen geen verschillen tussen putten en kolken opgenomen. De infiltratiegegevens voor de putten en kolken zijn dus identiek.

Verder is het veelvuldig voorkomen van het landgebruik “overig” belangrijk om op te merken. Dit zijn veelal tuinen, maar ook grasvelden die niet als zodanig geclassificeerd zijn (Google Maps, 2014). Vanwege het afwisselende karakter moet er aangenomen worden dat de infiltratie door dit type landgebruik wel een rol zal spelen.

Naast het landgebruik is ook de hoogtekkaart van de gemeente Hoogeveen van groot belang voor de berekeningen van PriceXD. Deze kaart is te zien in figuur 4-2. De gebouwen zijn uit deze kaart geknipt omdat wordt aangenomen dat deze hun eigen afwatering regelen. Hierdoor heeft de regen die op gebouwen valt binnen de berekeningen geen invloed op het water op straat.



Figuur 4-2: Hoogtekaart van Hoogeveen

Binnen het plangebied is er sprake van een natuurlijk hoogteverschil van ongeveer 5 meter. Het noordelijke deel van het plangebied ligt hierbij significant lager dan het zuidelijke deel. Verwacht wordt dus dat in het noordelijke deel het meeste sprake zal zijn van water op straat, aangezien het water zich vooral hier zal accumuleren.

Naast de infiltratie en het resulterend volume in de basissituatie is het belangrijk om te weten welk deel van de infiltratie plaatsvindt door de putten en kolken. Om hiervan een beeld te vormen wordt de basissituatie vergeleken met een situatie waar de infiltratiecapaciteit van de putten en kolken op nul wordt ingesteld. Deze methode is niet ideaal, omdat er door de infiltratiecapaciteit van putten en kolken op nul te zetten meer water in het modeldomein blijft staan, en er dus ook meer door de andere landgebruikstypen zal infiltreren. Deze methode is daarom slechts een benadering van de werkelijke uitstroom door putten en kolken in de basissituatie.

4.3 Resultaten basissituatie

Deze paragraaf toont de resultaten van de tests voor Hoogeveen die uitgevoerd zijn voordat er met de daadwerkelijke gevoeligheidsanalyse begonnen wordt. Het belangrijkste resultaat hierbij is de basissituatie aangezien in de gevoeligheidsanalyse de parameters vanaf deze situatie gevarieerd zullen worden.

De resultaten van de projectsituatie, de basissituatie en de situatie zonder putten en kolken zijn te zien in tabel 4-1.

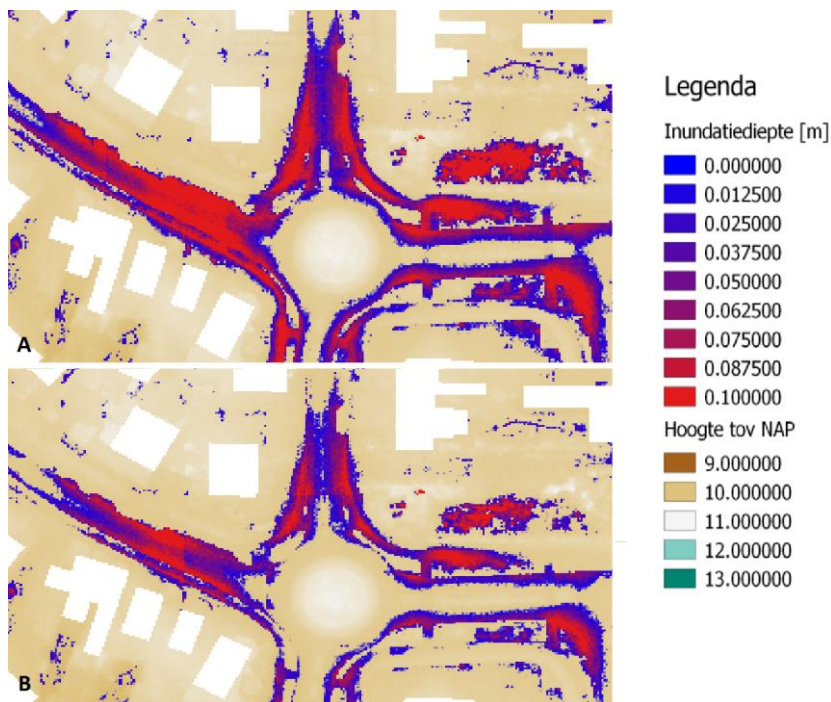
Tabel 4-1: Verschil tussen de basissituatie en de situatie zonder putten en kolken

	Projectsituatie	Basissituatie	Zonder kolken
f_0 [mm/uur]	16000	1000	0
f_c [mm/uur]	999	500	0
k [s^{-1}]	0.001	0.001	0
Neerslag [m^3]	$2.7318 * 10^4$	$2.7318 * 10^4$	$2.7318 * 10^4$
Infiltratie [m^3]	$2.0499 * 10^4$	$1.878 * 10^4$	$1.7084 * 10^4$
Eindvolume [m^3]	$6.8190 * 10^3$	$8.5385 * 10^3$	$1.0235 * 10^4$

Met 'eindvolume' in tabel 4-1, en alle verdere tabellen in dit hoofdstuk, wordt bedoeld het volume water dat aanwezig is in het modeldomein aan het eind van de simulatie. Oftewel het totale volume aan water op straat.

Uit tabel 4-1 blijkt dat de infiltratie door putten en kolken vormt maar een relatief klein deel van de totale infiltratie vormt. Bij benadering is deze voor de basissituatie $1.878 * 10^4 - 1.7084 * 10^4 = 1.696 * 10^3 m^3$. Dit is slechts 8% van de totale infiltratie in de basissituatie. Hoewel dit getal slechts een benadering is van de werkelijke infiltratie door de putten en kolken, zal dit getal wel gebruikt worden om in de gevoeligheidsanalyse de uitstroom door putten en kolken aan te duiden.

Deze waarde is belangrijk om te weten voordat met de gevoeligheidsanalyse begonnen wordt aangezien er bij het variëren van de parameters voor de putten en kolken in de Horton formule dus ook nooit heel grote variaties in de resultaten verwacht kunnen worden.

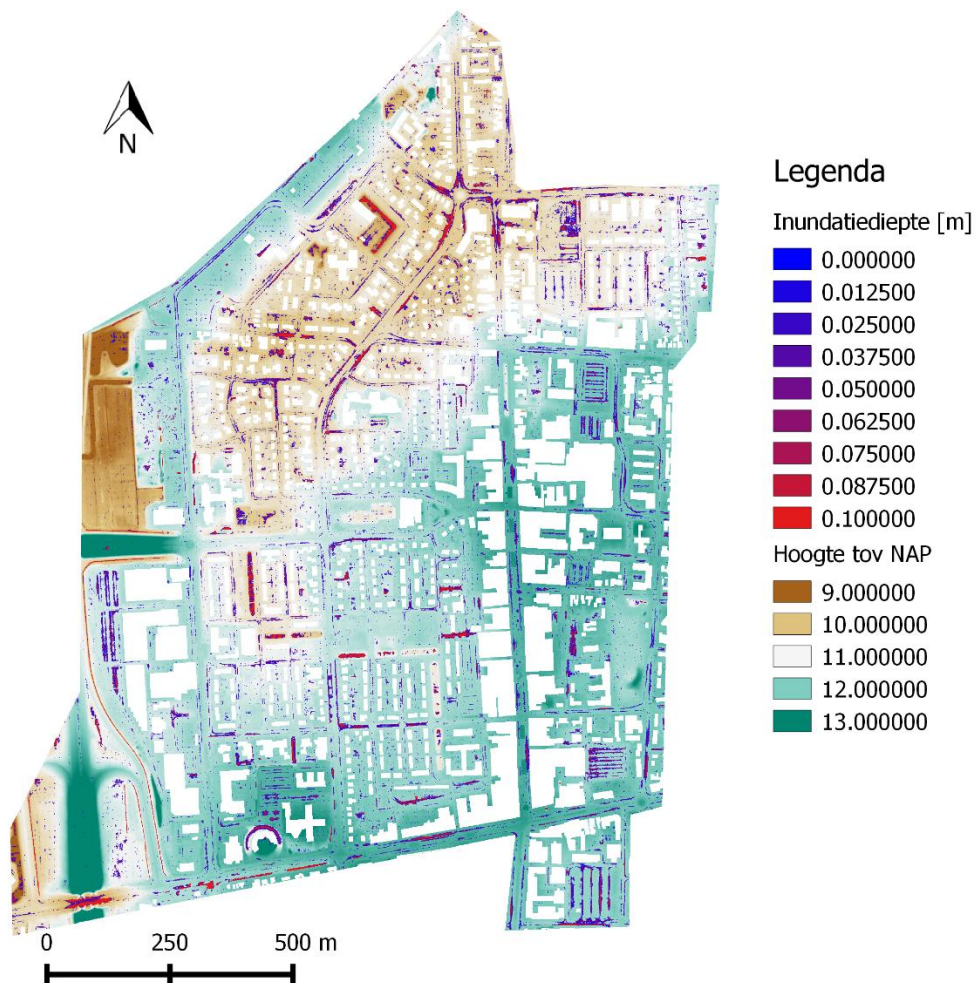


Figuur 4-3: Voorbeeld van de verschillen tussen de situatie zonder kolken (A) en de basissituatie (B)

Ondanks dat de afvoer voor de putten en kolken dus maar verantwoordelijk is voor 8% van de infiltratie, zijn de gevolgen van het weghalen van de putten en kolken op sommige plekken zeker significant. Figuur 4-3 toont het verschil tussen de twee situaties na twee uur rond een rotonde in het noorden van het plangebied.

Ondanks dat verschillen in totale infiltratie dus vrij klein kunnen zijn, kunnen deze verschillen leiden tot grote locatie-specifieke gevolgen. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat in de basissituatie door bepaalde kolken veel water infiltreert. Dit water blijft dan in de situatie zonder kolken op straat staan. Hierdoor zijn ook de relatief kleine verschillen in infiltratie zeer relevant.

De totale verdeling van het water over het plangebied in de basissituatie is te zien in figuur 4-4.



Figuur 4-4: inundatiekaart voor de basissituatie

Als figuur 4-4 (de basissituatie) vergeleken wordt met figuur G-1 in bijlage G (de projectsituatie), dan is het duidelijk dat er in de basissituatie fors meer water op straat staat. Dit blijkt ook uit de waarden bij 'eindvolume' in tabel 4-1.

4.4 Gevoeligheid voor de initiële infiltratie door de putten en kolken

De eerste gevoeligheid die getest wordt is de gevoeligheid voor de initiële infiltratie door de putten en kolken, oftewel f_0 . De waarden die getest worden zijn -50%, -25%, 0%, +25% en +50% ten opzichte van de 1000 mm/uur uit de basissituatie. De waarden voor f_0 die getest worden zijn dus 500, 750, 1000, 1250 en 1500 mm/uur. De resultaten zijn te zien in tabel 4-2.

Tabel 4-2: Gevolgen van veranderingen in f_0

f_0 [mm/uur]	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Eindvolume [m^3]	Afvoer kolken
500	$2.7318 * 10^4$	$1.7985 * 10^4$	$9.3334 * 10^3$	-47%
750	$2.7318 * 10^4$	$1.8400 * 10^4$	$8.9179 * 10^3$	-22%
1000	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5385 * 10^3$	0%
1250	$2.7318 * 10^4$	$1.9114 * 10^4$	$8.2047 * 10^3$	20%
1500	$2.7318 * 10^4$	$1.9396 * 10^4$	$7.9221 * 10^3$	36%

In de laatste kolom van tabel 4-2 wordt de procentuele af- of toename van de afvoer door de putten en kolken weergegeven. Hieruit blijkt duidelijk dat veranderingen in f_0 bij deze test zeker gevolgen hebben, maar dat ze niet lineair doorwerken in de resultaten. Dit is ook goed terug te zien in figuren H-1 en H-2 in bijlage H. Deze waarden zijn goed te verklaren. Het verhogen van de infiltratiecapaciteit van de putten en kolken verhoogt logischerwijs de infiltratie, maar dit loopt asymptotisch richting een maximum.

4.5 Gevoeligheid voor de uiteindelijke infiltratie door de putten en kolken

Aan de hand van de basissituatie wordt ook de waarde voor f_c in de formule van Horton gevarieerd. De waarden voor deze constante die getest worden zijn 0, 250, 500, 750, en 999 mm/uur. Hierbij is 500 mm/uur al getest, aangezien dit de basissituatie is. Bij 999 mm/uur is de infiltratie door de putten en kolken (zo goed als) constant. De resultaten van de modelruns zijn te zien in tabel 4-3.

Tabel 4-3: Gevolgen van veranderingen in f_c

f_c [mm/uur]	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Eindvolume [m^3]
0	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5385 * 10^4$
250	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5387 * 10^4$
500	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5385 * 10^4$
750	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5387 * 10^4$
999	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5387 * 10^4$

Zoals te zien verschillen de waarden voor het totaal geïnfiltreerd volume niet op het moment dat f_c gevarieerd wordt. In het totaal resterend volume in het modeldomein zijn de verschillen alleen te verklaren door afrondingsfouten, en niet door de veranderingen in f_c . Aangezien er geen structurele verschillen zijn in de infiltratie kunnen er immers ook geen structurele verschillen optreden in het resulterend volume.

Een mogelijke reden voor het uitblijven van gevolgen kan zijn dat de waarde van k , die nu is ingesteld op 0.001 s^{-1} , te laag is. Als dit zo is dan wijkt de infiltratie gedurende de simulatieduur van 2 uur nauwelijks af van f_0 , waardoor f_c geen rol speelt in de bepaling van de infiltratie.

4.6 Gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt van de putten en kolken

Aangezien het vermoeden bestaat dat de waarde van de vervalcoëfficiënt k te laag is om de gevolgen van f_c terug te zien in de modelresultaten, wordt de gevoeligheid voor k getest. Ook bij deze test zal er vanuit de basissituatie getest worden. Vanwege de lage waarde van k is er echter voor gekozen om in deze test de waarden logaritmisches op te laten lopen. De waarden voor k die getest worden zijn 0, 0.001, 0.01, 0.1 en 1 s^{-1} . De resultaten zijn te zien in tabel 4-4.

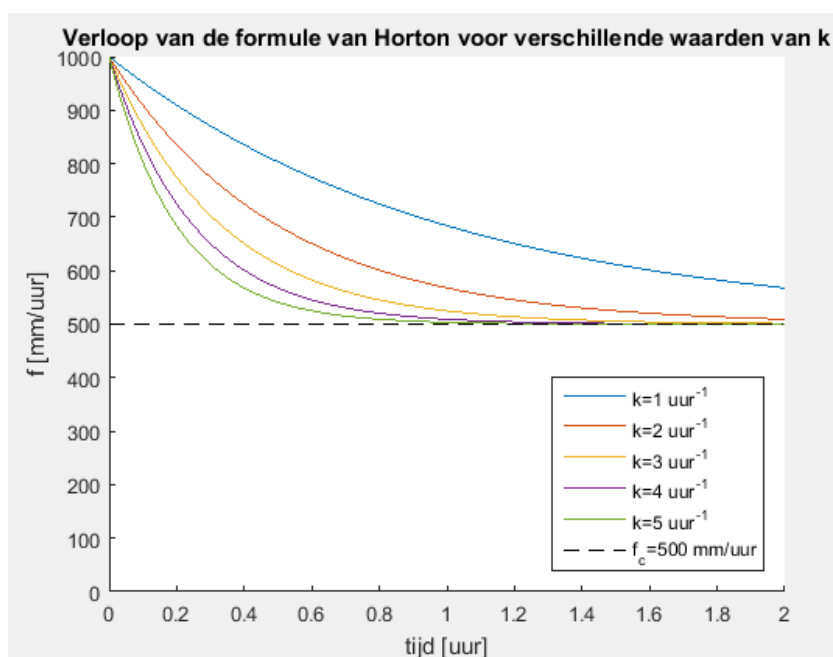
Tabel 4-4: Gevolgen van veranderingen in k bij basissituatie

$k [s^{-1}]$	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Eindvolume [m^3]
0	$2.7319 \cdot 10^4$	$1.8780 \cdot 10^4$	$8.5391 \cdot 10^3$
0.001	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8780 \cdot 10^4$	$8.5385 \cdot 10^3$
0.01	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8780 \cdot 10^4$	$8.5388 \cdot 10^3$
0.1	$2.7317 \cdot 10^4$	$1.8778 \cdot 10^4$	$8.5396 \cdot 10^3$
1	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8771 \cdot 10^4$	$8.5472 \cdot 10^3$

Ook in tabel 4-4 is zeer weinig verandering in de infiltratie en het resulterend volume te zien. Alleen bij de hoogste twee waarden voor k , wordt er verandering waargenomen. Deze verandering is vrij minimaal en zou eventueel verklaard kunnen worden door afrondingsfouten. Toch voldoen deze veranderingen wel aan de logische verwachtingen. Naarmate de waarde van k wordt verhoogd, wordt de infiltratie lager. Hierdoor ontstaat het vermoeden dat de juiste eenheid voor k niet s^{-1} is, maar uur^{-1} .

Als dit het geval is dan kunnen nieuwe waarden voor k getest worden. Het verloop van de formule van Horton voor verschillende waarden van k in uur^{-1} is te zien in figuur 4-5.

Als k wordt getest voor de waarden 1, 2, 3, 4 en 5 uur^{-1} , dan zouden de gevolgen hier duidelijk van moeten doorwerken in de resultaten. De waarde voor $k=1$ is al getest in de vorige test.



Figuur 4-5: Verloop van de formule van Horton voor verschillende waarden van k

De resultaten zijn te zien in tabel 4-5.

Tabel 4-5: Modelresultaten met de waarden van k in uur^{-1}

$k [uur^{-1}]$	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Resultaat [m^3]	Afvoer kolken
1	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8771 \cdot 10^4$	$8.5472 \cdot 10^3$	-0.5%
2	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8763 \cdot 10^4$	$8.5564 \cdot 10^3$	-1.0%
3	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8754 \cdot 10^4$	$8.5642 \cdot 10^3$	-1.5%
4	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8746 \cdot 10^4$	$8.5734 \cdot 10^3$	-2.0%
5	$2.7319 \cdot 10^4$	$1.8737 \cdot 10^4$	$8.5820 \cdot 10^3$	-2.5%

In de laatste kolom van tabel 4-5 wordt de verandering in de afvoer door putten en kolken ten opzichte van de basissituatie gegeven. Hierin is duidelijk te zien het aanpassen van de waarde voor k tussen 1 en 5 uur^{-1} structureel leidt tot een verlaging van de infiltratie, en daarmee tot een verhoging van het resterend volume in het model domein. Een grafische weergave hiervoor is te zien in figuren H-3 en H-4 in bijlage H. Uit het zo goed als lineaire verloop wordt geconcludeerd dat de

veranderingen inderdaad het gevolg zijn van de aanpassingen in k en dus niet zijn toe te schrijven aan afrondingsfouten.

Wel zijn de veranderingen in de infiltratie zeer klein. Dit blijkt ook uit de laatste kolom die de procentuele verandering van de afvoer door de putten en kolken weergeeft ten opzichte van de basissituatie. Om deze reden wordt er in paragraaf 3.4 een preciezere test uitgevoerd naar de correcte eenheid van k .

4.7 Nieuwe situatie met k in uur^{-1}

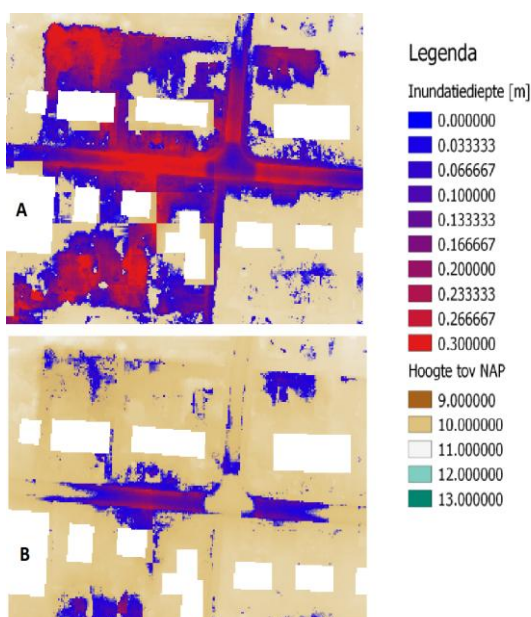
Aan de hand van de test op een klein raster is vastgesteld dat de juiste eenheid van k in de formule van Horton inderdaad uur^{-1} is. Dit heeft grote gevolgen voor de analyse van Hoogeveen. Om deze gevolgen te onderzoeken wordt er een situatie getest waarin voor de basissituatie de waarden voor k aangepast worden naar waarden met de eenheid uur^{-1} . In tabel F-2 in bijlage F zijn de nieuwe eenheden voor elk type landgebruik te zien.

De verwachting is dat deze aanpassingen voor zeer veel extra water op straat zullen zorgen. Doordat veel van de waarden tot nu toe een factor 3600 te laag zijn ingesteld, is gedurende de twee uur simulatieduur f_c eigenlijk niet van toepassing geweest. Hierdoor is voor al het landgebruik de infiltratie constant bijna niet afgeweken van f_0 . Voor veel typen landgebruik is het verschil tussen f_0 en f_c echter vrij groot. Bijvoorbeeld het landgebruik overig: $f_0 = 8.0$ en $f_c = 0.5$. Dit zorgt voor een grote afname in infiltratie gedurende de twee uur, wat op zijn beurt weer voor een grote toename in de hoeveelheid water op straat zal zorgen.

De resultaten van deze simulatie en de resultaten van de basissituatie zijn te zien in tabel 4-6.

Tabel 4-6: Verschil tussen de basissituatie en de situatie met de verhoogde waarden voor k

	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Resultaat [m^3]
Basissituatie	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5385 * 10^3$
k in uur^{-1}	$2.7318 * 10^4$	$1.0522 * 10^4$	$1.6797 * 10^4$
Procentuele verandering	0%	-44%	97%



Figuur 4-6: Verschil tussen de situatie met verhoogde waarden voor k (A) en de basissituatie (B)

Zoals te zien blijft er in de situatie met de verhoogde waarden voor k bijna twee keer zo veel water in het model domein achter als in de basissituatie. Hoe dit water zich accumuleert is te zien in figuur H-5 in bijlage G.

In figuur 4-6 is het verschil tussen de besproken situatie en de basissituatie te zien voor een bepaalde straat (de Blankenlaan-West) in het plangebied. Deze locatie geeft een van de meest extreme verschillen maar met de verhoogde waarden voor k staat deze straat volledig onder water. Bij de kalibratie moet goed op dit soort extremiteiten gelet worden, aangezien deze doen vermoeden dat de waarden voor de infiltratieparameters op dit moment nog niet goed zijn afgesteld.

Aangezien de infiltratieparameters dus waarschijnlijk niet goed staan afgesteld en vanwege een tijdsgebrek,

wordt er niet gekozen om de basissituatie aan te passen naar de situatie met k in uur^{-1} . Ook met de tekortkomingen van de huidige basissituatie zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse bruikbaar.

4.8 Gevoeligheid voor infiltratie door landgebruik overig

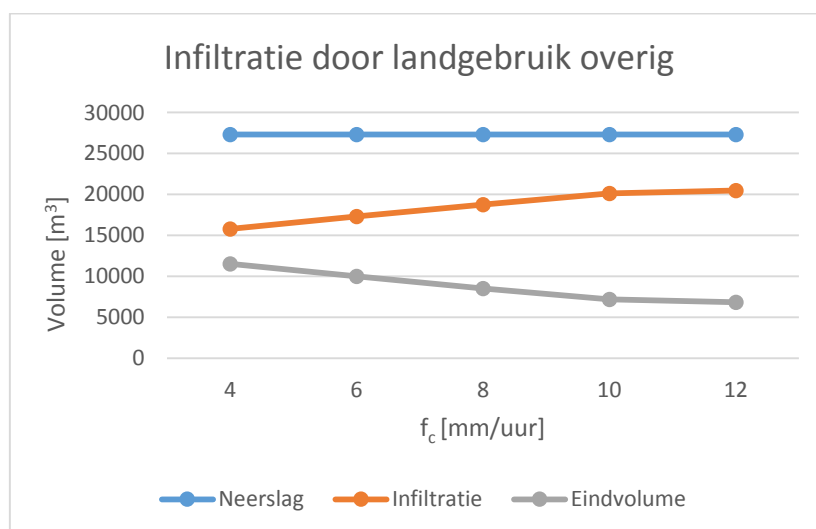
Aangezien de infiltratie door de putten en kolken bij benadering slechts 8% van de totale infiltratie uitmaakt, is het ook belangrijk om infiltratie door een ander type landgebruik te bekijken. Specifiek is dit het landgebruikstype overig. Zoals al genoemd bestaat dit type landgebruik vooral uit tuinen en niet goed geclassificeerde grasvelden. Daarom zal dit type landgebruik in werkelijk een grote variatie in de waarden van de gekoppelde parameters hebben. Echter, voor de simulaties kan uiteraard slechts één waarde voor elke parameter aan dit landgebruik gekoppeld worden. Daarnaast zijn deze parameters waarschijnlijk van vrij groot belang voor de modelresultaten, aangezien het landgebruik overig het meest voorkomende is in Hoogeveen. In Hoogeveen heeft 39% van de cellen het landgebruikstype overig, tegenover 21% van het op een na meest voorkomende landgebruik, gebouwen.

Deze redenen maken het noodzakelijk om de infiltratie door dit landgebruikstype te gebruiken bij de kalibratie voor het model. Voordat dit kan moet er eerst een beeld gevormd worden van de gevoeligheid van de totale infiltratie voor deze parameters. Tot nu toe werden de volgende parameters gebruikt voor dit landgebruik: $f_0 = 8 \text{ mm/uur}$ $f_c = 0.5 \text{ mm/uur}$ en $k = 0.005 \text{ uur}^{-1}$.

De waarde voor f_0 wordt getest met de waarden -50%, -25%, 0%, 25% en 50% ten opzichte van de basissituatie. Oftewel, 4, 6, 8, 10 en 12 mm/uur. De rest van de parameters zijn gelijk aan de basissituatie. De resultaten van deze test zijn te zien in tabel 4-7 en figuur 4-7.

Tabel 4-7: Gevolgen van het aanpassen van f_0 van het landgebruik overig

f_0 [mm/uur]	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Eindvolume [m^3]
4	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.5798 \cdot 10^4$	$1.1521 \cdot 10^4$
6	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.7312 \cdot 10^4$	$1.0006 \cdot 10^4$
8	$2.7318 \cdot 10^4$	$1.8780 \cdot 10^4$	$8.5385 \cdot 10^3$
10	$2.7318 \cdot 10^4$	$2.0120 \cdot 10^4$	$7.1987 \cdot 10^3$
12	$2.7319 \cdot 10^4$	$2.0482 \cdot 10^4$	$6.8374 \cdot 10^3$



Figuur 4-7: Grafische weergave van tabel 4-7

De gevolgen van het aanpassen van f_0 voor het landgebruik overig zijn duidelijk terug te zien. Net zoals bij de putten en kolken lijkt de infiltratie door het overige landgebruik asymptotisch richting een maximum te bewegen naarmate de waarde van f_0 verhoogd.

4.9 Gevoeligheid voor de resolutie

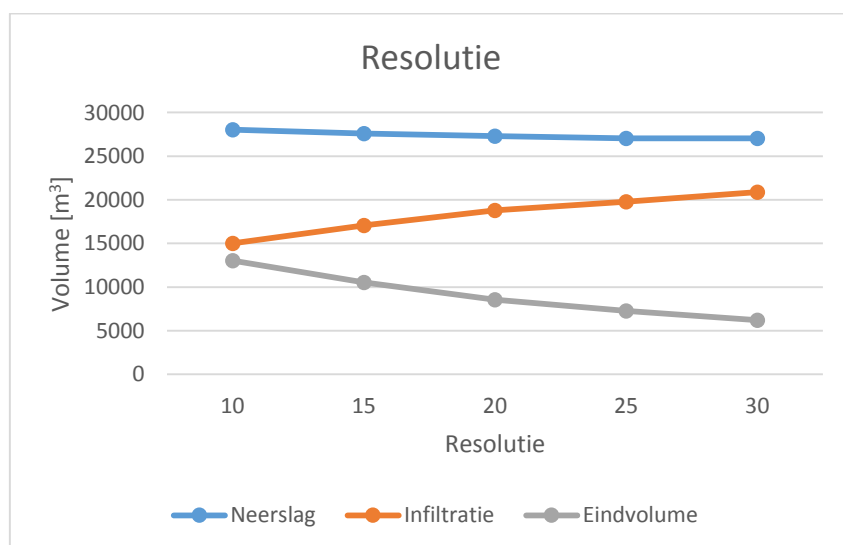
Naast de gevoeligheid voor de verschillende infiltratieparameters bestaat er ook onduidelijkheid over wat de gevolgen zijn van veranderingen in de resolutie op de modelresultaten. In paragraaf 2.2 is besproken hoe er in GeoGEN bij opschaling toch een relatief hoog detailniveau behouden wordt. De focus hierbij ligt echter op de bodemhoogte van de cellen en de bijbehorende waterstanden. Voor het landgebruik, en dus ook voor de infiltratieparameters wordt gewerkt met een gemiddelde over de fijne cellen.

Deze methode in combinatie met de keuze om putten en kolken als cellen met extreme infiltratie te modelleren, heeft gevolgen voor de totale infiltratie. Voor elke grove cel wordt een gemiddelde berekend uit een reeks waarden met af en toe een uitschieter van een put of kolk. Binnen GeoGEN en PriceXD lijkt het niet zo te zien dat er gecorrigeerd wordt voor uitschieters, waardoor de put of kolk de infiltratiecapaciteit van de hele grove cel verhoogd. Naarmate de resolutie grover wordt zijn er meer opgeschaalde cellen met hierin één of meer uitschieters, wat waarschijnlijk zal zorgen voor een toename van de totale infiltratie.

Om deze hypothese te testen wordt de resolutie van de basissituatie opnieuw gevarieerd met de waarden -50%, -25%, 0%, 25% en 50%. De resoluties die worden getest zijn dus 10, 15, 20, 25 en 30. Naast de gevolgen voor de modelresultaten worden ook de gevolgen voor de rekentijd van PriceXD bijgehouden. De resultaten zijn te zien in tabel 4-8 en figuur 4-8.

Tabel 4-8: Gevolgen van veranderingen in de modelresolutie

Resolutie	Neerslag [m ³]	Infiltratie [m ³]	Eindvolume [m ³]	Verschil Eindvolume	Rekentijd
10	$2.8025 * 10^4$	$1.5006 * 10^4$	$1.3020 * 10^4$	52%	17:27:17
15	$2.7596 * 10^4$	$1.7056 * 10^4$	$1.0541 * 10^4$	23%	4:55:27
20	$2.7318 * 10^4$	$1.8780 * 10^4$	$8.5385 * 10^3$	0%	1:58:34
25	$2.7054 * 10^4$	$1.9799 * 10^4$	$7.2557 * 10^3$	-15%	1:14:08
30	$2.7062 * 10^4$	$2.0868 * 10^4$	$6.1944 * 10^3$	-27%	0:43:06



Figuur 4-8: Grafische weergave van tabel 4-8

Wat allereerst opvalt, is dat de veranderingen in resolutie niet alleen gevolg hebben voor de infiltratie maar ook voor de totale neerslag. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat de neerslag per open grove cel wordt berekend. Of een grove cel open is wordt bepaald aan het aantal fijne cellen met een nodata-waarde in de grove cel. Aangezien de gebouwen in de hoogtekaart opgegeven worden als nodata-cellen, kan een resolutieverandering gevolgen hebben voor de bepaling of een grove cel open of gesloten is. Over het algemeen lijkt de tendens te zijn dat het neerslagvolume groter wordt naarmate de resolutie fijner wordt. Dit klopt alleen niet voor het verschil tussen de resoluties 25 en 30.

Vervolgens is te zien dat de infiltratie zoals verwacht hoger is bij grovere resoluties. Dit, in combinatie met de verhoogde neerslag, zorgt bij fijnere resoluties voor significant meer water op straat. In de een-na-laatste kolom van tabel 4-8 staat de procentuele verandering in het eindvolume ten opzichte van de basissituatie. Hierin is te zien dat bij een resolutie 10 er meer dan anderhalf keer zo veel water blijft staan als in de basissituatie. Dit terwijl er in feite niets verandert aan de externe parameters, alleen de rekenmethode wordt aangepast. Dit komt dus voornamelijk door de extreme afname van de infiltratie bij fijnere resoluties, wat waarschijnlijk komt doordat er in deze situatie minder opgeschaalde cellen zijn die een put of kolk bevatten. Deze hypothese wordt getest in paragraaf 3.4 en blijkt ook te kloppen.

In de laatste kolom van tabel 4-8 staat de rekentijd van PriceXD voor elke resolutie. Dit is alleen de rekentijd van PriceXD, de rekentijd van GeoGEN komt hier nog bij al is deze wel significant lager, omstreeks 30 minuten. Wat opvalt, is de grootte van de verschillen in rekentijden bij de resoluties 10, 15 en 20. Bij de basissituatie met resolutie 20 is de rekentijd ongeveer 2 uur. Bij resolutie 10 zijn de grove cellen twee keer kleiner, dus wordt de theoretische rekentijd $2^3 = 8$ keer zo lang (zie paragraaf 2.2.2). De werkelijke rekentijd zou hierdoor dus onder de 16 uur moeten komen. Bij resolutie 10 is de rekentijd echter bijna 17.5 uur. Een mogelijke verklaring voor deze langere rekentijden dan verwacht volgt uit de modelresultaten. Doordat er bij fijnere resoluties meer water in het modeldomein blijft staan, duurt de simulatie per tijdstap langer wat zorgt voor de verlenging van de totale rekentijd.

5 Verbetervoorstellen

Met de eerste drie deelvragen beantwoord, kan er gekeken worden welke verbeteringen er in PriceXD doorgevoerd kunnen worden om het model beter en breder inzetbaar te maken. De voorgestelde verbeteringen zijn opgedeeld in noodzakelijke verbeteringen en mogelijke verbeteringen.

5.1 Noodzakelijke verbeteringen

Er wordt aangeraden om deze verbeteringen werkend in het model te krijgen voordat er in nieuwe projecten met PriceXD gewerkt wordt. Met deze twee voorgestelde verbeteringen zullen de modelresultaten sterk in bruikbaarheid toenemen.

5.1.1 Apart opnemen straatkolken

Allereerst is het van groot belang dat de in versie 1.2 ingevoerde mogelijkheid om straatkolken apart op te geven naar behoren gaat werken. De alternatieve benadering waarbij de straatkolken en putten worden opgegeven als landgebruik met een hoge infiltratiecapaciteit brengt zeer veel problemen met zich mee. Allereerst is het noodzakelijk om per straatkolk het debiet te weten als er een koppeling met een rioleringsmodel opgezet wil worden. In versie 1.1 is het alleen mogelijk de totale uitstroom door putten en kolken te bepalen en zelfs dan is dit slechts een benadering van de werkelijke waarde.

Belangrijker is echter het feit dat de methode om putten en kolken op te geven als landgebruik voor een enorme afhankelijkheid zorgt voor de resolutie waarop gerekend wordt. Doordat de opschalingsmethode in GeoGEN simpelweg een gemiddelde neemt voor de infiltratiecapaciteit van elke grove cel, zorgen de uitschieters voor een te hoge infiltratiecapaciteit van grove cellen. Hierdoor wordt de totale infiltratie verhoogd als er op een grovere resolutie gerekend wordt. Een alternatief voor het apart implementeren van kolken is het kiezen voor een andere berekeningsmethode van de infiltratiecapaciteit van grove cellen. Er zou gekozen kunnen worden voor een middelingsmethode waarbij er beter wordt omgegaan met uitschieters. De voorkeur ligt echter bij de manier van omgaan met straatkolken die in versie 1.2 geprobeerd is in te voeren.

De basis voor het apart invoeren van straatkolken is gelegd in versie 1.2 van PriceXD. Deze aanpak heeft echter nog veel tekortkomingen. Allereerst gaat de locatiebepaling van de straatkolken niet goed. Ook wordt vooralsnog de verkeerde formule gebruikt voor de uitstroom door de straatkolken (zie paragraaf 2.6). Deze problemen zijn echter relatief simpel op te lossen door de gebruikte formules in GeoGEN en PriceXD aan te passen. Wat een groter probleem vormt is de grote volumefout die optreedt wanneer er gebruik gemaakt wordt van straatkolken. De straatkolken zorgen dus voor een niet kloppende waterbalans. Dit is iets wat zeker opgelost moet worden in de modelcode voordat versie 1.2 in de praktijk toegepast kan worden.

Op het moment dat er toch een project met versie 1.1 van PriceXD uitgevoerd wordt dient het model gekalibreerd te worden op een vaste resolutie. Met deze resolutie kunnen dan de kalibratieparameters ingesteld worden. Zolang de ingestelde resolutie niet wordt veranderd kunnen dan alsnog bruikbare resultaten verkregen worden.

5.1.2 Kalibratie infiltratieparameters

Uit de gevoeligheidsanalyse en een aanvullende test is gebleken dat de waarde voor de vervalcoëfficiënt k in de infiltratieformule van Horton niet in s^{-1} dient te worden opgegeven maar in uur^{-1} . Dit leidt tot een grote afname in de totale infiltratie. De gebruikte waardes voor f_o en f_c voor alle landgebruikstypen zijn echter vrij grove schattingen. En ook de gebruikte waarden voor k in uur^{-1} zijn slechts aanpassingen van initiële schattingen.

Het is mogelijk om de parameters van elk landgebruik (of eventueel van de grondsoort) te gebruiken bij de modelkalibratie, maar in principe is dit onnodig. In plaats daarvan is het mogelijk en ook wenselijk om een lijst op te stellen met hierin een indicatie van de infiltratieparameters. Deze lijst kan opgesteld worden aan de hand van literatuur maar waarschijnlijk is het beter om hierin op ervaring af te gaan. Dit betekent dat in één project alle infiltratieparameters gekalibreerd dienen te worden, maar dat in latere projecten een aantal van deze parameters gelijk gehouden wordt. Dit geldt voor de parameters binnen de Hortoninfiltratie maar ook bij parameters binnen een andere infiltratieformule, zie paragraaf 5.2.1.

Als er voor de meeste landgebruiken een standaard bestaat dan hoeven alleen de onzekere landgebruiken, zoals bijvoorbeeld het landgebruik overig, gebruikt te worden voor de kalibratie.

5.2 Mogelijke verbeteringen

Dit zijn verbeteringen die niet noodzakelijk zijn voor gebruik van het model, maar die vooral de inzetbaarheid en werkbaarheid van het model verbeteren.

5.2.1 Alternatieven voor Horton infiltratie

Momenteel is de enige methode om de infiltratie te berekenen de formule van Horton. Deze formule lijkt gekozen te zijn aangezien deze uiterst geschikt is voor relatief korte simulaties waarbij sprake is van extreme neerslag. Dit sluit in principe goed aan op waar PriceXD voor bedoeld is. Aangezien echter de wens bestaat om PriceXD breder inzetbaar te maken zou er ook een optie om de infiltratie op een andere manier te modelleren kunnen komen.

Met de Hortonformule als basis voor de infiltratie is PriceXD minder goed toepasbaar bij langere neerslagperiodes en bij neerslaggebeurtenissen met meerdere pieken. Om PriceXD ook in deze situaties inzetbaar te maken kan gedacht worden aan een optie om van infiltratieformule te wisselen, vergelijkbaar aan de optie om de coëfficiënt van Chézy of Manning te gebruiken. Hierbij zou vooral een formule die op een bepaalde manier rekening houdt met de grondwaterstand een goede optie zijn. Daarnaast is het eventueel ook mogelijk om voor de tijd in de Hortonformule niet altijd de simulatietijd aan te houden. De tijd in de Hortonformule zou bijvoorbeeld alleen op kunnen lopen als er water aanwezig is op een bepaalde cel, en gelijk kunnen blijven (of terug kunnen lopen) wanneer een cel droog is. Dit vereist wel dat de tijdsparemeter in de Hortonformule continu per grove cel bepaald moet worden, wat invloed zal hebben op de rekentijd.

5.2.2 Introductie van een interface

Hoewel deze mogelijke verbetering een lage prioriteit heeft zou een vervanging van de huidige manier van het opgeven van parameters en instellingen de werkbaarheid van het model vergroten. Een weergave van de verschillende parameters, waarin idealiter ook direct de ASCII GRID-bestanden grafisch getoond kunnen worden, zou een grote toevoeging zijn voor de snelheid waarmee met het model gewerkt kan worden. Daarnaast zou dit ook de kans op menselijke fouten verkleinen, aangezien bij de huidige methode waarbij met veel verschillende bestanden gewerkt wordt zeer snel dingen verkeerd worden ingevoerd. Dit is uiteraard een verbetering die pas onderzocht dient te worden als het model naar behoren werkt en op grotere schaal toegepast zou kunnen worden.

6 Discussie

Voor de conclusies van het onderzoek worden een aantal punten genoemd van het onderzoek die ter discussie gesteld kunnen worden.

Allereerst is het belangrijk om de rol van dit onderzoek te zien in de context van de algehele ontwikkeling van PriceXD. In totaal zijn er drie verschillende versies van PriceXD onderzocht. Versie 1.1, versie 1.2 en versie 1.2.1. Er wordt vastgesteld dat versie 1.2 en 1.2.1 niet naar behoren werken en daarom wordt de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd in versie 1.1. De situatie lijkt echter hoopvol dat er in de nabije toekomst wel een versie zal komen waar zowel de instroom als de straatkolken naar behoren werken. Op dat moment is het de vraag hoe de resultaten van de gevoeligheidsanalyse van versie 1.1 transleren naar de nieuwe versie. Bijvoorbeeld de gevoeligheid voor de resolutie, deze zal waarschijnlijk sterk afnemen op het moment dat straatkolken apart geïmplementeerd worden. Hoe dit precies zal verlopen, zal echter opnieuw getest moeten worden in deze versie. Ook de infiltratie door het landgebruik overig zal waarschijnlijk compleet anders reageren op het moment dat straatkolken apart worden geïmplementeerd.

Een volgend punt dat ter discussie gesteld kan worden is het feit dat er geen juiste eenheid gevonden is voor de neerslag in versie 1.2. Het is duidelijk dat het totale neerslagvolume op een bepaalde manier afhankelijk is het aantal grove cellen en niet van de oppervlakte van deze cellen, maar een duidelijk verband is niet vastgesteld. Wel kan er door de hoeveelheid uitgevoerde tests met absolute zekerheid gesteld worden dat er structurele fouten in de neerslag zitten, al blijft dus onduidelijk waar deze fouten precies optreden.

Ten slotte is het nogmaals belangrijk op te merken dat kalibratie en validatie van het model buiten de scope van dit onderzoek vallen. Dit is iets wat per project apart zal moeten gebeuren. Daarentegen zal de gevoeligheidsanalyse wel bruikbaar zijn bij de kalibratie van het model, zeker als er nog projecten met versie 1.1 gedaan worden.

7 Conclusies

Aan de hand van de verschillende tests en met in achtneming van de discussie zijn er conclusies te trekken over de werking van PriceXD.

In de inleiding is de volgende hoofdvraag opgesteld:

Hoe werken de verschillende functionaliteiten van het PriceXD model en hoe kan dit model beter in de praktijk toegepast worden?

Dit is uiteraard een te brede vraag om in één zin te beantwoorden maar met dit onderzoek is een beeld gevormd van het antwoord op deze vraag. Aan de hand van de opgestelde deelvragen zal in dit hoofdstuk het onderzoek geconcludeerd worden.

7.1 Deelvragen

Er zijn in de inleiding vier deelvragen opgesteld. In de hoofdstukken 2 tot en met 5 is er onderzoek gedaan naar deze deelvragen. Aan de hand hiervan zullen in deze paragraaf de deelvragen beantwoord worden.

7.1.1 Hoe is PriceXD opgezet?

De eerste deelvraag is beantwoord in hoofdstuk 2. Deze vraag heeft vooral als ondersteuning gediend voor de andere deelvragen, aangezien deze vraag vooral bedoeld was om het modelbegrip te verbeteren. De opdeling van het model waarbij de gegevens eerst worden opgeschaald in GeoGEN, waarna in PriceXD de daadwerkelijke berekeningen worden uitgevoerd is het belangrijkste deel van de opzet. Daarnaast zijn de verschillende vergelijkingen binnen PriceXD een belangrijk deel van de opzet. Dit zijn de Shallow Water Equations, de formule van Horton voor de infiltratie en de overlaatformule voor de uitstroom door de straatkolken. Daarnaast bepaald PriceXD zijn eigen tijdstap aan de hand van het CFL-criterium.

7.1.2 Zijn de nieuwe toevoegingen aan PriceXD oorzaak van problemen?

Gedurende dit project zijn er veel tekortkomingen aan het model naar voren gekomen. Vooral versie 1.2 heeft grote tekortkomingen op het gebied van zowel de instroom in het model (de neerslag) als de uitstroom uit het model (de straatkolken). In versie 1.2 wordt de neerslag niet in een logische eenheid opgegeven. In versie 1.2.1 lijkt de eenheid van de neerslag l/uur/grove cel te zijn, waar mm/uur gewenst is. De uitstroom uit het modeldomein door de straatkolken brengt twee belangrijke problemen met zich mee. Allereerst is de locatiebepaling van de straatkolken in het grove raster incorrect. Belangrijker is echter dat bij de uitstroom door de straatkolken een grote volumefout ontstaat, waardoor de waterbalans binnen PriceXD niet meer kloppend is.

Om deze twee redenen wordt geconcludeerd dat het antwoord op de tweede deelvraag bevestigend is. Hierom moet gesteld worden dat versie 1.2 vooralsnog niet bruikbaar is om in een project toe te passen, en dat ook een koppeling met een rioleringsmodel nog niet mogelijk is.

7.1.3 Voor veranderingen in welke parameters zijn de modelresultaten gevoelig?

In hoofdstuk 4 wordt de derde deelvraag uitgewerkt. Hier wordt vooral een enorme gevoeligheid voor de resolutie aangetoond. Dit komt doordat in versie 1.1 de straatkolken worden ingevoerd als cellen met een zeer hoge infiltratiecapaciteit en er in GeoGEN geen goede methode aanwezig is om met dit soort uitschieters om te gaan. Hierdoor is het volume water op straat significant kleiner bij grovere resoluties.

Daarnaast valt het op dat er in versie 1.1 slechts een klein deel van de totale infiltratie plaatsvindt door de putten en kolken. Dit betekent dat het model ook vrij gevoelig is voor veranderingen in de

infiltratie door het landgebruikstype 'overig'. Het is echter onduidelijk hoe dit zal zijn op het moment dat de straatkolken apart worden toegevoegd.

Ook wordt er aan de hand van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse aangetoond dat de eenheid voor de vervalcoëfficiënt k in de formule van Horton uur^{-1} in plaats van s^{-1} . Dit betekent dat in de tot nu toe uitgevoerde projecten de infiltratie niet of nauwelijks afhankelijk is geweest van de waarde van f_c in de formule van Horton.

7.1.4 Welke verbeteringen zijn er nodig in het model?

Er worden twee noodzakelijke verbeteringen voorgesteld die nodig zijn om de bruikbaarheid van de modelresultaten te vergroten. Allereerst is het zeer belangrijk dat de aparte invoer van straatkolken naar behoren gaat werken en dus niet meer zorgt voor een volumefout. Daarnaast dient er een lijst te worden opgesteld met daarin indicatiewaarden voor de infiltratieparameters. Naast de noodzakelijke verbeteringen zijn andere mogelijke verbeteringen het toevoegen van alternatieven voor de formule van Horton en de introductie van een interface voor PriceXD.

7.2 Hoofdvraag

De werking van de verschillende functionaliteiten van PriceXD zoals het oplossen van de Shallow Water Equations is uitgebreid beschreven in hoofdstuk 3. Om het model beter inzetbaar te maken moeten allereerst de huidige problemen binnen PriceXD opgelost worden. Gedurende het onderzoek zijn er een aantal tekortkomingen in zowel versie 1.1 als versie 1.2 van PriceXD aan het licht gekomen. Dit wil echter niet zeggen dat PriceXD geen potentie heeft. Vooral uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de rekenkundige kern van het model naar behoren functioneert. Het oplossen van de Shallow Water Equations aan de hand van het MacCormack schema lijkt gedurende de simulaties op de juiste manier te gaan. In de gevoeligheidsanalyse accumuleert het meeste water zich op de laaggelegen plekken binnen Hoogeveen. In versie 1.1 lijkt deze functionaliteit dus te werken en tot zo ver duidelijk zijn hier geen aanpassingen aan gedaan in versie 1.2. Dit blijkt ook uit het feit dat het aanwezige water zich op de logische wijze over het modeldomein verdeelt in de tests met versie 1.2. Ook hierdoor ontstaan geen redenen om aan te nemen dat de rekenkundige kern van PriceXD niet naar behoren werkt.

Op het moment dat de huidige problemen binnen PriceXD worden opgelost kan het model zeker toegepast worden en bruikbare resultaten opleveren. Daarom zijn de twee in hoofdstuk 5 voorgestelde noodzakelijke verbeteringen ook de voorgestelde methoden om het model beter inzetbaar te maken. Als deze noodzakelijke verbeteringen zijn doorgevoerd zou er ook gekeken kunnen worden naar de voorgestelde mogelijke verbeteringen.

8 Aanbevelingen

Afsluitend zullen er aantal aanbevelingen over PriceXD gedaan worden, met vooral de focus op het gebruik van PriceXD in de toekomst.

De belangrijkste aanbevelingen over het gebruik van PriceXD zijn uiteraard al gedaan in de vorm van de verbetervoorstellen in hoofdstuk 5. Vooral de voorgestelde noodzakelijke verbeteringen moeten worden doorgevoerd aangezien de modelresultaten anders ernstige tekortkomingen hebben. Daarentegen lijkt de rekenkundige kern van het model goed te werken waardoor het model zeker potentie heeft. Zeker op het moment dat er een goede koppeling met een rioolmodel opgezet kan worden heeft het model ook zeker meerwaarde ten opzichte van andere stedelijke hydrologische modellen.

Als er nog een project wordt uitgevoerd met een van de huidige versies van PriceXD, wordt aangeraden dit project uit te voeren in versie 1.1 en dus niet in een van de huidige versies van 1.2. Wel moet hierbij dan rekening gehouden worden met de infiltratieparameters en de grote gevoeligheid voor de resolutie. Dit kan gedaan worden door het model te kalibreren op een bepaalde resolutie en deze resolutie vervolgens niet meer aan te passen.

Naast aanbevelingen over het gebruik van PriceXD worden er ook nog een aantal aanbevelingen over mogelijke vervolgonderzoeken gedaan. Allereerst is er zoals in de discussie genoemd onduidelijkheid over hoe resultaten van de gevoeligheidsanalyse veranderen als deze in versie 1.2 uitgevoerd wordt. Een belangrijk vervolgonderzoek is dus een gevoeligheidsanalyse op het moment dat er een werkende versie van PriceXD komt waarin de straatkolken apart opgegeven kunnen worden.

Daarnaast heeft dit onderzoek de focus gelegd op de nieuw toegevoegde functionaliteiten in versie 1.2. De rekenkundige kern van het model is buiten beschouwing gelaten omdat deze al eerder getest is. Toch hebben de Shallow Water Equations in combinatie met het schema van MacCormack enige beperkingen. Deze beperkingen gaan een rol spelen bij projecten met veel reliëf en vooral als er veel onregelmatigheden zijn in de hoogte. Hoe het model hier precies op reageert, is echter onduidelijk. Dit is ook iets wat uitgebreider onderzocht zou kunnen worden. Dit onderzoek zou idealiter uitgevoerd worden door iemand met veel verstand van hydrologie en ervaring met de programmeertaal Fortran. Hierdoor kan een completer beeld gecreëerd worden van de werking van het model. De prioriteit van dit onderzoek is echter vrij laag aangezien de modelresultaten alsnog goed bruikbaar zullen zijn zonder dat de volledige beperkingen van het MacCormack-schema volledig bekend zijn.

Literatuurlijst

- Abdulkahir, A., Wuddivira, M. N., Abdu, N., & Mudiare, O. J. (2011). Use of Horton Infiltration Model in Estimating Infiltration Characteristics of an Alfisol in the Northern Guinea Savanna of Nigeria. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 926-931.
- Barba, L. (2012). Multi-step finite-difference schemes. *Computational Fluid Dynamics*: TEDed.
- Beal, V. (2015). FORTRAN - formula translator. Opgehaald op 30-04-2015, van <http://www.webopedia.com/>
- Climate Source Inc. (2002). Description of ARC/INFO ASCII GRID File Format. Opgehaald op 28-4-2015, van www.climatesource.com
- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1928). Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen*, 98, 32-74.
- George, D. L. (2004). *Numerical Approximation of the Nonlinear Shallow Water Equations with Topography and Dry Beds: A Godunov-Type Scheme*. (Master of Science), University of Washington.
- Glasbergen, M., & Moens, M. (2014). Toepassing laserdata bovengrond in modellering: minder onzekerheden, steviger basis voor verbetermaatregelen. In Stichting RIONED (Ed.), *Ervaringen met de aanpak van regenwateroverlast in bebouwd gebied* (pp. 264-283).
- Google Maps (2014). *Hoogeveen*. Opgehaald van <https://www.google.com/maps/place/Hoogeveen,+Netherlands/@52.726855,6.471922,16z/data=!4m2!3m1!1s0x47c81a91610fbe03:0x5f4a259481cc9ae>
- HydroLogic BV. (2014). HydroNET PriceXD, Manual Fortran 1.2 Alpha.
- Kilanehei, F., Naeeni, S. T. O., & Namin, M. M. (2011). Coupling of 2DH-3D Hydrodynamic Numerical Models for Simulating Flow Around River Hydraulic Structures. *World Applied Sciences Journal*, 15(1), 63-77.
- Klomp, T., & Poortinga, I. (2014). Water-op-straat: Accepteren of reguleren? *Vakblad Riolerings*, 21, 14-15.
- Mendez-Nunez, L. R., & Carroll, J. J. (1993). Comparison of Leapfrog, Smolarkiewicz, and MacCormack Schemes Applied to Nonlinear Equations. *Monthly Weather Review*, 121(2), 565-578.
- Moler, C. (2011). Shallow Water Equations *Experiments with MATLAB* (pp. 241-246).
- Price, R. (2014). [PriceXD A 2D Urban Flooding Simulation Package].
- Roos, P. C. (2015). *Mathematical Physics of Water Systems* (7 ed.). Enschede: University of Twente.
- Spijker, M., Dassen, W., & Looovers, I. (2014). Inzicht in wateroverlast en effectiviteit van maatregelen met hoogwaardig afstroom- en infiltratiemodel *Ervaringen met de aanpak van regenwateroverlast in bebouwd gebied* (pp. 236-247): Stichting RIONED,.
- Thi, N. T. V. (2008). One dimensional Saint-Venant system *Analysis of PDEs*: University of Orleans.
- Thuerey, N., & Hess, P. (2011). Shallow Water Equations *Real Time Physics* (pp. 67-82).
- Tiehatten, B. (2014). CityFlood, PriceXD en GeoGEN: HydroLogic, TU Delft.
- Tomczak, M. (2005). Long Waves (shallow water waves). Opgehaald op 21-5-2015, van www.es.flinder.edu.au
- Vereniging van Producenten van Betonleidingsystemen. (2015). *Hydraulische Berekeningen Handboek Riolerings techniek*.

Bijlagen

Bijlage A: Modelinput	41
Basicgeometry.asc.....	41
Basicsurfacecover.asc.....	41
Basicsoiltype.asc.....	41
Project.txt	41
Config.txt	41
Basicconfig.txt	42
Basicparameterdata.txt.....	42
Cellinflow.txt	42
Surfacecovervalues.txt	42
Soiltypevalues.txt	42
Drainconnectdata.txt	43
Modeldata.txt.....	43
Bijlage B: Theorie over opschaling	44
Bijlage C: Tests versie 1.2.1	46
Test 1	46
Test 2	46
Test 3	46
Conclusie	47
Test 4	47
Test 5	47
Conclusie	47
Bijlage D: Tests versie 1.1	49
Test cellen van 1,0 meter	49
Test cellen van 0,5 meter	49
Conclusie	49
Bijlage E: Relatie tussen formule van Horton en infiltratievolume	50
Bijlage F: Parameters voor het landgebruik	51
Bijlage G: Projectsituatie in Hoogeveen	52
Gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt van de putten en kolken.....	52
Opstellen basissituatie	53
Bijlage H: Grafische resultaten van de gevoeligheidsanalyse	54
Gevoeligheid voor f_0	54
Gevoeligheid voor k	55
Situatie met k in uur^{-1}	55

Bijlage A: Modelinput

Deze bijlage bevat een uitgebreid overzicht van alle verschillende bestanden die door GeoGEN en PriceXD gebruikt worden om een simulatie uit te voeren. Het opgeven van parameters en instellingen voor GeoGEN en PriceXD wordt gedaan in twee typen bestanden. De meest gebruikte zijn tekstbestanden (.txt), deze worden gebruikt voor zowel het aanpassen van instellingen als het toekennen van waarden aan parameters. Het tweede type bestand dat wordt gebruikt zijn ASCIIGRID-bestanden (.asc). Dit zijn bestanden die over het algemeen gemaakt worden met GIS-software, maar die ook gelezen kunnen worden in gewone tekstverwerkers. Deze bestanden bevatten een rechthoekig raster van cellen, die allemaal een gelijke afmeting hebben. Voor elke cel wordt in het raster een waarde gegeven die een bepaalde eigenschap van de cel weergeeft. Ook bevat dit type bestanden altijd een aantal vaste gegevens, waaronder een zogenaamde Nodata value (Climate Source Inc., 2002). De Nodata value is voor cellen die buiten het plangebied vallen, maar wel binnen het rechthoekige raster vallen. Alle benodigde inputbestanden voor zowel GeoGEN als PriceXD worden hier uitgewerkt.

Basicgeometry.asc

Dit bestand bevat een raster dat per cel (met een standaard afmeting van 0,5 meter x 0,5 meter) de hoogte weergeeft. Deze hoogtes worden uitgedrukt in meter ten opzichte van een zeker nulpunt, wat in Nederland over het algemeen NAP zal zijn. Om plangebieden die niet volledig rechthoekig zijn te kunnen modelleren wordt gebruik gemaakt van de Nodata value voor de cellen die buiten het plangebied vallen.

Basicsurfacecover.asc

In dit bestand wordt in een raster weergegeven wat het landgebruik is van de verschillende cellen. Net zoals in basicgeometry.asc wordt er weer gebruik gemaakt van de Nodata value voor cellen die buiten het plangebied vallen. Voor alle cellen die wel in het plangebied vallen staat in dit bestand een getal dat een bepaald landgebruik aangeeft. In surfacecovervalues.txt worden deze getallen verklaard, en worden er waardes voor de verschillende parameters aan verbonden.

Basicsoiltype.asc

Dit bestand is optioneel en bestaat uit een raster van getallen die de grondsoort weergeven. De verklaring van deze getallen en de toekenning van parameters gebeurt in Soiltypevalues.txt. Als er geen gebruik gemaakt wordt van grondsoorten, dan is het landgebruik bepalend voor deze parameters. De verouderde handleiding (HydroLogic BV, 2014) raadt aan om geen gebruik te maken van de grondsoorten en dus het landgebruik leidend te laten zijn aangezien het werken met grondsoorten nog onvoldoende getest is.

Project.txt

Dit bestand geeft alleen de projectnaam aan. Deze moet altijd uit precies tien karakters bestaan (Tiehatten, 2014).

Config.txt

In dit bestand worden instellingen die voor de modelrun van belang zijn gedefinieerd. Dit zijn bijvoorbeeld de duur van de modelrun, en om de hoeveel tijd de waterstanden worden opgeslagen. Maar ook of bijvoorbeeld de formule van Chézy of die van Manning gebruik wordt voor de stroming over land, en of er gebruikt wordt gemaakt van infiltratie.

Basicconfig.txt

In dit bestand worden algemenere parameters die van belang zijn voor de modelrun vastgesteld. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld de gravitatieconstante en de minimale tijdstap. Ook zijn in dit bestand een aantal instellingen opgenomen, zoals of gebruik gemaakt wordt van straatkolken. Over het algemeen hoeft in dit bestand niets aangepast te worden, in tegenstelling tot in config.txt

Basicparameterdata.txt

In dit bestand kunnen minima en maxima opgegeven worden voor allerlei verschillende parameters uit de input, maar ook parameters die intern in het model gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld de zwaartekrachtconstante. Als de waarden van deze parameters buiten het domein van deze minima en maxima vallen dan geeft het model hiervan een melding.

Cellinflow.txt

In dit bestand worden de in- en uitstromen van het plangebied bepaald. Er kan voor verschillende cellen of groepen cellen bepaald worden hoeveel water er in of uit de cel stroomt. Dit kan op drie verschillende manieren plaatsvinden (HydroLogic BV, 2014). De eerste is een standaard in- of uitstroom van bijvoorbeeld een watergang, dit wordt opgegeven in m^3/s . In de praktijk zal deze manier van stroming vooral worden gebruikt voor cellen aan de rand van het plangebied, om water dat het plangebied in- of uitstroomt in bijvoorbeeld de vorm van een rivier te modelleren. In principe kan het echter ook worden gebruikt voor cellen die niet aan de rand van het plangebied liggen.

De tweede manier waarop water het model in kan stromen is in de vorm van een bepaalde waterstand die in een cel aanwezig is. De waardes voor deze waterstanden kunnen worden opgegeven in meters ten opzichte van het maaiveld.

De laatste manier waarop water het plangebied in kan stromen is via neerslag, wat opgegeven wordt in mm/uur . Over het algemeen zal de neerslag als constant over het hele plangebied beschouwd worden. Mocht dit niet het geval zijn dan kan de neerslag worden opgegeven aan de hand van verschillende regenmeters. PriceXD is dan zelf in staat om de verdeling van de neerslag te bepalen aan de hand van deze regenmeters (Price, 2014).

Voor elk van de drie methoden kunnen er via een tabel verschillende waarden voor de in- of uitstroom worden opgegeven voor verschillende momenten. Dit is vooral van belang bij de eerste en laatste methode omdat met deze optie rivierdebieten en neerslaggebeurtenissen die werkelijk plaatsgevonden hebben gemodelleerd kunnen worden.

Surfacecovervalues.txt

Dit bestand hoort bij basicsurfacecover.asc. Voor alle getallen voorkomend in dat bestand wordt verklaard bij welk landgebruik het getal hoort en worden enkele parameters aan dit landgebruik gekoppeld. Deze parameters zijn: de coëfficiënt van Chézy in $\text{m}^{1/2}/\text{s}$, de coëfficiënt van Manning in $\text{s}/\text{m}^{1/3}$, de initiële Horton infiltratiesnelheid in mm/uur , de uiteindelijke Horton infiltratiesnelheid in mm/uur en de Horton vervalcoëfficiënt in s^{-1} (HydroLogic BV, 2014). De formules waarin deze parameters voorkomen worden uitgewerkt in paragraaf 2.3 en 2.5.

Soiltypevalues.txt

Dit bestand werkt vergelijkbaar met surfacecovervalues.txt maar dan voor de grondsoorten in plaats van voor het landgebruik. Het koppelt de getallen uit basicsurfacecover.asc met een bepaalde grondsoort. Net zoals bij Basicsoiltype.asc is het gebruik van dit bestand optioneel. Als het wel gebruikt wordt dan worden de parameters voor de Horton infiltratieformule uit dit bestand gehaald,

en dus niet uit Surfacecovervalues.txt. De coëfficiënten van Chézy en Manning worden dan nog wel door het landgebruik bepaald.

[Drainconnectdata.txt](#)

In dit bestand worden de straatkolken en hun locaties gedefinieerd. Dit zal data zijn die afkomstig is uit het stedelijke rioleringsmodel dat gekoppeld wordt aan PriceXD. De locaties worden weergegeven als de coördinaten van de cel waarin de put ligt. Naast de locaties worden voor elke straatkolk een aantal parameters opgegeven die van belang zijn voor de hoeveelheid water die er in de straatkolk kan stromen. Voor de instroom wordt gebruik gemaakt van de stuwformule (Price, 2014). Deze wordt in detail uitgewerkt in paragraaf 2.6. De parameters van deze formule die in dit bestand worden opgegeven zijn het kolkoppervlakte in m^2 en de overlaatcoëfficiënt in $m^{1/2}/s$. Daarnaast worden twee debieten gegeven in m^3/s . Allereerst een vast debiet dat wordt gebruikt als de kolk zichzelf dicht begint te knijpen door het water dat er doorheen stroomt. Dit wordt aangenomen als een constante waarde. Het tweede debiet dat opgegeven moet worden is het debiet dat door de kolk kan stromen als de rioleringsbuis vol zit. Deze beide debieten moeten herleid worden aan de hand van de koppeling met het rioleringsmodel (Tiehatten, 2014).

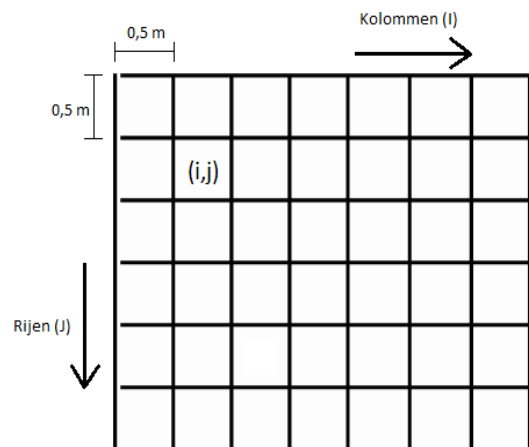
[Modeldata.txt](#)

Dit bestand dient specifiek voor GeoGEN. Hierin worden het aantal rijen en kolommen van het fijne raster opgegeven en de resolutie waarnaar deze worden opgeschaald. Ook moeten hier (nogmaals) het aantal grondsoorten en het aantal typen landgebruik opgegeven worden.

Bijlage B: Theorie over opschaling

Bij opschaling wordt er uitgegaan van een fijn basistraster dat wordt opgeschaald naar een raster met een grovere resolutie. Hierbij wordt de informatie over de fijne cellen omgezet naar de grove cellen.

Het fijne raster heeft voor GeoGEN over het algemeen een celgrootte van 0,5 bij 0,5 meter. Verder zijn voor dit fijne raster het aantal kolommen (I) en het aantal rijen (J) van belang. In dit raster krijgt elke cel een coördinaat (i,j) , waarbij cel $(1,1)$ de cel links bovenin het raster is. Aan deze coördinaat worden de gegevens voor die cel, zoals bijvoorbeeld de hoogte, gekoppeld. Een standaardraster is te zien in figuur B-1. Van dit raster wordt gezegd dat het resolutie 1 heeft.



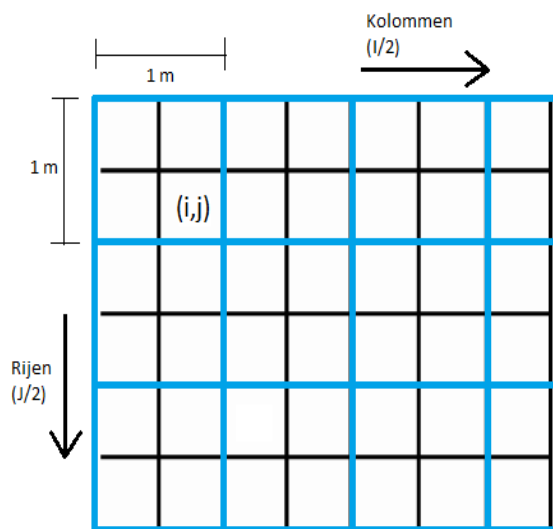
Figuur B-1: Standaardraster met resolutie 1

Door een verandering in deze resolutie aan te brengen wordt het raster opgeschaald. Er wordt hierbij gesteld dat de resolutie wordt veranderd van een waarde 1 naar een waarde r . Hierin geeft r de resolutie van het grove raster aan. Binnen GeoGEN is r altijd een geheel getal groter dan 0. Het is dus ook mogelijk dat r gelijk is aan 1, al wordt er dan niet gesproken van opschaling. De definitie van de waarde van r is dus het aantal fijne cellen dat er past in de lengte van een grove cel.

Bij het aanpassen van de resolutie wordt de celgrootte $0,5r$ bij $0,5r$ meter. De oppervlakte van een cel wordt hierdoor $(0,5r)^2 \text{ m}^2$. Dit laat zien dat het oppervlak van een cel kwadratisch afhankelijk is van de resolutie. Door het opschalen van het model wordt ook het aantal kolommen en rijen aangepast, deze worden respectievelijk I/r en J/r . Ter verduidelijking wordt hetzelfde raster maar nu met een resolutie $r=2$ afgebeeld in figuur B-2.

In het raster met een grovere resolutie krijgen de cellen ook een coördinaat (i,j) toegewezen. GeoGEN gebruikt deze coördinaten om informatie uit de fijne cellen om te zetten tot informatie die in de grovere cellen gebruikt wordt. Deze informatie wordt vervolgens door PriceXD gebruikt.

Er zijn een aantal redenen dat opschaling van het raster voordelen heeft ten opzichte van het basistraster met resolutie 1 gebruiken (Price, 2014). Allereerst is het in PriceXD niet mogelijk om de stroming over onregelmatige oppervlakten en om ronde voorwerpen heen nauwkeurig te modelleren. Hierdoor kan het model stabiliteit verliezen bij simulaties waarbij dit wel geprobeerd wordt. Door grotere cellen te gebruiken voor de berekeningen zijn dit soort kleine onregelmatigheden van minder belang. De belangrijkste reden voor opschaling is echter dat het doen van simulaties op het basistraster zorgt voor onwerkbaar lange rekentijden van de simulatie.



Figuur B-2: Raster met resolutie 2 (blauw) gelegd over het originele raster (zwart)

In tabel B-1 zijn een aantal mogelijke resoluties te zien met de gevolgen die deze resoluties hebben op de theoretische tijd van PriceXD.

Tabel B-1: Gevolgen van de resolutie op de theoretische rekentijd

Resolutie	Celafmeting [m]	Celoppervlak [m ²]	Verkleiningsfactor theoretische rekentijd
1	0,5	0,25	1
2	1	1	8
3	1,5	2,25	27
4	2	4	64
5	2,5	6,25	125
6	3	9	216
7	3,5	12,25	343
8	4	16	512
9	4,5	20,25	729
10	5	25	1000
11	5,5	30,25	1331
12	6	36	1728
13	6,5	42,25	2197
14	7	49	2744
15	7,5	56,25	3375
16	8	64	4096

Bijlage C: Tests versie 1.2.1

Aan de hand van de resultaten van de tests met versie 1.2 is er een nieuwe versie van PriceXD beschikbaar gekomen. Deze versie 1.2.1 bevat verbeteringen op het gebied van de invoer van de neerslagreeks. Versie 1.2.1 wordt ook getest op een klein raster.

Test 1

Deze test is bijna hetzelfde als de eerste test die met de oude versie van het model is uitgevoerd. Er wordt weer op een raster van 10 bij 10 cellen met een resolutie van twee gerekend. Om met iets grotere getallen te kunnen werken is alleen de neerslag bijgesteld naar 100.

Hypothese

Aangenomen wordt dat in de nieuwe versie de problemen zijn opgelost en de neerslag in mm/uur wordt opgegeven. In dit geval wordt de waterstand in elke cel $100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$, waardoor de totale neerslag $0,1 * 100 = 10 \text{ m}^3$ wordt.

Resultaat

De waterstand na één uur is in elke cel $0,025 \text{ m}$, met een totale hoeveelheid neerslag van $2,5 \text{ m}^3$. Ook in de nieuwe versie resulteert het model dus niet in de verwachte resultaten bij een simpele test. Om toch door te kunnen gaan met andere tests wordt er in de volgende tests getracht de juiste eenheid voor de regenval te achterhalen.

Test 2

Bij de vorige versie van het model bleek het totale neerslagvolume onafhankelijk van de celgrootte. Het lijkt aannemelijk dat dit probleem niet opgelost is in de nieuwe versie. Daarom wordt in deze test de celgrootte opnieuw aangepast naar $0,5 \text{ meter}$, voor de rest verandert er niets ten opzichte van de vorige test.

Hypothese

Als het neerslagvolume opnieuw onafhankelijk is van de celgrootte, zal dit gelijk zijn aan het volume van de vorige test, oftewel $2,5 \text{ m}^3$. De waterstand in de cellen zal dan $0,1 \text{ m}$ worden.

Resultaat

Na één uur was het totale neerslagvolume inderdaad $2,5 \text{ m}^3$ en de waterstand in de cellen $0,1 \text{ m}$. De hypothese is dus bevestigd, en de totale neerslag is nog steeds onafhankelijk van de celgrootte. Toch wijken deze resultaten een stuk minder af van de correcte waarden voor mm/uur. Ten opzichte van de vorige versie is er dus wel iets veranderd in de manier waarop er met neerslag omgegaan wordt.

Test 3

Om meer data te hebben voor het bepalen van de eenheid van de neerslag, worden de vorige twee tests opnieuw uitgevoerd maar nu op een raster van 20 bij 20 cellen. De neerslag blijft constant op 100. Ook de simulatieduur verandert niet, deze blijft dus één uur.

Hypothese

De totale neerslag is waarschijnlijk opnieuw afhankelijk van het aantal cellen, dus als de neerslag verviervoudigt zou hetzelfde moeten gebeuren met het neerslagvolume. Dit neerslagvolume zou dus bij een celgrootte van zowel $0,5$ als $1,0 \text{ meter}$ op 10 m^3 moeten komen.

Resultaat

De hypothese is opnieuw juist, het totale neerslagvolume is bij een raster van 20 bij 20 cellen altijd gelijk aan 10 m^3 . Dit is tevens een bevestiging dat het volume onafhankelijk is van de celgrootte.

Conclusie

In de eerste test is duidelijk een factor 0,25 terug te zien. Dit is opvallend omdat deze factor nergens in de inputvariabelen van de test is terug te vinden. Het aantal cellen is 100, het oppervlakte is 100 m² en ook de neerslag is 100. Echter, deze factor is wel te herleiden uit de opschaling. Door voor een resolutie van 2 te kiezen bevat elke grove cel 4 fijne cellen. Oftewel, het oppervlakte van een fijne cel is 0,25 keer dat van een grove cel. Dit maakt het aannemelijk dat de neerslag bepaald wordt aan de hand van de grove cellen, in plaats van aan de hand van de fijne cellen zoals tot nu toe werd aangenomen. Aangezien al eerder vastgesteld was dat de totale neerslag onafhankelijk is van de celgrootte moet de neerslag opgegeven worden in de vorm volume/tijdseenheid/grove cel. De meest aannemelijke eenheid die de resultaten van alle tests kan verklaren in deze vorm is liter/uur/grove cel. De volgende tests zullen zich richten op het testen van deze eenheid.

Test 4

Als de totale neerslag werkelijk afhankelijk is van het aantal grove cellen dan zou de totale neerslag moeten veranderen als de resolutie aangepast wordt. Om dit te testen wordt er een test uitgevoerd op een raster van 50 bij 50 cellen. Allereerst wordt deze getest met een resolutie 2, dit betekent dat er 625 grove cellen in het raster liggen. De celgrootte wordt weer ingesteld op 1,0 meter en de neerslag is opnieuw 100 (l/uur/grove cel) gedurende één uur.

Hypothese

Als de neerslag inderdaad opgegeven wordt in l/uur/grove cel, dan zou met deze input het totale neerslagvolume uit moeten komen op $100 * 1 * 625 = 62500 \text{ L} = 62,5 \text{ m}^3$. De waterstand per cel wordt in dit geval $\frac{62,5}{50*50} = 0,025 \text{ m}$.

Resultaat

De resultaten bevestigen opnieuw de hypothese. Het totale neerslagvolume is inderdaad 62,5 m³, en de waterstand in elke cel is 0,025 meter. De invoereenheid l/uur/grove cel lijkt dus zeker aannemelijk.

Test 5

In deze test wordt met exact hetzelfde raster en dezelfde neerslag gerekend als in de vorige test. Er wordt dus niets aan de inputvariabelen veranderd. Het enige dat verandert is de resolutie waarop gerekend wordt, deze wordt nu ingesteld op 5. Aangezien het fijne raster bestaat uit 50 bij 50 cellen, is het totale aantal grove cellen nu 100.

Hypothese

In deze test verandert alleen de rekenmethode ten opzichte van de vorige test. Onder normale omstandigheden zou dit dus geen invloed mogen hebben op de resultaten. Toch is de hypothese dat dit wel het geval is. Als de gezochte eenheid inderdaad l/uur/grove cel is dan wordt het totale neerslagvolume $100 * 1 * 100 = 10000 \text{ l} = 10 \text{ m}^3$. De bijbehorende waterstand in de cellen wordt dan 0,004 meter.

Resultaat

De hypothese klopt opnieuw. Het totale neerslagvolume is 10 m³ en de waterstand in de cellen is 0,004 meter. Op het moment dat alleen de rekenmethode verandert heeft dit dus toch invloed op de resultaten.

Conclusie

De eenheid l/uur/grove cel lijkt de enige realistische manier om de neerslag in te voeren in het model. Ook klopt deze eenheid met de resultaten van alle tot nu toe uitgevoerde tests. Hoewel

neerslag op deze manier invoeren uiteraard verre van optimaal is, kan een neerslag in mm/uur wel relatief simpel omgerekend worden naar deze eenheid. Dit betekent dat er in ieder geval versie 1.2.1 van PriceXD gerekend kan worden. Voor grotere projecten met veel cellen met een Nodata waarde, kan dit omrekenen echter wel een probleem vormen. Daarom is het van belang dat de neerslag is de toekomst wel in mm/uur opgegeven kan worden.

Bijlage D: Tests versie 1.1

Vanwege het grote aantal problemen met de invoermethode van de neerslag in de nieuwere versies ontstaan er ook vragen over de invoermethode in de oudere versies. Daarom zal dezelfde simpele test op het raster van 10 bij 10 nogmaals worden uitgevoerd maar nu met versie 1.1 van PriceXD.

Het belangrijkste verschil tussen versie 1.1 en versie 1.2 is de manier waarop er omgegaan wordt met straatkolken. De mogelijkheid om straatkolken direct toe te voegen is pas toegevoegd in versie 1.2, in oudere versies werden deze toegevoegd door in sommige cellen een extreem hoge infiltratie toe te staan. Groot nadeel van deze methode is dat het niet mogelijk is om het volume dat door de straatkolken stroomt te meten, tenzij er voor de rest geen infiltratie plaatsvindt. Voor deze tests zonder uitstroom is dat echter niet van belang.

Test cellen van 1,0 meter

Er wordt weer getest op een raster van 10 bij 10 cellen met een afmeting van 1 meter. De constante neerslag is ingesteld op 10 mm/uur, gedurende één uur. Ook wordt om de oudere versie van GeoGEN ook te testen dit raster opgeschaald naar resolutie 2.

Hypothese

Net zoals bij de eerder uitgevoerde tests onder dezelfde omstandigheden is de verwachting weer dat de waterstand 10 mm oftewel 0.01 meter is. Het totale neerslagvolume zal dan 1 m^3 worden.

Resultaten

Voor versie 1.1 kloppen deze hypothesen wel. De waterstand na één uur is inderdaad 0,01 meter en het neerslagvolume is 1 m^3 . De neerslagfunctie van het model lijkt dus in deze versie naar behoren te functioneren.

Test cellen van 0,5 meter

Bij de latere versies kwamen de problemen naar voren door het aanpassen van de celgrootte. Daarom wordt in deze test de lengte van de cellen opnieuw aangepast naar 0,5 meter. Voor de rest worden er geen aanpassingen gedaan ten opzichte van de vorige test.

Hypothese

Naar verwachting zal de waterstand in de cellen gelijk blijven op 0,01 meter. Aangezien het totale oppervlakte van het modeldomein nu 25 m^2 is, zal het totale neerslagvolume in dat geval $0,25 \text{ m}^3$ worden.

Resultaten

Ook bij deze test klopt de hypothese. Zoals verwacht is de waterstand in de cellen gelijk gebleven op 0,01 meter terwijl het totale volume een factor 4 kleiner is geworden waardoor het nu $0,25 \text{ m}^3$ is.

Conclusie

In tegenstelling tot de latere twee versies is bij deze versie de waterstand in de cellen onafhankelijk van de celgrootte. Het totale neerslagvolume is dit wel, zoals ook moet als de eenheid mm/uur is. Aangezien voor beide tests de hypothese klopt kan zonder het uitvoeren van verdere tests geconcludeerd worden dat de neerslag in versie 1.1 inderdaad in mm/uur wordt opgegeven.

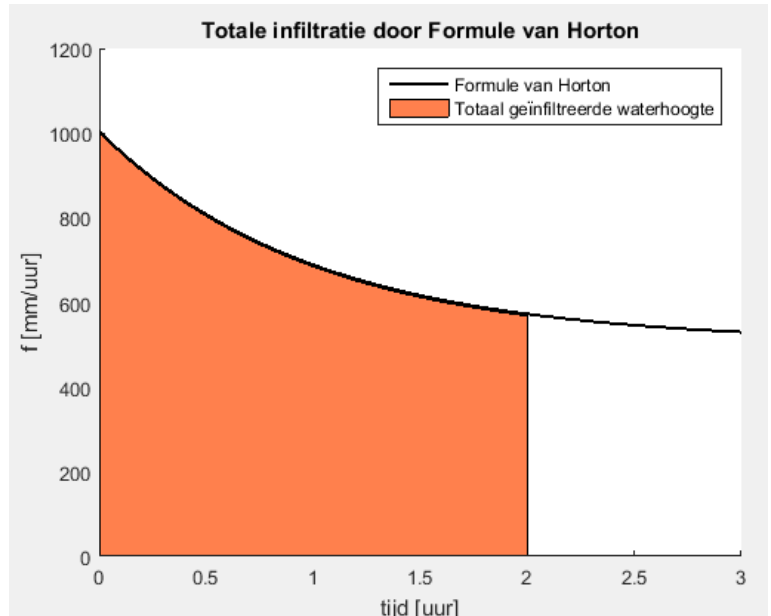
Bijlage E: Relatie tussen formule van Horton en infiltratievolume

In deze bijlage wordt de relatie tussen de formule van Horton en het totale infiltratievolume getoond. Vervolgens wordt deze relatie gebruikt om het totale infiltratievolume over 2 uur te berekenen bij de test voor de eenheid van k in de formule van Horton.

De formule van Horton berekent de infiltratiesnelheid op een bepaald moment, maar voor deze test is het totale infiltratievolume van belang.

Het totale volume water dat infiltreert, is afhankelijk van het oppervlakte van het plangebied en van de totale geïnfiltreerde waterhoogte. Deze totale geïnfiltreerde waterhoogte is gelijk aan het oppervlakte onder de formule van Horton, zoals te zien in figuur E-1.

De functie voor de totale geïnfiltreerde waterhoogte F in mm, is dus de primitieve van de formule van Horton. Aan de hand hiervan kan de totale waterstandsverlaging berekend worden, waarmee ook het totale infiltratievolume gevonden kan worden.



Figuur E-1: Relatie tussen de formule van Horton en de geïnfiltreerde waterhoogte na 2 uur

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^t f_c + (f_0 - f_c) * e^{-kt} dt \\ &= \left[f_c * t - \frac{(f_0 - f_c) * e^{-kt}}{k} \right]_0^t \end{aligned}$$

Invullen $f_0=10$ mm/uur, $f_c=5$ mm/uur en $k=1$ uur⁻¹ over een tijdsperiode van 2 uur:

$$\begin{aligned} F(2) &= [5t - (10 - 5) * e^{-t}]_0^2 \\ &= (5 * 2 - 5 * e^{-2}) - (5 * 0 - 5 * e^0) \\ &= \left(10 - \frac{5}{e^2} \right) - -5 \\ &= 15 - \frac{5}{e^2} \approx 14 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Gedurende twee uur infiltreert er dus 14 mm met deze infiltratieparameters.

Bijlage F: Parameters voor het landgebruik

Deze bijlagen bevat de tabellen zoals deze worden opgegeven in surfacecovervalues.txt voor de projectsituatie (tabel F-1) en voor de situatie waarin de waarden voor k zijn aangepast van s^{-1} naar uur^{-1} (tabel F-2).

Tabel F-1: Parameters voor het landgebruik in de projectsituatie

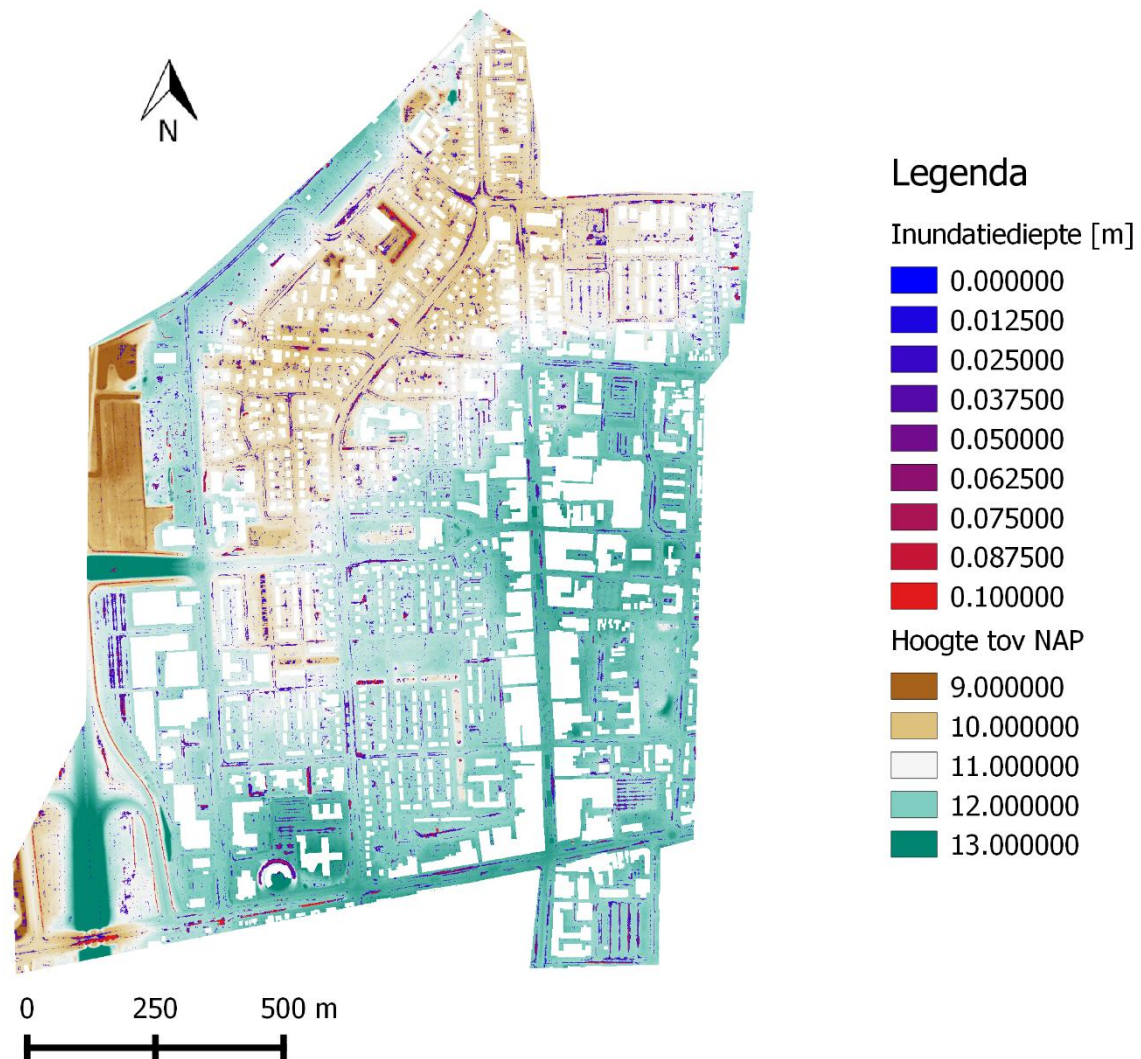
#	C [$m^{1/2}/s$]	n [$s/m^{1/3}$]	f_o [mm/uur]	f_c [mm/uur]	k [s^{-1}]	landgebruik
1	50	0.2	0.2	0.1	0.001	snelverkeer
2	50	0.05	0.2	0.1	0.001	gemengd verkeer
3	50	0.05	0.2	0.1	0.001	fietzers,bromfietzers
4	45	0.2	2	0.1	0.001	parkeren
5	42	0.2	3	0.1	0.001	voetgangers
6	50	0.05	0.2	0.1	0.001	busverkeer
7	45	0.05	200	190	0.001	meer,plas,ven,vijver
8	40	0.2	200	190	0.001	waterloop
9	40	0.2	25	0.1	0.001	spoorbaanlichaam
10	60	0.05	25	10	0.005	grasland
11	55	0.05	8	0.5	0.005	overig
12	50	0.05	200	190	0.001	bos:loofbos
13	50	0.05	200	190	0.001	gebouwen
14	50	0.05	16000	999	0.001	putten
15	50	0.05	16000	999	0.001	kolken

Tabel F-2: Infiltratieparameters met nieuwe waarden voor k

#	C [$m^{1/2}/s$]	n [$s/m^{1/3}$]	f_o [mm/uur]	f_c [mm/uur]	k [uur^{-1}]	landgebruik
1	50	0.2	0.2	0.1	3.6	snelverkeer
2	50	0.05	0.2	0.1	3.6	gemengd verkeer
3	50	0.05	0.2	0.1	3.6	fietzers,bromfietzers
4	45	0.2	2	0.1	3.6	parkeren
5	42	0.2	3	0.1	3.6	voetgangers
6	50	0.05	0.2	0.1	3.6	busverkeer
7	45	0.05	200	190	3.6	meer,plas,ven,vijver
8	40	0.2	200	190	3.6	waterloop
9	40	0.2	25	0.1	3.6	spoorbaanlichaam
10	60	0.05	25	10	9.0	grasland
11	55	0.05	8	0.5	9.0	overig
12	50	0.05	200	190	3.6	bos:loofbos
13	50	0.05	200	190	3.6	gebouwen
14	50	0.05	1000	500	3.6	putten
15	50	0.05	1000	500	3.6	kolken

Bijlage G: Projectsituatie in Hoogeveen

In eerste instantie lijkt het mogelijk om de projectsituatie uit Hoogeveen maar dan met een constante neerslag van 10 mm/uur te gebruiken als basissituatie. Bij deze projectsituatie werd er gebruik gemaakt van de volgende infiltratiewaarden voor de kolken: $f_0 = 16000$ mm/uur, $f_c = 999$ mm/uur en $k = 0.001$ s⁻¹. Figuur G-1 toont de inundatie die optreedt bij deze situatie.



Figuur G-1: Inundatiediepte bij projectsituatie met constante neerslag

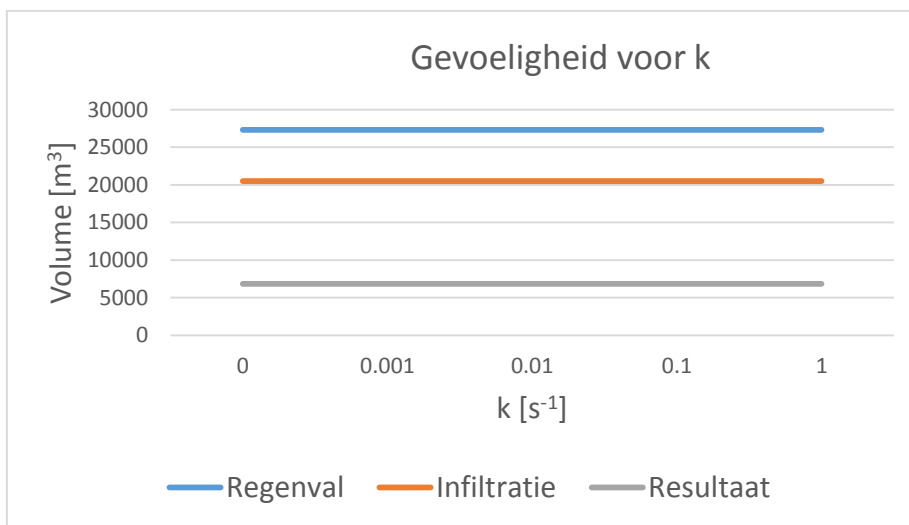
Gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt van de putten en kolken

Om de projectsituatie te testen als basissituatie wordt een test uitgevoerd voor de gevoeligheid voor de vervalcoëfficiënt in de formule van Horton k . Op het moment dat de uitstroom uit het modeldomein als infiltratie wordt gemodelleerd, dan wordt de vervalcoëfficiënt k van de putten en kolken een parameter die de snelheid waarmee het riool volstroomt beschrijft. Zowel het vollopen van het riool als het afnemen van de infiltratiecapaciteit hebben immers hetzelfde resultaat, namelijk een afname in de uitstroom. Dit maakt het nuttig om de gevolgen van veranderingen in deze parameter te onderzoeken.

Vanwege de kleine waarden van de parameter, de standaardwaarde is $0,001 \text{ s}^{-1}$, wordt er gekozen om deze parameter op een logaritmische schaal te testen. De waarden voor k die getest worden zijn: 0, 0.001, 0.01, 0.1 en 1 s^{-1} . De resultaten zijn te zien in tabel G-1 en figuur G-2.

Tabel G-1: Gevolgen van veranderingen in de vervalcoëfficiënt

k	Neerslag [m^3]	Infiltratie [m^3]	Eindvolume [m^3]
0	2.73180E+04	2.05000E+04	6.81920E+03
0.001	2.73180E+04	2.04990E+04	6.81900E+03
0.01	2.73190E+04	2.05000E+04	6.81910E+03
0.1	2.73180E+04	2.04990E+04	6.81900E+03
1	2.73180E+04	2.04990E+04	6.81920E+03



Figuur G-2: Gevoeligheid voor veranderingen in de vervalcoëfficiënt

Allereerst hebben de veranderingen in de vervalcoëfficiënt geen invloed op de regenval. Wat echter opvallend is, is dat de veranderingen ook slechts een minimale invloed hebben op de infiltratie, en dus ook op het resulterend volume. De veranderingen hierin zijn zelfs zo klein dat ze waarschijnlijk te wijten zijn aan afrondingsfouten in de berekening, en ze niet optreden als gevolg van de veranderingen in k . Een mogelijke oorzaak hiervan kan zijn dat f_o en f_c beide zo hoog zijn dat al het water dat op put- of kolkcellen komt, altijd infiltreert.

Opstellen basissituatie

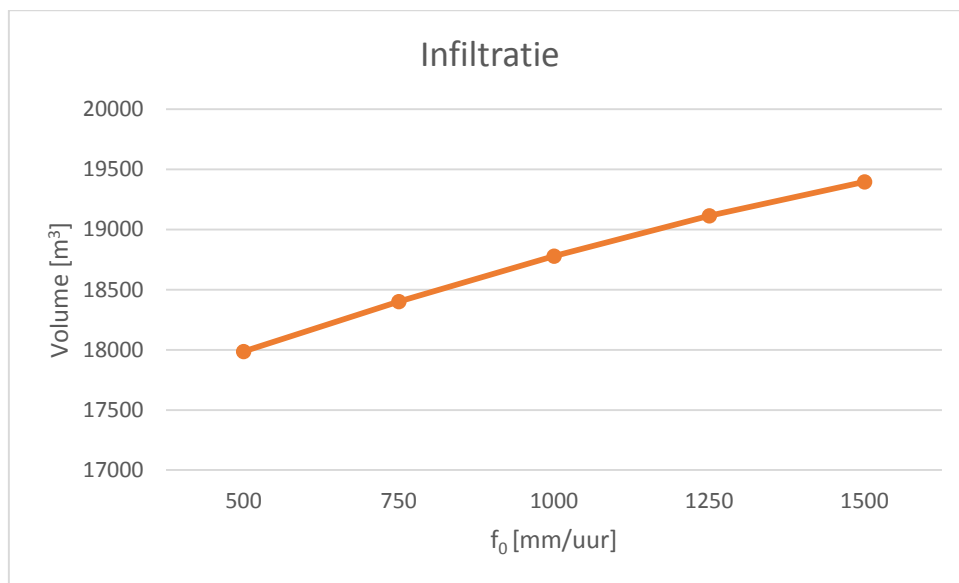
Het gebrek aan gevolgen voor veranderingen in de vervalcoëfficiënt k is te verklaren door de zeer hoge waarden voor f_o en f_c . Het totale volume dat door de putten en kolken uit het model verdwijnt, is 3415 m^3 in 2 uur, oftewel $1707,5 \text{ m}^3/\text{uur}$. In het model is de infiltratie 16000 mm/uur over naar schatting 5000 open putten en kolken, allen met een oppervlakte van $0,25 \text{ m}^2$. Hierdoor wordt de totale potentiële infiltratie $20000 \text{ m}^3/\text{uur}$, de afname buiten beschouwing gelaten. Er kan dus veel meer infiltreren door de kolken en putten dan noodzakelijk is. Om deze reden wordt er een nieuwe basissituatie gekozen voor de gevoeligheidsanalyse. De infiltratiewaarden hierbij worden $f_o=1000 \text{ mm/uur}$, $f_c=500 \text{ mm/uur}$ en $k=0.001 \text{ s}^{-1}$.

Bijlage H: Grafische resultaten van de gevoeligheidsanalyse

Deze bijlage bevat een reeks grafische weergaven van resultaten van de gevoeligheidsanalyse. Deze bestaan zowel uit grafieken, als uit inundatiekaarten van Hoogeveen. De belangrijkste van deze grafische resultaten zijn opgenomen in het hoofdverslag, maar voor algemenere resultaten wordt verwezen naar deze bijlage.

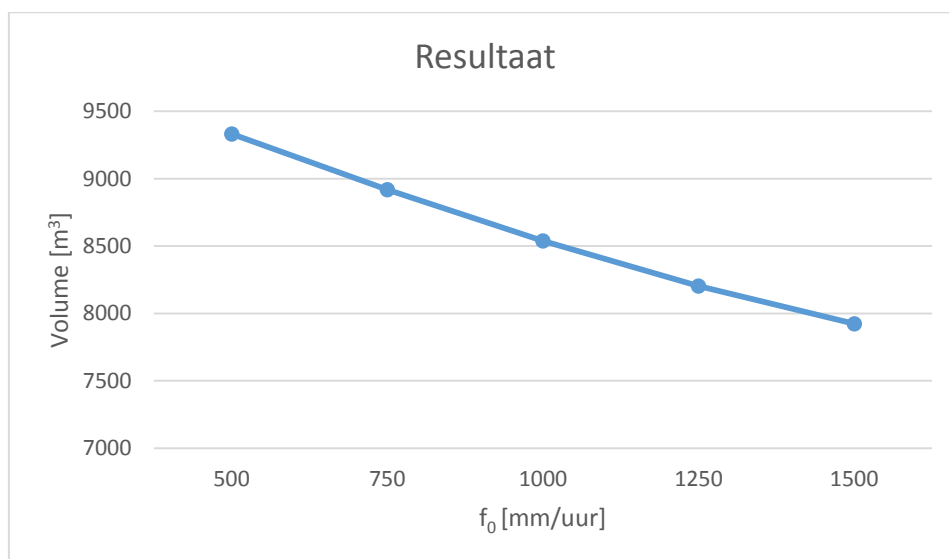
Gevoeligheid voor f_0

De eerste twee figuren geven het totale infiltratievolume (figuur H-1) en het volume water op straat (figuur H-2) weer bij de gevoeligheidsanalyse voor f_0 voor de putten en kolken in de formule van Horton. Hoewel de veranderingen in f_0 bijna lineair doorwerken in de resultaten is ook duidelijk het asymptotisch verloop richting een maximumwaarde voor de infiltratie te zien. Naarmate f_0 hoger wordt heeft de verhoging minder effect op het totale infiltratievolume.



Figuur H-1: Grafische weergave van de infiltratievolumes voor verschillende waarden van f_0

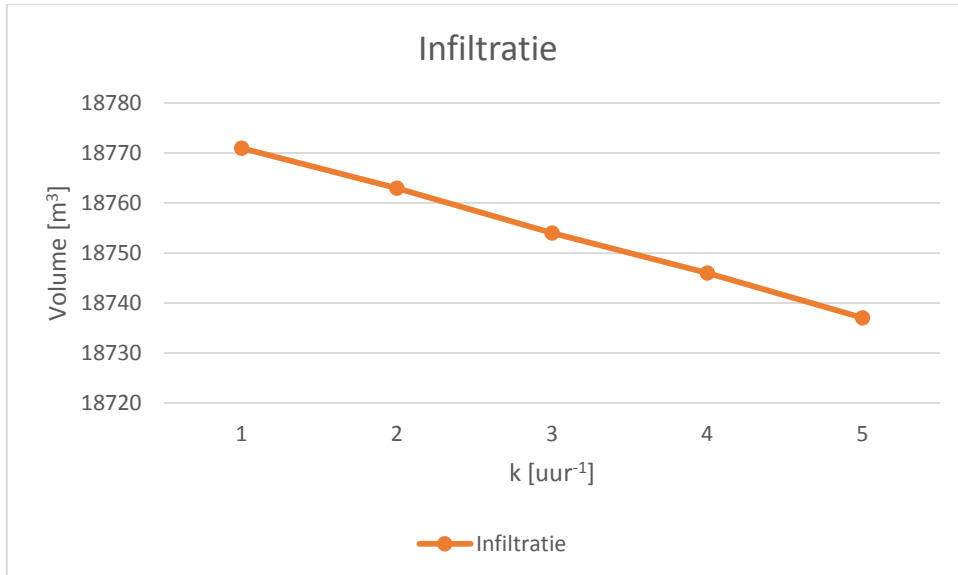
Uiteraard leidt de toename in infiltratie tot een afname in het resulterend volume in het modeldomein.



Figuur H-2: Grafische weergave van het resulterend volume voor verschillende waarden van f_0

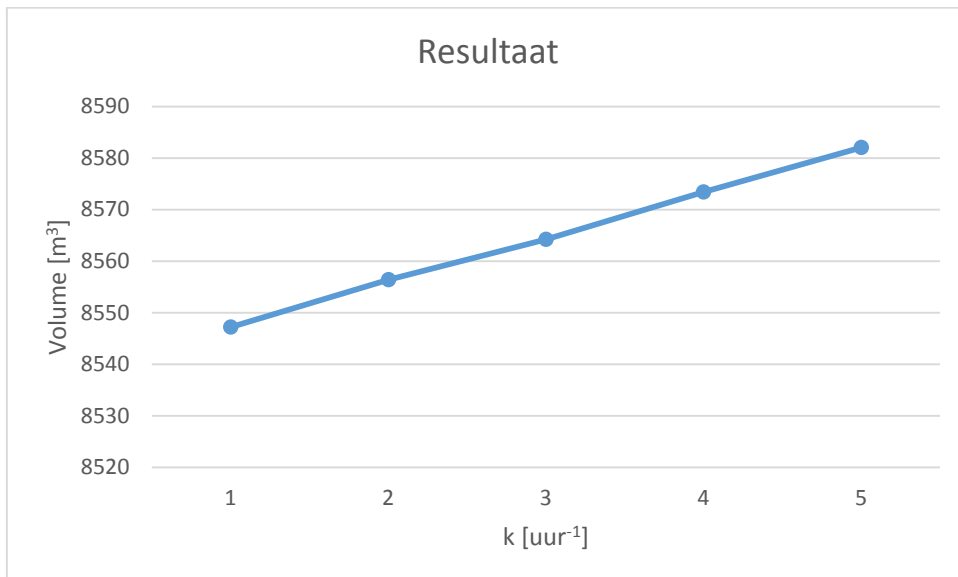
Gevoeligheid voor k

De volgende twee figuren laten het totale infiltratievolume (figuur H-3) en het totale volume water op straat (figuur H-4) zien voor de gevoeligheidsanalyse voor k bij de putten en kolken. Dit is de test voor k in de basissituatie. Alleen de waarden voor k van 1 tot 5 uur^{-1} worden getoond, aangezien de lagere waarden nauwelijks tot geen verschil laten zien.



Figuur H-3: Grafische weergave van het infiltratievolume bij verschillende waarden voor k

Ook hier werken de resultaten van de infiltratie weer door in het resulterend volume.



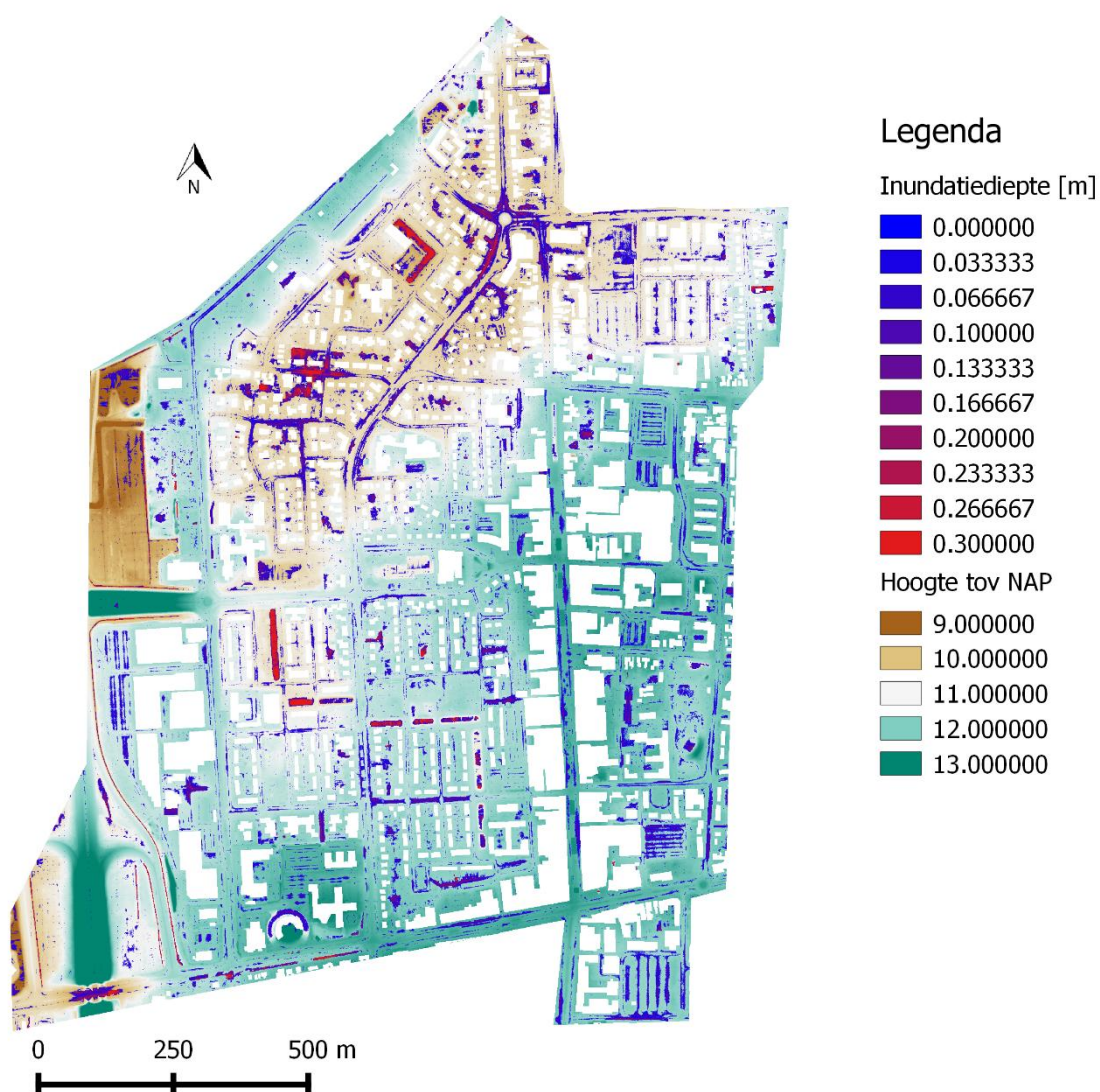
Figuur H-4: Resultierend volume bij verschillende waarden voor k

Ook bij de hogere waarden voor k zijn de gevolgen voor de infiltratie en het resulterend volume vrij klein (zie de waarden bij de verticale assen).

Situatie met k in uur^{-1}

Figuur H-5 toont de inundatiekaart van de situatie waarin de waarden van k zijn bijgesteld van s^{-1} naar uur^{-1} . De verschillende parameters die aan het landgebruik zijn gekoppeld zijn voor deze situatie te zien in tabel F-2. Dit leidt tot een extreme toename in de hoeveelheid water op straat. Belangrijk

om op te merken is dat de schaal in figuur H-5 loopt tot 0.3 meter en niet tot 0.1 meter, zoals bij de andere inundatiekaarten.



Figuur H-5: Inundatiekaart voor de situatie met de opgehoogde waarden voor k