



Effectenstudie naar het mee schematiseren van straatkolken in 3Di

Bachelor eindopdracht

S.D.G. (Bas) van Haaren

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

Nelen & Schuurmans



30 juni 2017

Effectenstudie naar het mee schematiseren van straatkolken in 3Di

door:

S.D.G. (Bas) van Haaren

S.D.G. (Bas) van
Haaren
Universiteit Twente

Auteur

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

Arnold van 't Veld MSc
Nelen & Schuurmans

*Dagelijkse
begeleider*

Nelen & Schuurmans



Valesca Harezlak MSc
Universiteit Twente

Begeleider

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**

ir. A.E. (Albert)
Kemeling
Gemeente Rotterdam

Partner



Gemeente Rotterdam

Voorwoord

Voor u ligt de bachelor eindopdracht "Effectenstudie naar het mee schematiseren van straatkolken in 3Di". Deze bachelor eindopdracht vormt het sluitstuk van de bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. In de periode april tot en met juni is dit onderzoek uitgevoerd bij Nelen & Schuurmans, in samenwerking met gemeente Rotterdam. Voor het positieve, prettige en leerzame verloop van de gehele onderzoeksperiode wil ik bij dezen graag de volgende personen bedanken:

Om te beginnen bedank ik Arnold van 't Veld en Valesca Harezlak voor de prettige begeleiding en voor hun ondersteuning tijdens het gehele traject. Desgelijks gaat mijn dank uit naar Albert Kemeling voor de geleverde expertise. Alsmede bedank ik studiegenoot Eva Juffermans voor haar constructieve advies als peerreview partner.

Daarnaast wil ik mede stagiaires Jermer Roosjens, Raïsa Schermer en Bram Winkelaar bedanken voor de uitstekende samenwerking. Ook bedank ik de collega's van afdeling Stedelijk Waterbeheer. Zij hebben bijgedragen aan een bijzonder prettige werkomgeving waarin behulpzaamheid als één van de belangrijkste waarden naar voren komt.

Als laatste bedank ik het opleidingsmanagement van Civiele Techniek aan de Universiteit Twente voor het bieden van een hoogwaardige bacheloropleiding.

Dit onderzoek valt binnen het vakgebied watermanagement. Naast vele onbekenden hebben ook bekende Nederlanders zoals Willem-Alexander der Nederlanden zich toegelegd op watermanagement. In een toespraak zei de koning daarover: "*Ik ben geen techneut en geen ingenieur, maar ik kan de problemen wel onder de aandacht brengen*" (Trouw, 2013). Door onvoorwaardelijk mijn enthousiasme en ambitie te blijven volgen hoop ik één van de vele ingenieurs te worden zoals genoemd door Koning Willem-Alexander.

Bas van Haaren
Utrecht, juni 2017

Samenvatting

Marktpartijen als Nelen & Schuurmans leveren inzicht en advies aan overheden met betrekking tot waterrobuustheid van de ruimtelijke inrichting. Hydraulische modellen leveren hieraan een aanzienlijke bijdrage door inzicht te geven in wateroverlast in de vorm van onder andere inundatiedieptes. In de meest vooraanstaande hydraulische modellen als 3Di worden abstracties gebruikt die vastgelegd zijn op basis van veel grovere modellen. Zo vindt in de huidige 3Di modellen de instroom van het maaiveld naar de riolering plaats via de inspectieputten. De gemeente Rotterdam heeft de vraag gesteld wat de impact is van de toepassing van deze abstractie op de berekende inundatiediepte.

De doelstelling van dit onderzoek is om inzicht te creëren in het effect van het toevoegen van straatkolken en het sluiten van inspectieputten op de berekende waterdiepte in 3Di. Het studiegebied waarvoor dit onderzoek is uitgevoerd is Lombardijen, een wijk in de gemeente Rotterdam. De focus ligt op waterdiepte omdat op basis van die parameter overlast en schade wordt berekend. De volgende probleemstelling is geformuleerd: *Welk effect heeft het toevoegen van straatkolken op de berekende waterdiepte in een 3Di model van Lombardijen?*

Om antwoord te geven op de onderzoeksvraag zijn er hydraulische berekeningen uitgevoerd met een basismodel en een variant. Het basismodel is een bestaand model en vormt de nulmeting. Om te beginnen zijn de schematiseringen in dit model zonder straatkolken en de theoretische gevolgen daarvan op de berekende waterdiepte uiteengezet. De variant is het bestaande model waarin de straatkolken zijn mee geschematiseerd. De locaties van de straatkolken zijn daarvoor aangeleverd door de gemeente Rotterdam. Via kolkleidingen zijn de straatkolken in het model verbonden met de inspectieput toebehorend aan de dichtstbijzijnde riolering. Vervolgens zijn de in het basismodel en variant berekende waterdieptes met elkaar vergeleken op basis van dezelfde neerslaggebeurtenissen.

Met het mee schematiseren van straatkolken neemt gedurende de gehele simulatie het water op straat af, in de riolering neemt de waterdiepte toe. De afname van water op straat is met name zichtbaar op de laagste delen van het straatprofiel. In de watergangen vindt peilstijging plaats, dat is via overstorten het gevolg van de afname van water op straat. De uitwisseling tussen maaiveld en riolering is daarnaast versneld na het meenemen van straatkolken. Uit dit onderzoek is ook gebleken dat met het meenemen van straatkolken drie keer meer rekencellen neerslag uitwisselen tussen het maaiveld en de riolering. De instroomhoogte is bovendien veranderd en is beter benaderd met het mee schematiseren van de straatkolken. Ook is de verhanglijn in de riolering verhoogd en is het verhang van de waterstand toegenomen.

De gemeente Rotterdam heeft bevestigd dat de lagere waterdiepte zichtbaar op de laagste delen van het straatprofiel overeenkomen met de werkelijkheid. Het verschil in waterdiepte is bovendien significant. Het waterdiepteverschil benadert immers de helft van een stoeprandhoogte, dat is de hoogte die veelal het verschil bepaalt tussen overlast en schade. Daarom wordt aanbevolen om - in 3Di modellen van stedelijke omgevingen - straatkolken mee te nemen in de schematisering van de riolering. Wanneer de instroom naar de riolering via inspectieputten verloopt, wordt het aanbevolen om de instroomhoogtes van inspectieputten in het vervolg te bepalen aan de hand van de straatkolken. Ook wordt het aanbevolen om gebruik te maken van de mogelijkheden die het mee schematiseren van straatkolken teweegbrengt, zoals het bepalen van instroomdebieten en uitwisselingsrichting.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	iii
Samenvatting.....	iv
Begrippenlijst.....	vi
1 Inleiding.....	7
1.1 Aanleiding.....	7
1.2 Doelstelling.....	7
1.3 Methode.....	8
1.4 Opbouw onderzoeksrapport.....	8
2 Theoretisch kader.....	9
2.1 3Di modelinstrumentarium.....	9
2.2 0D, 1D en 2D modelcomponenten.....	9
2.3 Neerslaggebeurtenissen.....	13
3 Schematisering basismodel.....	15
3.1 Schematisering riolering.....	15
3.2 Gevolgen schematisering basismodel.....	15
4 Schematisering variant.....	19
4.1 Verwerking straatkolkgegevens.....	19
4.2 Schematisering straatkolken.....	21
4.3 Schematisering straatkolk aansluitingen.....	23
5 Resultaten.....	25
5.1 Waterbalans.....	25
5.2 Waterdiepte kaarten.....	26
5.3 Waterdiepte verschilkaarten.....	26
6 Analyse.....	27
6.1 Verloop waterdiepte over de simulatietijd.....	27
6.2 Kwantificering waterdiepteverschil.....	29
6.3 Locaties met waterdiepteverschil.....	30
6.4 Verhanglijn riolering.....	30
7 Discussie.....	32
8 Conclusie.....	34
9 Aanbevelingen.....	35
Bibliografie.....	36
Bijlage I – Kaarten.....	37
Bijlage II - Diagrammen.....	40
Bijlage III - Tabellen.....	45
Bijlage IV - Figuren.....	47

Begrippenlijst

0D hydraulisch model – In een 0D hydraulisch model is water weergegeven in hoeveelheden en kan water niet stromen. Een 0D model kan worden voorgesteld als bakjes met water.

1D hydraulisch model – Een 1D hydraulisch model simuleert de waterbeweging in één richting, in die richting kan het water twee kanten op stromen. De richting is gelijk aan de richting van de 1D tak, de richting van die tak wordt bepaald door twee knopen.

2D hydraulisch model – Een 2D hydraulisch model simuleert de waterbewegingen in 2 richtingen die beide in het horizontale vlak liggen. Een 2D netwerk is opgebouwd uit rekencellen waartussen water kan stromen. In 3Di staan de stromingsrichtingen loodrecht op de randen van de rekencel.

Abstractie – Een abstractie is een representatie van een object of systeem waarbij één of meerdere eigenschappen of elementen buiten beschouwing worden gelaten. Die eigenschappen of elementen zijn niet relevant voor de door de abstractie te leveren informatie (MacLeod, 2017).

Basismodel – Het basismodel is de nulvariant van het model van Lombardijen in 3Di. Dat is de staat waarin het model is gebruikt voor eerdere projecten. In het basismodel bevinden zich geen straatkolken en verloopt de interactie met het 1D domein via de inspectieputten.

Idealisatie – Een idealisatie is een simplificatie die zich voordoet als het originele systeem en tevens relevantie heeft aan het originele systeem met betrekking tot het kunnen oplossen van een probleem. Feitelijk is een idealisatie een onjuist systeem dat eigenschappen kan hebben die het originele systeem niet heeft (MacLeod, 2017).

Inspectieput – Een inspectieput is een onderdeel van het riool dat is bedoeld voor het verbinden van rioolleidingen; het mogelijk maken van bochten en het toegankelijk maken van het riool. In het rioolsysteem zijn gebruikelijk om de 40 meter inspectieputten geplaatst. Inspectieputten worden ook gebruikt voor inspectiedoeleinden en voor het plaatsen van meetapparatuur (Stichting RIONED, 2009).

Inundatie – Inundatie is een waterdiepte groter dan nul. Wanneer inundatie plaatsvindt op wegen, wordt dat 'water op straat' genoemd.

Maaiveld – Het maaiveld is de grens tussen de ondergrond en de lucht. Deze grens wordt weergegeven als een hoogte in relatie tot een nationaal nulniveau. In Nederland wordt het maaiveld gespecificeerd ten opzichte van NAP.

Normaal Amsterdams Peil (NAP) – Het Normaal Amsterdams Peil is een hoogte aanduiding. 0 NAP vormt het nationaal nulniveau. Hoogtes worden in Nederland relatief ten opzichte van dit nulpunt aangeduid.

Straatkolk – Een straatkolk is het onderdeel van het riool dat bedoeld is voor de instroom van water op het maaiveld naar het riool. In het rioolsysteem zijn straatkolken gebruikelijk om de 20 meter geplaatst. De bovenkant van een straatkolk is geplaatst op maaiveldhoogte (Stichting RIONED, 2009).

Waterdiepte – De waterdiepte is de waterhoogte gespecificeerd in relatie tot het maaiveld. De waterdiepte is zodoende het hoogteverschil tussen de waterstand en de maaiveldhoogte (Nelen & Schuurmans, 2016).

Waterstand – De waterstand is de waterhoogte gespecificeerd in relatie tot een nationaal nulniveau, in Nederland is dat NAP (Nelen & Schuurmans, 2016).

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Deltabeslissing Ruimtelijke adaptatie is onderdeel van het Deltaprogramma 2017, gepresenteerd aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal op Prinsjesdag 2016. In deze Deltabeslissing is de ambitie opgenomen dat Nederland in 2050 zo goed mogelijk klimaatbestendig en waterrobuust is ingericht. Samen met de marktpartijen zijn alle overheden daarvoor verantwoordelijk (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Marktpartijen als Nelen & Schuurmans leveren inzicht en advies aan overheden met betrekking tot waterrobuustheid van de ruimtelijke inrichting. Hydraulische modellen leveren hieraan een aanzienlijke bijdrage door inzicht te geven in wateroverlast in de vorm van inundatiedieptes.

De nauwkeurigheid van de modeluitkomsten werd tot 5 à 10 jaar geleden met name beperkt door de precisie van de modelberekeningen zelf. Tegenwoordig is de nauwkeurigheid van modeluitkomsten 'data driven' wat inhoudt dat de precisie van de aangeleverde gegevens de beperkende factor vormt voor de nauwkeurigheid van de uitkomsten.

In de meest vooraanstaande hydraulische modellen worden abstracties gebruikt die vastgelegd zijn op basis van oude, veel grovere modellen. Enerzijds zorgen abstracties voor een relatief snelle rekentijd en versnellen het modelleerproces dat leidt tot lagere kosten. Anderzijds kunnen abstracties een negatief effect hebben op de nauwkeurigheid van modeluitkomsten. In de door Stichting RIONED (2004) opgestelde richtlijnen voor het schematiseren van riolering, is opgenomen dat de instroom mag plaatsvinden in de inspectieputten en dat straatkolken achterwege mogen worden gelaten. Ook in de huidige 3Di modellen vindt de instroom van het maaiveld naar de riolering plaats via de inspectieputten. De gemeente Rotterdam heeft de vraag gesteld wat de impact is van de toepassing van deze abstractie op de berekende inundatie.

Dit onderzoek draagt bij aan de afwegingen die gemaakt moeten worden tussen enerzijds rekentijd en kosten, en anderzijds de nauwkeurigheid van de modeluitkomsten. Het onderzoek is afgebakend tot de Rotterdamse wijk Lombardijen, omdat over die wijk relevante kennis bij zowel de gemeente Rotterdam als bij Nelen & Schuurmans beschikbaar is.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is om inzicht te creëren in het effect van het toevoegen van straatkolken en het sluiten van inspectieputten op de berekende inundatie in 3Di. Op basis van de doelstelling is de volgende probleemstelling geformuleerd:

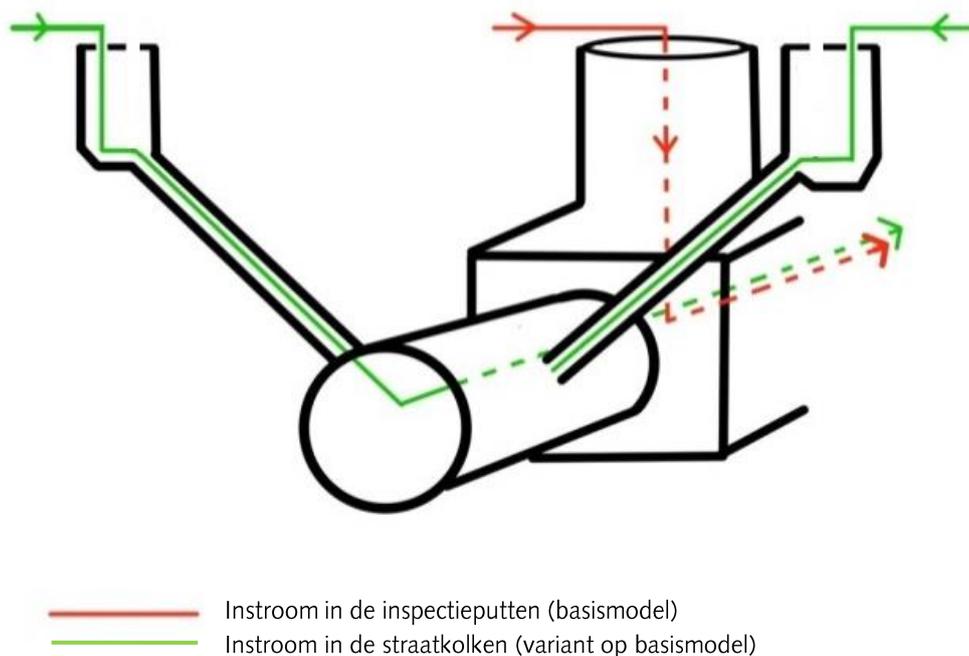
Welk effect heeft het toevoegen van straatkolken op de berekende waterdiepte in een 3Di model van Lombardijen?

Ter beantwoording van deze hoofdvraag zijn eerst de volgende deelvragen beantwoord:

- 1) Wat zijn de schematiseringen in het model zonder straatkolken en de theoretische gevolgen daarvan op de berekende waterdiepte?
- 2) Hoe kan de toevoeging van straatkolken worden geschematiseerd in het model?
- 3) Wat is de berekende waterdiepte in het model met straatkolken en zonder straatkolken?
- 4) Wat zijn de oorzaken en gevolgen van de verschillen in de berekende waterdiepte tussen het model met straatkolken en zonder straatkolken?

1.3 Methode

Op het reeds bestaande 3Di model van Lombardijen is een variant gemodelleerd waar de abstractie is weggenomen door het toevoegen van straatkolken en het sluiten van inspectieputten. Het al bestaande model bevat de abstractie van instroom in de riolering via inspectieputten, dit levert de nulmeting in het onderzoek op. In het gehele rapport wordt gesproken over het 'basismodel' en over de 'variant'. In Figuur 1 staat een schematische weergave van de instroom in het basismodel en de instroom in de variant. Beide modellen zijn vergeleken op basis van berekende waterdiepte. Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van twee verschillende neerslaggebeurtenissen, RIONED bui 08 en de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016 ter plaatse van Lombardijen.



Figuur 1: Schematische weergave van de inloop naar de riolering in het basismodel (rood, via inspectieputten) en in de variant (groen, via straatkolken)

1.4 Opbouw onderzoeksrapport

Hoofdstuk 2 (Theoretisch kader) vormt een fundering van relevante informatie die benodigd is voor de daaropvolgende hoofdstukken. In hoofdstuk 3 (Schematisering basismodel) is de eerste deelvraag beantwoord. Daarvoor wordt inzicht gegeven in de schematiseringen in het basismodel met betrekking tot de open inspectieputten. Hoofdstuk 4 (Schematisering variant op basismodel) geeft antwoord aan de tweede deelvraag. De toegepaste schematiseringen voor de variant op het basismodel staan hier beschreven. In hoofdstuk 5 (Resultaten) zijn in overeenstemming met de derde deelvraag de verwerkte modeluitkomsten gepresenteerd. In hoofdstuk 6 (Analyse) zijn als gevolg van deelvraag vier de oorzaken en gevolgen van de verschillen in de berekende waterdiepte tussen het model met straatkolken en zonder straatkolken beschreven. In hoofdstuk 7 (Discussie) wordt het onderzoek besproken en worden de resultaten geïnterpreteerd. Al deze hoofdstukken geven samen antwoord op de hoofdvraag in hoofdstuk 8 (Conclusie). In hoofdstuk 9 (Aanbevelingen) worden er aanbevelingen gedaan voor de praktijk.

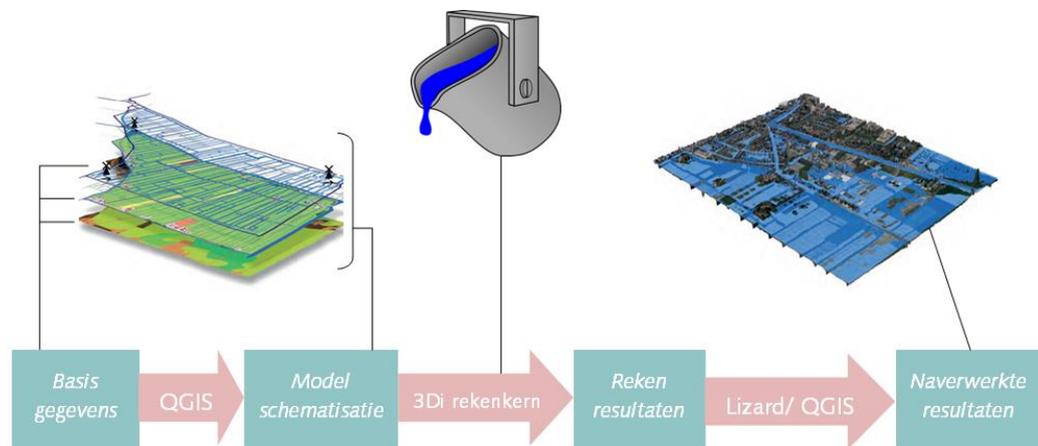
2 Theoretisch kader

In dit hoofdstuk is eerst het modelinstrumentarium gepresenteerd. Vervolgens is het 2D-, 1D- en 0D-domein toegelicht inclusief de interactie tussen deze drie domeinen. Tot slot zijn de neerslaggebeurtenissen beschreven.

2.1 3Di modelinstrumentarium

2.1.1 De 'invoer-reken-uitvoer' trein

3Di is een modelinstrumentarium voor het uitvoeren van hydraulische berekeningen. Deze hydraulische berekeningen geven hoofdzakelijk informatie over de verspreiding van water op basis van tijd. Door Nelen & Schuurmans (2016) wordt het instrumentarium omgeschreven als de 'invoer-reken-uitvoer'-trein, zoals weergegeven in Figuur 2.

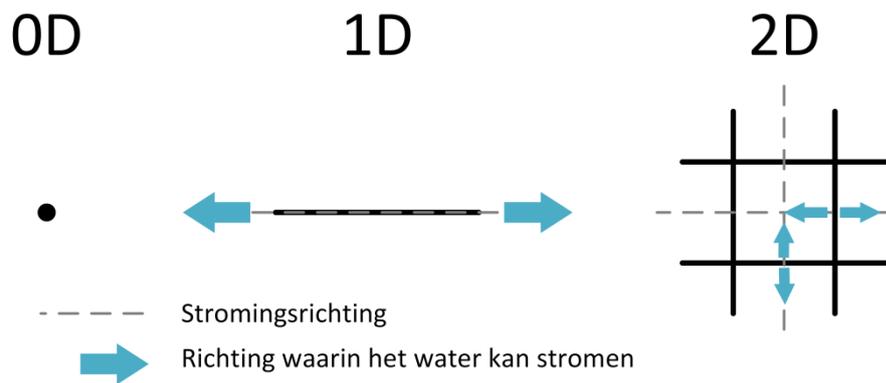


Figuur 2: Het 3Di modelinstrumentarium weergegeven als de 'invoer-reken-uitvoer' trein

De 'invoer-reken-uitvoer'-trein kan van links naar rechts worden gelezen. De basisgegevens bestaan uit informatie over het rioolstelsel, het Actueel Hoogtebestand Nederland, informatie over panden en informatie over de bodem. Ook de neerslaggegevens behoren tot de benodigde basis gegevens. De trein bestaat uit de volgende onderdelen: QGIS (versie 2.14.14) is een open source geografisch informatiesysteem; de 3Di rekenkern (versie 2.0) is een numeriek hydraulisch model; Lizard is een web portaal waarin resultaten kunnen worden nabewerkt.

2.2 0D, 1D en 2D modelcomponenten

Het 3Di model van Lombardijen is een integraal en hybride model. Een integraal model houdt in dat er in hetzelfde model gerekend wordt met zowel water op het 2D maaiveld als met water in de 1D riolering en watergangen. Hybride betekent dat het horizontale vlak deels wordt beschreven in een 0D domein en deels in een 2D domein. De daken van panden zijn als 0D vlakken gemodelleerd, het maaiveld rondom de panden is een 2D-rooster. De riolering behoort toe aan de 1D-component. Zodoende bevat het model van Lombardijen 0D, 1D en 2D componenten. In Figuur 3 zijn de stromingsrichtingen van deze componenten gevisualiseerd.



Figuur 3: Van links naar rechts de stromingsrichtingen en de richtingen waarin het water kan stromen in het 0D-, 1D-, en 2D domein

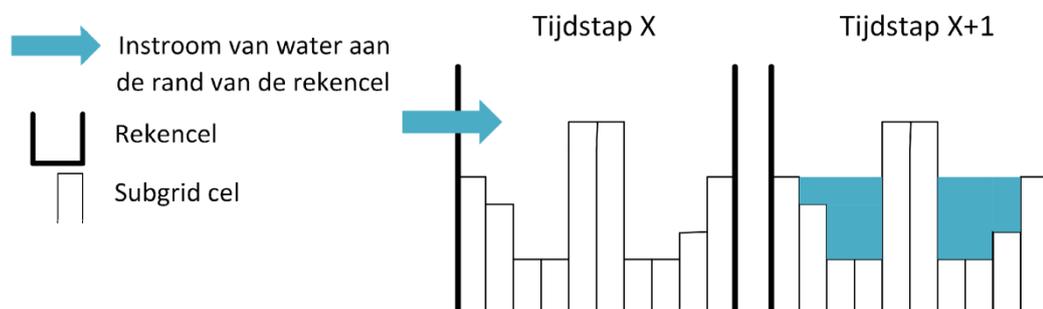
2.2.1 2D Rooster

3Di is een subgrid gebaseerd model: in één model worden twee verschillende rekenroosters gebruikt. Ten eerste is er een grof rooster van rekencellen, dat wordt het rekenrooster genoemd. Ten tweede is er een fijner rooster op basis van pixels, genaamd het subgrid (Nelen & Schuurmans, 2016).

Het basisprincipe achter een subgrid gebaseerd hydraulisch model is dat in het horizontale vlak het waterniveau in veel mindere mate varieert dan het bodemniveau (Nelen & Schuurmans, 2016). Op basis daarvan kan worden aangenomen dat voor een juiste beschrijving van het waterniveau een veel grovere resolutie kan worden toegepast dan voor de juiste beschrijving van het bodemniveau. Zodoende worden in een subgrid-gebaseerd hydraulisch model de waterstanden berekend op basis van het grove rekenrooster, terwijl er tegelijkertijd gebruikt gemaakt wordt van informatie die het detailniveau van de subgrid resolutie heeft (Nelen & Schuurmans, 2016).

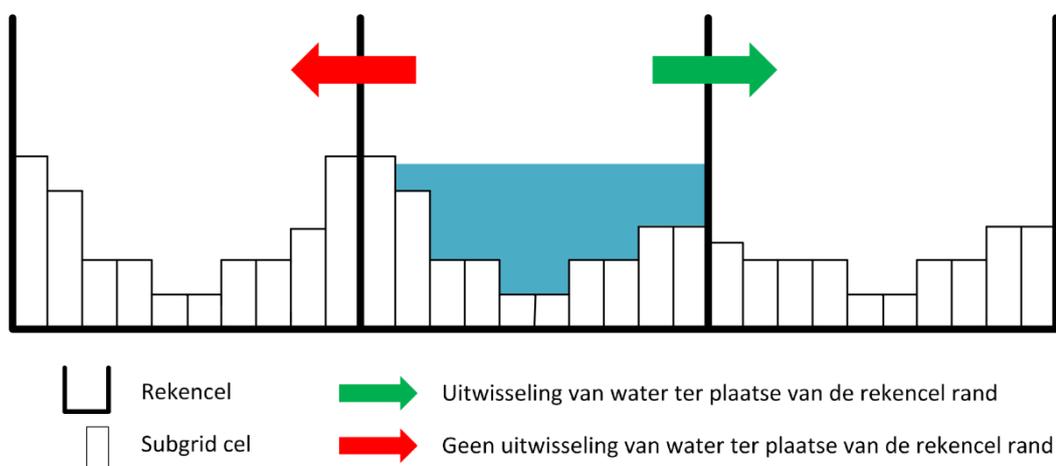
Aan het rekenrooster is de informatie uit het subgrid gekoppeld. Dat wordt mogelijk gemaakt door de hoge resolutie informatie uit het subgrid te tabelleren per rekencel. Op die manier wordt iedere rekencel beschreven door tabellen die kenmerken als volume, stromingsweerstand en infiltratiecapaciteit beschrijven. Op basis van het waterstandpunt in een rekencel wordt met behulp van het gedetailleerde subgrid het bijbehorende volume water in een cel bepaald. Dit volume kan via tabellen vervolgens worden uitgedrukt in waterdiepte op basis van subgrid resolutie.

De verdeling van het volume binnen de rekencel op basis van het weerstandpunt en op basis van het subgrid vindt plaats zonder stroming. Dat betekent dat de rekencel vanaf het laagste punt gevuld wordt (Nelen & Schuurmans, 2016). Doordat er geen stroming binnen een rekencel plaatsvindt, hebben obstakels binnen de rekencel geen invloed. Dat is gevisualiseerd in Figuur 4.



Figuur 4: De verdeling van het water volume in een rekencel op basis van het subgrid rooster

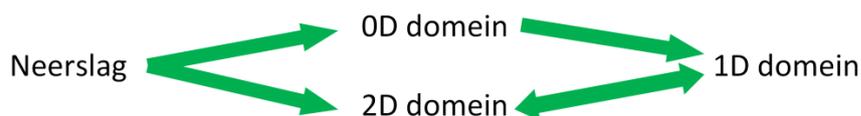
De uitwisseling van water tussen twee rekencellen vindt plaats aan de aangrenzende randen van de cellen, zoals te zien is in Figuur 3. Water wordt alleen uitgewisseld indien het water binnen de rekencel in contact staat met de celrand. In Figuur 5 is de uitwisseling tussen rekencellen weergegeven.



Figuur 5: Weergave van wanneer water wel (groende pijl) en niet (rode pijl) wordt uitgewisseld met een aanliggende rekencel op basis van het subgrid rooster

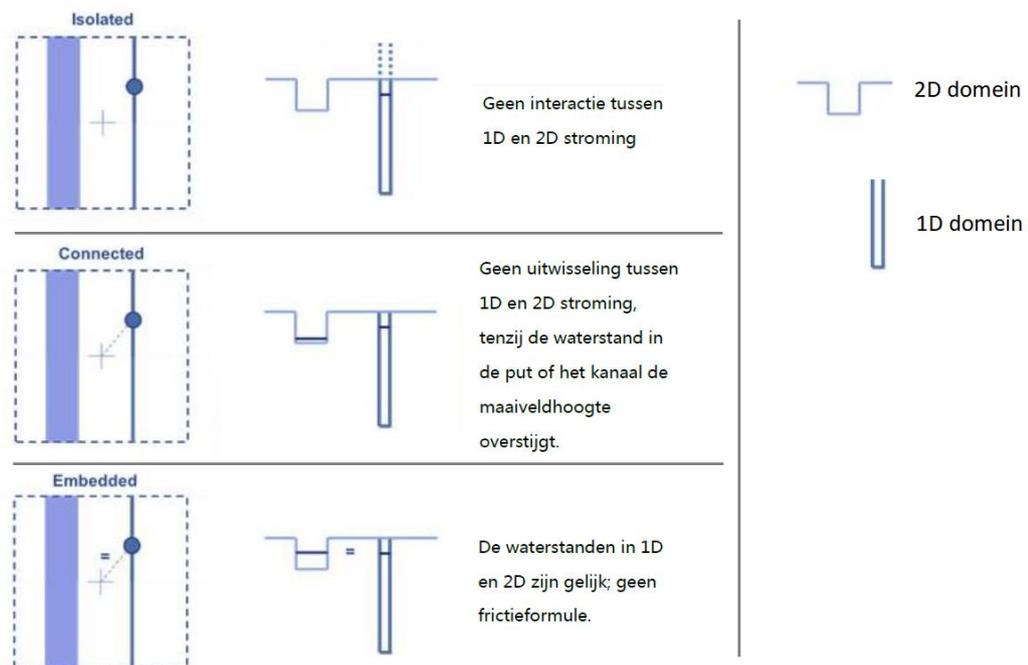
2.2.2 1D Netwerk

Het 1D netwerk is opgebouwd uit twee soorten elementen: knopen en takken. Een knoop representeert bijvoorbeeld een inspectieput of straatkolk. Een tak is een element dat twee knopen verbindt en representeert een leiding. In alle gevallen is een tak omsloten door een knoop aan beide uiteinden (Stichting RIONED, 2004). Neerslag kan het 1D domein bereiken via het 0D domein of via het 2D domein. In Figuur 6 is te zien hoe er tussen de drie verschillende domeinen interactie plaatsvindt. De uitwisseling tussen het 1D en 2D domein wordt in deze paragraaf verder toegelicht. De uitwisseling tussen het 0D en 1D wordt in de paragraaf 2.2.3 '0D vlakken' uitgelegd.



Figuur 6: De weergave van de interactie mogelijkheden om neerslag uit te wisselen tussen het 0D-, 1D-, en 2D domein

Water kan zich zowel verplaatsen van het 2D rooster naar het 1D netwerk als andersom. Die uitwisseling gebeurt door middel van een verbinding tussen de 1D knoop, het waterstandspunt in de rekencel waarin de knoop zich bevindt. Aan die verbinding wordt een type interactie toegekend. Dat kan zijn 'isolated', 'connected' of 'embedded' (Nelen & Schuurmans, 2016). Terwijl 'isolated' betekent dat er geen interactie is tussen het 2D en 1D domein, houdt 'connected' in dat er uitwisseling van water kan plaatsvinden tussen het 2D en 1D domein. Deze stroming treedt op wanneer de waterstand in de rekencel de instroomhoogte overschrijdt. De hoeveelheid water die wordt uitgewisseld wordt bepaald aan de hand van een frictieformule. Het derde type interactie tussen het 2D rooster en het 1D netwerk, 'embedded', betekent dat de waterstanden in 1D en 2D gelijk zijn: er is geen frictieformule of beperkende instroomhoogte. In Figuur 7 zijn de drie type interacties overzichtelijk weergegeven.



Figuur 7: Overzicht van de mogelijke interactie typen toegekend aan een 1D knoop (Nelen & Schuurmans, 2016)

De snelheid waarmee neerslag via het 2D rooster het 1D domein bereikt, is afhankelijk van opgegeven eigenschappen van het maaiveld als infiltratiecapaciteit en hellingsgraad.

2.2.3 0D vlakken

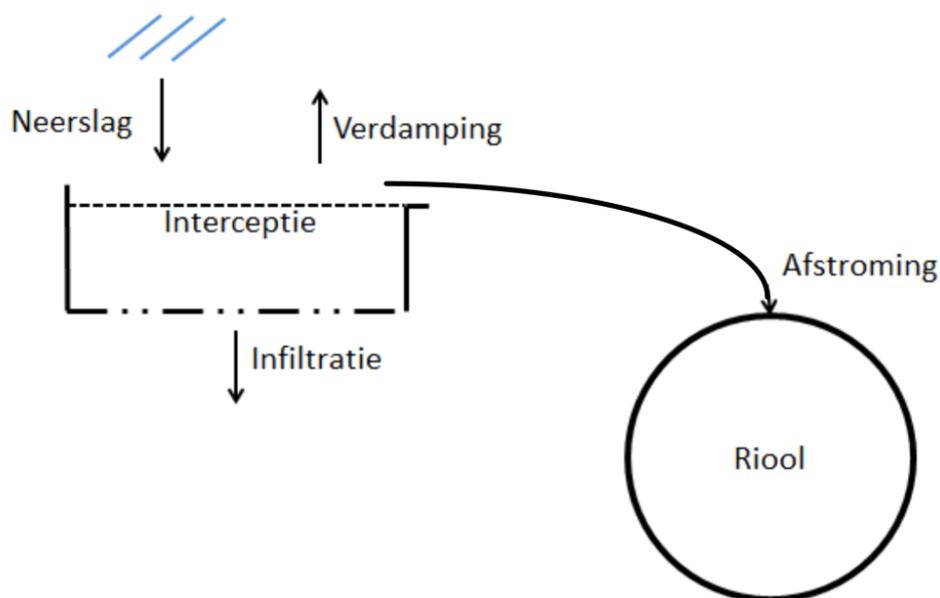
Het horizontale vlak kan (gedeeltelijk) worden opgedeeld in vlakken, in het model van Lombardijen representeren deze vlakken de daken van panden. De 0D vlakken hebben geen onderlinge uitwisseling: ieder vlak kan zodoende worden voorgesteld als een bakje. De hoeveelheid water in het bakje is het product van oppervlak en neerslag.

De 0D vlakken of bakjes kunnen uitwisselen met het 1D domein. De uitwisseling tussen het 0D en 1D domein is alleen één richting op mogelijk (Inloopmodel 3Di, 2014). Gezien het enorme hoogteverschil zal water immers in de praktijk niet vanuit de riolering via de regenpijpen terug de daken op stromen.

Voor de uitwisseling tussen de 0D bakjes en het 1D netwerk wordt gebruik gemaakt van het NWRW 4.3.1-model (Nelen & Schuurmans, 2016). NWRW staat voor Nationale Werkgroep Riolering en Waterkwaliteit. In Figuur 8 is weergegeven hoe de neerslag via dit model afstroomt.

De neerslag die in het bakje valt wordt geborgen in de vorm van interceptie. Tegelijkertijd verdwijnt er ook water uit het bakje in de vorm van infiltratie en verdamping. Dit proces gaat door tot dat de maximale interceptiecapaciteit is overschreden, wanneer het bakje vol is. Het overschot wordt dan verplaatst naar de riolering, te zien als 'afstroming' in Figuur 8 (Inloopmodel 3Di, 2014).

De hybride manier van schematiseren is in overeenstemming met het feit dat gevallen neerslag op daken via een regenpijp direct afstroomt naar de riolering. Wanneer ook de daken onderdeel zouden zijn van het 2D rooster stroomt de neerslag vanaf de daken af naar de voor- en achtertuin, dat is niet in overeenstemming met de werkelijkheid.



Figuur 8: Schematische weergave van het NWRW 4.3.1-model (Inloopmodel 3Di, 2014)

2.3 Neerslaggebeurtenissen

Een neerslaggebeurtenis is gedefinieerd als een aaneengesloten periode waarbinnen geen droge perioden langer dan vijf uur voorkomen (Stichting RIONED, 2017). De meeste neerslaggebeurtenissen hebben een relatief kort interval met een hoge intensiteit en een langdurige 'staart'. Omdat deze staart minder interessant is voor hydraulische berekeningen, wordt in de regel de duur van een neerslaggebeurtenis beperkt tot de tijd waarin 85 procent van de totale neerslaghoeveelheid is gevallen (Stichting RIONED, 2017).

Volgens een medewerker van Nelen & Schuurmans zijn er drie typen neerslaggebeurtenissen waarmee een 3Di model normaliter bij stedelijke omgevingen kan worden doorgerekend (Arnold van 't Veld, persoonlijke communicatie, april 2017):

- Stresstest
- Past event
- RIONED standaard-bui

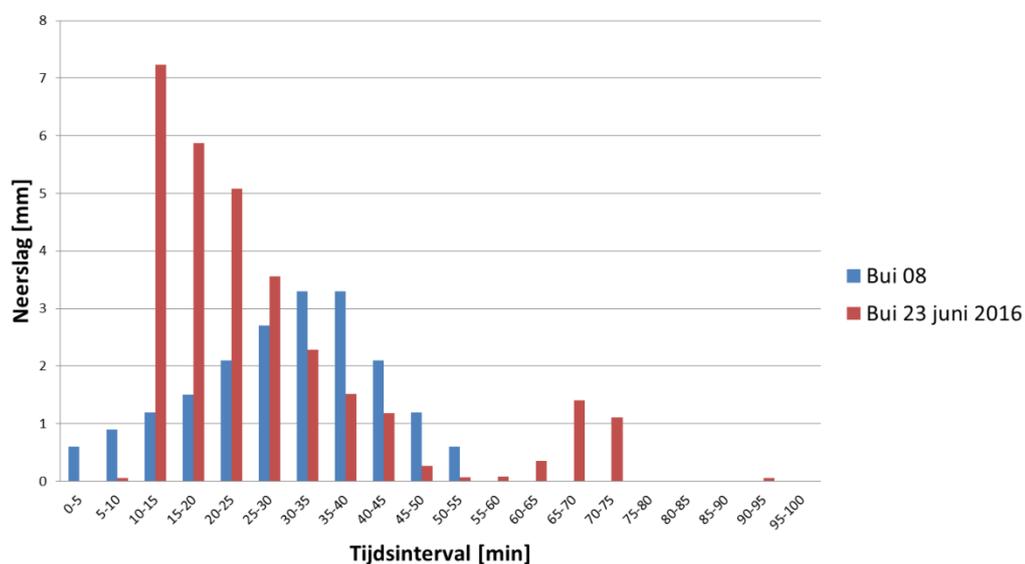
Een stresstest is een ongedefinieerde extreme bui van bijvoorbeeld 60 mm in één uur, soms aangeduid als klimaatbui. De modelresultaten van een stresstest geven inzicht in de meest kwetsbare gebieden. Door de hoge neerslag intensiteit is de bijdrage van de riolering beperkt, om die reden wordt in dit onderzoek geen stresstest uitgevoerd.

Een 'past event' is een neerslaggebeurtenis die in het verleden heeft plaatsgevonden ter plaatste van het modelgebied. De resultaten kunnen worden voorgelegd aan een gebiedsexpert ter validatie.

Stichting RIONED heeft 10 standaard buien voorgeschreven oplopend in intensiteit en herhalingsstijd. Deze 10 standaard neerslaggebeurtenissen zijn gebaseerd op 15 minuten neerslagval series gemeten in de Bilt van 1955 tot 1979 (Stichting RIONED, 2017). De gemeente Rotterdam heeft de riolering ontworpen op bui 08 (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017). De herhalingsstijd van die bui is twee jaar (Stichting RIONED, 2017).

Het is discutabel of de herhalingstijd van 2 jaar behorend aan bui 08 nog steeds correct is. Enerzijds heeft een recente studie aangetoond dat de neerslag in Nederland in de vorige eeuw met ongeveer 25 procent is gestegen (A Buishand, 2013). Anderzijds is de herhalingstijd bepaald aan de hand van metingen die dateren van 1955 tot 1979 (Stichting RIONED, 2017). Dit vermoeden is echter nog niet onderzocht.

Tussen neerslaggebeurtenissen kan onderscheid gemaakt worden tussen een piekintensiteit voor- en achterin de bui. Bui 08 heeft een piekintensiteit achterin de bui, zie Figuur 9. De neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016 daarentegen heeft een piekintensiteit voorin de bui. Voorafgaand aan de piekintensiteit treedt er vulling op van de bergingsruimte in het maaiveld en in de riolering. Als gevolg daarvan levert een neerslaggebeurtenis met piekintensiteit achterin de bui in de praktijk een hoge waterdiepte op in vergelijking met dezelfde gebeurtenis met de piek voorin de bui.



Figuur 9: De hoeveelheid neerslag [mm] per 5 minuten van bui 08 en neerslaggebeurtenis 23 Juni 2016

3 Schematisering basismodel

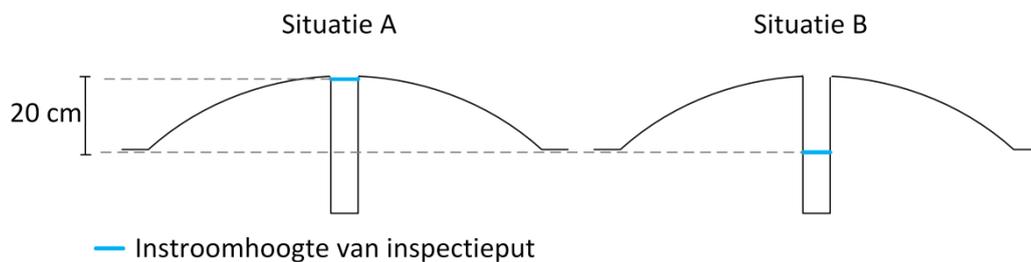
In dit hoofdstuk is de schematisering gepresenteerd waarin de riolinloop via inspectieputten verloopt. Ook zijn de gevolgen van deze abstractie beschreven. In deze beschrijving is onderscheid gemaakt tussen rekencellen met een inspectieput en rekencellen zonder een inspectieput.

3.1 Schematisering riolering

In het 1D netwerk van 3Di is de riolering geschematiseerd volgens de richtlijnen van Stichting RIONED. Dit is de overkoepelende organisatie die een kennisplatform vormt voor stedelijk waterbeheer en riolering in Nederland. De richtlijnen schrijven een detailniveau voor waar in staat dat in een stedelijk model de instroom in de riolering via inspectieputten mag verlopen (Stichting RIONED, 2014). Volgens deze schematisering worden zowel de straatkolken als de kolkleidingen achterwege gelaten. In het basismodel is dat het geval.

De inspectieputten zijn in het basismodel een idealisatie met twee feitelijk onjuiste eigenschappen die de werkelijkheid representeren. De eerste feitelijk onjuiste eigenschap is dat de inspectieputten in het model open zijn, en dus geen deksel hebben. Daardoor vindt er ter plaatste van de inspectieputten interactie plaats met het maaiveld. De knopen die een inspectieput representeren hebben het interactie type 'connected'.

De tweede feitelijk onjuiste eigenschap is de instroomhoogte van de inspectieputten. De instroomhoogte van de inspectieputten is met 20 centimeter verlaagd ten opzichte van de werkelijke hoogte van het maaiveld, zie situatie B in Figuur 10. Deze correctie benadert het hoogteverschil tussen het hoogste punt en het laagste punt in het straatprofiel die wordt veroorzaakt door de bolling. Hierbij is de aanname gemaakt dat inspectieputten op het hoogste punt van de weg liggen en straatkolken zich in het laagste punt van de weg bevinden.



Figuur 10: Schematische weergave van de aanpassing in de instroomhoogte van inspectieputten

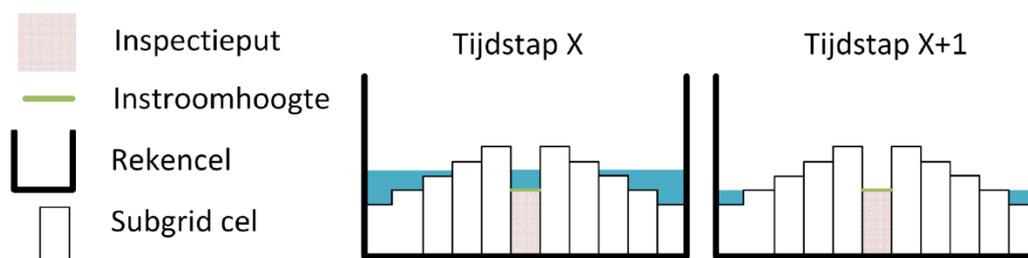
In situatie A van Figuur 10 vindt er zeer weinig tot geen instroom plaats via de inspectieput. Desondanks kan wanneer de capaciteit van de riolering wordt overschreden uitstroom via de inspectieput plaatsvinden door opgebouwde waterdruk.

3.2 Gevolgen schematisering basismodel

Voor het bepalen van de gevolgen van de instroom via de inspectieputten wordt deze abstractie onder de loep genomen aan de hand van rekencellen. De rekencellen in het rekenrooster zijn homogeen van grootte en hebben een resolutie van 10 x 10 meter. De rekencellen in het subgrid hebben de afmeting van 0,5 bij 0,5 meter. Voor rekencellen waarin zich in werkelijkheid straatkolken zouden bevinden, wordt er onderscheid gemaakt tussen twee situaties: rekencellen waarin zich één of meerdere inspectieput(ten) bevinden en rekencellen zonder een inspectieput.

3.2.1 Rekencellen met inspectieput(ten)

De eerste situatie die wordt uitgelicht is een rekencel waarin zich een 'open' inspectieput bevindt en waar in werkelijkheid in dezelfde rekencel straatkolk(en) zouden liggen. De instroom via de inspectieput is in dat geval gelijk aan de instroom die via de straatkolken zou plaatsvinden, zoals weergegeven in Figuur 11. Dit is gebaseerd op het feit dat water binnen een rekencel niet over het subgrid stroomt, zoals toegelicht in de laatste alinea van paragraaf 2.2.1 '2D Rooster'. Uit die uitleg volgt dat de instroomlocatie binnen de rekencel geen verschil maakt.



Figuur 11: De interactie met een 'connected' 1D knoop binnen een rekencel

In de onderstelling dat in dezelfde rekencel de instroom via de inspectieput gelijk is aan de instroom die via de straatkolken zou plaatsvinden, is kennis van de volgende aannames noodzakelijk:

- Voor het bepalen van de instroomhoogte van de inspectieputten is niet de instroomhoogte van de straatkolken gebruikt. Het hoogteverschil is berekend op basis van een afschot van 1:200 en een wegbreedte van 10 m. Vanzelfsprekend hebben echter niet alle wegen een afschot van 1:200 en zijn niet alle wegen 10 m breed. Zodoende is 20 cm slechts een grove benadering.
- Het instroomoppervlak van de inspectieputten is niet aangepast naar het gezamenlijk instroomoppervlak van de bijbehorende straatkolken. Het instroomoppervlak van een inspectieput zonder deksel is vele malen groter dan het instroomoppervlak van een straatkolk. De maximale instroomcapaciteit van de straatkolk of kolkleiding is daarmee buiten beschouwing gelaten.
- Ten derde is de bergingscapaciteit van de straatkolken en de bergingscapaciteit van de kolkleidingen verwaarloosd. Die berging is 0,3 mm, geschat op basis van 4500 straatkolken en 4500 straatkolkleidingen van 5 m.

3.2.2 Rekencellen zonder inspectieput

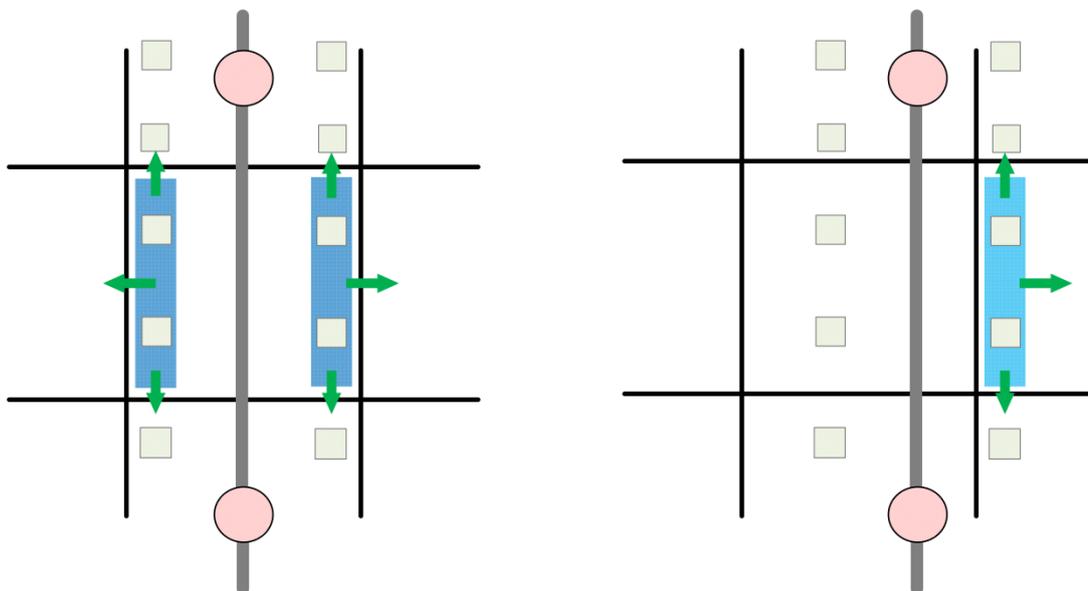
Een inspectieput is ongeveer iedere 40 meter aanwezig en een straatkolk iedere 20 meter. Daardoor zijn er rekencellen zonder een inspectieput terwijl die rekencellen wel straatkolken zouden bevatten. Dit kan leiden tot 'water op straat' dat niet correspondeert met de werkelijkheid. Deze inundatie bevindt zich met name aan één of beide randen van de weg.

In Figuur 12 zijn twee situaties weergegeven van rekencellen waarin wel straatkolken zouden liggen maar waarin geen inspectieput aanwezig is.

In de linker situatie bevindt zo'n rekencel zich tussen twee rekencellen met een inspectieput. Daaraan gevolge treedt inundatie op aan beide randen van de weg. In de rechter situatie bevindt zich een rekencel zonder inspectieput naast een rekencel met wel een inspectieput. Die situatie leidt tot water op straat aan één wegzijde. Aangezien in werkelijkheid zich juist aan de zijdes van de weg straatkolken bevinden is het niet in overeenstemming met de werkelijkheid dat daar inundatie optreedt. Dat geldt voor de situatie waarin de capaciteit van de riolering nog niet is overschreden.

Onderaan in Figuur 12 is te zien dat het water zich bevindt in het laagste punt van het straatprofiel, dat is de locatie waar ook de straatgoot ligt. Aan één kant wordt dit laagste punt ingesloten door de bolling van de weg, aan de andere kant bevindt zich vaak een stoep of hoger gelegen berm.

Bovenaanzicht



Zijaanzicht



■ Locatie van straatkolk

▬ Riolleiding

● Inspectieput

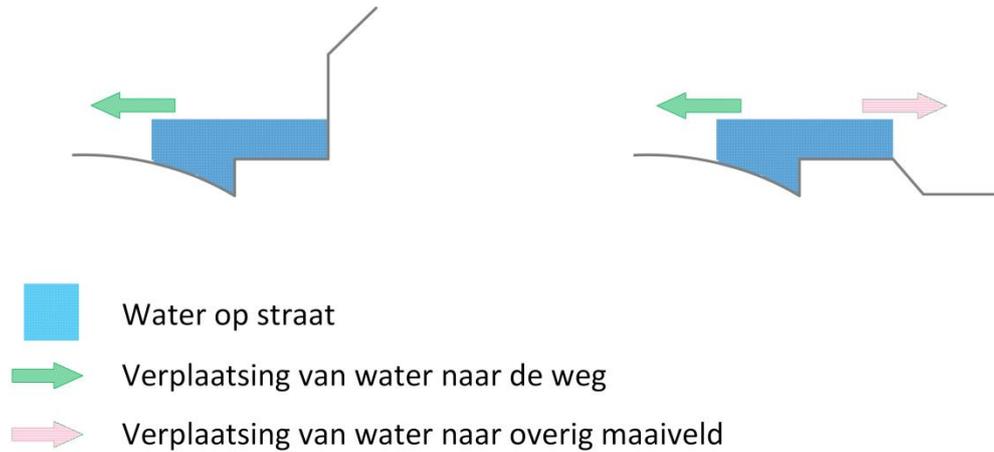
■ Water op straat

➔ Verplaatsing van water tussen rekencellen

Figuur 12: Rekencellen zonder inspectieputten waarin wel straatkolken zouden liggen

Wanneer de verlaging in het straatprofiel deels is gevuld kan het water op verschillende manier verplaatsen. Ten eerste kan het water langs de richting van de straatgoot stromen, dat is in Figuur 12 weergegeven met groene pijlen. Via die weg kan het water alsnog in een rekencel terecht komen waar een inspectieput aanwezig is en de riolering instromen. Dat is te zien in de linkersituatie van Figuur 12. In de rechtersituatie echter bevatten de rekencellen in het verlengde van de straatgoot geen inspectieputten, het water kan dus niet alsnog de riolering instromen.

Wanneer de verlaging in het maaiveld volledig is gevuld dan zal toestromend water naar een andere locatie verplaatsen. In dat geval kan het water de weg op stromen (groene pijlen in Figuur 13) en vervolgens terecht komen in een rekencel met inspectieput. Ook is het mogelijk dat water naar overige delen van het maaiveld stroomt (rode pijl in Figuur 13), bijvoorbeeld naar een grasveld of plein. Het is dus mogelijk dat door het weglaten van straatkolken zowel de weg als overige delen van het maaiveld inunderen in tegenstrijd met de werkelijkheid.



Figuur 13: Water op straat waarbij de verlagingen in het straatprofiel reeds 'gevu'ld' zijn

4 Schematisering variant

In dit hoofdstuk is eerst de verwerking van de aangeleverde straatkolkgegevens beschreven. Vervolgens is de schematisering van de straatkolken en kolkleidingen toegelicht.

4.1 Verwerking straatkolkgegevens

De gegevens van de straatkolken in Lombardijen zijn aangeleverd door het cluster 'Stadsbeheer' van de gemeente Rotterdam. De rioleringsgegevens die gebruikt worden voor hydraulische modellen zijn echter afkomstig van het cluster 'Stadsontwikkeling'. Door het meenemen van straatkolken is het 3Di model opgebouwd uit data afkomstig uit twee verschillende gemeentelijke clusters. De gevolgen daarvan zijn beschreven in 4.1.3 'Consistentie straatkolken met basismodel'.

In de aangeleverde gegevens is onderscheid te maken tussen gegevens per individuele straatkolk en algemene gegevens die op de meeste straatkolken van toepassing zijn.

4.1.1 Gegevens per straatkolk

De ontvangen informatie over de straatkolken bevat vooral beheerinformatie. Dat zijn gegevens als datum van plaatsing, eigenaar en onderhoudsmethode. Van het totaal aan gegevens beschrijft onderstaande informatie daadwerkelijk het object :

- x-coördinaat, y-coördinaat
- Meubilair

De x-coördinaat en de y-coördinaat geven samen de ligging van de straatkolk in het horizontale vlak aan. Op basis van meubilair kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee type straatkolken: 'zij-inlaat' en 'boven-inlaat'. In Figuur 14 is een straatkolk met zij-inlaat weergegeven en in Figuur 15 is een straatkolk met boven inlaat gepresenteerd.



Figuur 14: Straatkolk meubilair met zij instroom



Figuur 15: Straatkolk meubilair met boven instroom

4.1.2 Algemene gegevens

Er is algemene informatie over de straatkolkaansluitingen in Rotterdam beschikbaar gesteld (zie bijlage II, Figuur 41). Daaruit volgt dat de leidingen tussen de straatkolken en riolering een diameter hebben van 0,125 m en gemaakt zijn van PVC. Het afschot loopt van 1:50 tot 1:200 en is afhankelijk van de mogelijkheden ter plaatse volgens de functionaris van de Gemeente Rotterdam (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017).

De afmetingen van het meubilair zijn in Nederland vrijwel standaard volgens de functionaris van de Gemeente Rotterdam (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017). In Figuur 42 en Figuur 43 (zie Bijlage II) zijn de afmetingen weergegeven.

4.1.3 Consistentie straatkolken met basismodel

De gegevens van de riolering in het basismodel corresponderen niet volledig met de gegevens van de straatkolken. Dit is een mogelijk gevolg van het feit dat beide gegevenssets apart van elkaar worden beheerd in verschillende gemeentelijke clusters. Het samenvoegen van de gegevens leidt tot twee type locaties waar zich een discrepantie voor lijkt te doen:

1. Locaties waar riolering in het basis model lijkt te ontbreken

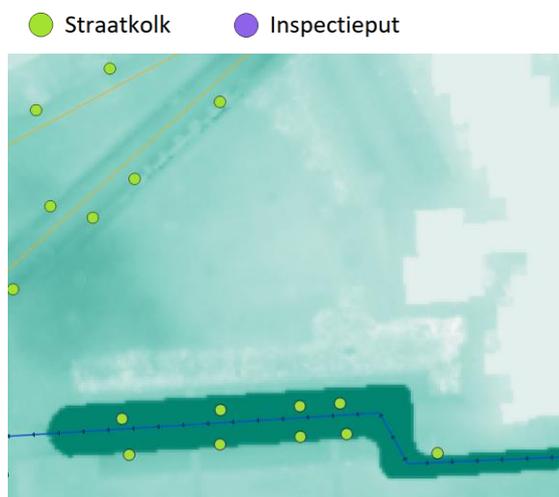
Op deze locaties bevinden zich straatkolken in Lombardijen volgens de aangeleverde gegevens. Op basis daarvan wordt daar ook riolering verwacht waaraan de straatkolken toebehoren. Die riolering is echter niet aanwezig op de betreffende locaties. In Figuur 17 is een voorbeeld weergegeven, in Figuur 45 (zie Bijlage II) zijn al deze locaties aangegeven. Twee verschillende verklaringen zijn opgesteld voor de locaties waar riolering in het basis model lijkt te ontbreken:

A. De straatkolk voert af naar oppervlaktewater

Verschillende straatkolken zonder riolering hebben een watergang in de nabije omgeving. Bij deze straatkolken is er vanuit gegaan dat deze afvoeren op de watergang, dat wordt beaamd door de functionaris van de Gemeente Rotterdam (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017). Deze verklaring wordt versterkt door het feit dat in sommige gevallen groepen straatkolken evenwijdig en op gelijke afstand van het kanaal liggen. Deze straatkolken zijn buiten beschouwing gelaten. Hier is voor gekozen omdat het relatief complex is om de straatkolken op een watergang aan te sluiten en het slechts enkele straatkolken betrof.

B. De straatkolk voert af naar verder gelegen riolering

Een college van Nelen & Schuurmans heeft de ervaring dat straatkolkleidingen een lengte kunnen hebben van 140 meter (Dave Deckers, persoonlijke communicatie, mei 2017). Op basis van deze ervaring zijn de betreffende straatkolken verbonden met de riolering wanneer de afstand tot de riolering maximaal 140 meter bedraagt.



Figuur 16: Straatkolken die afvoeren op een watergang



Figuur 17: Voorbeeld van straatkolken die afvoeren naar verder gelegen riolering

2. Locaties waar straatkolken lijken te ontbreken

Op deze locaties bevindt zich riolering inclusief inspectieputten in het basismodel. Deze inspectieputten zijn 'open' wat betekent dat op die plek water de riolering in kan stromen. Op basis daarvan wordt verwacht dat op deze locaties ook straatkolken aanwezig zijn. Echter, bevatten de aangeleverde gegevens op enkele van die locaties geen straatkolken. In Figuur 17 is een voorbeeld weergegeven, in Figuur 44 (zie Bijlage II) zijn alle locaties aangegeven.

Op deze locaties vindt in het basismodel wel instroom in de riolering plaats maar zou in de variant op het basismodel geen instroom in de riolering plaatsvinden door het ontbreken van straatkolken. Met behulp van Google Maps is gekeken of op de betreffende locaties straatkolken aanwezig zijn. In 14 van de 31 gevallen zijn straatkolken waargenomen, in 8 gevallen niet en in 9 gevallen was het niet zichtbaar. Hieruit volgt dat er twee verklaringen van toepassing zijn:

- A. Er missen straatkolken in de aangeleverde gegevens of er zitten fouten in de aangeleverde coördinaten van de straatkolken.
- B. In het basismodel is instroom in de riolering via inspectieputten mogelijk op locaties waar in werkelijkheid geen instroom mogelijk is.

Op de eerste verklaring kan worden geanticipeerd door op die locaties de instroom via de inspectieputten te behouden. De tweede verklaring geeft een fout aan in het basismodel en de oplossing vraagt dus ook om een aanpassing in het basismodel. Fouten die zich voordoen in het basismodel zijn behouden in de variant op het basismodel. Op die manier geven de resultaten inzicht in het toevoegen van straatkolken en niet in het elimineren van andere fouten. Daarom is op alle locaties waar straatkolken lijken te ontbreken, de instroom via de inspectieputten behouden.

4.2 Schematisering straatkolken

Voor de toevoeging van straatkolken aan een 3Di model zijn voor iedere straatkolk de volgende gegevens nodig:

- Maaiveldhoogte
- Instroomhoogte
- Bodemhoogte
- Instroomoppervlak (lengte, breedte, vorm)
- Interactietype

4.2.1 Maaiveldhoogte en instroomhoogte

De maaiveldhoogte is de positie van de bovenkant van een straatkolk ten opzichte van NAP (Normaal Amsterdam Peil). Voor iedere straatkolk is de maaiveldhoogte bepaald op basis van de locatie in het DEM (Digital Elevation Model). Het DEM is een digitale weergave van de maaiveldhoogte op basis van het AHN (Algemeen Hoogtebestand Nederland). Rondom iedere straatkolk is binnen een straal van 1 meter het laagste punt in de DEM berekend. Die waarde ten opzichte van NAP is toegekend aan de maaiveldhoogte.

Voor de straatkolken is de instroomhoogte gelijk genomen aan de maaiveldhoogte, zowel bij meubilair met zij-instroom als meubilair met boven-instroom. Een straatkolk met zij-instroom bevindt zich in de rand van bijvoorbeeld een trottoir. De buffer rondom de kolk zal in dat geval zowel het trottoir als de lager gelegen weg bevatten. Aangezien het laagste punt in het DEM binnen de buffer is genomen, zal de instroomhoogte overeenkomen met de maaiveldhoogte van de weg en niet de maaiveldhoogte van het trottoir. Dat is in overeenstemming met de werkelijkheid.

Voor iedere straatkolk is het verschil in instroomhoogte berekend tussen de straatkolk en de verbonden inspectieput. In Figuur 33 (zie Bijlage II) is de verdeling weergegeven van de relatieve instroomhoogte van straatkolken ten op zichte van de verbonden inspectieput. Ook is de relatieve instroomhoogte van

de inspectieputten berekend op basis van de verbonden straatkolk met de laagste instroomhoogte, zie Figuur 34 (Bijlage II).

Voor 42 procent van de straatkolken en 44 procent van de inspectieputten geldt dat de relatieve instroomhoogte kleiner is dan (-) 5 centimeter. Opvallend meer straatkolken hebben een hogere instroomhoogte dan de verbonden inspectieput (36 procent). Daarmee corresponderend hebben opvallend meer inspectieputten een lagere instroomhoogte (41 procent).

4.2.2 Bodemhoogte

De bodemhoogte is voor iedere straatkolk bepaald op 0.8 meter onder de maaiveldhoogte. Dat is in overeenstemming met de afmetingen weergegeven in Figuur 42 en Figuur 43 (zie Bijlage II). Variaties in bodemdiepte zijn aanwezig op basis van modeltype en op basis van aanwezig sediment. Deze variaties zijn buiten beschouwing gelaten.

4.2.3 Instroomoppervlak

Volgens de functionaris van de Gemeente Rotterdam (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017). levert het instroomoppervlak van straatkolken in een vlak gebied geen beperking op voor de instroom. Het totale instroomoppervlak van een straatkolk met zijn instroom is 0,03 m² en voor boven instroom is dat 0,07 m².

Om te waarborgen dat ook in 3Di het instroomoppervlak geen beperking vormt is deze relatief groot gemodelleerd. Alle straatkolken zijn gemodelleerd als een vierkant van 40 x 40 cm met een bijbehorend instroomoppervlak van 0,16 m².

4.2.4 Interactietype

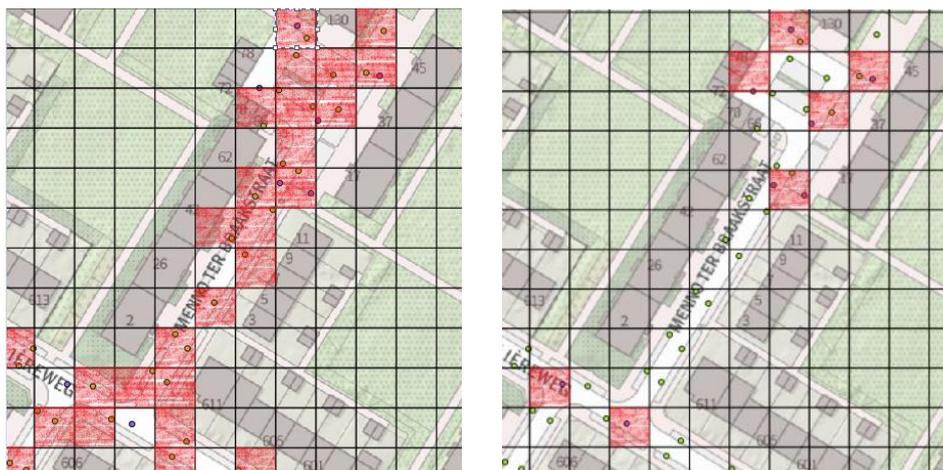
De straatkolken hebben het interactietype 'connected' toegekend gekregen. Naast het toevoegen van de straatkolken en bijbehorende kolkleidingen zijn ook de inspectieputten aangepast. De inspectieputten zijn gesloten. Het interactietype 'isolated' is toegekend aan de inspectieputten waardoor er geen in- of uitstroom meer mogelijk is. Uitzonderingen hierop zijn beschreven in 4.1.3.2 'Locaties waar straatkolken lijken te ontbreken' en 4.3.3 'Verhang'.

Tabel 1: Het aantal rekencellen dat water uit kan wisselen tussen het 1D en het 2D domein

Model	Aantal rekencellen met een 'connected' knoop
Basismodel	1.349
Variant	4.094

Na het toevoegen van de 'connected' straatkolken is het aantal rekencellen dat water uit kan wisselen tussen het 2D domein en het 1D domein toegenomen, zie

Tabel 1. In variant kunnen ruim drie keer zoveel rekencellen water uitwisselen tussen beide domeinen. Ter beeldvorming zijn in Figuur 18 de rekencellen gemarkeerd waarin 1D-2D uitwisseling plaats kan vinden in de variant (links) en in het basismodel (rechts) ter plaatste van de Menno ter Braakstraat.



Figuur 18: Het aantal rekencellen met 1D-2D uitwisseling (rood) in de variant (links) en in het basismodel (rechts) ter plaatse van de Menno ter Braakstraat

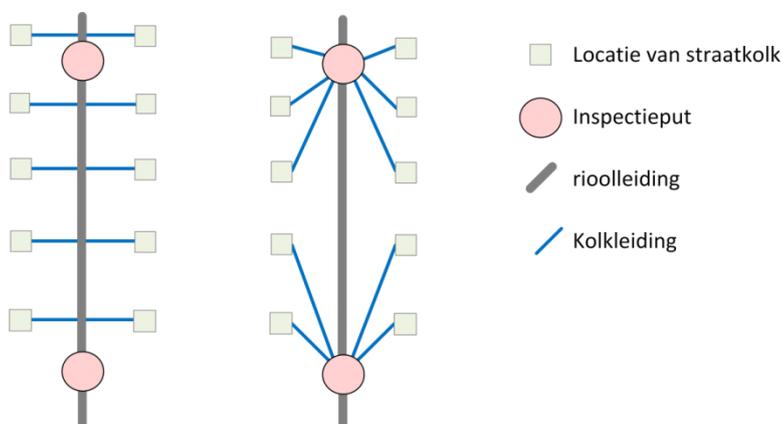
4.3 Schematisering straatkolk aansluitingen

De kolkleiding vormt de verbinding tussen de straatkolken en de riolering. Voor de toevoeging van kolkleidingen aan een 3Di model zijn voor iedere leiding de volgende gegevens benodigd:

- Beginknoop
- Eindknoop
- Leidingprofiel (vorm, diameter, materiaal)
- Verhang (instroomhoogte beginpunt, instroomhoogte eindpunt)

4.3.1 Begin en eindknoop

In Lombardijen zijn de straatkolken loodrecht verbonden met de rioolbuizen, dat is weergegeven in situatie A van Figuur 19. Een buis aansluiten op een andere buis is niet mogelijk zonder een knoop toe te voegen. Immers is in een 1D model een link (leiding) altijd ingesloten door twee knopen. Het toevoegen een grote hoeveelheid knopen heeft een negatieve invloed op de rekentijd, daarnaast wordt het model daarmee complexer en minder overzichtelijk. Bovendien is dat een aanpassing die de modelleur veel tijd kost. Om deze redenen zijn de kolkleidingen niet op de rioolleidingen aangesloten maar op de inspectieputten toebehorend aan de betreffende rioolleiding. Om die reden is voor iedere straatkolk eerst de dichtstbijzijnde rioolleiding bepaald. Vervolgens is van de twee knopen die de link insluiten bepaald welke van beide het dichtste bij de straatkolk ligt. Deze stappen zijn weergegeven in Figuur 20.



Figuur 19: Schematische weergave van de kolkleidingen in werkelijkheid (links) en in het model (rechts)

Voor iedere straatkolk:

- Bepalen van de dichtstbijzijnde link (rioolbuis) aan de straatkolk
- Vaststellen van de twee knopen waartussen de link is begrensd
- Bepalen van de afstanden tussen de twee knopen en de straatkolk
- Vaststellen van de knoop met de kortste afstand tot de straatkolk
- Toevoegen van een link tussen straatkolk en knoop

Figuur 20: Stappenplan voor het toevoegen van kolkleidingen in 3Di

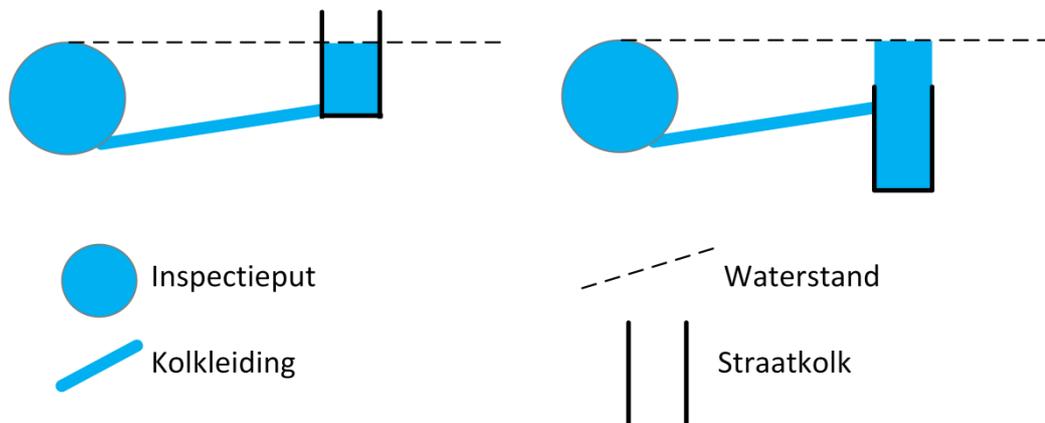
4.3.2 Leiding profiel

Het leidingprofiel is gedefinieerd aan de hand van de vorm, diameter en het materiaal. Voor iedere straatkolk zijn de eigenschappen van de verbindingsbuis gemodelleerd als een ronde PVC buis met een diameter van 0,125 m. Dat is conform de aangeleverde informatie. Variaties zijn buiten beschouwing gelaten omdat hier geen informatie over beschikbaar is.

4.3.3 Verhang

Het verhang is het verschil tussen de instroomhoogte aan het beginpunt van de leiding ten opzichte van de instroomhoogte aan het eindpunt, gedeeld door de afstand. Doordat de kolkleidingen met de inspectieputten worden verbonden zijn de kolkleidingen in het model langer dan in werkelijkheid. Daaraan ten gevolge neemt het verhang van de kolkleidingen af. Voor een zo groot mogelijk verhang is de instroomhoogte van het eindpunt van de kolkleiding zo laag mogelijk gekozen. Daaruit volgend is de instroomhoogte van het eindpunt van de kolkleiding gelijk aan de hoogte van de bodem van de inspectieput.

De instroomhoogte van het beginpunt van de kolkleiding is bepaald als gelijk aan de bodemhoogte van de straatkolken. Op die manier bevindt zich boven de kolkaansluiting een buffer van 80 cm hoogte. Met de aanname dat rioolleidingen geen diameter groter dan 80 cm hebben, zal bij een volledig gevulde rioolbuis en een kolkleiding met een zeer klein verhang het water niet via de straatkolk de riolering uitlopen, zie Figuur 21. Met deze schematisering wordt ingespeeld op het kleine verhang dat kan ontstaan doordat de kolkleidingen in het model langer zijn dan in werkelijkheid.



Figuur 21: Kolkleiding met minimaal verhang met een instroomhoogte in het begin punt halverwege de straatkolk (rechts) en een beginpunt op bodemhoogte van de straatkolk (links)

Voor alle kolkleidingen is gecontroleerd of het verhang positief is. Wanneer dat niet het geval was heeft de straatkolk het interactie type 'isolated' verkregen zodat er geen water uit de riolering kan stromen via de betreffende straatkolk. In enkele gevallen is daarvoor gecompenseerd door de bijbehorende inspectieput open te laten via het interactie type 'connected'.

5 Resultaten

In dit hoofdstuk is eerst de waterbalans beschreven. Daarna zijn de berekende waterdieptes gepresenteerd aan de hand van waterdiepte kaarten en waterdiepteverschil kaarten.

5.1 Waterbalans

Tabel 2: De onderdelen berging [m³], infiltratie [m³], weggepompt water [m³] en uitstroom aan grenzen [m³] van de waterbalans van de in 3Di uitgevoerde berekeningen

	Bui 08		Neerslaggebeurtenis 23 juni 2016	
	Basismodel	Variant	Basismodel	Variant
Δ berging in 2D [m3]	25737	23993	36856	35282
Δ berging in 1D [m3]	2288	2630	4012	4722
Infiltratie [m3]	2619	2565	7696	7620
Weggepompt water [m3]	32316	33818	53427	54562
Uitstroom aan grenzen [m3]	27	47	94	119
<i>Berging in 2D eind van simulatie [%]</i>	32.3	30.1	46.2	44.2

Aan de hand van de logboek bestanden van de 3Di berekeningen is een waterbalans berekend voor de vier uitgevoerde simulaties (zie Tabel 7, Bijlage III). Enkele onderdelen uit de waterbalans zijn weergegeven in Tabel 2. In de waterbalans is te zien dat de inloop naar het 1D domein is toegenomen na het meenemen van straatkolken. De afname van de berging in het 2D-domein aan het einde van de simulatie is daarop een logisch vervolg. Ook het gegeven dat zowel het weggepompt volume als de uitstroom aan de grenzen is toegenomen is een logisch gevolg van de toegenomen inloop naar het 1D domein. Het zelfde geldt voor de afname van de hoeveelheid infiltratie. Afname van infiltratie betekent dat het aantal geïnundeerde locaties of de inundatieperiode is afgenomen (Dingman, 2008).

In de waterbalans is het 1D domein een combinatie van riolering en watergangen. Door middel van overstorten staat de riolering in verbinding met de watergangen. Uit Tabel 3 volgt dat na het meenemen van straatkolken het overstortdebiet is toegenomen. Toename van overstortdebiet is het gevolg van een grotere overschrijding van de afvoercapaciteit van de riolering. Daaruit volgt dat na het meenemen van straatkolken meer neerslag de riolering in loopt.

Tabel 3: Cumulatieve overstortdebiet [m³] van de riolering naar de watergangen in de gehele simulatie

	Basismodel	Variant
Bui 08	4.465 m ³	8.642 m ³
Neerslaggebeurtenis 23 juni 2016	11.860 m ³	18.988 m ³

5.2 Waterdiepte kaarten

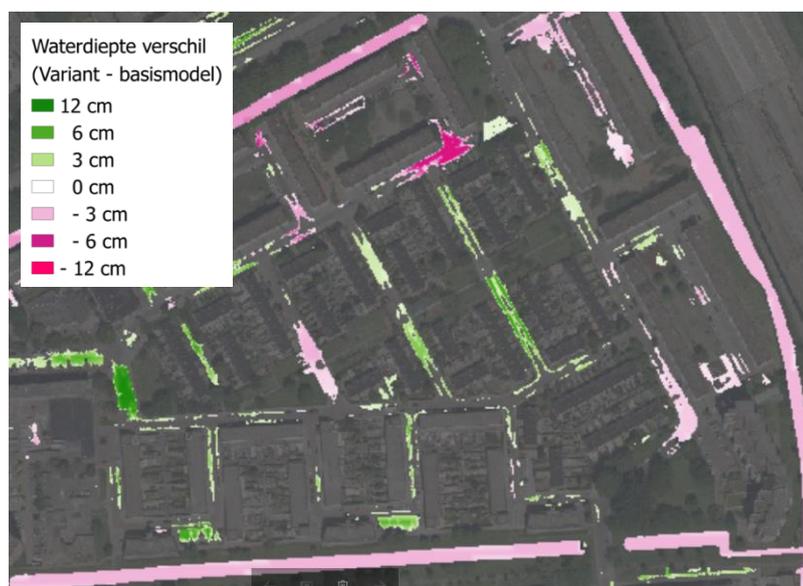
Het basismodel en de variant zijn beide met twee verschillende neerslaggebeurtenissen doorgerekend: Bui 08 en de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016. De start van de neerslaggebeurtenissen is gelijk aan de start van de simulaties. De totale simulatietijd is 2,5 uur. De resultaten zijn weggeschreven in tijdstappen van 5 minuten.

Ten eerste is er voor de twee neerslaggebeurtenissen een maximale waterdiepte kaart opgesteld voor zowel het basismodel als voor de variant. Een maximale waterdiepte kaart is verkregen door per rekencel de grootste waterdiepte te bepalen die tijdens de simulatie heeft plaatsgevonden. De waterdieptes in een maximale waterdiepte kaart horen daardoor niet toe aan één tijdstap.

Ten gevolge van bui 08 is de maximale waterdiepte in het basismodel te zien in Figuur 26 en de maximale waterdiepte in de variant te zien in Figuur 27 (zie Bijlage I). Dezelfde kaarten zijn weergegeven voor de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016 in Figuur 28 en Figuur 29 (zie Bijlage I).

Naast maximale waterdiepte kaarten, kunnen dergelijke kaarten ook de waterdiepte op één tijdstap weergeven. Dit gebeurt interactief in QGIS met behulp van de 3Di Tool-plugin (versie 0.9.3).

5.3 Waterdiepte verschilkaarten



Figuur 22: Verschil in maximale waterdiepte [cm] met bui 08, ingezoomd op de Liviusstraat

Voor het inzicht in de verschillen tussen de waterdiepte kaarten van het basismodel en van de variant zijn er waterdiepte verschil-kaarten opgesteld. Waterdiepte verschil-kaarten zijn verkregen door per subgrid cel de waterdiepte in het basismodel van de waterdiepte in de variant af te trekken.

Voor alle maximale waterdiepte kaarten zijn waterdiepte verschil-kaarten opgesteld, zie Figuur 30 en Figuur 31 (Bijlage I). De groene kleuren geven een kleinere waterdiepte aan in de variant ten opzichte van het basismodel. De paarse kleuren een grotere waterdiepte. Ook voor de waterdiepteverschil kaarten geldt dat in QGIS de kaarten per tijdstap kunnen worden bekeken.

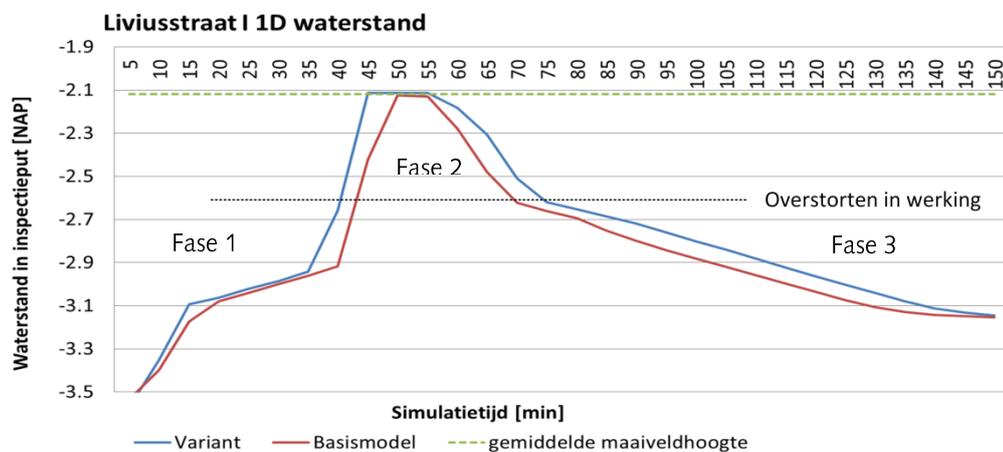
De in Bijlage II gepubliceerde waterdiepte kaarten en waterdiepteverschil kaarten bevatten het gehele studiegebied. Om gedetailleerder het resultaat waar te nemen wordt er in QGIS ingezoomd op deze kaarten. Om te illustreren waar waterdiepteverschil op straatniveau wordt waargenomen is in Figuur 22 een uitsnede van Figuur 31 ter plaatse van de Liviusstraat gepubliceerd.

6 Analyse

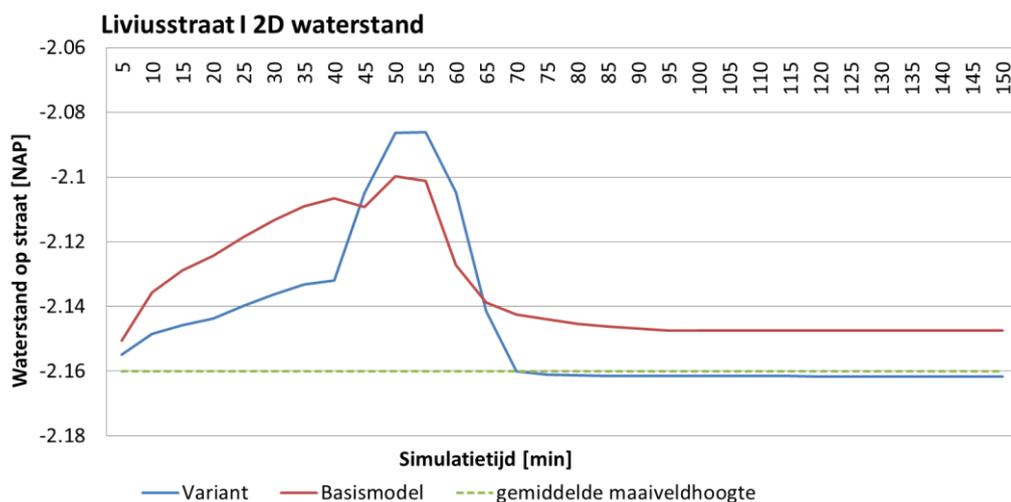
In dit hoofdstuk is eerst het verloop van de waterdiepte over de simulatietijd geanalyseerd. In de daaropvolgende paragraaf is het waterdiepteververschil gekwantificeerd. Tot slot zijn de factoren toegelicht die bijdragen aan een verschil in berekende waterdiepte.

6.1 Verloop waterdiepte over de simulatietijd

Het water op straat in de variant is met water op straat in het basismodel vergeleken. Op basis van bui 08 worden de constatering toegeleucht met een voorbeeldstraat representatief voor Lombardijen, de Liviusstraat. In Figuur 23 is voor de Liviusstraat de waterdiepte in de riolering weergegeven en in Figuur 24 de waterdiepte op straat.



Figuur 23: De 1D waterstand [NAP] weergegeven op basis van de simulatietijd [min] ter plaatse van de Liviusstraat



Figuur 24: De 2D waterstand [NAP] weergegeven op basis van de simulatietijd [min] ter plaatse van de Liviusstraat

De waterdiepte in het 1D domein geeft het effect weer van de neerslaggebeurtenis op de riolering. Op basis van de 1D waterstand kan de simulatietijd worden opgedeeld in drie achtereenvolgende fases:

- In de eerste fase wordt de riolering gevuld. Het begin van fase één is gelijk aan het begin van de neerslaggebeurtenis. In Nederland is de standaard rioolbergings gemiddeld 7 mm (de Vaan, 2015). De simulatiestap waarop de riolering theoretisch gevuld kan zijn is weergegeven op 25 minuten (zie Tabel 8, Bijlage III). Fase twee loopt tot aan het moment dat de riolering de maximale bergingscapaciteit heeft bereikt en de overstorten in werking treden.
- Gedurende fase twee is de inloop naar de riolering groter dan de afvoercapaciteit van de riolering. In deze fase zijn de overstorten in werking. De in- en uitwerking treding van de overstorten is waar te nemen als een (kleine) knik in de grafiek. Gedurende deze fase kan neerslag uit de riolering de straat op stromen, dat wordt gekenmerkt door plotselinge afvlakking van de grafieklijn. Gedurende deze afvlakking vindt er uitstroom plaats naar het maaiveld.
- Fase drie begint wanneer het water op straat stabiliseert, overstorten niet meer actief zijn en de riolering wordt leeggepompt. In deze fase is de neerslaggebeurtenis voorbij.

De waterstand in de riolering is in de variant continu hoger dan in het basismodel. In de Liviusstraat, zie Figuur 23, is halverwege fase één een knik waar te nemen in de grafieklijn. Hoogstwaarschijnlijk wordt deze knik veroorzaakt door het bergingsprofiel van de riolering. In fase één vult de riolering sneller in de variant, dat is te zien in Figuur 23 aan de relatief steile grafieklijn. Daarnaast stroomt in fase één de neerslag op het maaiveld makkelijker af in de variant, dat is te zien in Figuur 24 aan de relatief flauwe grafieklijn.

In fase twee is uitstroming waar te nemen, dat is niet representatief voor alle straten in Lombardijen. Wanneer er geen uitstroom naar het maaiveld plaatsvindt, bereikt de waterstand niet de maaiveldhoogte en vlakt de grafieklijn niet af. Fase twee wordt veroorzaakt door de piek in bui 08. Uit figuur Figuur 32 (zie bijlage II) blijkt dat fase twee inderdaad overeenkomt met de periode waarin de overstort die aangesloten is op de Liviusstraat actief is. Wanneer uitstroming plaatsvindt bepaalt dat de maximale waterstand op het maaiveld, te zien in Figuur 24.

De waterstand in het 2D domein, weergegeven in Figuur 24, is in de variant overwegend lager dan in het basismodel. In fase één en drie is de verhouding tussen locaties met waterdiepte toename en locaties met waterdiepte afname grofweg 9:1. In fase twee is die verhouding 7:3. In de berekening hiervan zijn alleen de locaties meegenomen waar het waterdiepteverschil tussen het basismodel en de variant meer dan 2 cm bedraagt. De resultaten van deze berekening staan in Tabel 4 en Tabel 5 als percentage.

Tabel 4: De verdeling [%] tussen waterdiepte toename en waterdiepte afname ten gevolge van bui 08

Waterdiepte in de variant ten opzichte van het basismodel is...	25 minuten (Fase 1)	Maximale waterdiepte (Fase 2)	150 minuten (Fase 3)
...afgenomen [%]	93	83	91
...toegenomen [%]	8	17	9

Tabel 5: De verdeling [%] tussen waterdiepte toename en waterdiepte afname ten gevolge van de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016

Waterdiepte in de variant ten op zichte van het basismodel is...	10 minuten (Fase 1)	Maximale waterdiepte (Fase 2)	150 minuten (Fase 3)
...afgenomen [%]	85	72	88
...toegenomen [%]	15	28	12

De vulling van de riolering verloopt sneller na het mee schematiseren van straatkolken waardoor aan het begin van de bui de waterdiepte minder snel toeneemt in Figuur 24. Het mee schematiseren van straatkolken leidt er ook toe dat na de piekintensiteit van een bui de toegenomen waterdiepte sneller weer afneemt. Dat is in Figuur 24 te zien aan de grafieklijn van de variant die steiler daalt. Daarnaast blijft in het basismodel water op straat staan terwijl in de variant de waterdiepte in de Liviusstraat het maaiveld nadert.

6.2 Kwantificering waterdiepteverschil

In de kwantificering van het waterdiepteverschil tussen het basismodel en de variant wordt onderscheid gemaakt tussen water op straat en het waterpeil in de watergangen.

6.2.1 Water op straat

Voor de subgrid cellen waarin de waterdiepte in de variant met twee of meer centimeter verschilt van de waterdiepte in het basismodel zijn histogrammen opgesteld. Voor bui 08 zijn de histogrammen weergegeven in Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37 (zie Bijlage II). De Histogrammen behorend aan de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016 zijn weergegeven in Figuur 38 en Figuur 39 en Figuur 40 (zie Bijlage II).

Op basis van de histogrammen is het interval bepaald waarbinnen 90 procent van de subgrid cellen met een waterdiepteverschil ligt. Dit is apart uitgevoerd voor de subgrid cellen met waterdiepte toename en voor de cellen met waterdiepte afname. Waterdiepte verschillen kleiner dan twee centimeter zijn wederom buiten beschouwing gelaten. De resultaten van deze berekening staan weergegeven in Tabel 10 en Tabel 11 (zie Bijlage III). De waterdiepteverschillen zijn voor beide buien overeenkomstig. Grofweg is er in fase twee een waterdiepteverschil van 0 tot 5 centimeter. In fase één en drie is grofweg een waterdiepteverschil van 0 tot 10 centimeter.

Het 90 procent interval is gekozen op basis van het feit dat in de histogrammen is af te lezen dat waterdiepte waardes hierbuiten relatief ver uit elkaar liggen. De waterdiepteverschil intervallen van twee cm buiten de 90 procent grens bevatten relatief weinig waarden, daarop steunend zijn deze waarden bestempeld als uitschieters.

6.2.2 Waterdiepte watergangen

In de watergangen is overwegend toename van de waterdiepte waar te nemen. Echter, het verschil in waterdiepte is kleiner dan het verschil in waterdiepte op en rondom wegen. Het verschil in waterdiepte ligt binnen het interval van -3 tot 3 centimeter.

De peilstijging van enkele centimeters geeft een vertekend beeld. Uit Tabel 3 volgt dat de overstortdebieten bijna zijn verdubbeld. Door de bergingscapaciteit en het brede profiel van de watergangen is de peilstijging klein. De overstortdebieten laten echter zien dat het effect van straatkolken aanzienlijk is op de instroom naar de watergangen.

6.3 Locaties met waterdiepteverschil

Op de waterdiepteverschil kaarten is waar te nemen dat fase twee de meeste locaties met een verschil in waterdiepte bevat, daaropvolgend fase drie en daarna fase één. In Tabel 9 (zie Bijlage III) is voor iedere fase het aantal subgrid cellen weergegeven met een waterdiepteverschil groter dan twee cm tussen het basismodel en de variant. In Tabel 6 zijn dezelfde gegevens relatief ten op zichte van fase twee gepresenteerd.

Tabel 6: Het aantal subgrid cellen [%] met een waterdiepte verschil groter dan twee cm tussen het basismodel en de variant relatief weergegeven ten op zichte van de maximale waterdiepte

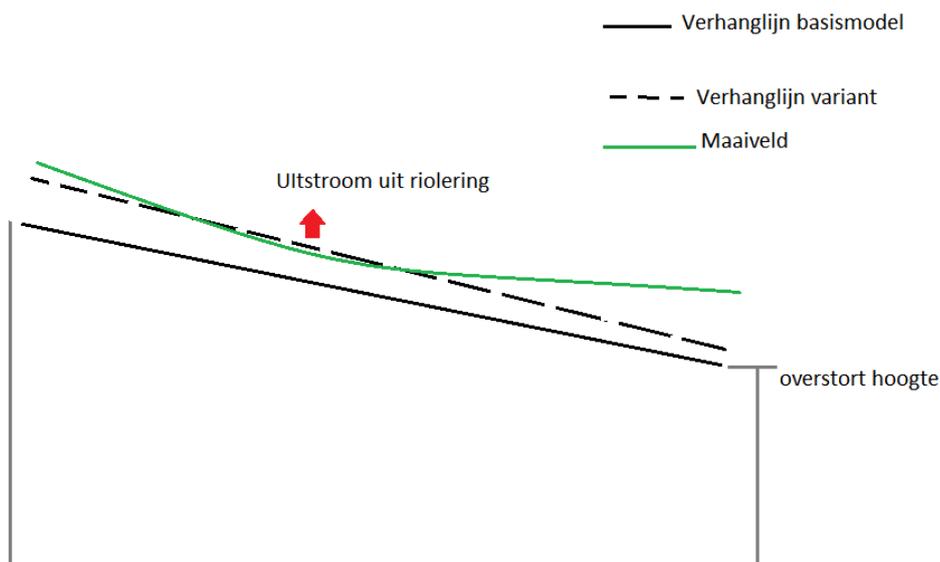
Neerslagebeurtenis	25 minuten/ 10 minuten (fase 1)	Maximale waterdiepte (fase 2)	150 minuten (fase 3)
Bui 08	55 %	100 %	82 %
23 jun 2016	42 %	100 %	99 %

De locaties waar de waterdiepte is afgenomen alsmede de locaties waar de waterdiepte is toegenomen bevinden zich met name in de laagste delen van het straatprofiel, dat is vaak aan de zijkant van de weg. Dit is waar te nemen in de in hoofdstuk 5 'Resultaten' gepresenteerde waterdiepteverschil kaarten.

6.4 Verhanglijn riolering

De waterstand in de riolering kan worden beschreven aan de hand van de verhanglijn. De verhanglijn is het verloop van de waterstand over het lengteprofiel van de leidingen.

Na het meenemen van de straatkolken is de verhanglijn verhoogd. In Figuur 23 is bijvoorbeeld een continu hogere waterstand in de riolering te zien. Bovendien volgt de verhoging van de verhanglijn uit de combinatie van peilverhoging in de watergangen en toename van de inloop naar de riolering. De peilstijging is waar te nemen in de waterdiepte verschilkaarten, de toegenomen 1D inloopt volgt uit de waterbalans (zie Tabel 7, Bijlage III).



Figuur 25: Illustratie van de verhanglijn in de riolering geschematiseerd als bakje, in combinatie met een overstort en het maaiveld.

Wanneer de verhanglijn lager is dan de instroomhoogte kan er inloop naar de riolering plaatsvinden. Andersom, wanneer de verhanglijn hoger is dan de instroomhoogte vindt er uitstroom uit de riolering plaats door opgebouwde druk (Dingman, 2008). Dit is geïllustreerd in Figuur 25, waar de riolering is geschematiseerd als een bak met een overstorthoogte.

De uitstroom uit de riolering naar aanleiding van een verhoogde verhanglijn wordt beïnvloed door de instroomhoogte en door het aantal rekencellen met uitwisselingspunt. Een lagere instroomhoogte betekent dat de verhanglijn eerder de 1D-2D uitwisselingshoogte bereikt. Meer rekencellen met een 1D/2D uitwisselingspunt vergroot het aantal locaties waar de verhanglijn boven de instroomhoogte uit kan komen.

7 Discussie

In dit hoofdstuk is er interpretatie gegeven aan de resultaten. Daarnaast zijn de beperkingen van dit onderzoek beschreven. Op basis van de beperkingen zijn aanbevelingen voor vervolg onderzoek genoemd.

Voor dit onderzoek zijn verschillende neerslaggebeurtenissen gebruikt, zowel een standaard bui waarop de riolering is getoetst als een daadwerkelijk plaatsgevonden bui. Het studiegebied Lombardijen is representatief voor vele andere Nederlandse stedelijke omgevingen, op basis van ruimtelijke inrichting, het rioleringsplan en het verhang van het maaiveld. Zodoende kan worden gesteld dat bij een herhaling van dit onderzoek voor andere wijken vergelijkbare resultaten zullen worden verkregen en de resultaten van dit onderzoek valide zijn.

Desalniettemin bevat het studiegebied in dit onderzoek geen hellend gebied. Lujtelaar (2014) beschrijft dat in hellend gebied water langs de straatkolken stroomt. In dat geval zal het instroomoppervlak mogelijk van grotere invloed zijn op de instroom naar de riolering. In het 3Di model van Lombardijen is de instroomcapaciteit van het straatkolkmeubilair buiten beschouwing gelaten. Daarnaast zal in hellend gebied neerslag door stroming een groter deel van het maaiveld passeren en dus mogelijk meer rekencellen betreden dan in een vlak gebied. Het effect van het uitbreiden van het aantal rekencellen met 1D-2D uitwisseling is dan mogelijk kleiner. Op basis van deze informatie dient te worden gesteld dat de verkregen resultaten in dit onderzoek mogelijk niet valide zijn voor hellend gebied. Vervolgonderzoek naar het meenemen van straatkolken in hellend gebied wordt daarom aanbevolen.

Het moet worden opgemerkt dat de berekende waterdieptes niet gevalideerd zijn met de werkelijkheid. Gemeten waterdieptes zijn niet beschikbaar. Desalniettemin zijn de resultaten voorgelegd aan een gebiedsexpert, de functionaris van de Gemeente Rotterdam, en beoordeeld als betrouwbaar (A. Kemeling, persoonlijke communicatie, 5 mei 2017).

De resultaten bevestigen dat door de toename van rekencellen met 1D-2D uitwisseling de inundatie op de laagste delen van het straatprofiel afneemt. De afname van waterdiepte de laagste delen van het straatprofiel is in lijn met de verwachtingen, beschreven in 3.2.2 'Rekencellen zonder inspectieput'.

Ook de aanwezige toename van waterdiepte is niet in overeenstemming met de verwachting dat de waterdiepte afneemt. Op locaties met waterdieptetoename is veelal uitstroom uit de riolering waar te nemen. De verhanglijn in de riolering is verhoogd en is het verhang van de waterstand is toegenomen. Daarnaast kunnen meer rekencellen neerslag uitwisselen tussen het maaiveld en de riolering en is de instroomhoogte beter beschreven. Deze combinatie heeft op enkele locaties het gevolg dat water uit de riolering stroomt.

In de analyse van water op straat zijn verschillen tot twee centimeter buiten beschouwing gelaten. Deze ondergrens is gebaseerd op het feit dat het grote aantal rekencellen met een verschil kleiner dan 2 centimeter niet in verhouding staan tot het aantal rekencellen met een groter verschil. Op die manier vallen de resultaten niet weg tegen de kleine waterdieptever verschillen.

Ter plaatse van de watergangen tonen de resultaten zowel toename als afname van waterdiepte aan. Het waterdieptever verschil is klein in verhouding tot de waterdiepte in de watergangen. De toename van waterdiepte is het gevolg van toegenomen inloop naar de riolering wat het overstortdebiet verhoogd.

In de waterbalans is waar te nemen dat de hoeveelheid neerslag is toegenomen in de variant met 0,1 procent (bui 08) en 0,2 procent (neerslaggebeurtenis van 23 juni). Die toename is dusdanig klein dat het effect op de berekende waterdiepte niet waar te nemen is. Wanneer in 3Di stromingssnelheden groter worden, dan worden in de rekenkern de rekenstappen verkleind. Tussen deze rekenstappen vindt interpolatie van de resultaten plaats. Door het verschil in interpolatiestappen kunnen volumes aan het einde van de berekening verschillen (persoonlijke communicatie, Martijn Siemerink, 20 juni 2017). Gezien de grotere uitwisselingssnelheid in de variant is het aannemelijk dat de rekenstappen zijn verkleind. De volumefout is voor beide neerslaggebeurtenissen gelijk gebleven en heeft zodoende geen invloed op de resultaten. Deze volumefout is bovendien dusdanig klein dat het model volumebehouden mag worden genoemd (persoonlijke communicatie, Martijn Siemerink, 20 juni 2017).

In dit onderzoek zijn de straatkolken verbonden met de dichtstbijzijnde inspectieput van de dichtstbijzijnde rioolleiding. In enkele gevallen is de dichtstbijzijnde rioolleiding niet de leiding waarnaar de straatkolk in werkelijkheid op afvoert. Gezien het geringe aantal foute verbinden is het effect hiervan op de resultaten verwaarloosbaar. Het is aanbevolen om in vervolgonderzoek de mogelijkheden te bekijken om uit de aangeleverde gegevens als straatnamen en straatcodes af te leiden bij welke rioolleidingen de straatkolken behoren. Weliswaar zal hiermee niet de modeluitkomst de werkelijkheid beter benaderen maar wel het model zelf.

Door het meenemen van straatkolken is de uitwisseling tussen het maaiveld in de riolering versneld, beschreven in hoofdstuk 6 'Analyse', op basis van de toegenomen helling in de waterdiepte-tijd grafieken. Aan dit resultaat liggen het aantal 1D-2D uitwisselingspunten en de instroomcapaciteit via de kolkleidingen ten grondslag. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat dit onderzoek zich niet heeft gericht op de juiste beschrijving van de afvoer capaciteit van deze straatkolkleidingen. Doordat de kolkleidingen in het model langer zijn dan in werkelijkheid is het verhang van de leiding afgenomen. Verhang heeft invloed op de hydraulische eigenschappen van een leiding zoals maximaal debiet (Wavin, 2016). Compensatie voor het afgenomen verhang is niet onderzocht. Het is aanbevolen om in vervolgonderzoek te bekijken of het afgenomen verhang van de kolkleidingen verwaarloosbaar is.

De informatie over de kolkleidingen in Lombardijen is beschikbaar en eenduidig. Het precieze instroomoppervlak van de straatkolken daarentegen is afhankelijk van het meubilair. Door de meerdere openingen is het instroomoppervlak bovendien complex om precies te beschrijven. Daarom is de maximale instroomcapaciteit bepaald door het profiel, diameter en materiaal van de kolkleiding. Het instroomoppervlak oppervlak van de straatkolken is vergroot zodat deze niet beperkend is voor de instroomcapaciteit. De keuze is gebaseerd op het gegeven dat het instroomoppervlak in werkelijkheid geen beperking vormt.

Met inloop via inspectieputten verloopt de 1D-2D uitwisseling via enkel een knoop (inspectieput). Na het schematiseren van straatkolken verloopt de 1D-2D uitwisseling via de combinatie knoop (straatkolk) en link (kolkleiding). De link maakt het mogelijk om het instroomdebiet naar de riolering te berekenen per straatkolk. Bovendien is het via de links eenvoudig te analyseren of neerslag de riolering in- of uitloopt.

Op basis van berekende waterdiepte worden vaak aanvullende analyses uitgevoerd als het bepalen van de begaanbaarheid van wegen en het bepalen van kwetsbare panden. Het is aanbevolen om te onderzoeken wat het verschil in waterdiepte voor effect heeft op deze aanvullende analyses.

In dit onderzoek heeft het toevoegen van straatkolken (knopen) en kolkleidingen (links) niet geleid tot toename van de rekentijd. Dat betekent dat in het gebruikte model andere rekenprocessen de maatgevende factor vormen voor de rekentijd (persoonlijke communicatie, Arnold van 't Veld, Nelen & Schuurmans, 26 juni 2017). De verwachting is dat de rekentijd niet significant zal toenemen.

8 Conclusie

De conclusie geeft antwoord op de hoofdvraag: *Welk effect heeft het toevoegen van straatkolken op de berekende waterdiepte in een 3Di model van Lombardijen?*

De uitwisseling tussen maaiveld en riolering is versneld na het meenemen van straatkolken. De interactie tussen het maaiveld in de riolering is vergroot en de inloopvertraging is afgenomen. De vulling van de riolering verloopt zodoende sneller na het mee schematiseren van straatkolken waardoor aan het begin van de bui de waterdiepte minder snel toeneemt. Het mee schematiseren van straatkolken leidt er ook toe dat na de piekintensiteit van een bui de tegenomen waterdiepte sneller weer afneemt.

Gedurende de gehele simulatie neemt het water op straat af. Meer neerslag loopt via het maaiveld naar de riolering. In uitzondering op de locaties waar de waterdiepte afneemt zijn er ook locaties waar zich toename van de waterdiepte voordoet. Wanneer de capaciteit van de riolering niet wordt overschreden, aan het begin van de bui en na de bui, is de verhouding tussen locatie met waterdiepte afname en locaties met waterdiepte toename grofweg negen op één. In de periode waarin de capaciteit van de riolering wordt overschreden is de verhouding tussen waterdiepte afname en waterdiepte toename grofweg zeven op drie.

De afname van water op straat is met name zichtbaar op de laagste delen van het straatprofiel. Daarnaast vindt de afname van waterdiepte plaats op wegen en op het maaiveld rondom de wegen.

In de watergangen vindt peilstijging plaats. De waterdiepte neemt toe ten gevolge van overstorten die meer neerslag uit de riolering naar de watergangen verplaatsen. Dit is gevolg van het feit dat meer neerslag van het maaiveld naar de riolering loopt.

Het verschil in waterdiepte is significant. Het waterdiepteverschil benadert de helft van een stoeprandhoogte, dat is de hoogte die vaak het verschil bepaalt tussen overlast en schade. Het verschil tussen de berekende maximale waterdiepte in het basismodel en de variant is 0 tot 5 centimeter. In de periodes waarin de capaciteit van de riolering niet wordt overschreden loopt het verschil in berekende waterdiepte op tot 10 centimeter. Op deze waardes zijn uitzonderingen aanwezig.

De toe- en afname van de waterdiepte worden bepaald door neveneffecten van het mee schematiseren van de straatkolken:

- Ten eerste kunnen drie zoveel rekencellen neerslag uitwisselen tussen het maaiveld en de riolering.
- Ten tweede is de instroomhoogte veranderd en is met het mee schematiseren van de straatkolken de werkelijke instroomhoogte beter benaderd. Overwegend hebben straatkolken een gelijk of hogere instroomhoogte dan de bijbehorende inspectieput.
- Ten derde is de verhanglijn in de riolering verhoogd en is het verhang van de waterstand toegenomen. Dit is het gevolg van een toegenomen inloop naar de riolering. Op enkele locaties op het maaiveld, waar de waterstand in de riolering de maaiveldhoogte overschrijdt, leidt dit tot toename van de waterdiepte.

9 Aanbevelingen

De aanbevelingen in de hoofdstuk zijn ten aanzien van de aanleiding voor het onderzoek. De op wetenschappelijk onderzoek gebaseerde resultaten zijn in dit hoofdstuk omgezet naar praktisch relevant advies.

Het wordt aanbevolen om in 3Di modellen van stedelijke omgevingen straatkolken mee te nemen in de schematisering van de riolering. De geïnundeerde locaties na het meenemen van straatkolken zijn nauwkeuriger ten opzichte van een model met enkel inspectieputten. De afname van water op straat is met name zichtbaar op de laagste delen van het straatprofiel. Daarnaast is het verschil in berekende waterdiepte significant.

Wanneer de instroom naar de riolering via inspectieputten verloopt wordt aanbevolen om de instroomhoogtes van inspectieputten niet langer te bepalen op 20 centimeter onder maaiveld. In plaats daarvan wordt het aanbevolen om de instroomhoogte te bepalen aan de hand van de straatkolken. Immers is in hoofdstuk 6 'Analyse' aangetoond dat het verschil in instroomhoogte tussen de inspectieputten en straatkolken groot is en dat de instroomhoogte van de straatkolken de werkelijke instroomhoogte beter benadert. Bovendien is de instroomhoogte medebepalend voor de berekende waterdiepte.

Tot slot wordt aanbevolen om gebruik te maken van de mogelijkheden die het mee schematiseren van straatkolken teweegbrengt. Tot deze mogelijkheden behoren het (cartografisch) presenteren van instroomdebieten en het (cartografisch) presenteren van in- of uitstroom ter plaatse van een straatkolk.

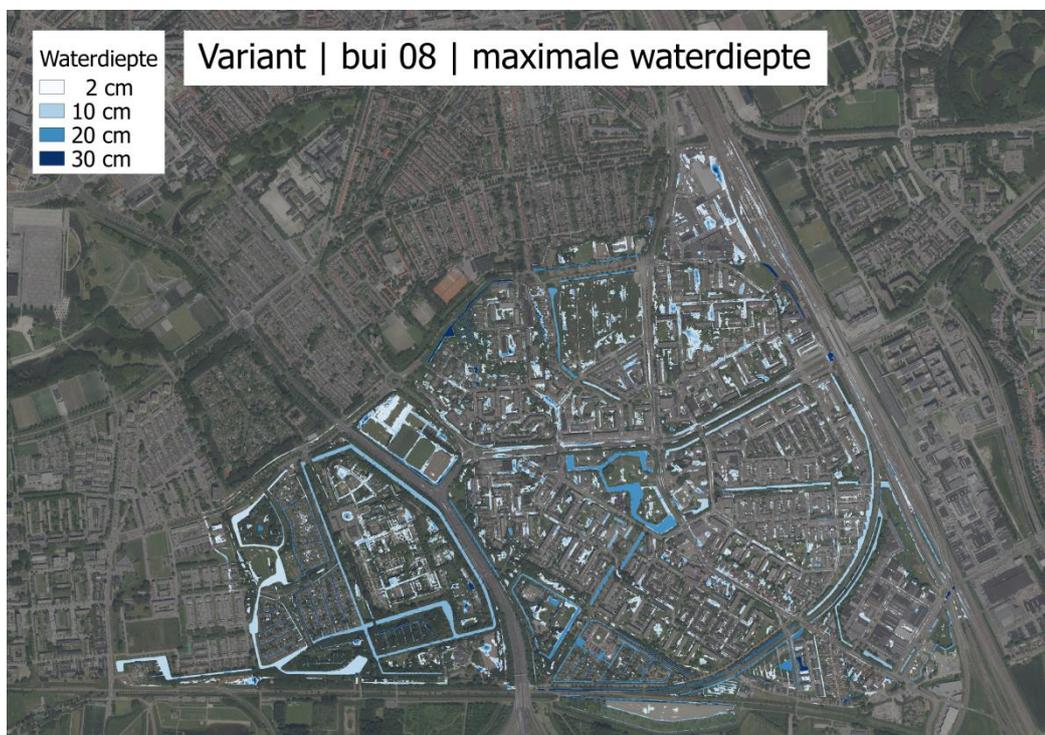
Bibliografie

- 3Di Waterbeheer consortium. (2014). *3Di explained*. Geraadpleegd van http://www.3di.nu/wp/wp-content/uploads/2014/05/3Di_explained.pdf
- Buishand, T. A. (2013). Homogeneity of precipitation series in the Netherlands and their trends in the past century. *International Journal of Climatology*, 33, 815-833. doi:10.1002/joc.3471
- Dingman, S. L. (2008). *Physical Hydrology* (2e ed.). Long Grove, Verenigde Staten: Waveland Pr Inc.
- Gemeente Rotterdam. (2016, 14 oktober). Organogram gemeente Rotterdam. Geraadpleegd van www.rotterdam.nl/werken-leren/werken-voor-rotterdam/2016-10-14-Organogram-Gemeente-Rotterdam.pdf
- Harry van Luijelaar et al., H. van. (2014). *Ervaringen met de aanpak van regen wateroverlast in bebouwd gebied*. Geraadpleegd van <https://www.riool.net/documents/20182/331026/Summary+RR18+Reducing+urban+storm+water+nuisance.pdf/a2c46496-a0b7-445b-a9a8-0e9b9ce8e410>
- MacLeod, M. (2017). *How do Models Work*. Paper gepresenteerd op de POK 1, Enschede, The Netherlands. Geraadpleegd van www.blackboard.utwente.nl
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Deltaprogramma 2017*. Geraadpleegd van <https://deltaprogramma2017.deltacommissaris.nl/viewer/publication/1/1-deltaprogramma->
- Nelen & Schuurmans. (2016). *3Di Reference Manual*. Geraadpleegd van www.nelen-schuurmans.nl
- Stichting RIONED. (2004). *C2100 Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren*. Geraadpleegd van https://www.nelen-schuurmans.nl/turtle/C2100_Rioleringsberekeningen_hydraulisch_functioneren.pdf
- Stichting RIONED. (2009). Opbouw van het riool. Geraadpleegd op 11 april, 2017, van <https://www.riool.info/buizen-putten-kolken>
- Stichting RIONED. (2009). Stichting RIONED in het kort. Geraadpleegd op 11 april, 2017, van <https://www.riool.net/over-rioned/stichting-rioned-in-het-kort>
- Stichting RIONED. (2017). Neerslaggebeurtenissen. Geraadpleegd op 12 april, 2017, van <https://www.riool.net/1620/neerslaggebeurtenissen>
- Trouw. (2013, 21 maart). Willem-Alexander neemt afscheid als 'waterprins'. Geraadpleegd op 27 juni, 2017, van <https://www.trouw.nl/home/willem-alexander-neemt-afcheid-als-waterprins--ab5a44b0/>
- Vaan, H. H. H. M. de. (2015). *Riolering en regenwater*. Geraadpleegd van <http://www.strategie.nl/userfiles/pdf/188-hoofdstuk-6-riolering-en-regenwater.pdf>
- Vries, B. de. (2014). *Inloopmodel 3Di*. Geraadpleegd van www.nelen-schuurmans.nl
- Wavin. (2016, 11 maart). Zijn de hydraulische eigenschappen van kunststof buizen vergelijkbaar met buizen van ander materiaal? Geraadpleegd op 2 juni, 2017, van <http://nl.wavin.com/web/nieuws/toon-nieuws/zijn-de-hydraulische-eigenschappen-van-kunststof-buizen-vergelijkbaar-met-buizen-van-ander-materiaal.htm>

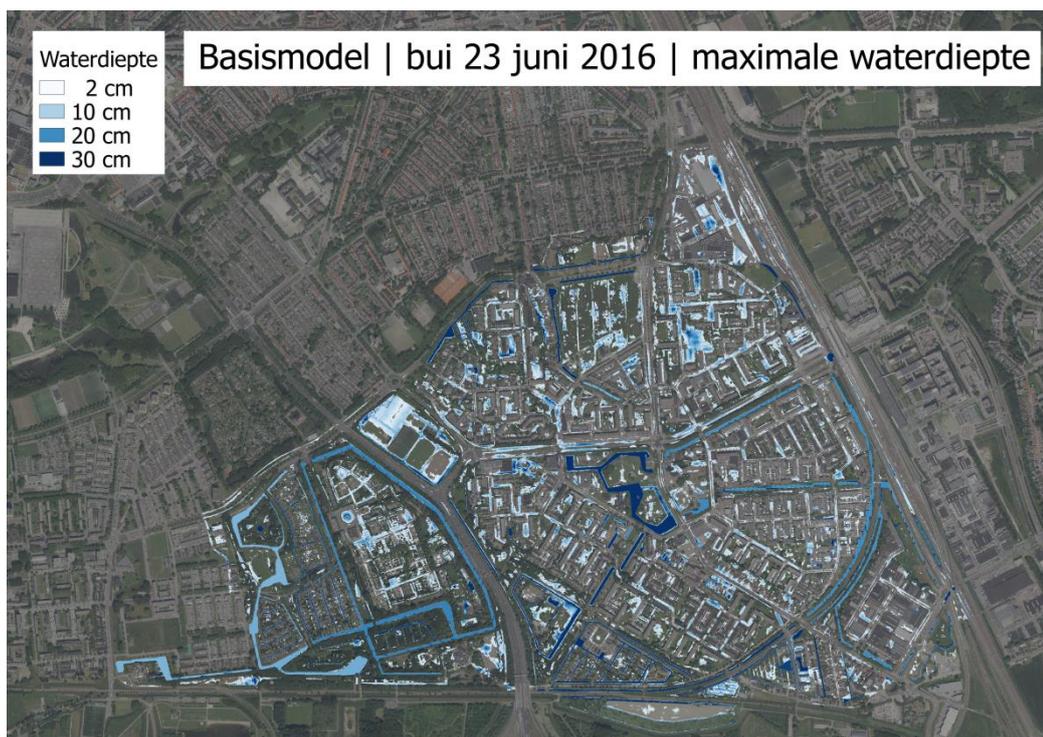
Bijlage I – Kaarten



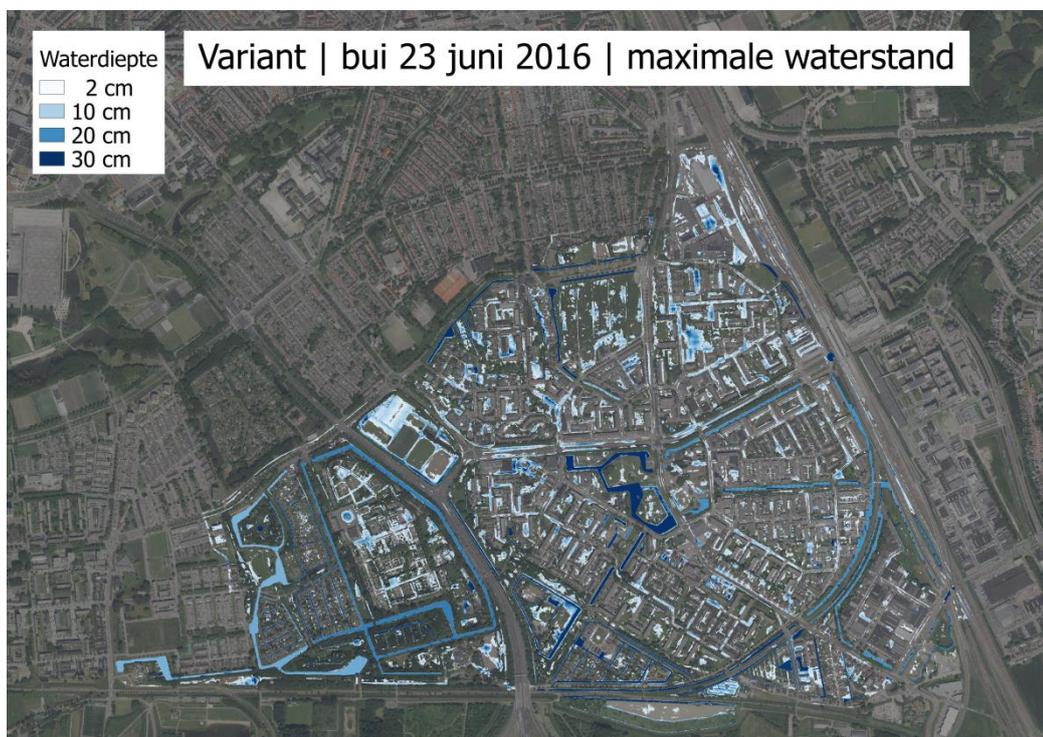
Figuur 26: Maximale waterdiepte [cm] in het basismodel met bui 08



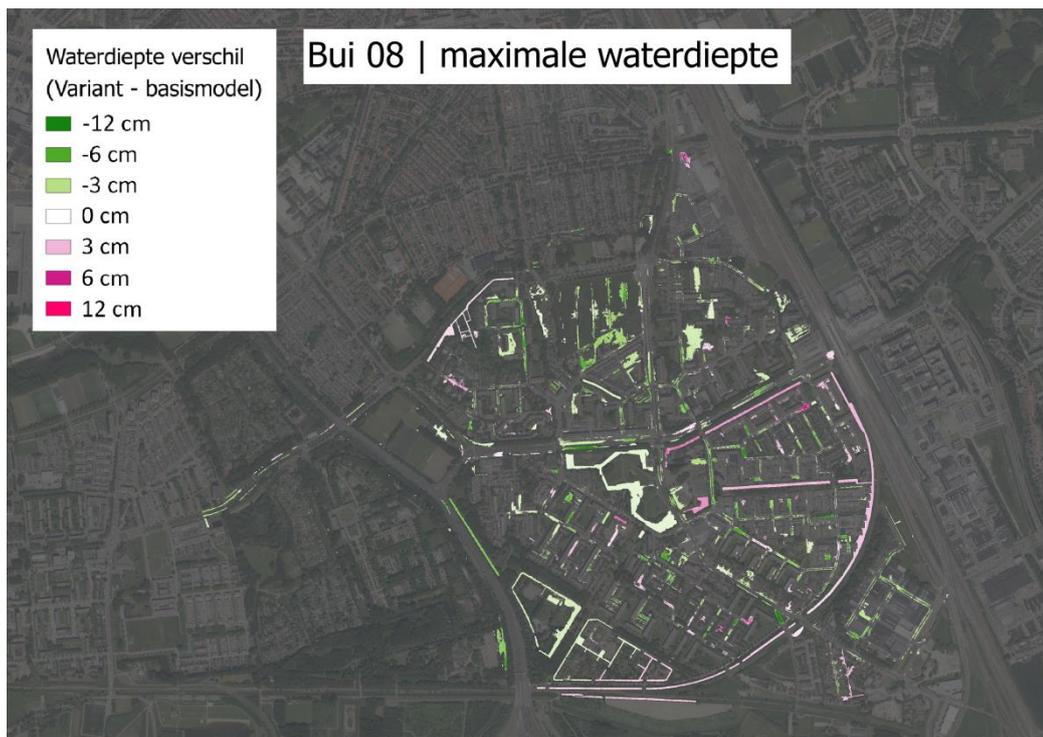
Figuur 27: Maximale waterdiepte [cm] in de variant met bui 08



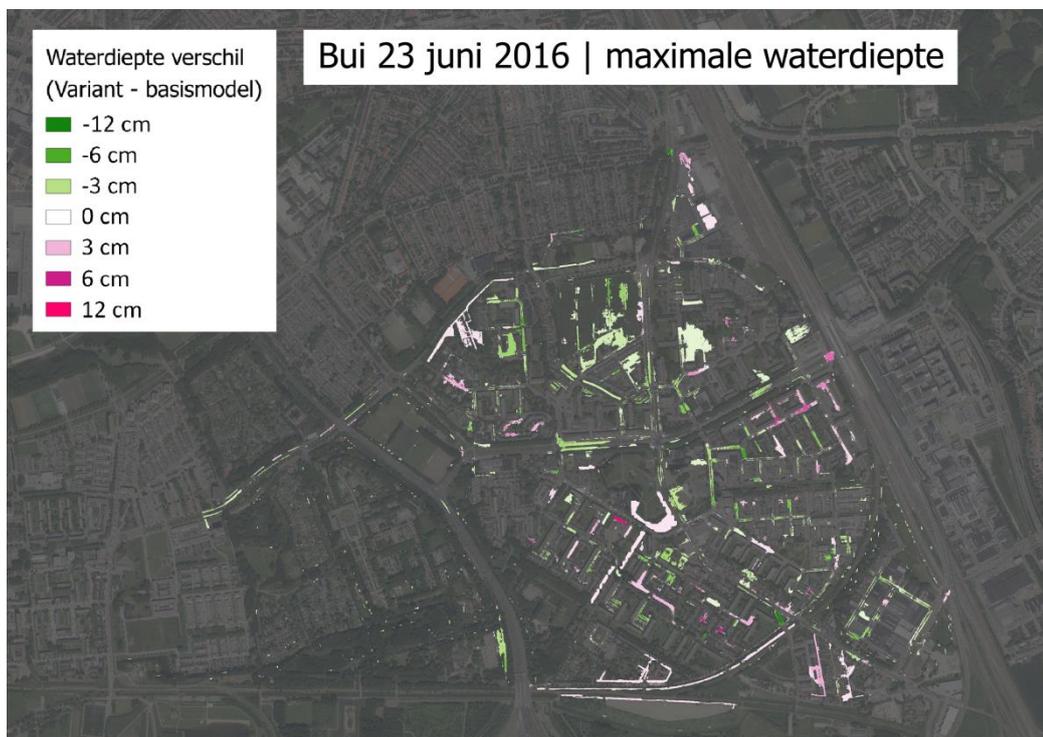
Figuur 28: Maximale waterdiepte [cm] in het basismodel met neerslaggebeurtenis 23 juni 2016



Figuur 29: Maximale waterdiepte [cm] in de variant met neerslaggebeurtenis 23 juni 2016

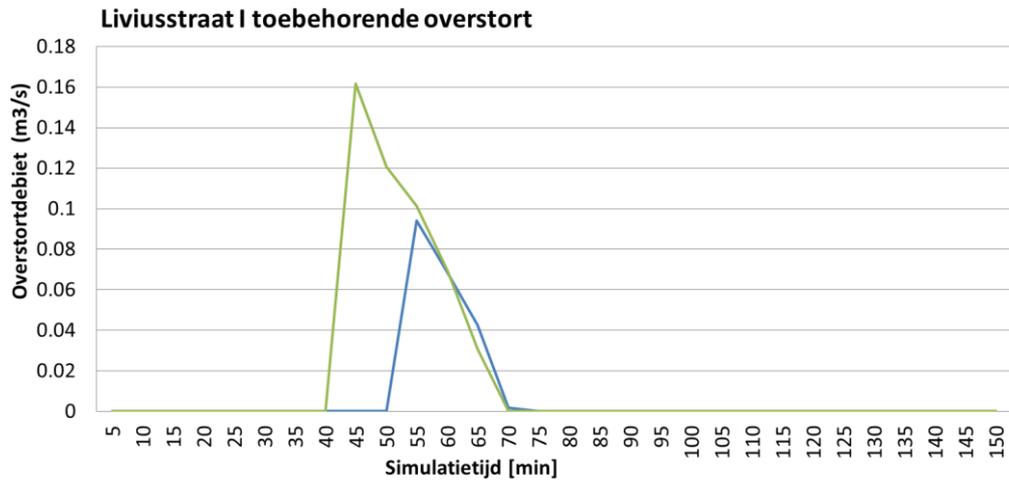


Figuur 30 :Verschil in maximale waterdiepte [cm] met bui 08

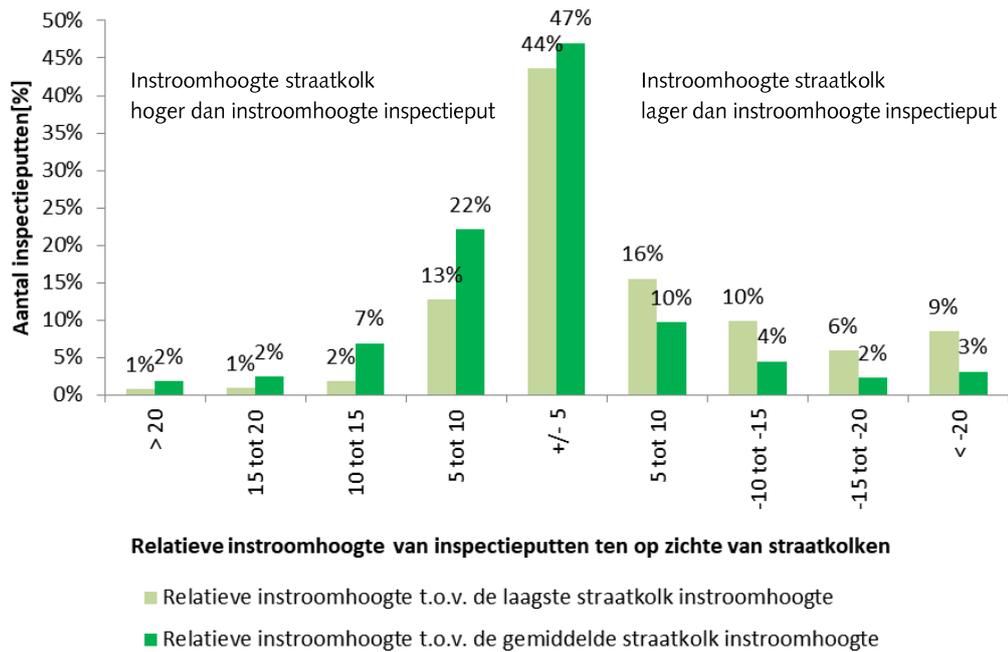


Figuur 31 :Verschil in maximale waterdiepte [cm] met neerslaggebeurtenis 23 juni 2016

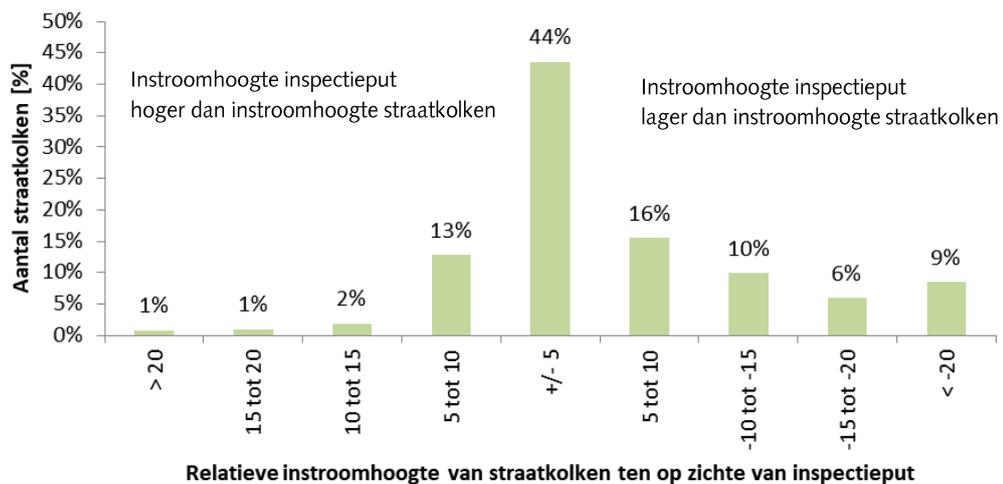
Bijlage II - Diagrammen



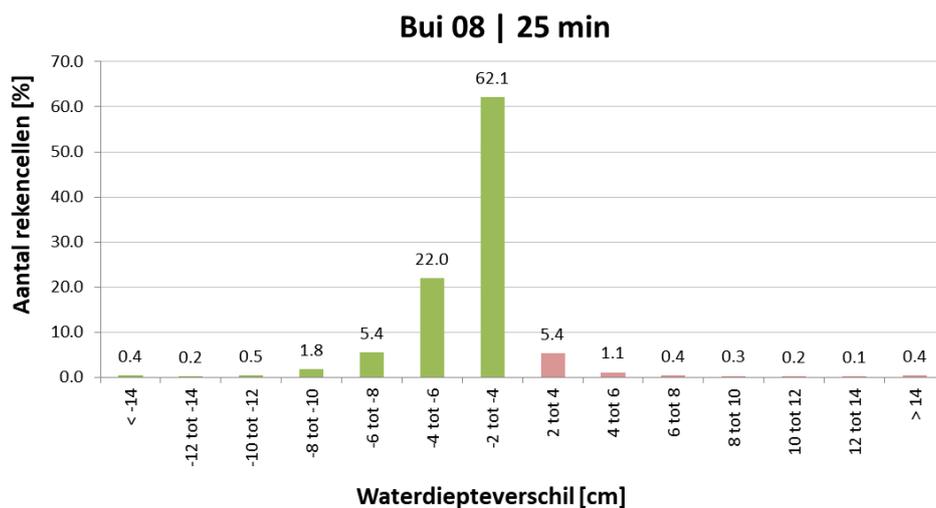
Figuur 32: Het overstortdebiet (m³/s) weergegeven op basis van de simulatietijd [min] van de overstort toebehorende aan de Liviusstraat



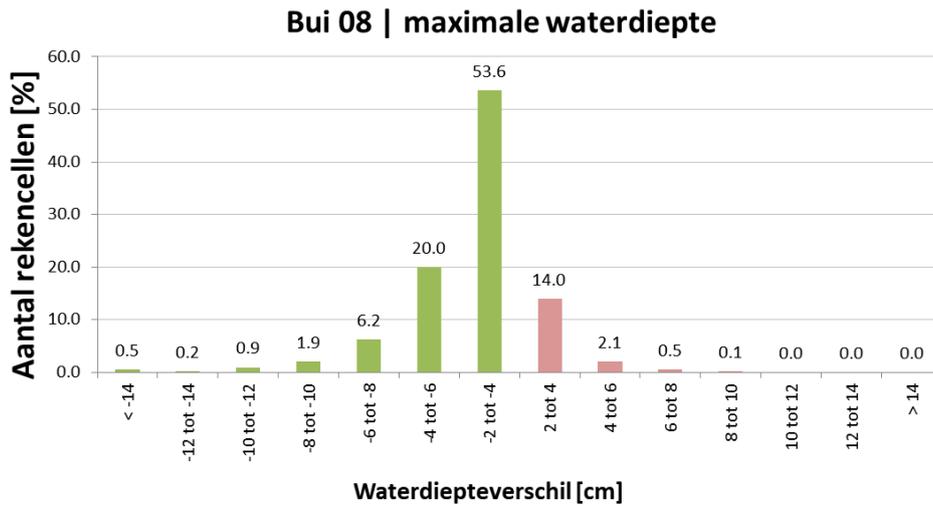
Figuur 33: Het verschil in instroomhoogte [cm] tussen de straatkolken en de bijbehorende inspectieputten



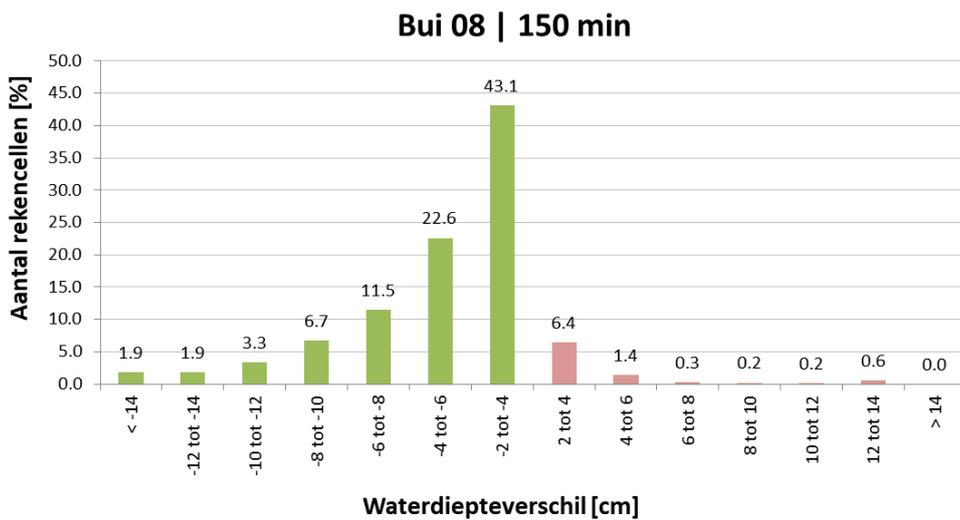
Figuur 34: Het verschil in instroomhoogte [cm] tussen de inspectieputten en de bijbehorende straatkolken



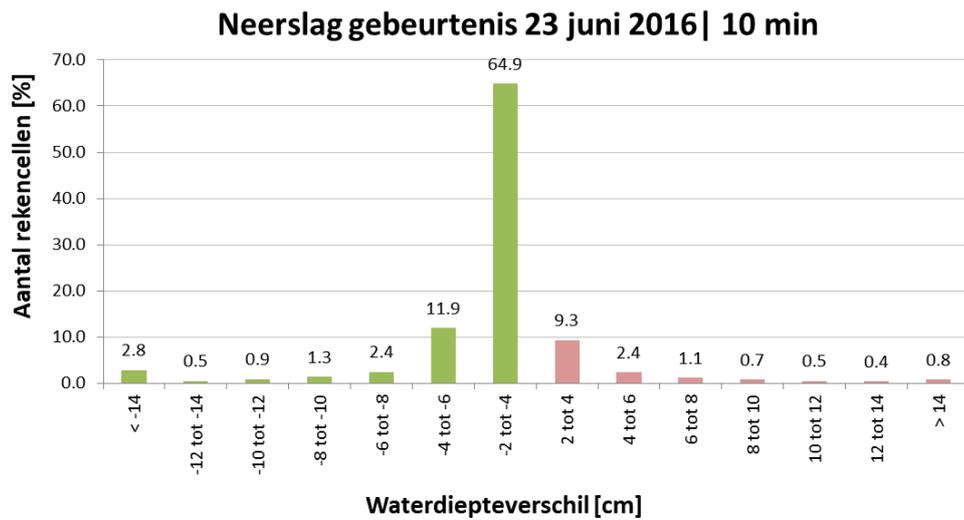
Figuur 35: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel na 25 minuten



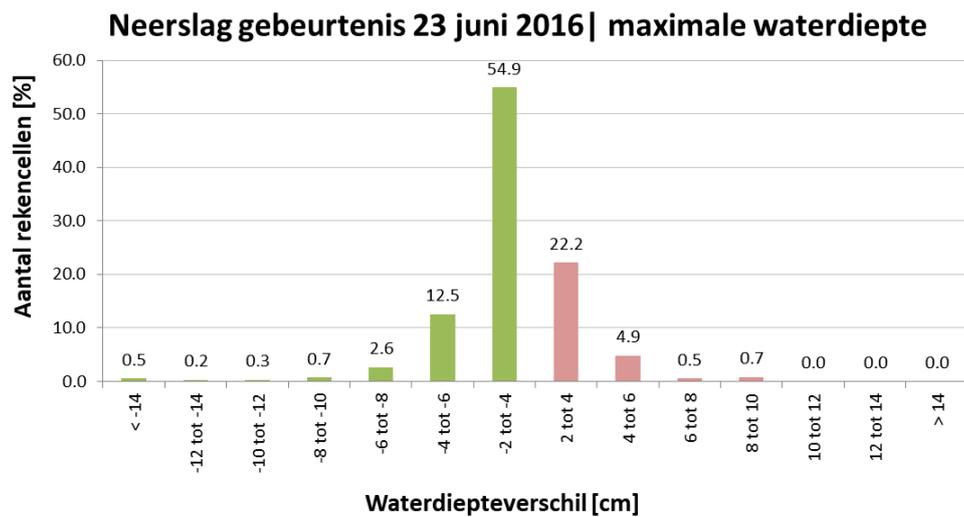
Figuur 36: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel op basis van maximale waterdiepte gedurende de simulatie



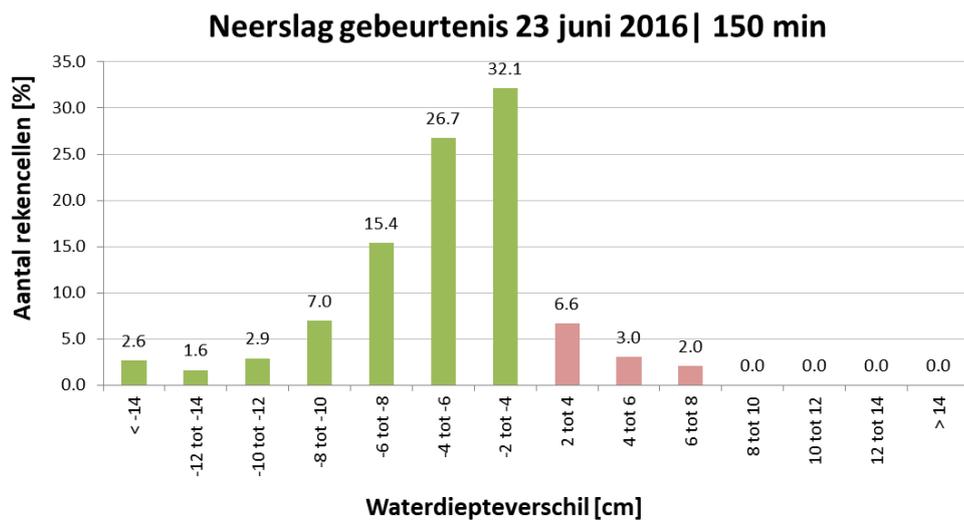
Figuur 37: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel na 150 minuten



Figuur 38: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel na 10 minuten



Figuur 39: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel op basis van maximale waterdiepte gedurende de simulatie



Figuur 40: De waterdiepte afname [cm] (groen) en waterdiepte toename [cm] (rood) in de variant ten opzichte van het basismodel na 150 minuten

Bijlage III - Tabellen

Tabel 7: Waterbalans van de in 3Di uitgevoerde simulaties

	Bui 08		Neerslaggebeurtenis 23 juni 2016	
	Basismodel	Variant	Basismodel	Variant
2D neerslag [m3]	58032	58096	94192	94407
0D neerslag [m3]	4871	4873	7810	7816
Δ berging in 2D [m3]	25737	23993	36856	35282
Δ berging in 1D [m3]	2288	2630	4012	4722
Infiltratie [m3]	2619	2565	7696	7620
Weggepompt water [m3]	32316	33818	53427	54562
Uitstroom aan grenzen [m3]	27	47	94	119
Volumefout [m3]	84	85	82	82
<i>Berging in 2D eind van simulatie [%]</i>	32.3	30.1	46.2	44.2

Neerslaggebeurtenis	Tijdstip 7mm	Simulatie stap
Bui 08	1545 seconden	25 minuten
23 juni 2016	655 seconden	10 minuten

Tabel 8: De simulatie stappen [minuten] corresponderend met 7 mm neerslag

Tabel 9: Het aantal subgrid cellen met een waterdiepte verschil groter dan twee cm tussen het basismodel en de variant

Neerslaggebeurtenis	10 minuten	25 minuten	Maximale waterdiepte	150 minuten
Bui 08	-	135.629	244.463	201.199
23 jun 2016	100.354	-	237.840	236.711

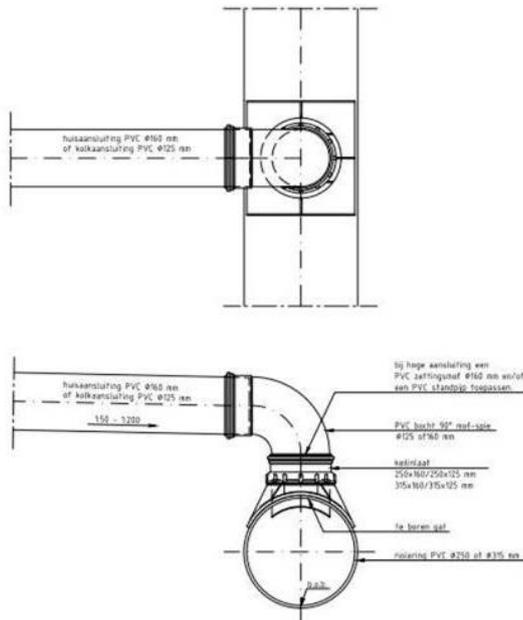
Tabel 10: Het interval waarbinnen 90 procent van de subgrid cellen met een waterdiepte afname [cm] of toename [cm] groter dan 2 cm ligt, ten gevolge van bui 08

	25 minuten	Maximale waterdiepte	150 minuten
Waterdiepte afname [cm]	0 tot -6	0 tot -6	0 tot -9
Waterdiepte toename [cm]	0 tot 9	0 tot 5	0 tot 8

Tabel 11: Het interval waarbinnen 90 procent van de subgrid cellen met een waterdiepte afname [cm] of toename [cm] groter dan 2 cm ligt, ten gevolge van de neerslaggebeurtenis van 23 juni 2016

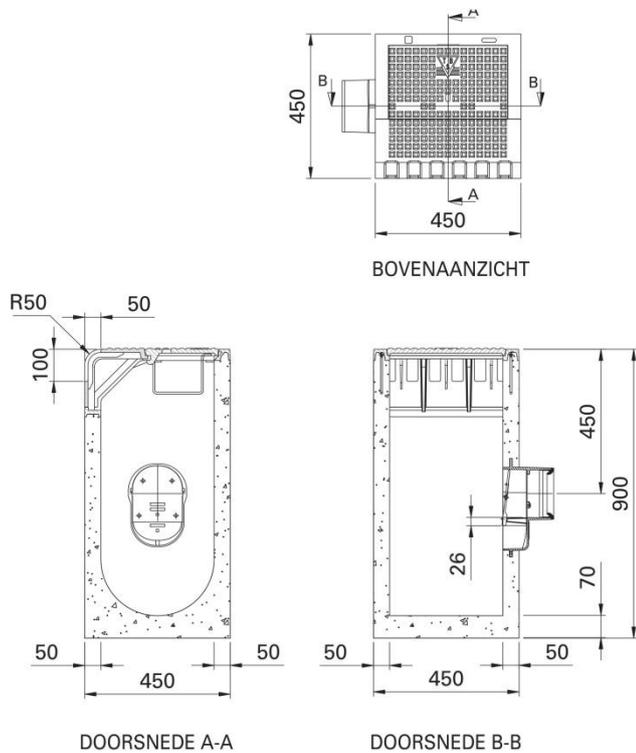
	10 minuten	Maximale waterdiepte	150 minuten
Waterdiepte afname [cm]	0 tot -6	0 tot -5	0 tot -9
Waterdiepte toename [cm]	0 tot 10	0 tot 5	0 tot 7

Bijlage IV - Figuren

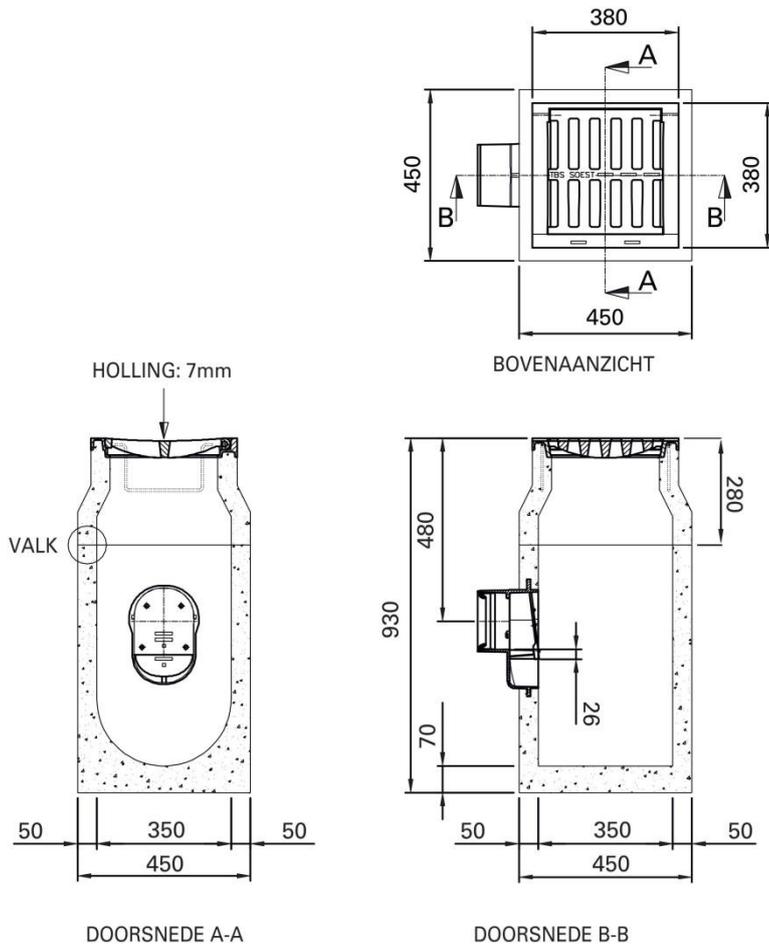


**BOVENAANSLUITING OP PVC RIOLERING
(ALLEEN VOOR ÉÉN HUISAANSLUITING OF ÉÉN KOLKAANSLUITING)**

Figuur 41: Tekening van de straatkolk aansluitingen in Rotterdam



Figuur 42: Tekening van straatkolk met zij instroom



Figuur 43: Tekening van straatkolk met boven instroom



Figuur 44: Locaties waar straatkolken lijken te ontbreken



Figuur 45: Locaties waar riolering in het basis model lijkt te ontbreken