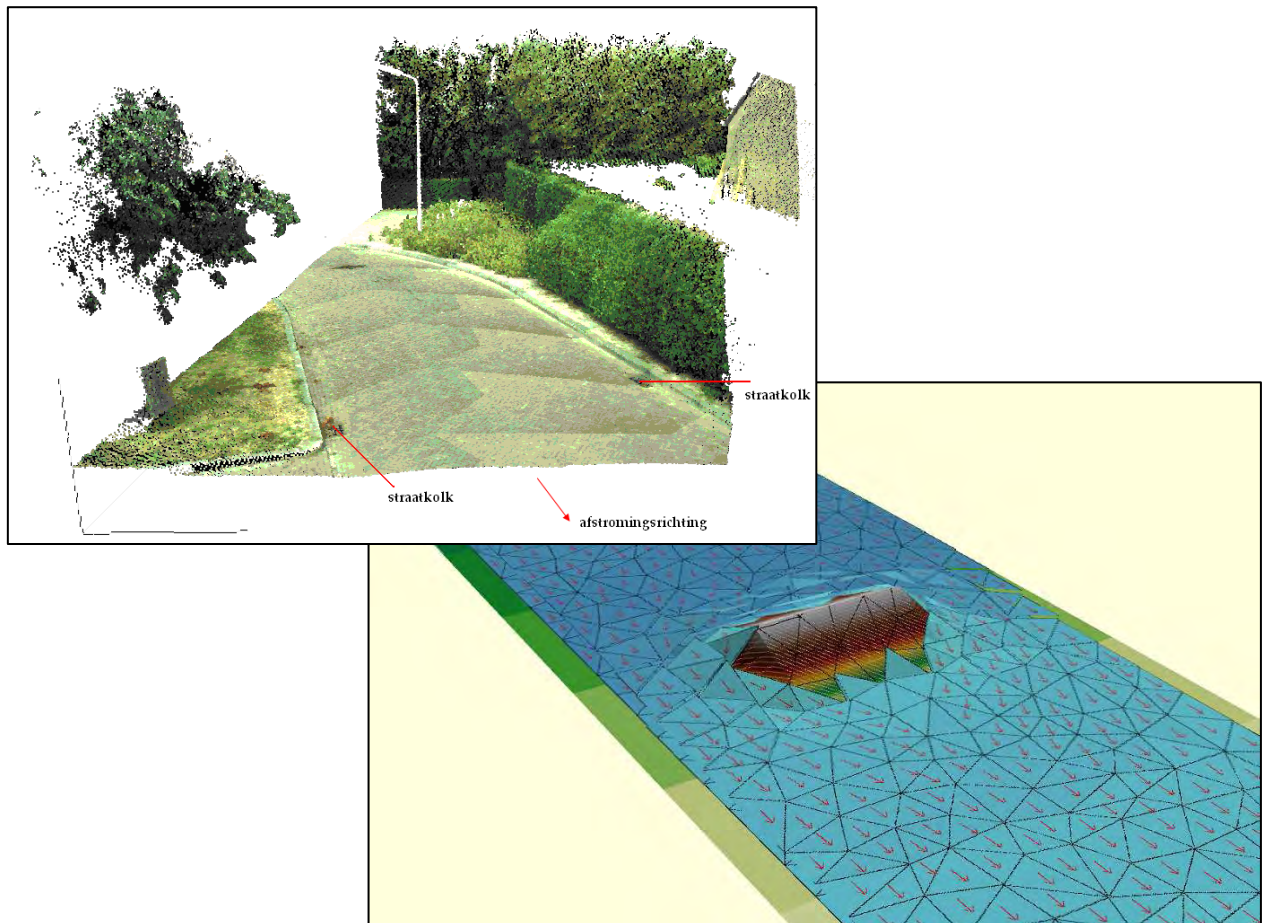


Modelleren van water over straat

Twee dimensionaal modelleren van oppervlakte stroming in stedeling gebied



M.Sc. Thesis by Richard Wilbrink

juni 2010

Irrigation and Water Engineering Group



WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

Modelling of surface flow

Two dimensional modelling of surface flow in urban areas

Master thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the degree of Master of Science in International Land and Water Management at Wageningen University, the Netherlands

Richard Wilbrink

June 2010

Supervisors:

Ir. Gerrit van Vuren

Irrigation and Water Engineering Group
Centre for Water and Climate
Wageningen University
The Netherlands
www.iwe.wur.nl/uk

Drs. Paul Torfs

Hydrology and Quantitative Water Management Group
Centre for Water and Climate
Wageningen University
The Netherlands
www.hwm.wur.nl/uk

Ing. Marcel Glasbergen

Urban Water Group
ARCADIS Nederland BV
The Netherlands
www.arcadis.nl

Summary

To do the hydraulic testing of the urban sewerage system Dutch municipalities consult engineering agencies. From 2008 onwards municipalities are obliged to take care for rain, sewage and groundwater. Municipalities are now committed to elaborate on these topics in a *Verbreed Gemeentelijk Rioleringsplan (vGRP)*, a 'extended Municipal Sewerage Plan'. Municipalities have to establish such a plan before 1 January 2013.

Hydrodynamic models are used to control sewerage system functioning. By using such a model it can be made clear where weaknesses are and difficulties can be expected. Analyzing these difficulties means also looking at areas where flood is a potential problem. Considering expected climate change, it is possible that flood problems will occur more often. To manage flood problems in urban areas it is needed to take effective interventions. These interventions mainly need to be above ground, but if needed also under ground. In the end it is important that such measures have effect on the amount and location of water which is on the street.

At this moment consultancies are using very simplified models which calculate water on the street. When the sewerage system is overloaded, there is not calculated water flow on the street in this current system. A combined 1D-2D model, according to the 'dual drainage'-concept offers possibilities to analyze what in extreme situations, is happening with water on the street. This way of modeling does offer a closer approach of reality and offers possibilities to visualize the effect of interventions.

Modeling of water flow on the street in urban areas does need a detail elevation model. This is for most Dutch cities not available at current. 'Mobile laser mapping' offers the opportunity to obtain a detailed elevation model of the urban area. By using this type of data, above ground model simulations can be conducted.

In this research two dimensional modeling of water flow on the street, by using the hydrodynamic model InfoWorks CS, is verified. Several input and simulation parameters are analyzed on their sensitivity.

It appears that there are possibilities to use two dimensional modeling to visualize urban flood problems and the effect of above ground interventions.

Samenvatting

Nederlandse gemeenten laten zich voor de hydraulische toetsing van het stedelijk rioleringsstelsel adviseren door adviesbureaus. Met de in 2008 ingevoerde zorgplicht voor hemelwater, afvalwater en grondwater is de gemeente verplicht om deze zorgplicht vorm te geven en uit te werken in een uitgebreid Gemeentelijk Rioleringsplan (vGRP). Gemeenten zijn verplicht om dit voor 1 januari 2013 vast te laten stellen.

Hydrodynamische modellen worden gebruikt om het rioolsysteem te toetsen op het functioneren. Aan de hand van een dergelijk model kan inzichtelijk gemaakt worden waar zich knelpunten bevinden. Tot het analyseren van knelpunten behoort ook het analyseren van wateroverlastlocaties. Gelet op verwachte klimaatveranderingen is er de mogelijkheid dat wateroverlastsituaties vaker op zullen treden. Om wateroverlastsituaties te beheersen is het van belang effectieve, met name bovengrondse, en waar nodig ook ondergrondse maatregelen te treffen. Uiteindelijk is van belang dat dergelijke maatregelen effect hebben op de hoeveelheid dan wel locatie van water op straat.

Op dit moment wordt door adviesbureaus gebruik gemaakt van sterk vereenvoudigde modellen die water op straat berekenen. In de huidige werkwijze wordt bij een overbelast riool geen waterstroming over straat berekend. Een gekoppeld 1D-2D model, volgens het *'dual drainage'*-concept biedt wel de mogelijkheid om te analyseren wat er in extreme situaties gebeurt met water op straat. Deze manier van modelleren is een dichtere benadering van de werkelijkheid en biedt mogelijkheden om het effect van interventies te visualiseren.

Voor de modellering van waterstroming over straat in het stedelijk gebied is een gedetailleerd hoogtemodel nodig. Dit is voor de meeste Nederlandse steden niet beschikbaar. *'Mobile laser mapping'* biedt de mogelijkheid om van het stedelijk gebied een gedetailleerd hoogtemodel te verkrijgen. Op basis hiervan kunnen bovengrondse modelberekeningen uitgevoerd worden.

In dit onderzoek is twee dimensionale modellering van waterstroming over straat, door middel van het hydrodynamische model InfoWorks, geverifieerd. Diverse invoer en simulatie parameters zijn getest op hun gevoeligheid. Er blijken mogelijkheden te zijn om een twee dimensionaal model in te zetten om wateroverlast en het effect van bovengrondse interventies te visualiseren.

Inhoud

Voorwoord	9
1 Inleiding	11
1.1 Wateroverlast in stedelijk gebied	11
1.2 Relevante ontwikkelingen in wetgeving	11
1.3 Leeswijzer	12
2 Onderzoeksvragen	13
3 Methodologie	14
3.1 Uitgangspunten	14
3.2 Werkwijze	14
3.3 Modelmatige randvoorwaarden	16
4 Hydrodynamische modellen	17
4.1 Algemeen	17
4.2 Ondergronds en bovengronds	18
4.2.1 Traditioneel 1D-model	19
4.2.2 1d-1d model	20
4.2.3 1d-2d model	21
5 InfoWorks CS	23
5.1 Basis modelopbouw	23
5.2 Inloopmodel	26
5.3 Simulatieparameters	26
5.4 Simulatie	26
6 Datagebruik	27
6.1 Rioolstelsel	27
6.2 Neerslaggegevens	27
6.3 Hoogtemodel	28
7 2D-modellering	30
7.1 1d modelleren vs. 2d modelleren	30
7.2 Hydraulische achtergrond	30
7.3 2D simulatie van water op het maaiveld	32
7.4 2D simulatieparameters	33
8 Modelresultaten	34
8.1 Theoretische schematisaties	34
8.1.1 Rechthoekige goot	34
8.1.2 Goot met drempel	38
8.1.3 Fictieve kruising	41

8.2	Reele situaties	43
8.2.1	Borsele	43
8.2.2	Prinsenbeek	49
9	Conclusies	56
10	Aanbevelingen	58
	Literatuurlijst	61
1	Berekening evenwichtsdiepte en kritische diepte	63
2	Node types in InfoWorks CS	65
3	2D simulatie parameters	67
4	Verklarende woordenlijst	69
5	Hoogtemodel Prinsenbeek	71
6	Water op straat bij bui 08, Prinsenbeek	75
7	Risicokaart water op straat	79

Voorwoord

Deze afstudeerscriptie is geschreven als afronding van de Master Irrigatie en Waterbouwkunde aan de Wageningen Universiteit. Het afstudeeronderzoek heeft plaatsgevonden bij de groep Stedelijk Water bij ARCADIS te Den Bosch. Vanuit Wageningen Universiteit is dit afstudeeronderzoek begeleid door drs. P.J.J.F. Torfs (Lsg. Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer) en ir. G.H. van Vuren (Irrigatie en Waterbouwkunde). De begeleiding bij ARCADIS is gedaan door ing. M.J. Glasbergen.

Het afstudeeronderzoek had aan het begin de insteek om een gedetailleerde kwantitatieve gevoeligheidsanalyse uit te voeren ten aanzien van input parameters voor twee dimensionale modellering van waterstroming over straat. Uiteindelijk is gebleken dat aan de volledige 1D-2D modellering van water over straat meer haken en ogen zitten dan vooraf voorzien. Dit hangt in het bijzonder samen met het feit dat beschikbaarheid van gedetailleerde hoogtedata van het stedelijk gebied zeldzaam is. In dit onderzoek was gedetailleerde hoogtedata beschikbaar van een dorp. Van het betreffende dorp was echter geen rioleringsmodel beschikbaar. Desondanks is twee dimensionale modellering van waterstroming over straat op vele aspecten onderzocht.

Met het onderzoek is geprobeerd helder te krijgen waarom, wanneer, waar en hoe twee dimensionale modellering van water op straat meerwaarde kan hebben.

Graag wil ik mijn begeleiders, Marcel Glasbergen, Paul Torfs en Gerrit van Vuren, bedanken voor hun nuttige feedback en hulp gedurende het afstudeeronderzoek. Daarnaast wil ik ARCADIS, team Stedelijk Water te Den Bosch bedanken dat zij mij in de gelegenheid hebben gesteld dit onderzoek uit te voeren.

Den Bosch, 15 juni 2010
Richard Wilbrink

HOOFDSTUK

1 Inleiding

Eén van de mogelijke gevolgen van klimaatverandering is extreme regenval. In alle KNMI'06 scenario's (voor Nederland) neemt zowel in de zomer als in de winter de extreme neerslag en de extremiteit van de neerslag toe (KNMI, 2009). Samen met de zeespiegelstijging, bodemdaling en verstedelijking zijn dit processen die de kans op wateroverlast in de stad vergroten.

1.1

WATEROVERLAST IN STEDELIJK GEBIED

Wateroverlast in het stedelijk gebied kan worden veroorzaakt door hevige, vaak kort durende regenval en het vervolgens gebrek aan afvoer- en bergingscapaciteit. Daarnaast speelt ook het beheer van de riolering en openbare ruimte een belangrijke rol. Dit is gebleken in een onderzoek dat door Rioned in 2007 is gedaan in 203 gemeenten (Rioned, 2007b). In dit onderzoek is gekeken naar de aard, oorzaken en mogelijke oplossingsrichtingen van wateroverlast in de bebouwde omgeving. De volgende vijf typen oorzaken voor regenwateroverlast zijn onderscheiden in het onderzoek:

1. Ontwerp van de riolering.
2. Beheer van de riolering.
3. Inrichting van de bovengrondse ruimte.
4. Capaciteit van het watersysteem.
5. Regenwaterafvoer in gebouwen en op particulier terrein.

Uit dit onderzoek is aan de hand van de grootte van het effect en het aantal overlastlocaties geconcludeerd wat de belangrijkste oorzaken van regenwateroverlast zijn. Volgens het onderzoek zijn de belangrijkste oorzaken qua effect: *'de inrichting van de bovengrondse ruimte waar water zich ophoopt op lage punten, ontbrekende ontlastpunten bij gebouwen en een recente sterke toename van het afvoerend (verhard) oppervlak.'* (Rioned, 2007b, p.3)

Naast overlast door extreme regenval kan er ook sprake zijn van oppervlaktewater dat buiten de oevers treedt of grondwateroverlast. Binnen dit onderzoek zal de focus echter liggen op wateroverlast door extreme neerslag.

1.2

RELEVANTE ONTWIKKELINGEN IN WETGEVING

Volgens het Nationaal Bestuursakkoord Water (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003) moesten gemeenten voor de eerste helft van 2006 een gemeentelijk waterplan opstellen waarin o.a. de overlastproblematiek in beeld werd gebracht. Het hele NBW heeft als doel om voor 2015 het watersysteem op orde te hebben.

Daarnaast hebben gemeenten sinds 1 januari 2008 de zorgplicht voor afvalwater, hemelwater en grondwater. Deze aspecten moeten ook opgenomen worden in het Gemeentelijk Rioleringsplan (GRP). Wanneer de hemelwater- en grondwaterzorgplicht ook zijn uitgewerkt in het GRP wordt gesproken van een verbreed GRP (vGRP). De genoemde zorgplichten zijn verankerd in artikel 3.5 van de Waterwet (2009). Het vGRP moet uiterlijk 1 januari 2013 vastgesteld zijn. Voor gemeenten is het dus van belang om inzichtelijk te hebben waar mogelijk knelpunten optreden bij het afvoeren van hemelwater.

Met het oog op extreme buien die verwacht worden in bepaalde klimaatscenario's is, gezien de hoge kosten, het aanpassen van rioolstelsels hieraan geen optie. Daarnaast kan, theoretisch gezien, het ook voorkomen dat een bui optreedt die statistisch gezien niet eens zou kunnen voorkomen.

De gemeente Arnhem bijvoorbeeld meldt in het GRP4 2009-2013, dat de traditionele maatregelen, te weten het vergroten van de capaciteit van het rioolstelsel, niet de oplossing zijn. Er moet echter naar het bovengrondse systeem gekeken worden. Vragen die dan opkomen zijn: *“Hoe stroomt het water over de weg, waar is bovengrondse berging aanwezig of kan deze aangelegd worden, waar is het niet zo erg als er een tijdje water tussen de trottoirbanden blijft staan.”* (Gemeente Arnhem, 2007, p.23) Uiteindelijk wordt in de praktijk een bepaald risico van water op straat geaccepteerd. Ook in de uitgangspunten voor het GRP 2010-2015 van de gemeente Doetinchem wordt besloten water op straat te accepteren *“mits dit niet vaker dan eenmaal per twee jaar optreedt in hetzelfde gebied.”* (Gemeente Doetinchem, 2009). Dit is overigens ook juridisch te verantwoorden, aangezien de gemeentelijke zorgplicht in de *Wet verankering en bekostiging gemeentelijke watertaken* een inspanningsverplichting is. De gemeente bepaalt dus in welke mate overlast geaccepteerd wordt. In de praktijk wordt als acceptabele frequentie van water op straat, eens in de twee jaar water aangehouden.

1.3

LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 worden de onderzoeksvragen die centraal staan in dit afstudeeronderzoek geformuleerd. Hoofdstuk 3 beschrijft de methodologie die gebruikt is om de onderzoeksvragen te beantwoorden. De achtergrond van hydrodynamische modellen wordt toegelicht in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft summier de opbouw en werking van het gebruikte programma InfoWorks Collection Systems (CS). In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op het gebruik van data. Hoofdstuk 7 behandelt de verschillende manieren van twee dimensionaal modelleren.

De modelresultaten worden beschreven in hoofdstuk 8. Conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 9 en 10.

Aangezien InfoWorks een Engelstalig programma is zullen in dit rapport ook regelmatig de Engelse termen worden gebruikt. Deze termen zullen bij eerste gebruik toegelicht worden. Daarnaast is een verklarende woordenlijst te vinden in Bijlage 4.

HOOFDSTUK

2 Onderzoeksvragen

Middels dit onderzoek is het inzicht vergroot in de mogelijkheden en beperkingen van 2D-modellering van water op straat, middels een hydrodynamisch model (InfoWorks CS). Daarnaast was het doel inzicht te krijgen in de gevoeligheid van het 2D-model voor bepaalde parameters. Er is ook gekeken naar de toepasbaarheid van 2D-modellering om oplossingen met betrekking tot wateroverlast in stedelijk gebied in beeld te brengen.

Hoofdvraag: Wat zijn de mogelijkheden en beperkingen van 2D-modellering van wateroverlast in stedelijk gebied?

Deelvragen:

1. Wat is de hydraulische basis voor het rekenen aan water op straat (oppervlakkige afstroming)?
2. Hoe kan extreme regenval met als gevolg wateroverlast, in het stedelijk gebied, middels het InfoWorks CS tweedimensionaal gemodelleerd worden?
3. Wat is de invloed van de wijziging van numerieke simulatieparameters op de modeluitkomsten?
4. Wat is de gevoeligheid van het detailniveau van het in de berekening gebruikte hoogtemodel?
5. Wat is de gevoeligheid van de ruwheidscoëfficiënt?
6. Wat zijn de voor- en nadelen van het gebruik van mobile laserdata ten behoeve van de productie van een hoogtemodel?

HOOFDSTUK

3 Methodologie

3.1

UITGANGSPUNTEN

In dit onderzoek wordt gewerkt met het model InfoWorks CS 10.5 (MWH Soft, 2009). Daarin aanwezige hydrologische rekenmethoden (zie verder hoofdstuk 7.2) zullen gebruikt worden. Het model zal verkend en beschreven worden. Ook zal het model geverifieerd worden, en zal door vereenvoudiging en verandering van invoer en modelparameters een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden. Deze analyse is niet gedetailleerd kwantitatief, maar omvat eerder een kwalitatieve vergelijking van de hoeveelheid water op straat die het model berekent onder veranderende parameters, dan wel invoergegevens.

Deze keuze is gemaakt omdat het model niet in de eerste plaats gebruikt wordt als gedetailleerd hydrologisch voorspellingsmodel. De output van het model wordt door de adviseur gebruikt als advies- en communicatiemiddel voor de (gemeentelijke) overheid. Afhankelijk van de verandering van het 'water-op-straat'-beeld bij variatie van bepaalde parameters, wordt inzichtelijk welke parameters dan wel invoer gegevens meer invloed hebben op de uitkomst dan andere. Daaruit kan geconcludeerd worden welke parameters dan wel invoer gegevens van belang zijn bij het gebruiken van twee dimensionale modellering van waterstroming over straat.

Naast het gebruik van het hydrodynamische model InfoWorks, zal voor diverse technische bewerkingen ArcGIS gebruikt worden.

3.2

WERKWIJZE

Om de mogelijkheid van het berekenen van waterstroming over straat in InfoWorks CS te verifiëren, zullen simulaties gedaan worden met:

1. Theoretische schematisaties

Theoretische schematisaties die narekenbaar zijn met behulp van vloeistofmechanica wetten zullen gebruikt worden om de resultaten van twee dimensionale modellering te toetsen. Het gaat hierbij om verificatie van modelresultaten. Gerealiseerd moet worden dat vergelijkingen van de modeluitkomsten met vloeistofmechanica wetten uiteindelijk model-model vergelijkingen zijn. Het is niet het doel om aan de hand van deze vergelijkingen harde conclusies te trekken welke uitkomst het best de werkelijkheid weergeeft. Er zijn in de werkelijkheid vele dynamische factoren die op bepaalde momenten en plaatsen invloed kunnen hebben op wat er gebeurt met water op straat. Deze factoren kunnen echter nooit allemaal meegenomen worden. Daarom is aan de hand van deze theoretische schematisaties niet te zeggen welk model het best de werkelijkheid benadert.

Er is gekozen voor het testen van het model aan de hand van theoretische schematisaties omdat op die manier op kleine schaal de invloed van wijzigende parameters dan wel de invloed van wijzigende van invoergegevens geanalyseerd kan worden. Wanneer direct een hele woonwijk gemodelleerd zou worden, zou het niet haalbaar zijn om eenduidige reacties van het model op veranderingen te vinden. De volgende theoretische schematisaties, met een oplopende complexiteit, zijn gebruikt:

A. Rechthoekige goot

Dit betreft een licht hellende goot die een rechthoekige vorm heeft. Aan de hand van vloeistofmechanica wetten (in dit geval de wet van Bernoulli) is deze schematisatie goed na te rekenen. Aangenomen wordt stationaire stroming en daarmee constante stroomsnelheid en waterdiepte (evenwichtsdiepte). Dit treedt op wanneer het profiel van de goot, de helling en het debiet gelijk blijven. Bij deze schematisatie kunnen de uitkomsten van het 2D model en het 1D model ook met elkaar vergeleken worden aangezien de rechthoekige goot ook in het 1D model te construeren is. Ook de optredende kritische waterdiepte kan vergeleken worden tussen 2D model, 1D model en de handmatige narekening.

B. Goot met drempel

Dit betreft een schematisatie met één element extra: de drempel. Bij de drempel is nagegaan in hoeverre de in het 2D model berekende kritische diepte overeenkomt met de kritische diepte berekend vanuit de basisvergelijking voor kritische stroming. Bij de afgevlakte drempel is ook gekeken naar het optredende stromingsbeeld. Visueel is beoordeeld of rondom de drempel realistisch stromingsgedrag op lijkt te treden.

C. Twee goten in een kruising

Door middel van twee goten waarvan de een haaks op de andere goot staat is een fictieve 'kruising' gemodelleerd. Deze schematisatie is bedoeld om te testen wat er gebeurt bij elkaar ontmoetende stromen over het maaiveld.

2. Schematisatie van het maaiveld van een straat in Ellewoutsdijk, gemeente Borsele

De stap naar het modelleren van een reële woonwijk is gemaakt door eerst een klein stuk straat in het 2D model te zetten. Dit is gedaan om op deze manier op kleine schaal te testen wat er bij een berekening van water over staat in een reële situatie gebeurt. Op deze manier kon o.a. ingezoomd worden op de waterbalans: op hoe de interactie is tussen stroming over het maaiveld, putuitstroom en putinstroom. Daarnaast is de invloed van wijziging van numerieke 2D simulatie parameters bekeken.

Er is gekozen voor het modelleren van een straat in Ellewoutsdijk, omdat er van dit dorp een dataset met mobile laser data beschikbaar was bij ARCADIS. Vanuit praktische overwegingen, de bestandsomvang van de laser data en de tijdsinvestering benodigd voor het geschikt maken van de data, is gekozen om deze 'nieuwe' techniek in te zetten bij een klein stukje straat om de test haalbaar te houden.

3. Een bestaande schematisatie van het rioolstelsel van Prinsenbeek, gemeente Breda.

Uiteindelijk is een geheel rioolstelsel met een 2D model van het maaiveld doorgerekend. Deze stap is gemaakt om realistisch te kijken naar de haalbaarheid van en de manier waarop 2D modellering ingezet kan worden bij de toetsing van een rioolstelsel. De focus ligt bij deze schematisatie voornamelijk op welke mogelijkheden het 2D model biedt ten aanzien van visualisaties.

3.3

MODELMATIGE RANDVOORWAARDEN

In dit afstudeeronderzoek is gewerkt met de volgende randvoorwaarden:

- Gebeurtenisberekeningen zijn gebruikt om water over straat te simuleren. Deze gebeurtenisberekeningen zijn gebaseerd op 15 minuten neerslagreeksen waargenomen in De Bilt van 1955 tot 1979 (zie 6.2). Bui 08 en hoger zijn gebruikt voor het berekenen van water op straat.
- Wanneer water op straat berekend wordt in een 1D model zal de rioolput gedefinieerd worden als een fictief kegelvormig reservoir. Wanneer gewerkt wordt met een gecombineerd 1D-2D model, zullen deze modellen door 2D rioolputten aan elkaar gekoppeld worden (zoals beschreven in 7.1).
- Voor de ruwheid van leidingen kan gekozen worden uit: Colebrook-White, Hazen Williams, Manning of de inverse Manning. In dit onderzoek wordt als standaardwaarde voor ruwheid $k_{\text{beton}} = 3,0$ mm aangehouden (Colebrook-White), dit is gebaseerd op de Leidraad Riolerings C2100 (Rioned, 2004).
- In het onderzoek is gewerkt met niet-stationaire berekeningen. Het model (InfoWorks) berekent de inloop en stroming in het rioleringsmodel als functie van tijd.

HOOFDSTUK

4 Hydrodynamische modellen

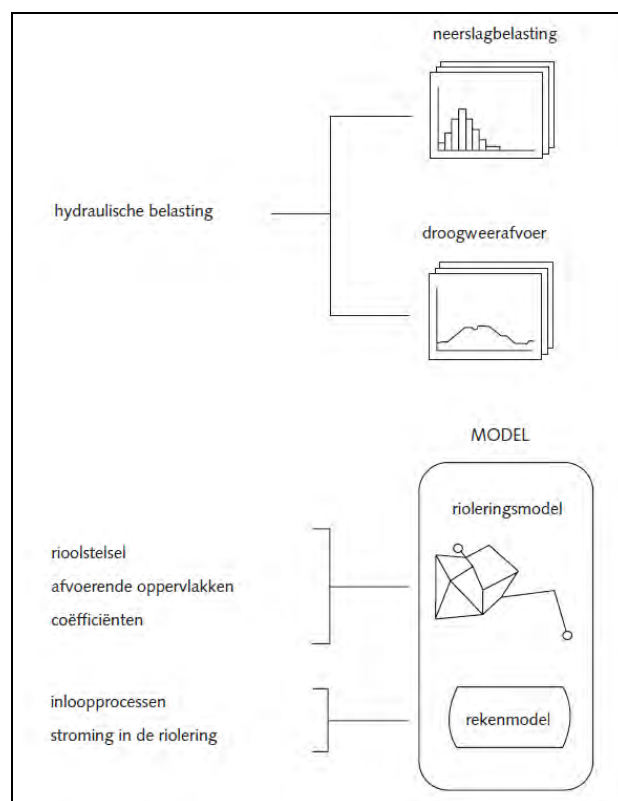
4.1

ALGEMEEN

Hydrodynamische modellen worden veelvuldig gebruikt om het hydraulisch functioneren van rioolstelsels te beoordelen (Clemens, 2001). Dit wordt gedaan door middel van het analyseren van het rioleringsmodel onder een bepaalde hydraulische belasting. Deze kan bestaan uit een neerslagbelasting en/of de droogweerafvoer. Het rioleringsmodel is een beschrijving van het rioolstelsel. De beschrijving van hydraulische processen, een inloopmodel en een stromingsmodel gebeurt in het rekenmodel (Rioned, 2004). Zie Figuur 4.1.

Figuur 4.1

Modelleren van een rioolstelsel



Een specifiek doel waarvoor ook hydrodynamische modellen worden gebruikt is het inzichtelijk maken van wateroverlastlocaties. Door middel van modelberekeningen kan, uitgaande van een regenbui met een bepaalde herhalingstijd, berekend worden op welke locaties er wateroverlast optreedt.

Door modelleren en simuleren kunnen overstromingsrisico's voor het stedelijk gebied in beeld gebracht worden. Voor gemeenten zijn de uitkomsten van modelleren en simuleren een instrument om afwegingen en keuzes te maken waar en tot welk beschermingsniveau maatregelen noodzakelijk zijn. Mede in het licht van het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) is het voor gemeenten van belang om voorbereid te zijn op toekomstige extreme regenval.

Voor het opstellen van diverse gemeentelijke documenten, zoals het Basisrioleringsplan (BRP) en (verbreed) Gemeentelijk Rioleringsplan (vGRP), wordt het rioleringsstelsel van een gemeente getoetst. Er worden o.a. berekeningen gemaakt waar mogelijk overlast kan optreden en vervolgens wordt aangegeven welke maatregelen genomen zouden kunnen worden om overlast te beperken tot een bepaald niveau. Voor deze berekeningen worden hydrodynamische modellen gebruikt. InfoWorks CS is een vaak gebruikt programma voor dergelijke berekeningen. Op dit moment wordt in Nederland voor rioleringsmodelleringen door de meeste adviesbureaus gebruik gemaakt van InfoWorks CS van MWH Soft.

4.2

ONDERGRONDS EN BOVENGRONDS

De eerste generatie hydrodynamische modellen, bijvoorbeeld Storm Water Management Model, geïntroduceerd in 1971, analyseerde alleen de ondergrondse stroming in rioolbuizen. Water wat overstroomde vanuit de rioolputten bleef in een fictieve vorm (bijvoorbeeld een kegelvorm) boven de rioolput staan, en wanneer er rioleringscapaciteit vrij kwam stroomde het terug het riool in.

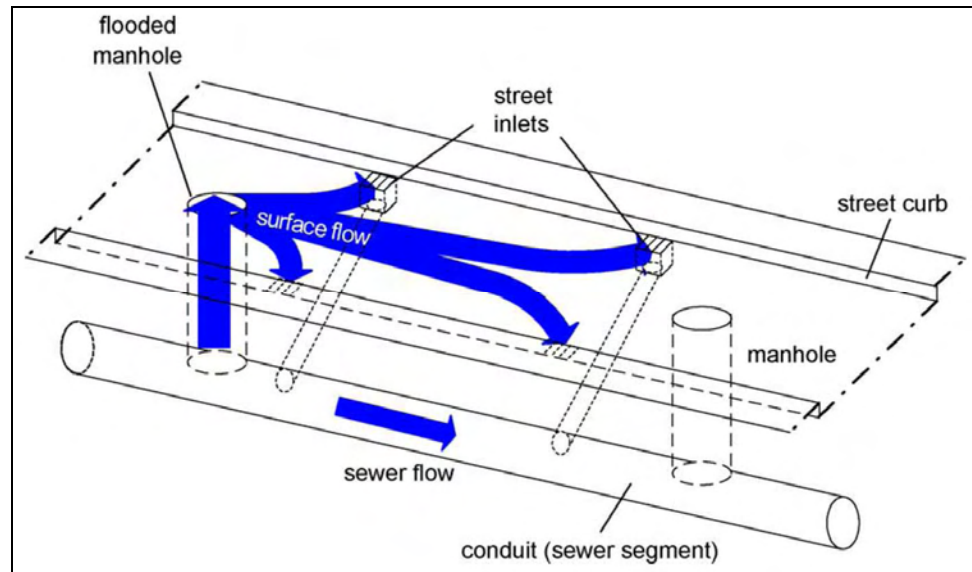
Latere modellen, zoals MIKE-Urban en InfoWorks Collection System (CS) 7.5, kregen opties om rekening te houden met stroming over het maaiveld door leidingen of goten op het maaiveld te modelleren. Het vervolg op deze 1D (riolering)-1D (straten) modellen zijn de 1D (riolering) -2D (straten) modellen. Voorbeelden hiervan zijn MOUSE-MIKE 21, Sobek Urban of TUFLOW (Leandro *et al*, 2009). Ook Wallingford Software kwam in 2007 met een nieuwe versie van InfoWorks CS waarmee 2D-modelleren van waterstroming over het maaiveld mogelijk werd. Het gebruik van deze 1D-2D modellen is echter nog niet doorgebroken.

Modellen waarbij het ondergrondse systeem gekoppeld kan worden aan het bovengrondse systeem kunnen geclassificeerd worden als een '*dual drainage model*'. Volgens Djordjevic *et al* (2005) is het '*dual drainage*'-concept in de jaren '80 geïntroduceerd in Noord Amerika. Het concept houdt in dat stedelijke afwatering op een gecontroleerde manier gebeurt door gebruikmaking van een *minor system* (ondergrondse riolering) en een *major system* (delen van het straatoppervlak). Schematisch is dit weergegeven in Figuur 4.2. Een deel van de neerslag resulteert in *run off* wat naar de straatkolken (*street inlets*) loopt. Via deze kolken stroomt het water naar de rioleringsbuizen (*conduits*). Bij overbelasting van het ondergrondse systeem stroomt het water vanuit de inspectieputten (*manholes*) de straat op waardoor stroming over het maaiveld (*surface flow*) ontstaat.

De koppeling van het ondergrondse en het bovengrondse systeem in hydrodynamische modellen, '*dual drainage modelling*', is pas later van de grond gekomen. Djordjevic *et al* (1999) heeft in 1999 een eerste beschrijving gedaan van de gecombineerde modellering van ondergrondse en bovengrondse systemen. Bij zowel 1D-1D als 1D-2D modellen kan gesproken worden van '*dual drainage modelling*'.

Figuur 4.2

'Dual drainage'-concept, interactie tussen ondergrondse en bovengrondse stroming (Schmitt *et al.* 2004)



Achtereenvolgens zal ingegaan worden op deze drie wijzen van berekenen van water op straat.

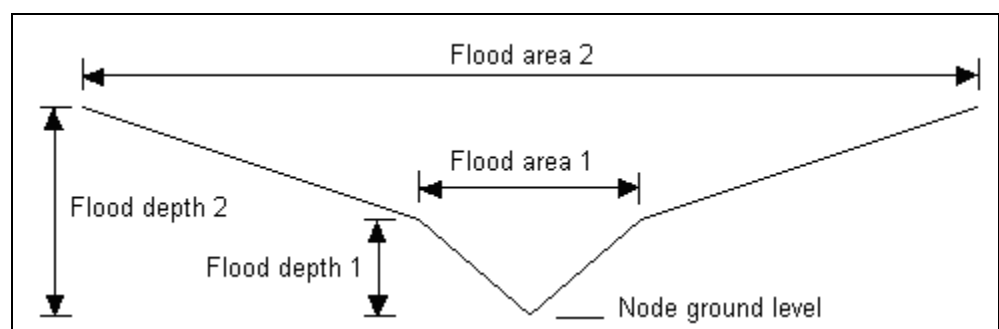
4.2.1

TRADITIONEEL 1D-MODEL

Op dit moment wordt de berekening van locaties waar water op straat optreedt bij een bepaalde neerslagintensiteit nog op grote schaal middels het traditioneel 1-dimensionaal strengenmodel gedaan. Het ondergrondse systeem wordt doorgerekend met droogweerafvoer (DWA) en hemelwaterafvoer (HWA) en wanneer het rioolsysteem op een zeker moment, op bepaalde plekken vol is, wordt per rioolput een waterhoogte berekend. Dit gebeurt door eerst boven elke rioolput een denkbeeldig reservoir in de vorm van een kegel te schematiseren. Zie Figuur 4.3. Dit reservoir wordt gedimensioneerd volgens de in Figuur 4.3 genoemde aspecten. In deze kegelvorm kan een bepaalde waterhoogte berekend worden die aangeeft hoe groot de wateroverlast op deze locatie zal zijn.

Figuur 4.3

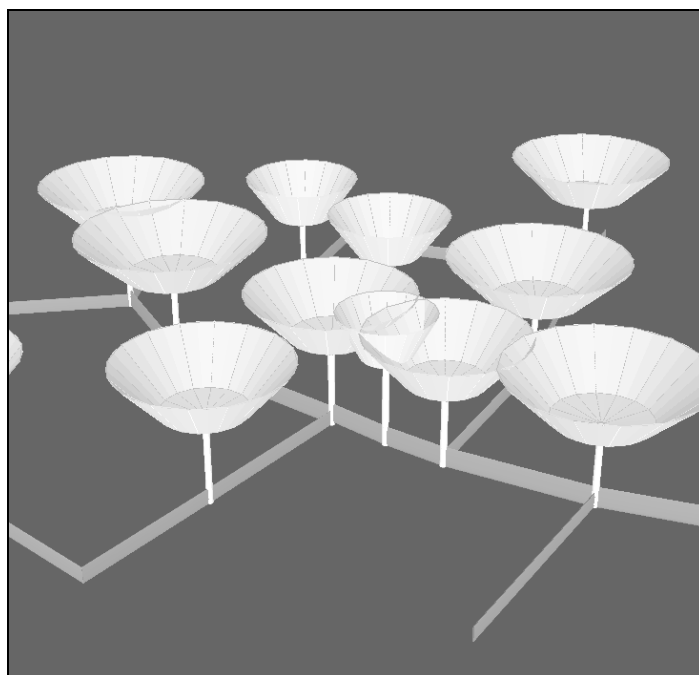
Reservoir boven rioolput



Afhankelijk van de definiëring van het reservoir en van de mate van overbelasting, treedt er bij overbelasting van het systeem een waterhoogte op in de kegel (zie Figuur 4.4).

Figuur 4.4

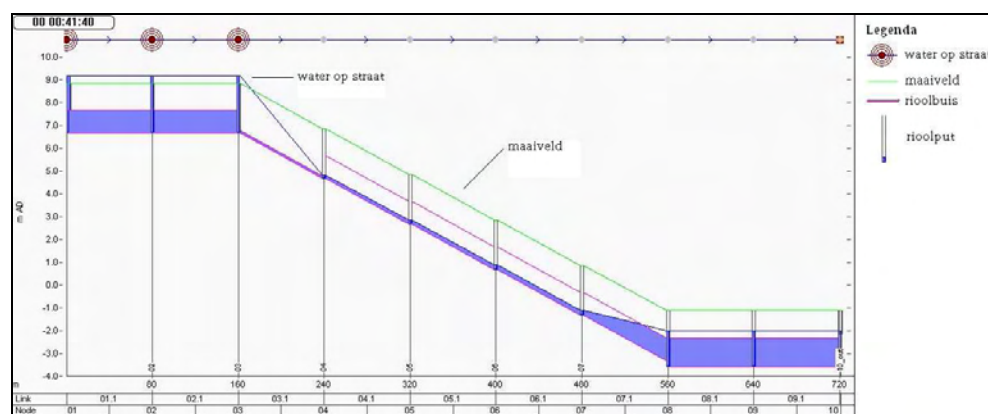
Fictieve kegelvormige reservoirs boven
rioolputten



Bij het definiëren van denkbeeldige reservoirs boven rioolputten kan een vertekend beeld ontstaan van de realiteit. Zoals in Figuur 4.5 te zien is zal in de realiteit, als gevolg van het maaiveldverloop, water afstromen naar het lageregelegen rechtergedeelte indien er aan de linkerkant water op het maaiveld komt te staan. In het traditionele 1D-model wordt echter water op straat berekend aan de linkerkant.

Figuur 4.5

Zijaanzicht 1D-modellering 'water op
straat'



4.2.2

1D-1D MODEL

Bij 1D-1D modellen worden bovengronds het maaiveld als open leidingen (rechthoekige goten) geschematiseerd. Op deze manier kan het water bovengronds afstromen. Bij deze werkwijze kan er dus niet geanalyseerd worden wat er gebeurt wanneer het waterniveau stijgt tot boven de stoepranden. Afhankelijk van de beschikbare hoogtedata kunnen de bovengrondse leidingen (als schematisatie van het maaiveld), tussen inspectieputten in nog gedetailleerder geschematiseerd worden.

4.2.3

1D-2D MODEL

Door in een 2D-model de stroming van water over het maaiveld mee te nemen in de berekening van wateroverlast kan de realiteit naar verwachting dichter worden benaderd. Indien dit laatste het geval is kan op deze manier met meer zekerheid uitspraken gedaan worden over potentiële wateroverlastlocaties. De modelberekening resulteert in een wateroverlastlandschap wat aangeeft waar bij een bui met een bepaalde herhalingstijd plasvorming optreedt. Afhankelijk van de locatie en mate van plasvorming kan vervolgens bepaald worden of er sprake is van overlast en waar maatregelen genomen zouden kunnen worden. Vervolgens biedt 2D-modellering de mogelijkheid om het effect van ondergrondse en bovengrondse interventies, al dan niet gericht op het voorkomen van wateroverlast, in het stedelijk gebied te evalueren. Hierbij kan gedacht worden aan het aanleggen van drempels om water af te laten stromen naar een andere locatie, het aanleggen van infiltratie bassins, etc.

Het gebruik van 2D-modellering is pas recent aan de orde gesteld in de advieswereld. In 2006 rapporteerde stichting Rioned in *Stedelijke Wateropgave – Vergelijking normen voor water op straat en inundatie* het volgende: *“De (on)mogelijkheid van modelleren van ‘water op straat’ is een essentiële schakel in de beoordeling van het functioneren van de riolering met buien extremer dan T=2 jaar. De ontwikkeling van die modellen om het gedrag van ‘water op straat’ te voorspellen moet meer vorm gaan krijgen. In principe is er al veel mogelijk maar de kwaliteit van de modellen is nog niet aan de maat en bovendien is de kwaliteit en beschikbaarheid van terreindata voorlopig nog een zwakke schakel.”* (Rioned, 2006, p.7).

Vervolgens werd op de Rioned-dag 2007 in de presentatie ‘Wateroverlast in een model’ (Melger, 2007) aandacht gegeven aan de uitdagingen van 2D-modellering van wateroverlast. Modelleren van de bovengrondse infrastructuur staat nog in de kinderschoenen, zo werd in de presentatie gesteld. In hetzelfde jaar verscheen het visiedocument *Klimaatverandering, hevige buien en riolering* van de stichting Rioned (2007a). Daarin werd gezegd dat er op dat moment nog geen mogelijkheid is om computermodellen te gebruiken voor het analyseren van water op straat. Later dat jaar echter kwam het bedrijf Wallingford Software, thans onderdeel van MWH Soft, met InfoWorks CS 8.5, waarmee tweedimensionale simulatie van waterstroming over het maaiveld mogelijk werd. Deze wijze van modelleren kan samen met het strengenmodel gebruikt worden.

In 2009 is de modellering van waterstroming over straat voor het eerst, in één alinea, benoemd in de Leidraad Riolering¹ module C2150 *Water op straat*. In deze module wordt gesteld dat meerdimensionale stromingsmodellen ingezet kunnen worden om wateroverlast te verklaren uit waterstroming over straat. Twee hindernissen worden genoemd die nog te overkomen zijn: als eerste de verkrijging van het detailniveau maaiveldhoogten en daarnaast wordt genoemd dat de kwaliteit van de beschikbare software nog verre van ideaal is (Rioned, 2009). Dit standpunt is echter niet verder onderbouwd en toegelicht.

Op dit moment zijn 11 adviesbureaus in samenwerking met de stichting Rioned bezig om een onderzoek op te zetten om een methodiek en instrumenten te ontwikkelen voor het modelleren van water op straat. (Rioned, 2010)

¹ De Leidraad Riolering is een consensusrichtlijn, opgesteld door een taakgroep vanuit diverse betrokkenen, opgesteld onder toezicht van stichting Rioned en het ministerie van VROM

Om verder te komen in de toepassing van 2D-modellen van waterstroming over straat is het noodzakelijk dat de beschikbare software onderzocht en getoetst wordt. Ook de verkrijging van het benodigde detailniveau van terreindata vereist aandacht. De beide aspecten, zowel de werking van de software als de verkrijging van maaiveldhoogten, zijn in dit onderzoek tegen het licht gehouden.

HOOFDSTUK

5 InfoWorks CS

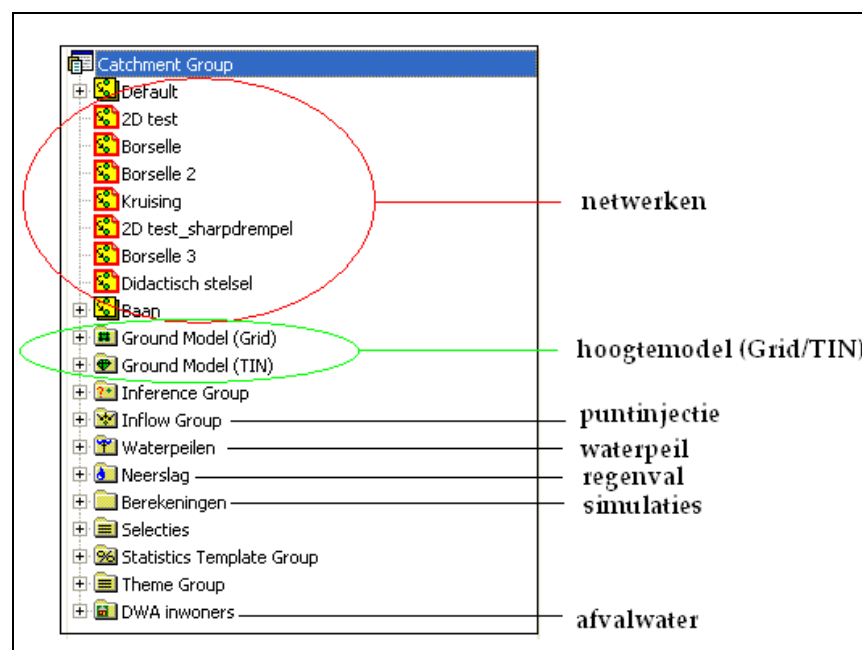
5.1

BASIS MODELOPBOUW

De opbouw van een rioleringsmodel binnen InfoWorks CS is weergegeven in Figuur 5.6. De basis van het model (1D-strengenmodel) is een netwerk wat bestaat uit *nodes* (putten), *links* (verbindingen) en *subcatchments* (deelgebieden). Deze elementen worden gebruikt om een rioolstelsel, wat bestaat uit putten, leidingen en kunstwerken (zoals pompen, overlaten, gemalen, etc.), te schematiseren.

Figuur 5.6

Structuur InfoWorks CS



Enkele van de belangrijkste elementen uit het rioleringsmodel worden hieronder besproken.

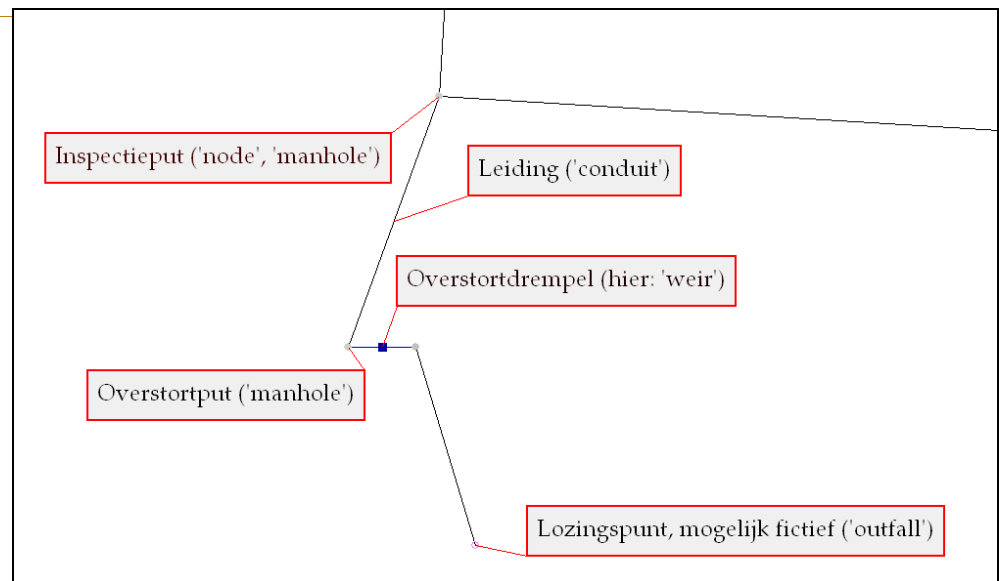
Een *node* is doorgaans een *manhole* (inspectieput). Andere typen *nodes* zijn: *storage*, *break*, *outfall*, *pond* of *outfall 2D*. Hiermee kunnen specifieke elementen geschematiseerd worden. Respectievelijk een reservoir, een knik in een leiding, een overstortput, een infiltratiereservoir of een overstort naar het 2D maaiveld te schematiseren. Zie ook Bijlage 2, Tabel 6.16.

Links zijn onder te verdelen in drie hoofdcategorieën; *conduits* (leidingen), *ancillaries* (kunstwerken) en *rivers* (waterlopen). Leidingen worden gedefinieerd door o.a. materiaal, hoogte, breedte, ruwheid, etc. Diverse kunstwerken, *ancillaries*, die gebruikt worden in een regulier rioleringsmodel zijn *flap valve* (terugslagklep), *pump* (gemaal) en *weir* (overstort).

In Figuur 5.7 is te zien hoe enkele basiselementen weergegeven worden in InfoWorks.

Figuur 5.7

Voorbeeldnetwerk



Een *subcatchment* binnen een netwerk representeert het gebied waarbinnen een *manhole* water inzamelt. Binnen een *subcatchment* kan er sprake zijn van regenval en afvalwater. Bij regenval is het van belang welk type afvoerend oppervlak er binnen het desbetreffende *subcatchment* gevonden wordt. Zoals te vinden in de Leidraad Riolerings module C2100 'Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren' (Rioned, 2004) zijn er vier hoofdtypen afvoerend oppervlak te definiëren. Deze typen oppervlak kunnen elk specifiek gekarakteriseerd worden met een type afstroming. Zie Tabel 5.1. De in totaal twaalf typen oppervlak hebben elk specifieke waarden voor o.a. afstromingsvertraging, oppervlakteberging en infiltratiecapaciteit.

Tabel 5.1

Typen afvoerend oppervlak

Type oppervlak	Type afstroming
Gesloten verhard	Hellend
	Vlak
	Vlak en uitgestrekt
Open verhard	Hellend
	Vlak
	Vlak en uitgestrekt
Dak	Hellend
	Vlak
	Vlak en uitgestrekt
Onverhard	Hellend
	Vlak
	Vlak en uitgestrekt

Naast regenval kan er binnen een *subcatchment* ook sprake zijn van droogweerafvoer (DWA) wat kan bestaan uit afvalwaterstromen van inwoners of bedrijfsafvalwaterstromen.

Zowel *nodes*, *links*, als *subcatchments* kunnen gelabeld worden om duidelijk te onderscheiden van welk systeem type sprake is. De volgende systeemtypes zijn als label beschikbaar:

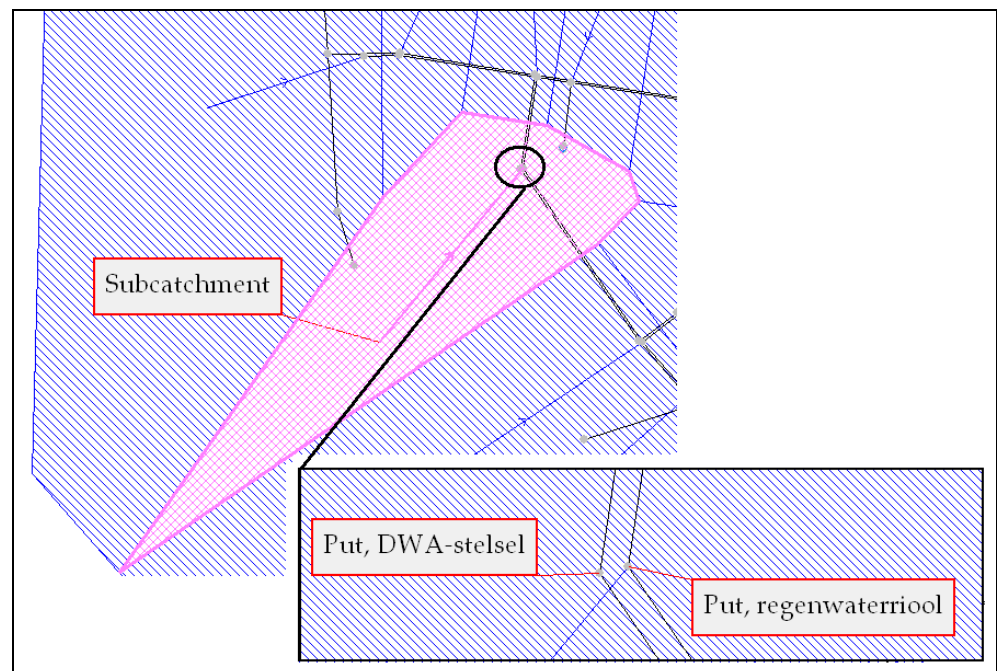
- 1 *Storm* (hemelwaterafvoer)
- 2 *Foul* (droogweerafvoer)
- 3 *Combined* (gemengd riool)
- 4 *Overland*
- 5 *Other*

Wanneer er in een gebied een gescheiden rioolstelsel ligt zullen er overlappende *subcatchments* zijn van het type *foul* en *storm*. In de modelberekening wordt in dat geval vuilwater (DWA) gekoppeld aan het *subcatchment* met de typering *foul* terwijl regenwater (HWA) aan het type *storm* gekoppeld wordt.

In Figuur 5.8 is een voorbeeldnetwerk weergegeven met een gescheiden riool. Te zien is dat het afvoerend oppervlak via een link gekoppeld is aan een put waar desbetreffend oppervlak op loost.

Figuur 5.8

Voorbeeld *subcatchment*



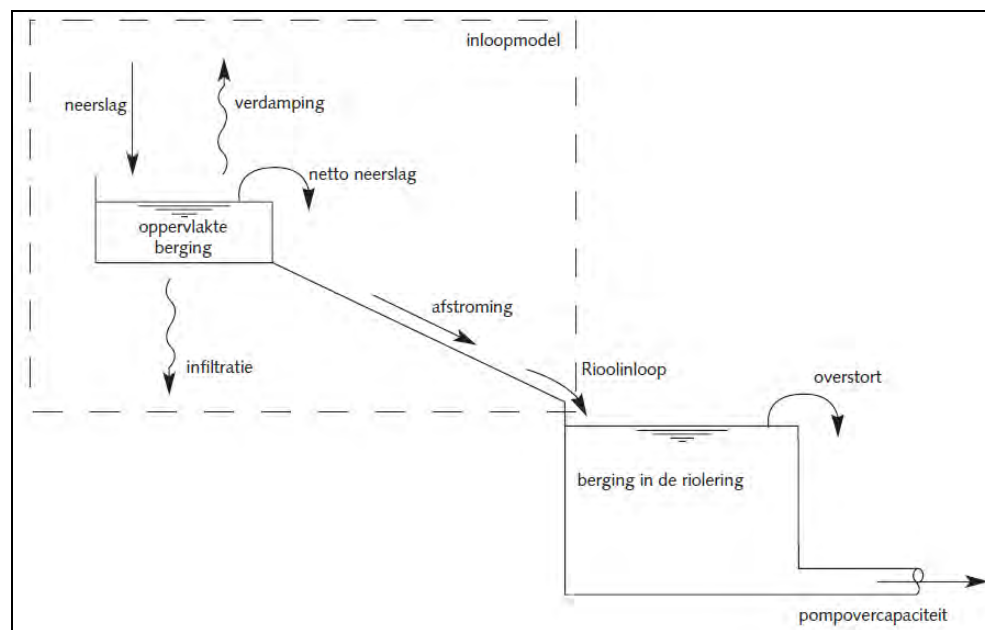
5.2

INLOOPMODEL

Neerslag wordt in het 1D-model via het NWRW 4.3 inloopmodel (zie Figuur 5.9) berekend tot een bepaalde rioolinstroom.

Figuur 5.9

NWRW 4.3 inloopmodel, ontwikkeld in 1989 door de Nationale Werkgroep Riolerings en Waterkwaliteit (Rioned, 2004)



In InfoWorks functioneert dit inloopmodel door deelgebieden te creëren en toe te kennen aan een bepaald type oppervlak en afstroming (zoals weergegeven in Tabel 5.1).

5.3

SIMULATIEPARAMETERS

Naast de hierboven beschreven schematisatie van de werkelijkheid en invoer van data zijn er ook simulatieparameters die door de gebruiker gewijzigd kunnen worden. Simulatieparameters zijn in dit geval meestal niet of moeilijk meetbare parameters. Bepaalde parameters zijn niet in de realiteit aanwezig, dit betreft numerieke parameters die van invloed zijn op het mathematische model, of de numerieke oplossingswijze daarvan. In hoofdstuk 8.1.1 zal op twee specifieke simulatieparameters worden ingegaan.

5.4

SIMULATIE

Door middel van een simulatie wordt het systeem doorgerekend onder een bepaalde optredende regenbui en/of DWA. De volgende stappen worden genomen om een berekening uit te voeren:

- I. Een *Run Title* wordt gegeven en een *Network* wordt geselecteerd.
- II. Diverse *Events* kunnen als input gegeven worden:
 - A. een regenbui (*Rainfall Event*),
 - B. een afvalwaterstroom (*Waste Water*),
 - C. een puntinjectie (*Inflow*),
 - D. een industriële afvalwaterstroom (*Trade Waste*),
 - E. een waterniveau (*Level*),
 - F. infiltratie in de bodem.
- III. In de *Run Parameters* worden de simulatieduur en tijden gespecificeerd.

HOOFDSTUK

6 Datagebruik

Om een rioolstelsel door te rekenen wordt het model gevoed door gegevens van het rioolstelsel (hoofdstuk 6.1) en neerslag- en/of afvoergegevens (hoofdstuk 6.2). Specifiek voor het twee dimensionaal simuleren van water over het maaiveld is een hoogtemodel (hoofdstuk 6.3) als invoer benodigd.

6.1

RIOOLSTELSEL

In de eerste plaats zijn gegevens benodigd m.b.t. het rioolstelsel dat gesimuleerd wordt. Dit zijn de gegevens van bijvoorbeeld de ligging en de dimensies van leidingen, putten, en andere constructies. Verder moet bekend zijn wat het type, de grootte en het lozingspunt van de afvoerende oppervlakken is. Dit is relevant voor de uiteindelijke berekening van de locatie en de hoeveelheid rioolinstroom.

Het rioolstelsel kan ook belast worden met droogweerafvoer. Wanneer dit het geval is moet onder andere bekend zijn wat omvang, verloop in tijd en locatie van lozing zijn.

6.2

NEERSLAGGEGEVENS

Voor berekeningen van water op straat worden standaard neerslaggebeurtenissen gebruikt. Deze standaard neerslaggebeurtenissen zijn gebaseerd op 15 minuten neerslagreeks waargenomen in De Bilt van 1955 tot 1979. (Rioned, 2004)

Het overzicht van standaard neerslaggebeurtenissen is weergegeven in Tabel 6.2. Als voorbeeld is in Figuur 6.10 het verloop van bui 08 weergegeven.

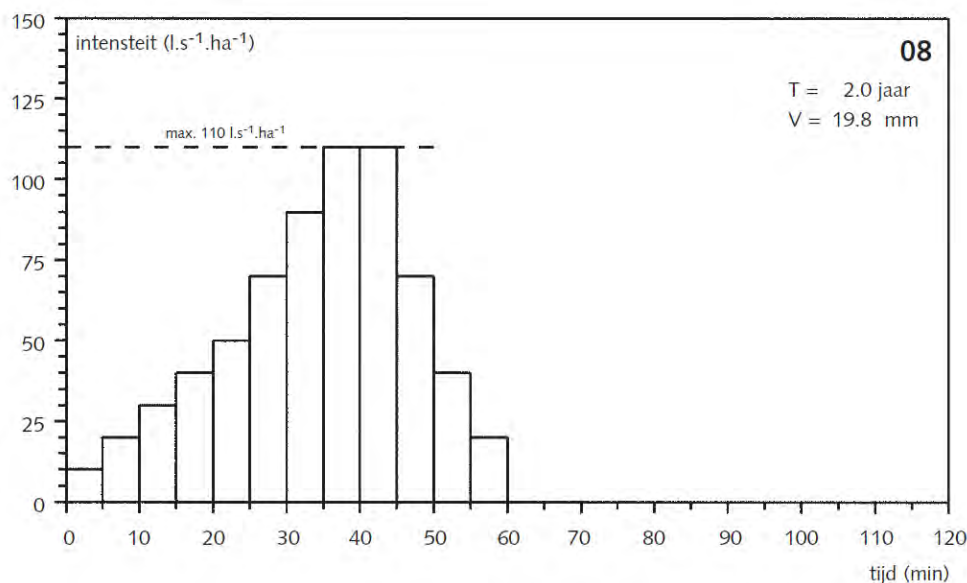
Tabel 6.2

Standaard neerslaggebeurtenissen

Bui	Herhalingstijd [jaar]	Volume [mm]	Piek: voorin (V) of achterin (A)	Piekintensiteit [L*s ⁻¹ *ha ⁻¹]
01	0.25	10.5	V	50
02	0.25	10.5	A	50
03	0.50	14.4	V	70
04	0.50	14.4	A	70
05	1.00	16.8	V	90
06	1.00	16.8	A	90
07	2.00	19.8	V	110
08	2.00	19.8	A	110
09	5.00	29.4	V	160
10	10.00	35.7	V	210

Figuur 6.10

Neerslaggebeurtenis bui 08



6.3

HOOGTEMODEL

Voor de 2D simulatie van waterstroming over het maaiveld is een hoogtemodel benodigd. Het hoogtemodel wordt ook wel een Digitaal Terreinmodel (DTM) genoemd. De typen hoogtemodel die in InfoWorks gebruikt kunnen worden zijn:

- een onregelmatig verdeeld netwerk van driehoeken; een *triangular irregular network* (TIN)
- een regelmatig verdeelt rooster; een Grid (raster-bestand).

Voor de Nederlandse situatie is het voor het stedelijk gebied een uitdaging om hoogtedata op hoog detailniveau te verkrijgen. Er is op dit moment nog geen of nauwelijks hoog detailniveau hoogtedata beschikbaar van het stedelijk gebied. Aangezien er bij modellering van waterstroming over straat sprake is van geringe waterdieptes die zeer dynamisch zich kunnen bewegen over het oppervlak is het juist van belang om een gedetailleerd hoogtemodel te hebben.

Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), een meerjarenprogramma van Rijkswaterstaat en de waterschappen, is wel voortdurend in ontwikkeling. Doelstelling is om de AHN2 in 2012 zo ver af te hebben dat van heel Nederland hoogtegegevens beschikbaar zijn voor elke 50 cm, met een nauwkeurigheid, in zowel de hoogte als in xy-richting, van 5 cm. Het verschil met de eerdere AHN1 is dat de AHN2 een grotere punt dichtheid heeft. Bij de AHN2 is dit tussen de 6 en de 20 punten per vierkante meter. Dit is 10 tot 100 maal gedetailleerder dan de AHN1. (AHN, 2010)

Op dit moment is de hoogtedata die beschikbaar is voor het stedelijk gebied doorgaans beperkt tot hoogtes van inspectieputten. Er is de mogelijkheid om gedetailleerde hoogtedata van het stedelijk gebied te verkrijgen door middel van *mobile laser mapping*. Deze techniek kan bij gebruikmaking van GPS INS (*inertial navigation system*) een nauwkeurigheid in xy-

positie van 2 cm en in z-positie van 5 cm leveren. Wanneer extra punten worden ingemeten kan de nauwkeurigheid verhoogd worden.

Voor dit afstudeeronderzoek is laserdata gebruikt van een dorpje in Zeeland: Ellewoutsdijk (gemeente Borsele). Zie hoofdstuk 8.2.1. Daarnaast is er ook door middel van GIS-interpolatie van de hoogtes van inspectieputten een hoogtemodel gecreëerd van Prinsenbeek (Gemeente Breda). Zie hoofdstuk 8.2.2.

HOOFDSTUK

7

2D-modellering

7.1

1D MODELLEREN VS. 2D MODELLEREN

Bij één dimensionaal modelleren wordt er gewerkt met de één dimensionale oplossing van de Saint Venant vergelijkingen. Voor het schematiseren en berekenen van waterstroming over straat zijn meerdere mogelijkheden zoals beschreven in hoofdstuk 4.2.

Een mogelijkheid is dat het terrein wordt geanalyseerd met behulp van dwarsdoorsneden. Er is dan sprake van 1D-1D modellering. Waterhoogte en stroomsnelheid worden berekend in dwarsdoorsneden loodrecht op de stroomrichting. Buiten deze dwarsdoorsneden wordt het overstromende water geïnterpoleerd. Deze manier van modelleren wordt doorgaans gebruikt buiten het stedelijk gebied. Meestal is er dan sprake van rivieren of kanalen waarbij één stromingsrichting wordt verondersteld.

In stedelijk gebied gaat deze veronderstelling niet op. De variatie in de hoogte en helling van het maaiveld zorgt voor een zeer complex hoogtemodel. Wanneer water op het straatoppervlak terecht komt en gaat afstromen is geen sprake van een eenduidige stromingsrichting. Kleine hoogteverschillen kunnen grote invloeden hebben aangezien het bij waterstroming over straat om kleine waterdieptes gaat.

Bij twee dimensionale modellen wordt de twee dimensionale Saint Venant vergelijking opgelost. Stroming wordt dan in twee ruimtelijke richtingen berekend (x- en y-richting). Wanneer op deze manier gemodelleerd wordt is er een hoogtemodel van het gebied vereist. (Alkema, 2007)

Voor twee dimensionale modellen geldt dat het ondergrondse rioleringsmodel gekoppeld moet worden aan het bovengrondse model. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. In InfoWorks CS gebeurt dit door zogenaamde 2D putten. De put wordt daarmee een put waar water vanuit het maaiveld in - en vanuit het riool uit kan stromen. De berekening van deze stroming gebeurt met een stuwvergelijking. Hierbij wordt aangenomen dat de hoogte van de stuw gelijk is aan het maaiveld ter plaatse van de put. De lengte van de stuw wordt gelijk gesteld aan de omtrek van de schacht van de put. Daarnaast wordt er een overstort coëfficiënt gebruikt die overeenkomt met de overstortcoëfficiënt van een stuw.

7.2

HYDRAULISCHE ACHTERGROND

Voor berekening van waterstroming over straat worden eveneens als voor stroming in het ondergrondse rioelstelsel de *Shallow Water* vergelijkingen (SWE) gebruikt. De twee dimensionale SWE bestaan uit drie vergelijkingen, de continuïteitsvergelijking en twee

bewegingsvergelijkingen. (Vojinovic *et al*, 2009) Deze vergelijkingen representeren een benadering van de stroming in open water in het horizontale vlak over een beschreven

Continuïteitsvergelijking

De continuïteitsvergelijking houdt in dat het volume van een vloeistof gelijk blijft als de som van de inkomende en uitgaande stromen gelijk is.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

waarin:

h = waterdiepte [m]

u en v = stroomsnelheid in resp. x - en y -richting [m/s]

Bewegingsvergelijkingen

De bewegingsvergelijking is afgeleid van de wet van het behoud van impuls. De bewegingsvergelijkingen zijn als volgt:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial(h)}{\partial x} + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = 0$$

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

waarin:

c_f = frictie coëfficiënt [-]

g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]

Complete 2D Saint Venant vergelijkingen

De complete 2D SWE kunnen op meerdere manieren weergegeven worden. Bij Alcrudo en Mulet (2005) zijn deze als volgt geformuleerd:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F = S_b + S_f$$

Hierin kan de bewegingsvergelijking F kan worden opgesplitst in twee componenten: $F = (E, G)$.

U , E en G zijn als volgt gedefinieerd:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2 / 2 \\ huv \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + gh^2 / 2 \end{bmatrix}$$

En waarbij S_b en S_f als volgt gegeven zijn:

$$S_b = -gh \begin{bmatrix} 0 \\ \partial z_B / \partial x \\ \partial z_B / \partial y \end{bmatrix} \quad S_f = -\frac{gn^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \end{bmatrix}$$

Oplossing

Een benadering van de oplossing van de Saint Venant vergelijkingen kan op numerieke wijze verkregen worden. De wijze waarop in InfoWorks de SWE worden opgelost is beschreven in Alcrudo en Mulet (2005) en Alcrudo en Garcia-Navarro (1993). Zij ontwikkelden een oplossingsmodel, het MULFLOOD-model (InfoWorks CS Help). Dit oplossingsmodel zoekt, op een iteratieve wijze, voor elk *mesh* element een benadering van de oplossing van de *Shallow Water* vergelijkingen ofwel de Saint Venant vergelijkingen. Het berekenen van een oplossing gebeurt door het oplossen van een zogenaamd *Godunov scheme*. Dit is een zogenaamd *conservative numerical scheme* waarmee partiële differentiaalvergelijkingen opgelost kunnen worden. Binnen MULFLOOD wordt echter niet het *Riemann* probleem exact opgelost voor elke *interface* zoals binnen het *Godunov scheme* gebeurt. MULFLOOD benadert dit met de *Roe approximate Riemann solver*. (Roe, 1981)

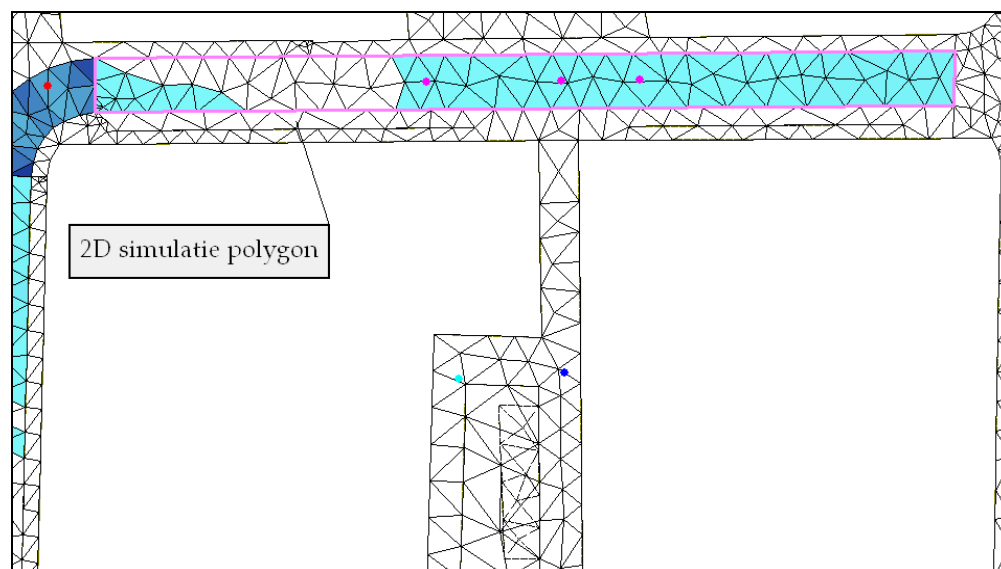
7.3

2D SIMULATIE VAN WATER OP HET MAAIVELD

Om binnen InfoWorks CS gebruik te maken van 2D-modellering van water over straat moet het gebied waar 2D gemodelleerd gaat worden een *2D Simulation Polygon* gecreëerd worden (zie Figuur 7.11). Binnen deze simulatie polygoon wordt op basis van een hoogtemodel (zie hoofdstuk 6.3) een *mesh* van driehoekige elementen gegenereerd. Dit gebeurt volgens de Shewchuk Triangulation Method (Shewchuk, 2010). Het hierop gebaseerde programma Triangle is een programma voor '*two-dimensional constrained Delaunay triangulation and quality mesh generation*.' (Shewchuk, 2010). Deze functionaliteit is ingebouwd in InfoWorks. De *mesh* generatie binnen InfoWorks heeft als resultaat: '*high quality triangular meshes*'. De *mesh* is de schematisatie van het maaiveld. Elk *mesh* element heeft 3 xyz-waarden voor de hoekpunten. Bij het genereren van een *mesh* kan gekozen worden wat de maximale driehoeksgrootte (in m²) is voor elk *mesh*-element. Daarnaast kan ingesteld worden wat de ruwheidsfactor (Manning) is voor het oppervlak. Binnen het *mesh* wordt voor elk *mesh* element voor elk tijdstap berekend wat de waterdiepte, de waterhoogte (incl. maaiveldhoogte), de snelheid en het debiet per lengte-eenheid (m²/s) is. Ook het Froude getal, wat aangeeft of er sprake is van kritische (Froude = 1), subkritische (Froude < 1) of superkritische stroming (Froude > 1), en de stromingsrichting worden per driehoekselement berekend.

Figuur 7.11

Rioleringsmodel met 2D-simulatie polygoon (waarbinnen een *mesh* gecreëerd is)



Wanneer binnen een simulatie zowel met water wat in het riool stroomt als met water wat over het maaiveld stroomt gerekend wordt, dan dient het 1D-strengenmodel gekoppeld te worden aan het maaiveld, het 2D-model. De koppeling tussen het ondergrondse rioolstelsel en het maaiveld vindt plaats binnen de gecreëerde *2D Simulation Polygon* en gebeurt door middel van *2D manholes* met het *flood type 2D*. Dit wil zeggen dat het opengestelde putten zijn waar als de waterstand in het 1D model boven het maaiveld uitkomt, het water op het maaiveld (het 2D-model in) kan stromen. Wanneer er water boven een rioolput staat waar een lagere waterstand dan het maaiveld aanwezig is, kan het water opnieuw het 1D-model instromen.

Het 2D-model kan op meerder manieren gebruikt worden bij de simulatie. Enerzijds is het mogelijk om regen direct op het *mesh* te laten vallen. Op dat moment wordt er geen rekening gehouden met infiltratie en verdamping. In de modelberekening wordt dan direct stroming van water over straat berekend. Water kan nadat het op het maaiveld gevallen is afstromen en de putten in- en uitstromen.

Anderzijds kan ervoor gekozen worden om regenval via het inloopmodel (zoals beschreven in hoofdstuk 5.2) het ondergrondse systeem in te laten stromen. In dat geval komt het water pas op het maaiveld als het ondergrondse systeem overbelast is. Op het moment dat water vanuit rioolputten het maaiveld opstroomt begint de 2D-modellering.

7.4

2D SIMULATIEPARAMETERS

In Bijlage 3 is een overzicht gegeven van de 2D simulatieparameters. Deze parameters zijn te onderscheiden in mathematische en numerieke parameters. De laatste hebben alleen invloed op de numerieke oplossingswijze. Deze parameters zijn niet terug te vinden in de werkelijkheid. Er kunnen dus geen metingen gedaan worden om deze te optimaliseren.

HOOFDSTUK

8 Modelresultaten

8.1

THEORETISCHE SCHEMATISATIES

In een viertal theoretische schematisaties is de werking van 2D modellering van waterstroming over het maaiveld getest. Het betreft een schematisatie van een rechthoekige goot (8.1.1), een goot met een drempel (8.1.2) en een fictieve kruising (8.1.3). De rechthoekige goot is vergeleken met de modeluitkomsten van het 1D-model en is nagerekend aan de hand van vloeistofmechanica wetten. De goot met een drempel is ook nagerekend aan de hand van de wetten van de vloeistofmechanica. De fictieve kruising is middels visuele observatie geanalyseerd.

8.1.1

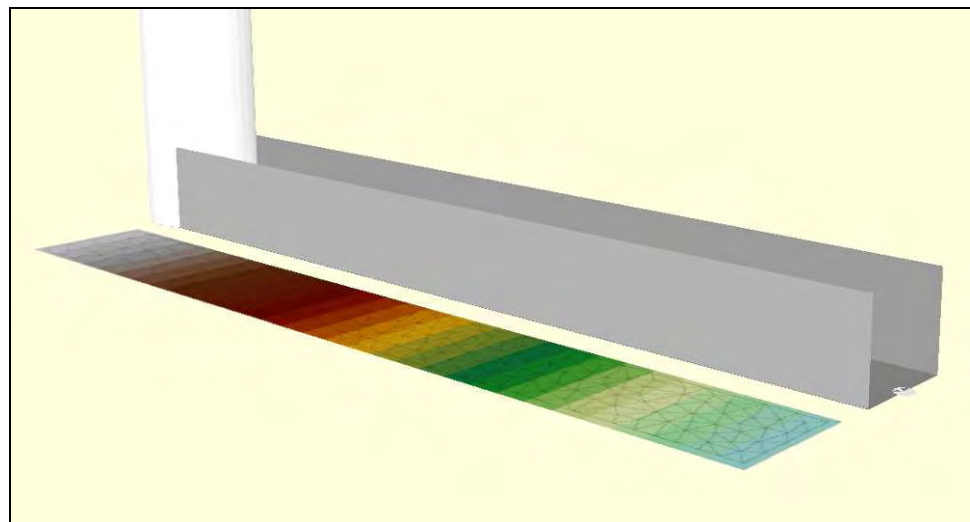
RECHTHOEKIGE GOOT

Structuur

Als eerste test is een rechthoekige goot gemodelleerd (zie Figuur 8.12). Het betreft een goot van 50 meter lang en 6 meter breed. De goot ligt onder een helling van 1 promille. Op twee manieren is de goot in het model gezet, zowel in het 1D strengenmodel als in het 2D model van het maaiveld.

Figuur 8.12

3D-view rechthoekige goot, linksvoor 2D, rechtsachter 1D



In het 1D strengenmodel is de goot geschematiseerd als twee putten waartussen een open leiding ligt met een rechthoekig profiel. In het 2D model is een hoogtemodel gecreëerd op basis van een handmatig ingevoerd hoogtemodel in het programma Microsoft Excel. Vervolgens is op dit TIN, binnen een 2D Simulation Polygon, een mesh gecreëerd. De creatie van een mesh is onderdeel van InfoWorks CS, volgens de Shewchuk Triangulation Method

(Shewchuk, 2010). Voor de *mesh* zijn verschillende eigenschappen gevarieerd, o.a. *maximum triangle area* en *roughness* (Manning's n).

De grenzen van de 2D simulatie polygoon zijn gedefinieerd als *Vertical Wall*, zijnde een oneindige hoge muur. De uitstroom is in het 1D gemodelleerd middels een reguliere *outfall*, die een vrije uitstroom heeft. In het 2D heeft de goot benedenstrooms een vrije uitstroom, een *dry 2D boundary condition*. Er is ook een modelberekening uitgevoerd met *critical depth* als *boundary condition* benedenstrooms. Dit is nader beschreven onder het kopje resultaten.

Bij zowel het 1D als het 2D model is een constante puntinjectie in de bovenstroomse put dan wel aan de bovenstroomse zijde van het *mesh* geplaatst.

Simulatie

De simulatie is uitgevoerd met drie verschillende debieten (0,01 m³/s, 0,1 m³/s en 0,5 m³/s) onder verschillende 1D simulatie parameters.

De 1D simulatieparameters waarmee gevarieerd is zijn de *minimum base flow depth* en de *base flow factor*. De *minimum base flow depth* is gedefinieerd als de minimale stroomdiepte in leidingen. Onder deze waarde wordt er geen stroming aanwezig verondersteld. De *base flow factor* zorgt voor stabiliteit van de Saint Venant vergelijkingen. Dit betekent dat bij geringe waterdieptes er een bepaalde stroming toegevoegd wordt aan de berekening. Dit is standaard ingesteld op 5% van de leidingdiameter.

Vervolgens is gevarieerd met de *maximum triangle area* en de *roughness* van het maaiveld. De simulatie is in alle gevallen uitgevoerd voor 10 uur met een tijdstap van 1 seconde.

Resultaten

De evenwichtsdiepte en de kritische diepte zijn middels een iteratief rekenproces nagerekend. De manier waarop dit gedaan is, staat beschreven in Bijlage 1.

Als eerste is gekeken naar het optreden van de evenwichtsdiepte. Aangenomen is dat in zowel het 1D- als het 2D-model, halverwege de goot (op 25 meter) de evenwichtsdiepte is opgetreden op het moment dat de waterdiepte constant blijft. Vanuit de resultaten blijkt dat de evenwichtsdiepte optreedt na ongeveer 4-5 minuten.

Het is duidelijk geworden dat in het 1D-model de simulatieparameter '*minimum base flow depth*' bij het berekenen van kleine debieten een rol speelt. De waarde voor deze parameter staat als standaard instelling op 0,02 m. Bij de simulaties blijkt dat dit resulteert in het berekenen van onjuiste waterdieptes in het 1D-model. Dit is in Tabel 8.3 en Tabel 8.4 te zien aan de afwijkende waarden die berekend worden voor de evenwichts- en kritische diepte. De standaardinstelling van *minimum base flow depth* veroorzaakt deze afwijking. Bij de bespreking van de andere resultaten zal bij de kleinere debieten deze instelling van simulatieparameters niet meegenomen worden aangezien gebleken is dat dit een fout in de uitkomsten veroorzaakt.

De evenwichtsdiepte in het 1D-model wijkt bij een debiet van 0,01 m³/s ook bij een andere instelling van de simulatieparameters af van de berekende waarde. In het 1D-model wordt een waarde berekend die 50 % hoger is. Bij hogere debieten liggen de evenwichtsdieptes van het 1D-model en de berekende evenwichtsdieptes meer in dezelfde orde grootte (tot 10 % afwijking).

Tabel 8.3

Resultaten kritische diepte en evenwichtsdiepte in een rechthoekige goot

1D-simulatieparameters		Debiet [m ³ /s]	Evenwichtsdiepte			Kritische diepte		
min base flow depth [m]	base flow factor [-]		2D [cm]	1D [cm]	berekend [cm]	2D [cm]	1D [cm]	berekend [cm]
0,01	0	0,01	1,20	1,80	1,20	0,70	1,30	0,66
0,001	0,001		1,20	1,80	1,20	0,70	1,00	0,66
0,02	0,05		1,20	5,30	1,20	0,70	5,20	0,66
0,01	0	0,1	4,80	4,90	4,80	2,70	3,10	3,10
0,001	0,001		4,80	4,90	4,80	2,70	3,10	3,10
0,02	0,05		4,80	7,20	4,80	2,70	6,40	3,10
0,01	0	0,5	12,10	11,70	13,00	7,60	9,00	9,00
0,001	0,001		12,10	11,70	13,00	7,60	9,00	9,00
0,02	0,05		12,10	12,90	13,00	7,60	10,00	9,00

Als de uitkomsten van het 2D-model en de berekende uitkomsten vergeleken worden is te zien dat de berekende evenwichtsdieptes en de evenwichtsdieptes uit het 2D-model overeenkomen bij een debiet van 0,01 en 0,1 m³/s. Bij een debiet van 0,5 m³/s wijkt de 2D-waarde met 6,9 % af van de berekende waarde.

Daarnaast is het optreden van de kritische waterdiepte geanalyseerd. Aangenomen is dat in het 1D-model de kritische diepte optreedt aan het einde van de 50 meter streng juist voor het water de *outfall* in stroomt. In het 2D-model is aangenomen dat de kritische waterdiepte optreedt juist voor het verlaten van het *mesh*, d.w.z. aan de benedenstroomse kant van de helling.

De kritische diepte in het 1D-model komt bij 0,1 m³/s en 0,5 m³/s overeen met de berekende kritische diepte. De kritische diepte die in het 2D-model gevonden wordt ligt in dezelfde orde grootte maar wijkt duidelijk meer af met respectievelijk 12,9 en 15,6 % lagere waarden.

Tabel 8.4

Procentuele afwijking in evenwichts- en kritische diepte bij 1D- en 2D-model t.o.v. berekende waarde

min base flow depth [m]	base flow factor [-]	Debiet [m ³ /s]	h _e 2D [%]	h _e 1D [%]	h _c 2D [%]	h _c 1D [%]
0,01	0	0,01	0	50	6,1	97,0
0,001	0,001		0	50	6,1	51,5
0,02	0,05		0	341,7	6,1	-87,3
0,01	0	0,1	0	2,1	-12,9	0
0,001	0,001		0	2,1	-12,9	0
0,02	0,05		0	50,0	-12,9	106,5
0,01	0	0,5	-6,9	-10,0	-15,6	0
0,001	0,001		-6,9	-10,0	-15,6	0
0,02	0,05		-6,9	-0,8	-15,6	11,1

Vervolgens zijn in het 2D-model twee *boundary conditions* getest (*dry* en *critical depth*). Bij beide *boundary conditions* zou de kritische diepte op dienen te treden op het moment dat het water benedenstrooms de *mesh* verlaat.

De *dry boundary condition* is gedefinieerd als: “The boundary line is considered to be bordered by a bottomless pit. Water that reaches the edge of the boundary line will flow out of the 2D Simulation polygon and will be lost from the simulation.” (MWH Soft, 2009) Dit komt hydraulisch gezien overeen met de *boundary condition critical depth*: “At the boundary line, if the level in the

boundary element of the 2D Polygon is above the boundary face level, flow out of the 2D Polygon will be calculated using a broad crested weir equation without energy loss."

De dry boundary condition lijkt meer overeen te komen met de eigen berekende kritische waterdiepte (zie Tabel 8.5).

Tabel 8.5

Verskillende *boundary conditions* waarbij kritische diepte op zou behoren te treden vergeleken met eigen berekening.

Debiet [m ³ /s]	Critical depth [cm]	t.o.v. referentie [%]	Dry [cm]	t.o.v. referentie [%]	Eigen berekening [cm]
0,01	1,0	+ 51,5	0,72	+ 9,1	0,66
0,1	4,4	+42,9	2,82	- 8,4	3,08
0,5	2,3	- 74,4	7,86	-12,7	9,00

Het effect van variatie van *mesh* detail op de hoeveelheid water die op het *mesh* blijft staan is getest voor de rechthoekige goot. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 8.6. Bij het kleinste debiet wordt er meer water berekend op het *mesh* bij een groter *mesh* detail. Dit is echter niet het geval bij grotere debieten. Er is bij deze vlakke rechthoekige goot echter geen groot effect van *mesh* detail, aangezien het een vlakke baan betreft. Aangezien het een vlakke goot betreft op basis waarvan de *mesh* is gecreëerd, zijn er geen depressies waar door een fijnmaziger *mesh* te creëren in de berekeningen water zou kunnen blijven staan.

Tabel 8.6

Hoeveelheid water die op het *mesh* achterblijft bij variërend *mesh* detail

Max. triangle area [m ²]	Water op mesh [m ³]		
	bij q= 0,01 m ³ /s	bij q= 0,1 m ³ /s	q= 0,5 m ³ /s
1,00	3,49	13,77	35,07
0,50	3,51	13,73	34,45
0,10	3,56	13,74	34,44

De invloed die de Manning waarde, de te kiezen ruwheid van het oppervlak, heeft op stroming over het maaiveld is getest. In Tabel 8.7 is het resultaat van een variërende ruwheidsfactor weergegeven. De Manning waarde 0,0125 is als referentiewaarde gekozen aangezien dit de gebruikte standaardwaarde is in het model. Een verandering van de ruwheidsfactor met 20% heeft als gevolg een verandering van de hoeveelheid water op het maaiveld van ongeveer 10%. Het is dus duidelijk dat de ruwheidsfactor invloed heeft op de hoeveelheid water op het maaiveld. Hoe groter de ruwheidsfactor, hoe moeilijker het water afstroomt wat er voor zorgt dat er meer water op het maaiveld blijft staan.

Tabel 8.7

Hoeveelheid water die op het *mesh* achterblijft bij een variërende waarde voor ruwheid.

ruwheid, n [-]	verandering t.o.v. referentie [%]	water op mesh [m ³]	verandering t.o.v. referentie [%]
0,01	-20	12,3	-10,7
0,0125	-	13,8	-
0,0131	5	14,1	2,5
0,015	20	15,1	9,6
0,02	60	17,4	26,3

8.1.2

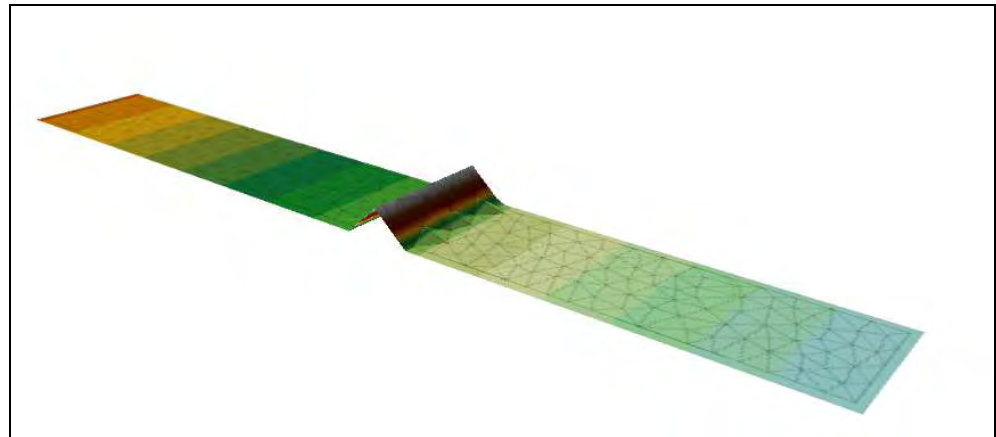
GOOT MET DREMPEL

Structuur

Als tweede theoretische schematisatie is een drempel in de rechthoekige goot gesimuleerd (zie Figuur 8.13). Voor de drempel zijn de verhoudingen gebruikt van een 30 km/u verkeersdrempel, volgens de Richtlijn Verkeersdrempels (Veilig Verkeer Nederland, 2010). De overige onderdelen van de schematisatie zijn gelijk gebleven.

Figuur 8.13

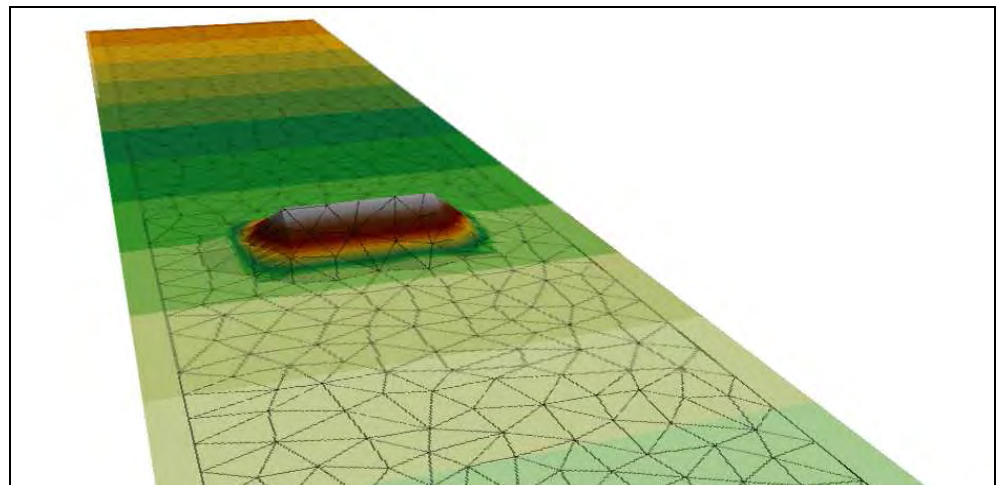
3D-view, goot met drempel.



Vervolgens zijn de zijanten van de drempel afgevlakt en is op deze wijze een fictieve verkeersdrempel met een ernaast vlakliggend fietspad geschematiseerd (zie Figuur 8.14).

Figuur 8.14

3D-view, goot met drempel, vlakke zijanten



Middels deze aangepaste schematisatie wordt meer concreet inzicht verworven in de praktische toepassing van 2D-modellering.

Simulatie

De simulatie is uitgevoerd met drie verschillende debieten (0,01 m³/s, 0,1 m³/s en 0,5 m³/s). In de eerste instantie is een uniform *mesh* gecreëerd op de goot, met een *maximum triangle area* van 1 m². Vervolgens is een aparte *mesh polygon* gecreëerd op de drempel, ten einde daar het *mesh* fijnmaziger te maken. Voor deze fijnmazige *mesh polygon* is een *maximum triangle area* van 0,01 m² gebruikt.

De simulatie is in alle gevallen uitgevoerd voor 10 uur met een tijdstap van 1 seconde.

Resultaten

Aangenomen wordt dat bij de schematisatie van de drempel in de goot, onder een vrije afstroming, de kritische waterdiepte optreedt boven de drempel. In het 2D-model is na modelberekening een gemiddelde berekend van de waterdieptes die optreden in de *mesh* driehoekjes ter hoogte van de kruin van de drempel (zie Tabel 8.8).

Tabel 8.8

Kritische waterdiepte optredend boven de drempel

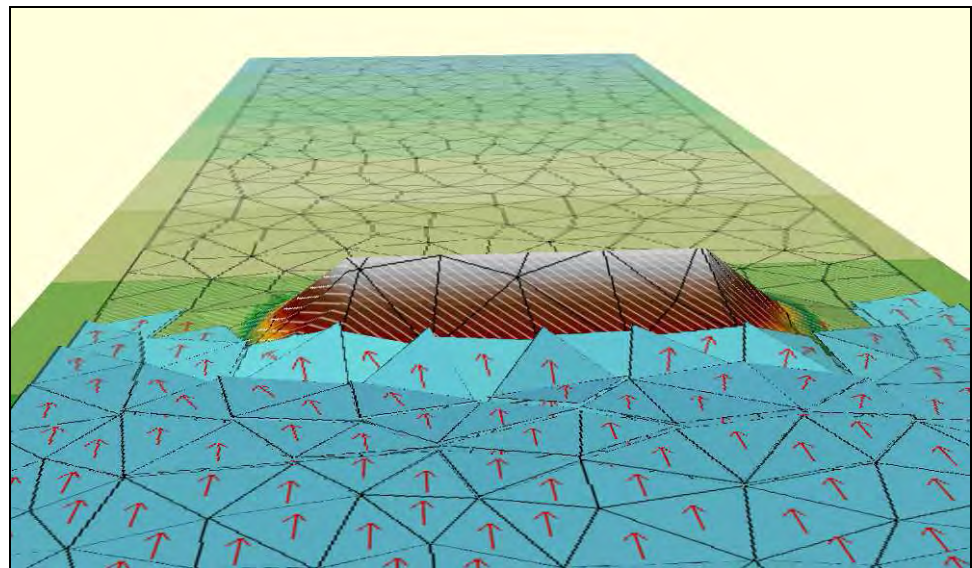
	Debiet [m ³ /s]		
	0,01	0,1	0,5
K _c eigen berekening [cm]	0,66	3,08	9,00
K _c 2D-model gemiddeld [cm]	0,76	3,40	8,84
verschil [%]	14,7	10,4	-1,8

Opnieuw kan geconcludeerd worden dat de kritische diepte die in het model optreedt in dezelfde orde grootte ligt als de eigen berekende kritische diepte.

Daarnaast is het stromingsbeeld langs de drempel geanalyseerd. De stroming lijkt een natuurlijk verloop te hebben. Zie de stromingspijlen in achtereenvolgens Figuur 8.15, Figuur 8.16, Figuur 8.17, Figuur 8.18 en Figuur 8.19. Bovenstrooms van de drempel treedt opstuwing op, duidelijk zichtbaar in het kleurverschil voor en na de drempel in Figuur 8.16.

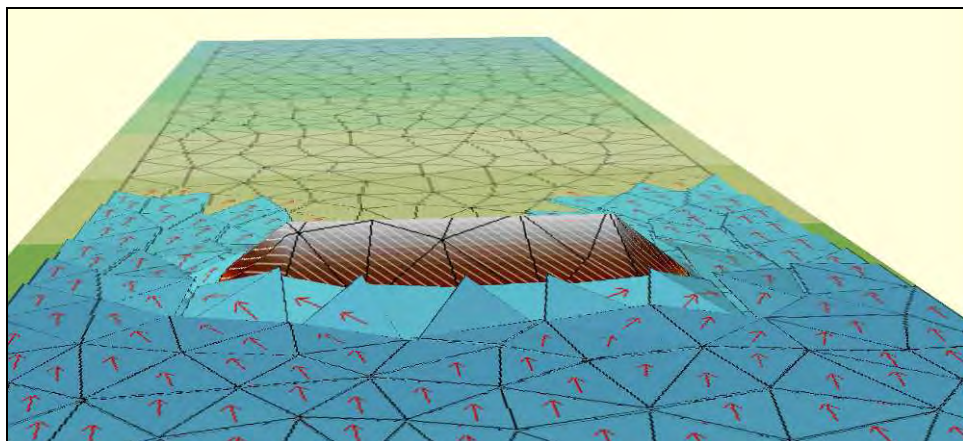
Figuur 8.15

Stroming op 1 minuut, 5 seconden



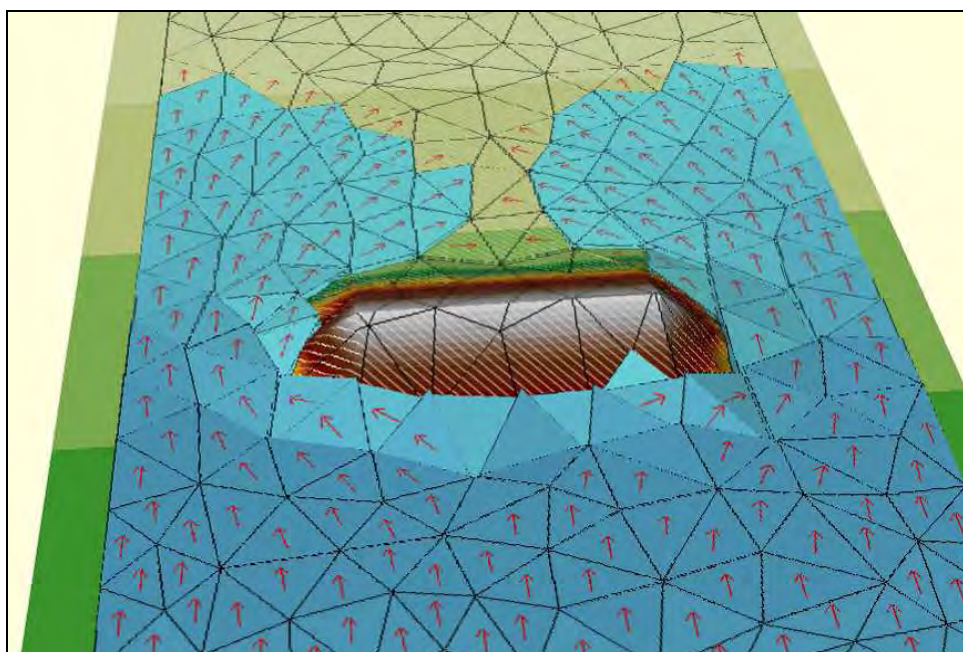
Figuur 8.16

Stroming op 1 minuut, 15 seconden



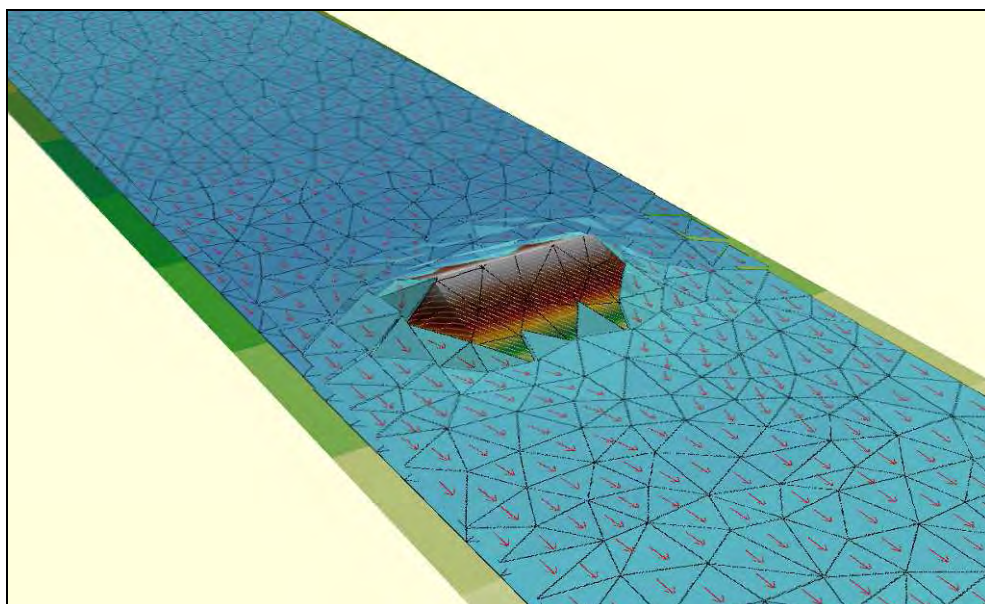
Figuur 8.17

Stroming op 1 minuut, 20 seconden



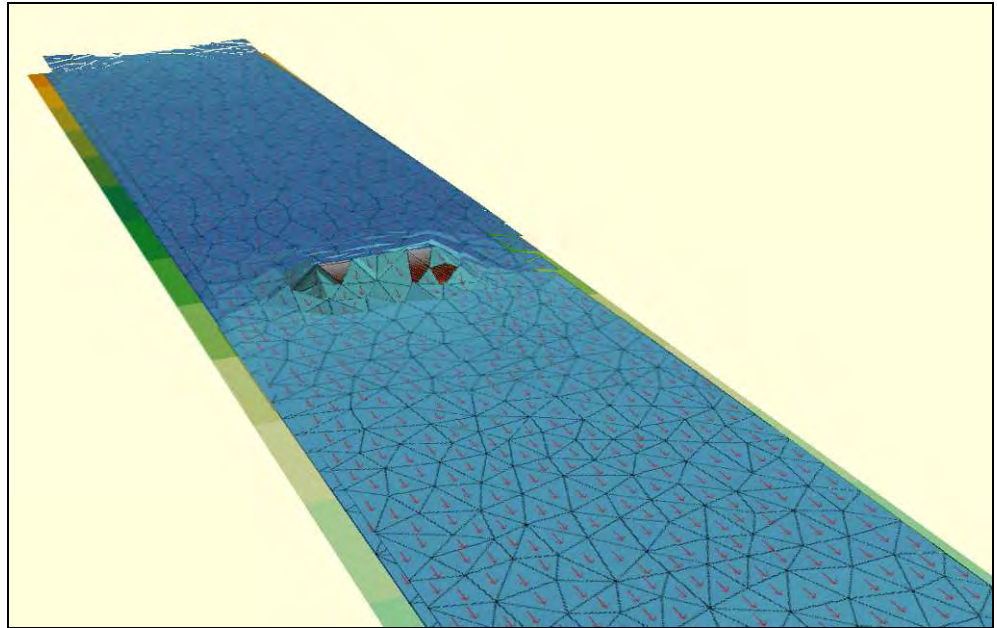
Figuur 8.18

Stroming op 1 minuut, 45 seconden



Figuur 8.19

Stroming na 10 uur



8.1.3

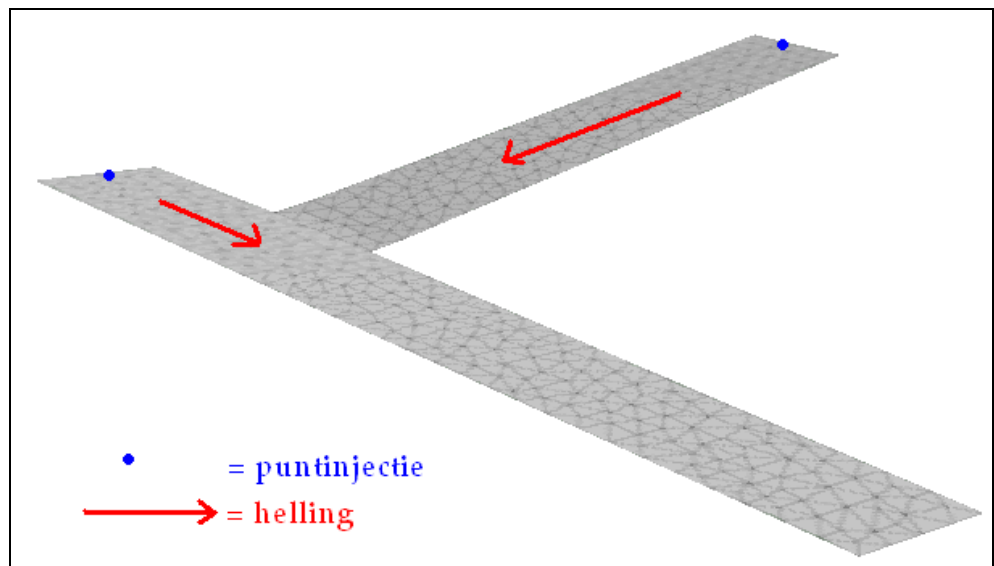
FICTIEVE KRUISING

Structuur

Om te controleren hoe het 2D-model reageert op elkaar ontmoetende stromen is een fictieve kruising geschematiseerd. Zie Figuur 8.20. De helling die van rechts komt ligt onder een verhang van 2 promille (over 30 meter). De basishelling ligt nog steeds onder een verhang van 1 promille (over 50 meter).

Figuur 8.20

Fictieve kruising met hellingsrichtingen



Simulatie

De simulatie is uitgevoerd met een debiet van 0,1 m³/s. Dit debiet is als puntinjectie geplaatst aan de bovenstroomse zijde van de twee hellingen.

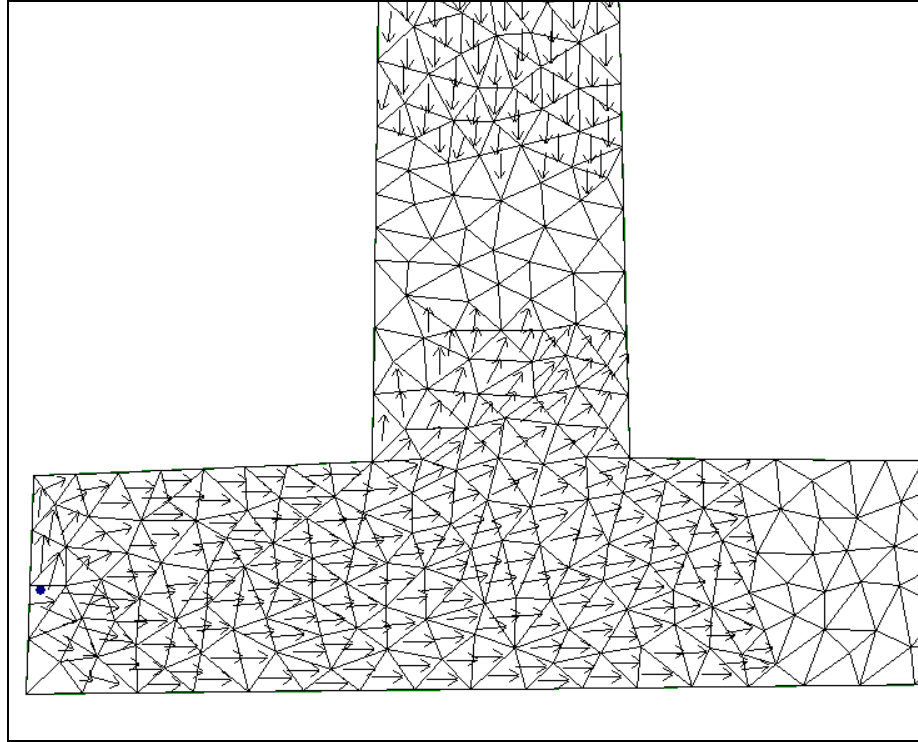
De simulatie is in uitgevoerd voor 10 uur met een tijdstap van 1 seconde.

Resultaten

In Figuur 8.22 is te zien dat de twee stromen elkaar ontmoeten 4,5 meter vanaf de onderzijde van de helling van 2 promille. In de eerste instantie treedt lichte opstuwing op, naar de helling van 2 promille maar vervolgens herstelt het evenwicht zich en stroomt het water van de steilere helling af op de helling van 1 promille.

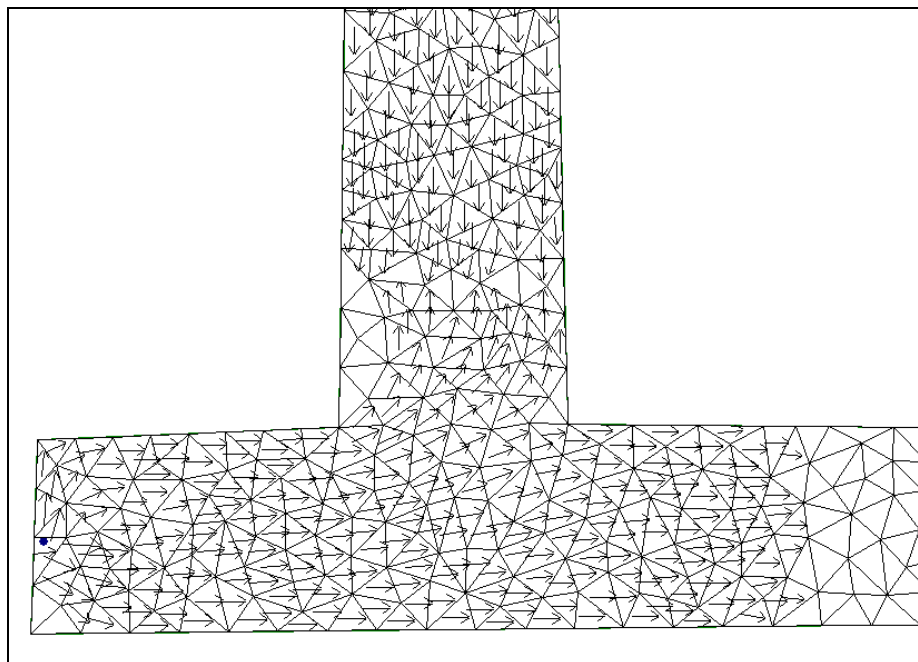
Figuur 8.21

Kruising op 40 seconden



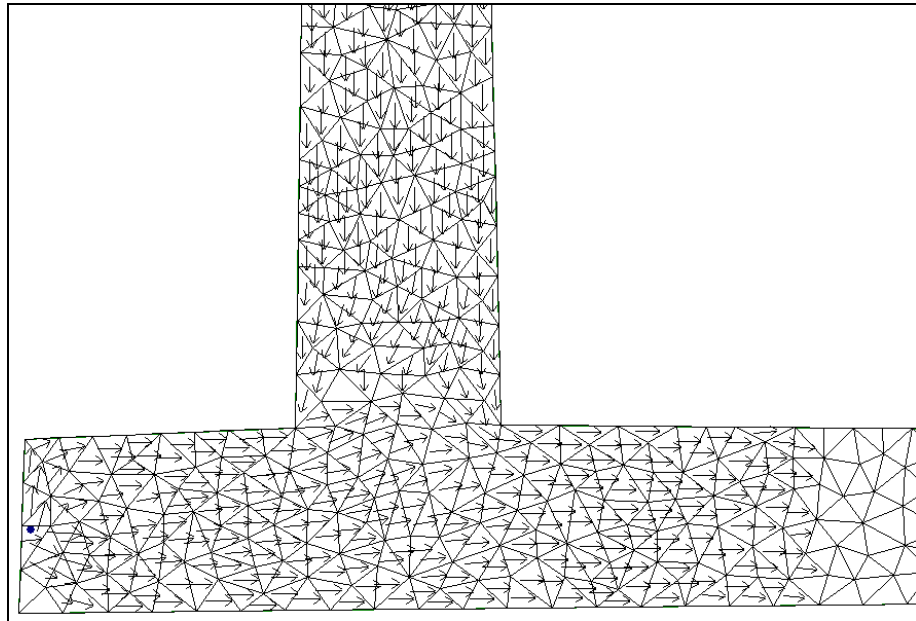
Figuur 8.22

Kruising op 50 seconden



Figuur 8.23

Kruising op 1 minuut



8.2

REELE SITUATIES

8.2.1

BORSELE

Structuur

Het functioneren van de 2D-modellering is vervolgens getest in een reële situatie, voor een stuk straat in Ellewoutsdijk (gemeente Borsele). Aangezien er geen rioleringsmodel beschikbaar is van dit gebied, is er een fictief stukje riool onder de weg geplaatst. De twee kolken die zichtbaar zijn in Figuur 8.24, zijn geschematiseerd als rioolputten. Deze leiden beiden via een leiding, naar een *outfall*. Deze bevindt zich aan het benedenstroomse einde van de straat.

Hoogtemodel

Voor Ellewoutsdijk is laserdata van een stuk straat omgezet naar een hoogtemodel. De originele set laserdata bestond uit een wolk van 466.822 punten met xyz-waarde. Zie Figuur 8.24.

Figuur 8.24

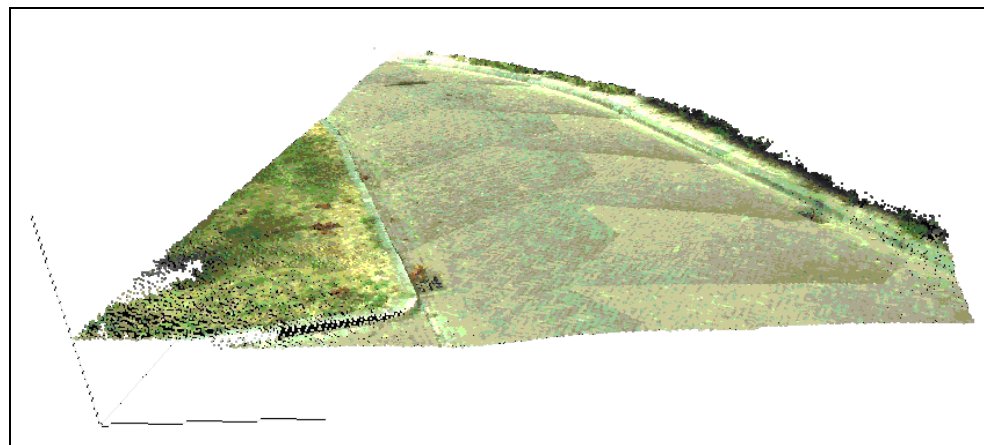
Laserdata, originele puntenwolk



Aangezien voor het simuleren van water op straat alleen het hoogtemodel van het straatoppervlak met omliggende trottoirbanden en wat daar vlak omheen ligt benodigd is, dient de originele set laserdata opgeschoond te worden. Dit is specifiek noodzakelijk daar waar een xy-waarde meerdere z-waarden kan hebben. Dit is bijvoorbeeld aan de orde als er bomen/struiken zich boven de straat bevinden. De opgeschoonde puntenwolk is te zien in Figuur 8.25.

Figuur 8.25

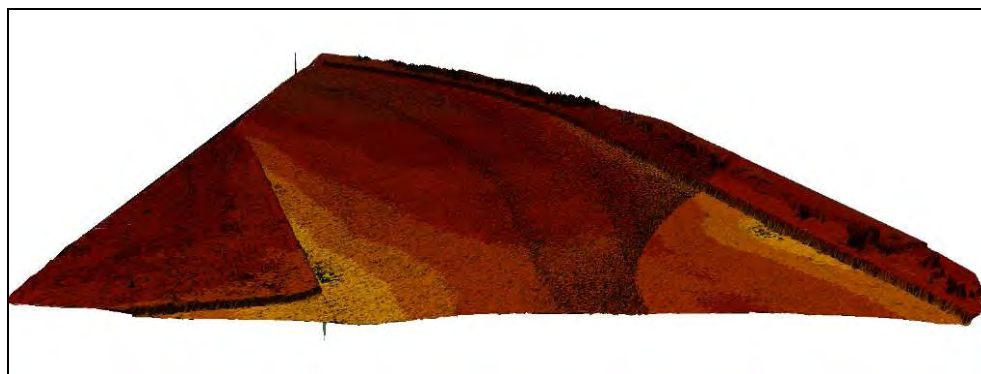
Opgeschoonde puntenwolk



Vervolgens is de opgeschoonde puntenwolk in ArcGIS omgezet in een *triangular irregular network* (TIN). Het hoogtemodel zoals het bruikbaar is voor simulaties in InfoWorks is te zien in Figuur 8.26.

Figuur 8.26

Hoogtemodel (TIN)



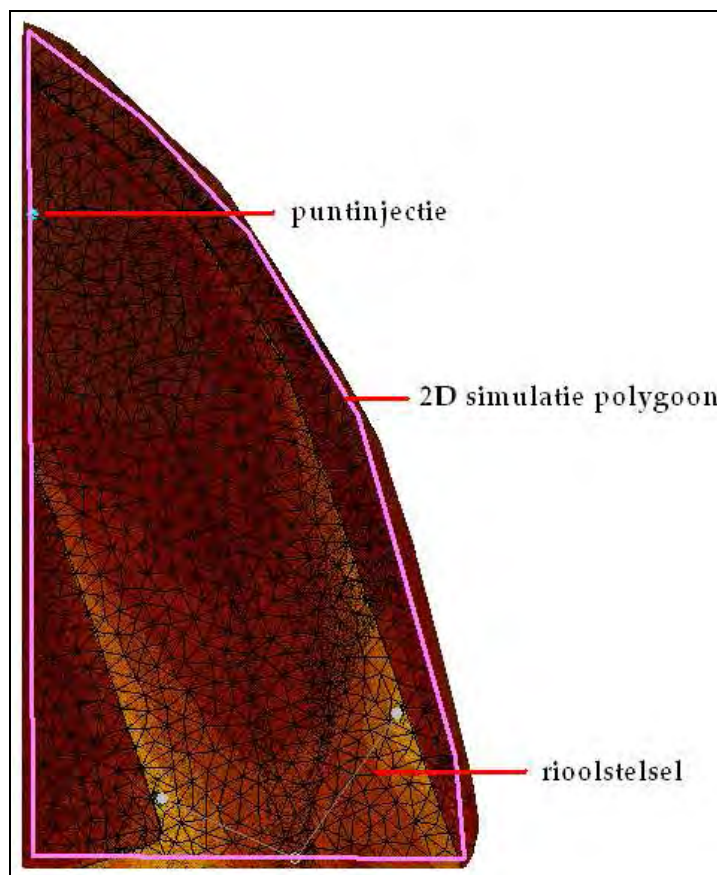
Vervolgens is dit TIN gebruikt in InfoWorks om het maaiveld te schematiseren middels een *mesh* (zie Figuur 8.27). De stoepenranden zijn ingevoegd als *break lines* om de *mesh* zodanig te krijgen dat er geen verstoring van de hoogtegegevens plaatsvindt. Door de *break lines* worden *mesh* elementen namelijk niet over de stoeprand heen gelegd, maar zijn alle *mesh* elementen grenzend aan de stoeprand.

Simulatie

Diverse simulaties zijn gemaakt met in de eerste instantie een puntinjectie met een debiet van 0,001 m³/s aan de bovenstroomse zijde van het straatdeel. Er is gevarieerd met *mesh* eigenschappen zoals de maximale driehoeksgrootte en de ruwheid van het oppervlak. Vervolgens is ook directe regenval op het *mesh* toegepast. Nadat eerst alleen de stroming van regen over het maaiveld is gesimuleerd is dit ook gekoppeld aan het ondergrondse 1D rioleringsmodel.

Figuur 8.27

Schematisatie straatdeel in InfoWorks



Resultaten

Algemeen

Bij de bovengrondse modellering van dit stuk straat is gezien dat het water afstroomt naar het laagste deel van een weg, doorgaans naar een straatkolk (zie Figuur 8.24). Wanneer we echter een schematisatie van een bestaand rioolmodel onder dit hoogtemodel zouden leggen, blijkt dat straatkolken in het ondergrondse model niet meegenomen worden. Een ondergronds rioolstelsel heeft als laagste niveau een inspectieput. Dit is een aspect wat meegenomen zal moeten worden, wanneer ondergronds en bovengronds modelleren gekoppeld wordt.

Mesh detail

Als eerste is het effect van variatie van het *mesh* detailniveau onderzocht. Dit is getest voor een puntinjectie (zie Figuur 8.27) van 0,001 m³/s en voor directe regenval op het *mesh* (gebeurtenis bui 08). Beide simulaties zijn uitgevoerd zonder en met 2D rioolputten. Bij het ontbreken van 2D putten kan het water dus over het maaiveld stromen, en stroomt het benedenstrooms van het maaiveld af. Bij het aanwezig zijn van 2D putten kan er rioolinstroom plaatsvinden.

De resultaten van de hoeveelheid water op het maaiveld bij de verschillende omstandigheden zijn weergegeven in Tabel 8.9.

Tabel 8.9

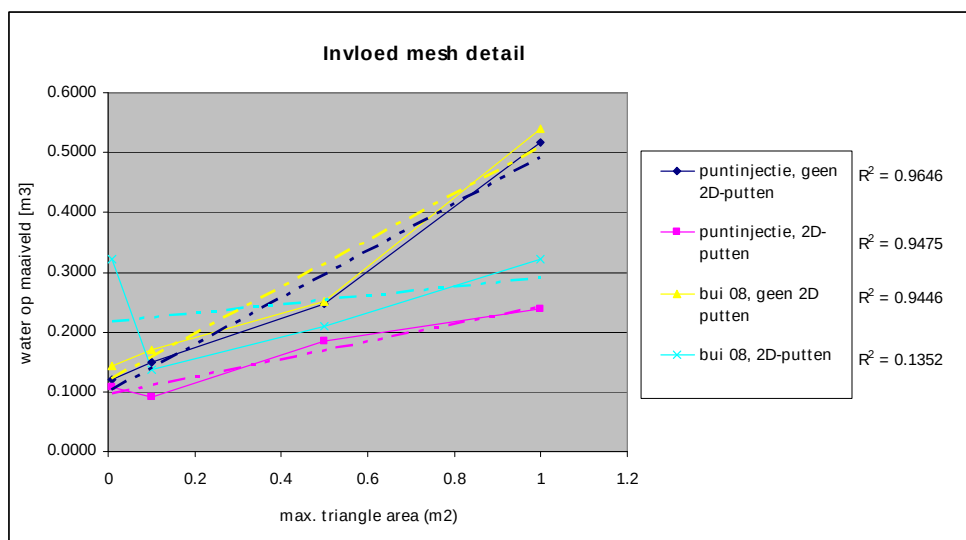
Water op maaiveld bui puntinjectie en regenbui bij verschillend *mesh* detail niveau

Max. triangle area [m ²]	Water op <i>mesh</i> bij puntinjectie [m ³]		Water op <i>mesh</i> bij bui 08 [m ³]	
	Geen 2D putten	Wel 2D putten	Geen 2D putten	Wel 2D putten
0,01	0,12	0,11	0,14	0,32
0,10	0,15	0,09	0,17	0,14
0,50	0,25	0,18	0,25	0,21
1,00	0,52	0,24	0,54	0,32

In Figuur 8.28 is te zien dat er meer water op het maaiveld blijft staan als het *mesh* detail grover wordt. Dit geldt zowel voor het berekenen van een standaardbui als voor het berekenen van een puntinjectie.

Figuur 8.28

Invloed van *mesh* detail op water over straat



Ruwheid oppervlak

Vervolgens is getest wat de invloed is van wijziging van de ruwheid van het oppervlak. Dit is gedaan door middel van drie soorten simulaties.

Als eerste is getest wat de invloed is van een verhoging van de ruwheid van het hele oppervlak. De Manning ruwheidsfactor van het 2D simulatie polygoon is van 0,0125 verhoogd naar 0,02. Drie puntinjecties met verschillende debieten zijn doorgerekend om het effect van de veranderende ruwheidsfactor te testen. Bij deze modelberekening waren 2D putten aanwezig in de schematisatie. Het water kon dus vanaf het maaiveld het ondergrondse systeem instromen. In Tabel 8.10 is te zien dat bij alle debieten de hoeveelheid van water die op het maaiveld blijft staan toeneemt, bij een toenemende weerstandsfactor.

Tabel 8.10

Water op het maaiveld bij variërende ruwheidsfactor en verschillende debieten

Ruwheid [Manning's n]	Water op straat [m ³]		
	bij q= 0,01 [m ³ /s]	bij q= 0,1 [m ³ /s]	bij q= 0,5 [m ³ /s]
0,0125	0,55	2,39	5,75
0,02	0,61	2,79	7,11

Vervolgens is bij één debiet nader ingezoomd op het effect van een veranderende ruwheidsfactor. Dit is gedaan met een debiet van 0,1 m³/s. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.11 en Figuur 8.29.

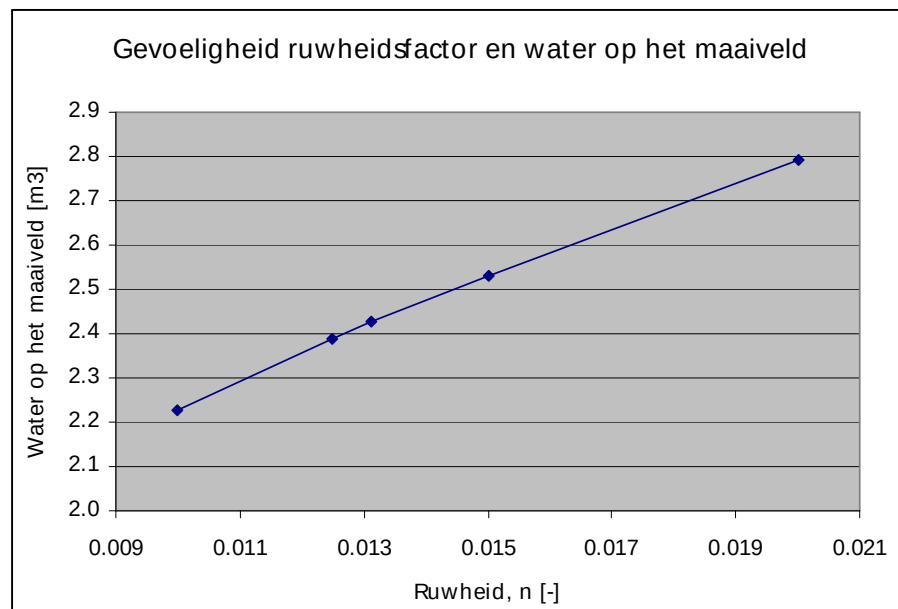
Tabel 8.11

Water op het maaiveld bij variërende ruwheidsfactor, bij een debiet van 0,1 m³/s

Ruwheid [Manning's n]		Water op straat	
n [-]	verandering t.o.v. referentie [%]	[m ³]	verandering t.o.v. referentie [%]
0,01	-20	2,2275	-6,8
0,0125	0	2,3888	0,0
0,0131	5	2,4254	1,5
0,015	20	2,5320	6,0
0,02	60	2,7910	16,8

Figuur 8.29

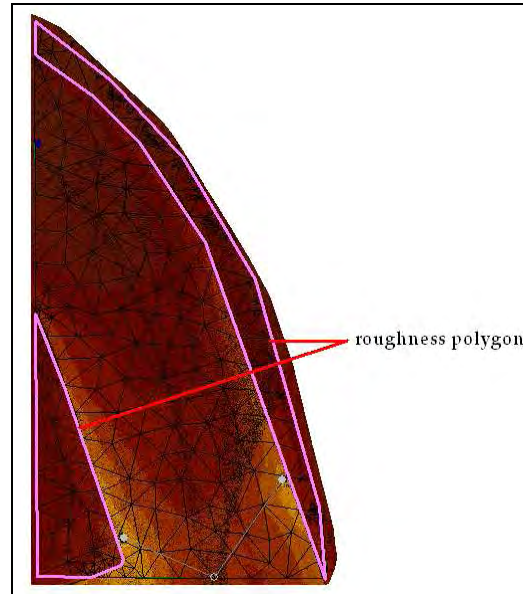
Effect van een veranderende ruwheidsfactor op de hoeveelheid water op het maaiveld



Daarna is alleen de ruwheid van de stoep verhoogd. De ruwheid van de stoep is in het model gewijzigd door zogenaamde *roughness polygons* toe te voegen met een andere ruwheidsfactor. Zie Figuur 8.30.

Figuur 8.30

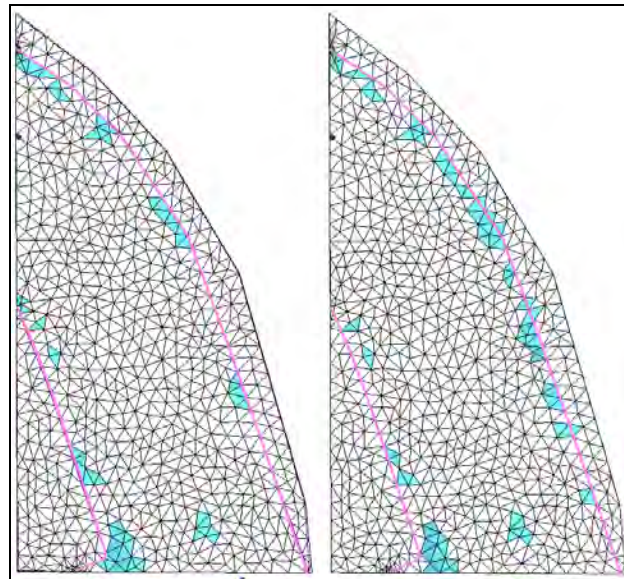
Straatdeel met toegevoegde
ruwheidspolygonen op de stoep



Het resultaat na berekening met bui 08 is te zien in Figuur 8.31. De berekening met een ruwe stoep laat zien dat er in dat geval minder water blijft staan op het stoepoppervlak (7,7% vs. 8,7%). De instroom van water in de 2D putten is echter hoger (92,3% vs. 91,3%), zie Tabel 8.12.

Figuur 8.31

Bui 08,
links: stoep heeft een hogere
ruwheidsfactor ($n=0,0250$)
rechts: uniforme ruwheidsfactor
($n=0,0125$)



Tabel 8.12

Water op straat en instroom in putten bij
verschillende ruwheidsfactor

	Water op straat [m3]	Instroom in putten [m3]
uniforme ruwheid	0,1489	1,5512
ruwe stoep	0,1307	1,5680

2D simulatieparameters

Vervolgens is een tweetal numerieke 2D simulatieparameters gevarieerd. Het betreft de *Timestep Stability Control (TSC)* en *theta*. Zie hoofdstuk 7.4 en Bijlage 3.

Er zijn modelberekeningen gedaan met een puntinjectie van 0,1 m³/s. Voor *TSC* zijn de waarden 0,50; 0,70 en 0,95 (default) gebruikt. Bij de variatie van deze parameter is geen verandering geconstateerd in de massabalans. Voor *theta* zijn de waarden 0,5; 0,7 en 0,9 (default) gebruikt. Bij de variatie van deze parameter is geen verandering geconstateerd in de massabalans.

8.2.2

PRINSENBEEK

Voor de wijk Prinsenbeek (gemeente Breda) zijn modelberekeningen gemaakt van water op straat. Aangezien voor de wijk Prinsenbeek (gemeente Breda) geen gedetailleerde hoogtedata beschikbaar was is een hoogtemodel geconstrueerd. Dit is gedaan door middel van GIS-interpolatie. De basis voor deze interpolatie was de bekende hoogtes van de inspectieputten. Dit heeft geresulteerd in het hoogtemodel zoals te zien in Bijlage 5.

Aan de hand van het hoogtemodel is vervolgens een *mesh* gecreëerd over het hele gebied. Daarna zijn de stoepranden handmatig ingevoegd door deze 10 centimeter te verhogen. In het door middel van interpolatie gecreëerde hoogtemodel was dit belangrijke element niet verdisconteerd aangezien dat slechts gemaakt is op basis van meetpuithoogtes.

Allereerst zijn modelberekeningen uitgevoerd om de volgende elementen te testen:

- *mesh* detail
- ruwheidsfactor
- 2D overstortcoëfficiënt

Er zijn ook modelberekeningen uitgevoerd waarmee de invloed van de 2D simulatieparameters is getest (zoals bij Borsele, zie hoofdstuk 8.2.1). Hierin bleek opnieuw dat er geen effect was te zien van de variatie van deze parameters op de waterbalans.

Mesh detail

Bij variatie van het *mesh* detail is te zien dat bij een fijnmaziger *mesh*, de hoeveelheid water op straat toeneemt. Dit kan verklaart worden uit het feit dat er mogelijk meer depressies ontstaan waar water kan stagneren. Hierbij moet opgemerkt worden dat er fouten in kunnen sluipen door de wijze waarop het hoogtemodel verkregen is. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.13.

Tabel 8.13

Invloed van *mesh* detail op water op straat

<i>Mesh</i> detail		Water op straat	
Maximum triangle area	verandering t.o.v. referentie [%]	[m ³]	verandering t.o.v. referentie [%]
100	0	200.14	0
80	-20	209.62	4.7
60	-40	211.23	5.5

Ruwheidsfactor

Bij variatie van de ruwheidsfactor is te zien dat bij een grotere Manning waarde, de hoeveelheid water op straat afneemt (Tabel 8.14). Dit laat zien dat het straatoppervlak meer weerstand heeft tegen de uitstroom van water uit de rioolputten. Aangezien in deze modelberekening water vanuit de rioolputten omhoog komt het maaiveld op is het effect van de weerstandswaarde hier tegengesteld aan de uitkomsten in Tabel 8.11.

Tabel 8.14

Hoeveelheid water op straat bij een
variërende ruwheidsfactor

Ruwheid [Manning's n]		Water op straat	
n [-]	verandering t.o.v. referentie [%]	[m3]	verandering t.o.v. referentie [%]
0.01	-20	200.71	0.3
0.0125	0	200.14	0.0
0.0131	5	200.03	-0.1
0.015	20	199.77	-0.2
0.02	60	199.09	-0.5

2D overstortcoëfficiënt

Zoals beschreven in hoofdstuk 7.1, heeft een 2D *manhole* een overstortcoëfficiënt die invloed kan hebben op in- en uitstroom van water naar – en van het maaiveld. Bij een grotere overstortcoëfficiënt is de hoeveelheid water die overstort naar het maaiveld minder. De invloed is echter gering; bij een verhoging van de overstortcoëfficiënt met 60%, neemt de hoeveelheid water op straat met 1,7% af. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.15.

Tabel 8.15

Hoeveelheid water op straat bij een
varierende 2D overstortcoëfficiënt

2D overstortcoëfficiënt		Water op straat	
[-]	verandering t.o.v. referentie [%]	[m3]	verandering t.o.v. referentie [%]
0.3	-40	205.85	2.9
0.4	-20	202.37	1.1
0.5	0	200.14	0
0.6	20	198.69	-0.7
0.7	40	197.57	-1.3
0.8	60	196.77	-1.7

Visualisatiemogelijkheden

Vervolgens zijn mogelijkheden van het visualiseren onderzocht. Bij de navolgende berekeningen en kaarten is het van belang te beseffen dat het op deze wijze uitvoeren van modelberekeningen vooral indicatieve resultaten geeft gezien de manier van constructie van het hoogtemodel.

Er is een modelberekening gedaan van bui 8. Resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 8.32. Aan de hand van deze berekening is een 'water op straat'-kaart geproduceerd. Deze geeft aan wat de maximale waterstanden zijn. Deze kaart is weergegeven in Bijlage 6.

Figuur 8.32

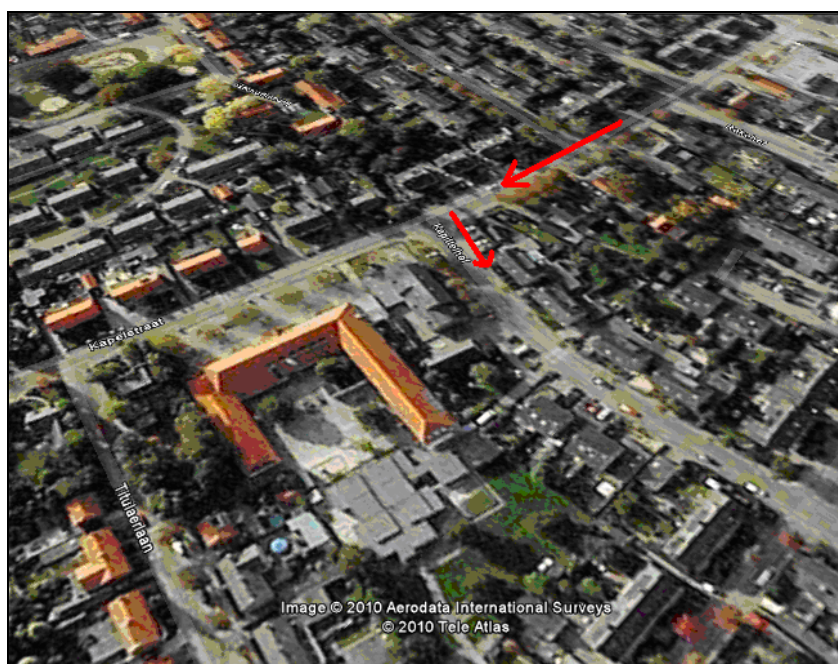
Water op straat (lichtblauw) in twee dimensionale modelberekening bij bui 08 (herhalingsstijd 2 jaar)



Bij een bui is per locatie te analyseren waar het water heen stroomt. Dit is gedaan voor bui 8 op een voorbeeldlocatie in Figuur 8.33, Figuur 8.34 en Figuur 8.35.

Figuur 8.33

Afstromingsrichting van water vanaf de Kapelstraat, naar de Kapittelhof



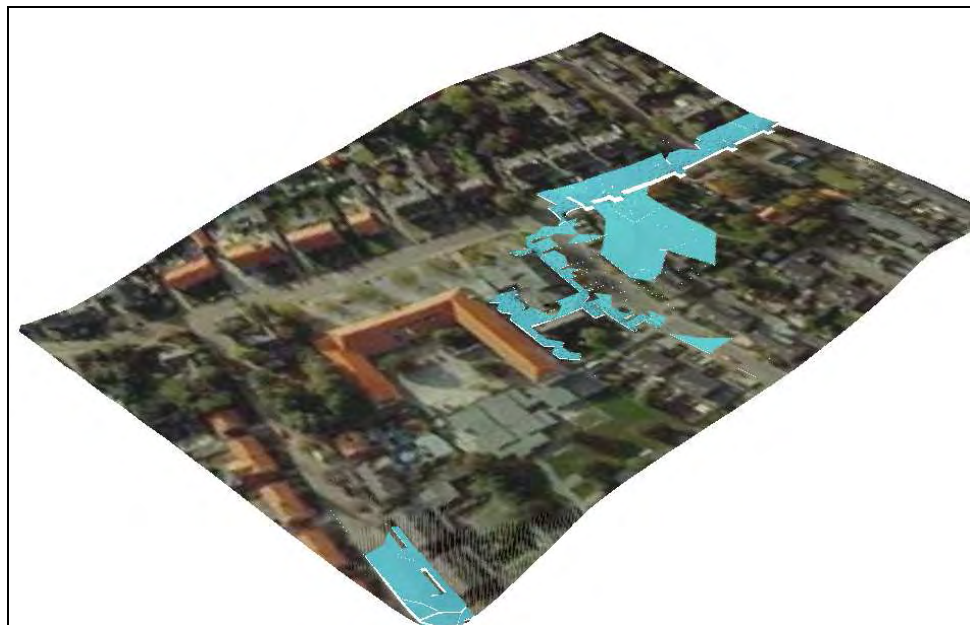
Figuur 8.34

Water op straat na 45 minuten van bui 8



Figuur 8.35

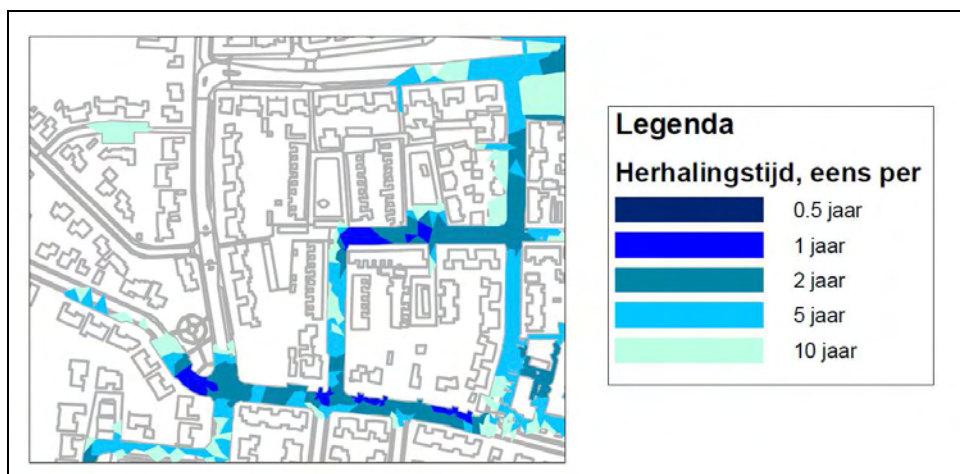
Water op straat na 55 minuten van bui 8



Daarnaast zijn er modelberekeningen gedaan met een serie standaardbuien (bui 4, 6, 8, 9 en 10). Aan de hand hiervan kon een risicokaart van water op straat gemaakt worden. Zie voor een uitknip hieruit Figuur 8.36 en voor de volledige kaart zie bijlage 7.

Figuur 8.36

Uitknip uit risicokaart water op straat voor Prinsenbeek, Breda.

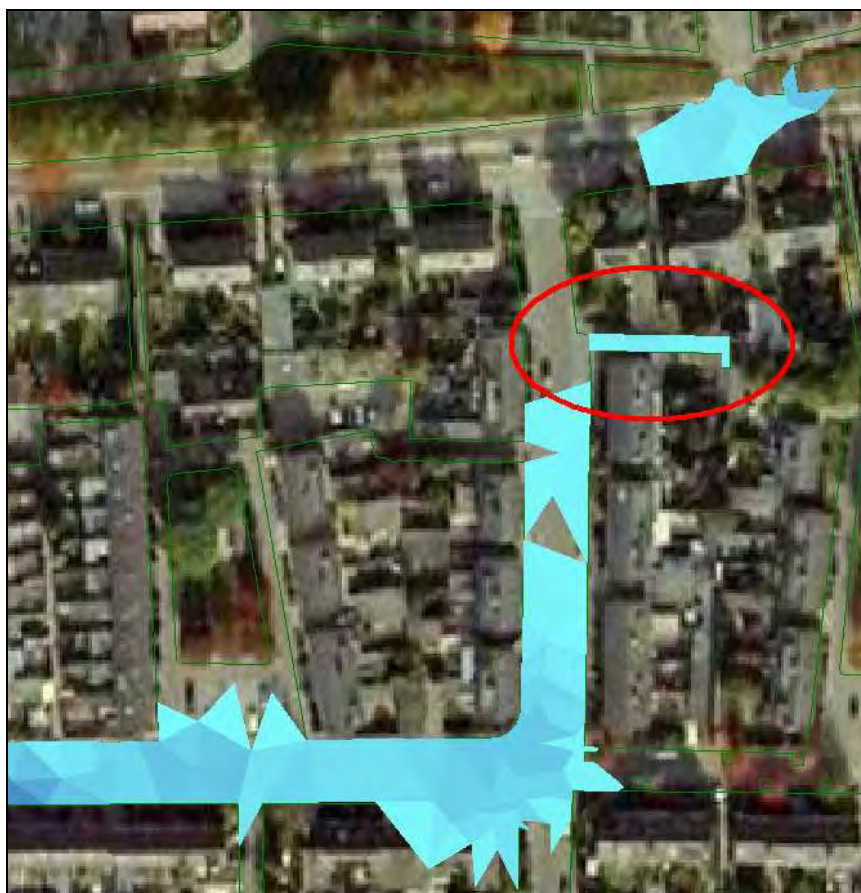


Bovengrondse interventie: drempel

Als eerste bovengrondse interventie is een drempel aangebracht voor een inrit, achter een huizenblok. In deze inrit zou bij bui 8 sprake zijn van water op straat (zie Figuur 8.37).

Figuur 8.37

Water op straat achter huizen, t.h.v. Kapittelhof 32, Prinsenbeek (gemeente Breda).



Aan het begin van deze inrit is een drempel van 15 cm hoogte geplaatst. Na een nieuwe modelberekening blijkt de maatregel doeltreffend om de inrit te vrijwaren van water. In Figuur 8.38 is te zien dat het effect van dergelijke interventies op een duidelijke wijze gevisualiseerd kan worden.

Figuur 8.38

Water op straat na het aanbrengen van een drempel. Rood omlijnde gebied nu gevrijwaard van water.

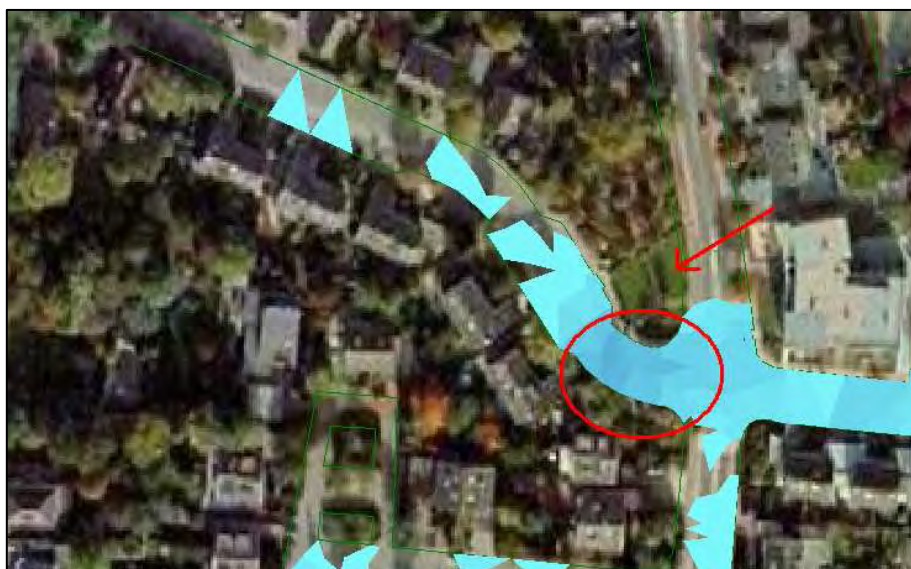


Bovengrondse interventie: infiltratie in een groenstrook

Een andere manier om wateroverlast te verminderen is het afleiden van afstromend regenwater naar een groene zone waar het kan infiltreren. Dit is gedaan door een drempel aan te brengen een groenstrook te verlagen. In Figuur 8.39 geeft de pijl de locatie aan waar de infiltratie in de groenstrook plaatst zal vinden.

Figuur 8.39

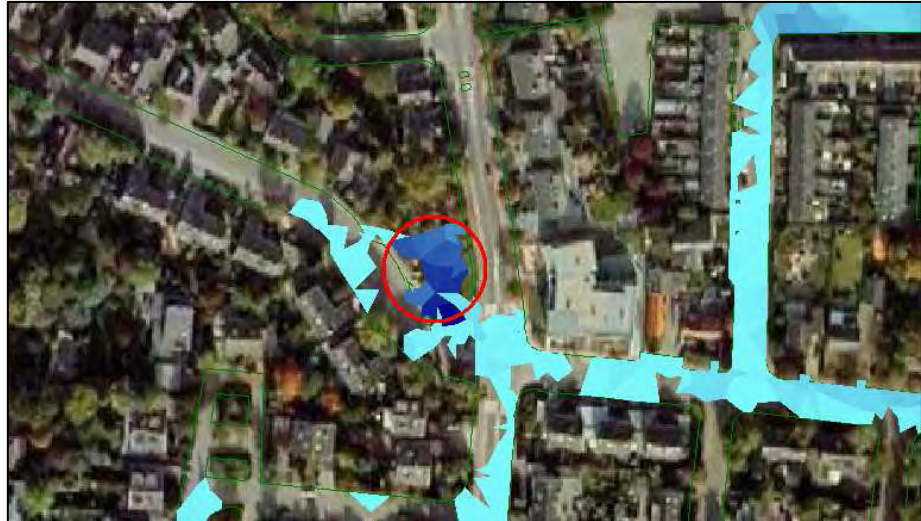
Water op straat bij bui 8, zonder interventie. Pijl indiceert beoogde groenstrook als infiltratie locatie.



Het resultaat is weergegeven in Figuur 8.40. De rode cirkel geeft aan waar het water zich na de interventie ophoopt. Op deze locatie kan het in de bodem infiltreren.

Figuur 8.40

Water op straat bij bui 8, met infiltratie in de groenstrook (rode cirkel).



HOOFDSTUK

9
Conclusies

De hydraulische basis voor het rekenen aan water op straat binnen InfoWorks ligt bij Alcrudo en Mulet (2005). Het mathematisch deel van twee dimensionale modellering is gebaseerd op een *Godunov-type scheme* en maakt gebruik van *Roe approximate Riemann solver* voor elke interface.

Door op basis van een hoogtemodel een twee dimensionale simulatie polygoon te creëren kan het maaiveld geschematiseerd worden. Binnen dit simulatie polygoon wordt middels de Shewchuk Triangulation Method een *mesh* van driehoekselementen gecreëerd. Voor elk driehoekselement worden diverse parameters zoals waterhoogte, watersnelheid en stroomrichting berekend. De gebruiker kan aangeven hoe gedetailleerd de *mesh* moet zijn. Hierbij moet dus rekening gehouden worden met de beschikbare hoogtedata. Wanneer gedetailleerde hoogtedata beschikbaar is, kan het *mesh* fijnmazig gemaakt worden. Is deze data niet beschikbaar, dan is het ook zinloos om het *mesh* gedetailleerd te maken.

Uit theoretische schematisaties is gebleken dat de twee dimensionale modellering van waterstroming middels InfoWorks CS resultaten geeft die vergelijkbaar zijn met uitkomsten van een één dimensionaal model. Dit geldt zowel voor een één dimensionaal model binnen InfoWorks, als een handmatig nagerekend één dimensionaal model. Bij het één dimensionaal model is gebleken dat bij rekenen aan kleine waterdieptes het model instabiel kan worden. Dit geeft aan dat voorzichtig moet worden omgegaan met 1D-1D modellering. Ook bij meer complexe schematisaties middels twee dimensionale modellering wordt een stromingsbeeld gesimuleerd wat overeenkomt met het verwachte stromingsbeeld. Bij het testen van de werking van modellering van twee dimensionale waterstroming binnen een realistische situatie, het dorp Ellewoutsdijk (gemeente Borsele), is gebleken dat water naar lager gelegen gedeelten binnen het hoogtemodel stroomt. Hiermee is aangetoond dat in dat opzicht het model een plausibele werking heeft.

De hoeveelheid water die achterblijft op het maaiveld neemt toe, met een toenemende ruwheidsfactor. Er is echter sprake van een geringe toename. Een ander punt is dat ruwheid van het oppervlak niet (of nauwelijks) te meten is in de werkelijkheid. Op grond hiervan is het niet te onderbouwen, en ook niet zinvol om dit als variabele parameter te gebruiken.

Betrouwbaarheid van de uitkomsten van twee dimensionale modelberekeningen is afhankelijk van de mate van detail van het gebruikte hoogtemodel. Wanneer, zoals in dit onderzoek is gedaan, gebruik is gemaakt van interpolatie van meetputhoogtes, zal de uitkomst van de modelberekening meer als indicatief dan als exact gezien moeten worden. In dit onderzoek zijn modelberekeningen gedaan voor Prinsenbeek (gemeente Breda). Er is gebleken dat in dat geval, bij gebruikmaking van een hoogtemodel op basis van interpolatie,

de bovengrondse twee dimensionale modellering van water over straat wel mogelijkheden biedt als visualisatietechniek.

Uiteindelijk zijn met dit afstudeeronderzoek een drietal vragen beantwoord.

1. *Waarom is twee dimensionale modellering van waterstroming over straat zinvol?*

De huidige werkwijze bij adviesbureaus met betrekking tot water op straat berekeningen is niet voldoende onderbouwd en wijkt te veel af van de werkelijkheid om betrouwbare informatie te genereren die als basis kan dienen voor adviezen. Twee dimensionale modellering van waterstroming over straat biedt mogelijkheden om de realiteit dichter te benaderen. De huidige werkwijze heeft bovendien als gevolg van drukopbouw boven rioolputten, een verstorend effect op de ondergrondse modelberekening. Een ander voordeel van twee dimensionale modellering van waterstroming over straat is het inzichtelijk kunnen maken van wat het resultaat is van onder- en bovengrondse interventies op het overstromingsrisico.

Vergeleken met andere benaderingswijzen, zoals een GIS-analyse van de gevoelige locaties binnen het stedelijk gebied op basis van alleen een hoogtemodel, is de gekoppelde 1D-2D modellering fundamenteeler. Zowel bovengronds als ondergronds wordt er berekend op basis van hydrologische vergelijkingen. Daarnaast is bij deze benadering het ondergrondse en het bovengrondse systeem in interactie met elkaar. Dit is een reden waarom 1D-2D modellering de voorkeur zou hebben boven de andere manieren van aanpak.

2. *Waar is twee dimensionale modellering van waterstroming over straat zinvol?*

Gelet op het feit dat veel computercapaciteit benodigd is en lange rekentijden nodig zijn bij het uitvoeren van volledige gedetailleerde modellering van de bovengrond heeft een selectieve tweedimensionale modellering de voorkeur. Twee dimensionale modellering zou dan uitgevoerd kunnen worden op plekken waar het conventionele 1D model water op straat berekend. Een andere manier is dat twee dimensionale berekening met een grofmazig hoogtemodel uitgevoerd wordt. Hierna kan dan het detailniveau van de modellering op gevoelige locaties verhoogd worden.

Uiteindelijk biedt twee dimensionale modellering meerwaarde daar waar het water de straat en het trottoirs verlaat en zich verplaatst rondom wat buiten het trottoir ligt.

3. *Hoe kan waterstroming over straat gemodelleerd worden?*

Waterstroming over straat kan op hydrodynamische wijze gemodelleerd worden door een 1D-1D model of door een 1D-2D model. Daarnaast kan ook door middel van GIS een analyse gedaan worden van gevoelige locaties. In dit onderzoek is gekeken naar de modellering door middel van een 1D-2D model.

Een 1D-2D model wordt gecreëerd door een hoogtemodel te koppelen aan een geschematiseerd ondergronds rioelstelsel. Afhankelijk van de beschikbaarheid van gedetailleerde hoogtedata heeft de bovengrondse simulatie een bepaald detailniveau. De betrouwbaarheid van berekeningen van waterstroming over straat neemt toe met de beschikbaarheid van hoger detailniveau hoogtedata.

Het is niet bekend in hoeverre berekende waterstanden en volumes kloppen met in de realiteit optredende waarden. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het feit dat het model niet gekalibreerd is. Anderzijds hangt het samen met het gebruik van standaard neerslagreeksen. Het gebruik van bijvoorbeeld de waterbalans in het model bij twee dimensionale modellering, is dus slechts indicatief. Puur mathematisch gezien moet de balans uiteraard kloppen.

HOOFDSTUK

10 Aanbevelingen

Hoogtedata

Om daadwerkelijk verder te komen met modeleren van water over straat is hoog detailniveau hoogtedata van het maaiveld benodigd. Dan kan ook geanalyseerd worden wat er gebeurt met water buiten de trottoirbanden. Dit is juist een onderwerp wat voor adviseur en gemeente van belang is.

Bij gebruikmaking van laserdata om een hoogtemodel te creëren van het stedelijk gebied is de vereenvoudiging die gebruikt wordt bij het schematiseren van een rioleringsmodel aan het licht gekomen. Wanneer een hoogtemodel gebruikt wordt op basis van laserdata zal een keuze moeten worden gemaakt ten aanzien van de koppeling van het maaiveld met het ondergrondse riool. Koppeling tussen straat en riool lijkt wenselijk ter hoogte van straatkolken. Dit zou betekenen dat straatkolken opgenomen moeten worden in de schematisatie van het rioleringsmodel. De vraag is of dit praktisch haalbaar is.

Wanneer er geen hoog detailniveau hoogtedata beschikbaar is kan er een minder gedetailleerd hoogtemodel gecreëerd worden door middel van interpolatie van meetputhoogtes. Het is echter van belang dat er gekeken wordt naar het effect van verschillende interpolatietechnieken. Het voordeel van het twee dimensionaal modelleren is ook wanneer er geen hoog detailniveau hoogtedata beschikbaar is dat bovengrondse interventies wel gevisualiseerd kunnen worden.

Een andere mogelijkheid is het modelleren van bovengrondse één dimensionale straatprofielen. Hiervoor zijn alleen de meetputhoogtes benodigd. Deze manier van bovengronds modeleren zal waarschijnlijk echter arbeidsintensiever zijn. Daarnaast treedt instabiliteit op in het 1D model bij het berekenen van kleine waterdieptes.

Welke manier van bovengronds modelleren de voorkeur heeft is locatie specifiek. Wanneer er sprake is van wateroverlast door het over lange afstand afstromen van water over straat, voldoet 1D-modeleren van de bovengrond. Als er echter sprake is van wateroverlast in lager gelegen gedeelten heeft 2D modeleren de voorkeur. Dit geldt bijvoorbeeld in een tunnel die onder het maaiveld komt. Daarnaast heeft 2D modeleren van de bovengrond de voorkeur wanneer het doel is het verkrijgen van visualisaties van wateroverlast dan wel interventie effecten.

Mesh detailniveau

Wanneer hoog detailniveau hoogtedata beschikbaar is zal een afweging gemaakt moeten worden ten aanzien van het detailniveau van de schematisatie van het maaiveld, het te

creëren *mesh*. Wanneer twee dimensionaal bovengronds wordt gemodelleerd verdient het de voorkeur dat op gevoelige locaties de schematisatie van het maaiveld fijnmaziger is. Nader onderzoek kan duidelijk maken hoe de verhouding ligt tussen het detailniveau van de hoogtedata en het detailniveau van de *mesh*.

Toepassing van directe regenval op mesh

Aangezien er op dit moment nog geen mogelijkheid is om infiltratie en evaporatie te koppelen aan gebieden waar twee dimensionaal gemodelleerd wordt, heeft het op grote schaal toepassen van regen direct op het twee dimensionale model niet de voorkeur. Wanneer modelberekeningen eerst via het 1D model gedaan worden, wordt wel voor infiltratie en evaporatie gecorrigeerd. Het twee dimensionale modelleren komt dan pas aan de orde op het moment dat water op straat komt. Wanneer wel gewerkt wordt met directe regenval op het gebied waar twee dimensionaal gemodelleerd wordt, is het van belang om aanvoerend oppervlak wat gebruikt wordt in het inloopmodel te verwijderen.

'Smoothed particle hydrodynamics'

In is ingegaan op de mogelijkheid om door middel van hydrodynamische modellen wateroverlast en interventies te visualiseren. Voor nader onderzoek ten aanzien van visualisaties is aan te bevelen om de mogelijkheden van *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) mee te nemen. Bij gebruikmaking van het SPH-algoritme wordt niet met een grid/mesh gerekend, maar wordt er met 'deeltjes' gerekend. Een voordeel van deze methode is volgens Bruycker (2006) dat het een adaptieve methode is. De resolutie wordt automatisch geconcentreerd op plaatsen met een hoge dichtheid. Op die manier kan makkelijkere gerekend worden aan gebieden met een hoge geometrische complexiteit. (Cleary *et al*, 2004) Daarnaast is het een voordeel van deze methode dat er niet met grenzen gerekend wordt. Er kan dus geen vloeistof uit het grid lekken. Visualisaties met behulp van SPH en renderen (het maken van 2D afbeeldingen uit een 3D-model), biedt visueel gezien meer dan wat op dit moment mogelijk is met het hydrodynamische model InfoWorks. Een belangrijk onderscheid is echter dat een hydrodynamisch model zoals InfoWorks de mogelijkheid biedt om tegelijkertijd bovengronds en ondergrondse stroming hydraulisch te berekenen.

Nader onderzoek is vereist om inzichtelijk te krijgen of de SPH-methode ingezet kan worden voor modellering van stedelijk wateroverlast.



Literatuurlijst

1. Alcrudo, F., Garcia-Navarro, P., 1993. *A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 16, p. 489-505.
2. Alcrudo, F., Mulet, J., 2005. *Urban inundation models based on the Shallow Water equations. Numerical and practical issues*. In: Benkhaldoun, F., Ouzar, D., Raghay, S. (eds.) Proceedings of finite volumes for complex applications IV. Problems and perspectives. Hermes Science.
3. Alkema, D., 2007. *Simulating floods. On the application of a 2D-hydraulic model for flood hazard and risk assessment*. ITC dissertation number 147.
4. Bruycker, I. de, 2006. *Ontwikkeling van een applicatie voor visualisatie van en interactie met vloeistoffen*. Universiteit Gent.
5. Cleary, P.W. and Prakash, M., 2004. *Discrete-element modeling and smoothed particle hydrodynamics: potential in the environmental sciences*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, vol. 362, no. 1822.
6. Clemens, F.H.L.R., 2001. *Hydrodynamische modellen in de riolering*. Samenvatting en discussie van proefschrift, Stichting Rioned.
7. Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C., 1999. *An approach to simulation of dual drainage*. Water Science and Technology, vol. 39 (9), p.95-103.
8. Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C., Ivetic, M., Savic, D., 2005. *SIPSON – Simulation of Interaction between Pipe flow and Surface Overland flow in Networks*. Water Science and Technology, vol. 52 (5), p. 275-283.
9. Gemeente Arnhem, 2007. *Vierde Gemeentelijke Rioleringsplan, 2009-2013*. Dienst Stadsbeheer, afdeling Openbare Ruimte
10. KNMI, 2009. *Klimaatschetsboek Nederland - het huidige en toekomstige klimaat*. De Bilt, report 223.
11. Leandro, J., Chen, A.S., Djordjević, S., Savić, A., 2009. *Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 134 (6), p. 495 – 504.
12. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003. *Nationaal Bestuursakkoord Water*.
13. MWH Soft, 2009. InfoWorks CS v.10.5 Help.
14. Rioned, 2004. *Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren*. Leidraad Riolering C2100.
15. Rioned, 2006. *Stedelijke Wateropgave – Vergelijking normen voor water op straat en inundatie*.
16. Rioned, 2007a. *Klimaatverandering, hevige buien en riolering*.
17. Rioned, 2007b. *Onderzoek regenwateroverlast in de bebouwde omgeving*.
18. Rioned, 2009. *Water op straat*. Leidraad Riolering C2150.
19. Roe, P.L., 1981. *Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes*. Journal of Computational Physics, vol. 43 (2), p. 357-372.
20. Schmitt, T.G., Thomas, M., Ettrich, N., 2004. *Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems*. Journal of hydrology, vol. 299, p. 300-311.
21. Vojinovic, Z. and Tutulic, D., 2009. *On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas*. Urban Water Journal, vol. 6 (3), p. 183-199.

Websites

Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), 2010.

<http://www.ahn.nl/>

bezocht op 14-04-2010.

Veilig Verkeer Nederland (VVN), 2010. *CROW publicatie 172: Richtlijn Verkeersdrempels*.

<http://www.3vo.nl/nl/vragen/vragen.htm#Anchor-Ho-24796>

bezocht op 15-02-2010.

Gemeente Doetinchem, 2009. *Raadsbesluit d.d. 1 oktober 2009, kaders voor het rioleringsplan*.

<http://besluitvorming.doetinchem.nl/Vergaderingen/gemeenteraad/2009/17-december/19:30/Rioleringsplan/>

bezocht op 09-03-2010.

KNMI, 2010. *Waargenomen veranderingen in neerslag*

http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/waarnemingen/monitoring_precipitation.php

bezocht op 24-03-2010.

Melger, E.R., 2007. Presentatie Rioned-dag 2007: *Wateroverlast in een model* en samenvatting hiervan.

<http://www.riool.net/riool/binary/retrieveFile?instanceid=36&itemid=2799&style=default>

bezocht op 18-03-2010.

Shewchuk, J.R., 2010. *A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*. Computer Science Division, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720-1776.

<http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>

bezocht op 30-03-2010.

Rioned, 2010.

<http://www.riool.net>

bezocht op meerdere data.

Waterwet, 2009.

<http://wetten.overheid.nl>

bezocht op 09-03-2010.

BIJLAGE

1 Berekening evenwichtsdiepte en kritische diepte

Berekening evenwichtsdiepte

De evenwichtsdiepte in de rechthoekige goot is middels een iteratieve berekening vastgesteld. De iteratieve methode bestaat hieruit dat het gegeven debiet gelijk moet zijn aan het debiet wat berekend wordt met Chezy. Ofwel:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot I_e}$$

waarin;

Q = gegeven debiet	[m ³]
C = Chezy coefficient = $149 \log(148R/k)$	[m ^{1/2} /s]
A = nat oppervlak	[m ²]
R = hydraulische straal	[m]
I _e = bodemverhang	[m/m]

$$F(h_e) = Q - C \cdot A \cdot \sqrt{R \cdot I_e}$$

Zijnde de restwaarde als functie van het gegeven debiet en het berekende debiet bij een aangenomen waterdiepte.

In Excel kan middels de functie 'doel zoeken' F(h_e) ingesteld worden op 0. Bijbehorende waterdiepte (de evenwichtswaterdiepte) wordt dan bepaald.

Aangenomen waarden voor k = 0,001 m

Berekening kritische diepte

De kritische diepte (h_k) kan berekend worden door de volgende vergelijking op te lossen:

$$h_k = Q / (B \cdot \sqrt{g/\alpha})$$

waarin;

h _k = kritische diepte	[m]
Q = debiet	[m ³ /s]
B = gootbreedte	[m]
g = zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
alpha = correctiecoëfficiënt voor kinetische energie	[-]

Aangenomen waarden voor alpha = 1,03, voor g = 9.81 m/s²

BIJLAGE

2

Node types in InfoWorks CS

Tabel 6.16

Node types en beschrijving

Node type	Beschrijving
Manhole	Node with shaft and chamber storage.
Storage	Allows you to define your own storage shape using level/plan area pairs.
Break	Can be used to model a change in gradient in a conduit. No storage.
Outfall	Node where flow leaves the modelled system - no storage.
Pond	Similar to a Storage node, the Pond node also supports infiltration to the ground from the sides and the base of the pond.
Outfall 2D	Outfall node from which flow discharged to a 2D meshed area. Flow from the 2D area may also enter the 1D model via this node.

BIJLAGE

3

2D simulatie parameters

Onderdeel	Parameter		Default	Typical	Valid
Tolerantie	Depth	Waterdiepte waaronder een cel als droog gezien wordt. Wel wordt massa behoud toegepast.	0.1 cm	0.1 cm	-
	Momentum	Waterdiepte waaronder impuls in een cel niet wordt meegenomen. Wel wordt massa behoud toegepast.	0.1 cm	0.1 – 1 cm	-
	Velocity	Stroomsnelheid waaronder de snelheid als 0 gezien wordt en als 0 gerekend wordt in de impulsberekening.	0 m/s	0 m/s	-
Geavanceerd	Timestep Stability Control	Garandeert dat de interne tijdstap gebruikt in de 2D berekening stabiel is, stabiliteitsgrenzen gegeven door de CFL-conditie (Courant Friedrichs Lewy).	-	0.95	0 – 1
	Maximum Velocity	Maximale stroomsnelheid, hierboven wordt de maximale snelheid aangehouden	-	10 m/s	-
	Theta	Wegingsfactor voor de semi impliciete parameter, weegt het expliciete en het semi-impliciete deel van het numerieke schema wat gebruikt wordt voor de tijdsintegratie van de stromingsvergelijkingen. Hoe hoger de waarde hoe meer gewicht gegeven wordt aan het impliciete deel.	-	0.9	0 – 1
	Inundation mapping depth threshold	Drempelwaarde voor diepte waarmee tijd tot eerste inundatie wordt bepaald	1 cm	-	-
	Ignore rain falling on dry elements	Aangevinkt? Dan wordt regen en evaporatie binnen de 2D mesh alleen toegepast op natte elementen.	Niet actief		

BIJLAGE

4

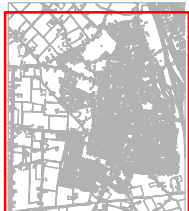
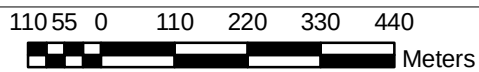
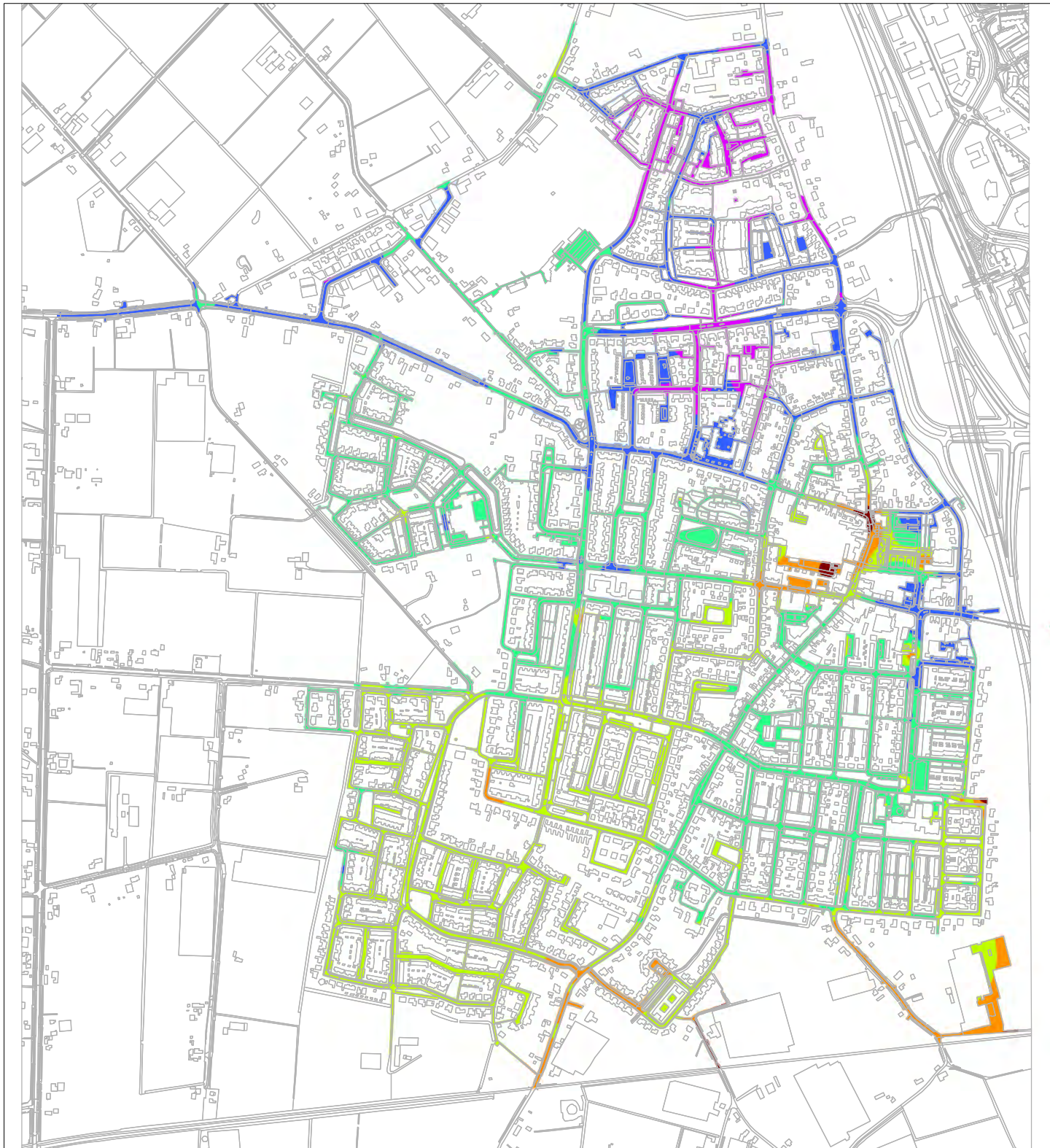
Verklarende woordenlijst

Ancillaries	= kunstwerken, zoals: <i>flap valve</i> , <i>pump</i> en <i>weir</i>
Break	= knik in een leiding
Combined	= gemengd riool, systeemtype
Conduit	= leiding
Flap valve	= terugslagklep
Foul	= droogweerafvoer, systeemtype
Grid	= hoogtemodel met een regelmatig verdeelt rooster, rasterbestand
Link	= verbinding
Manhole	= inspectieput
Mesh	= driehoekige schematisatie van het maaiveld, waarop 2D stroming berekend wordt
Node	= put, zoals: <i>manhole</i> , <i>storage</i> , <i>break</i> , <i>outfall</i> , <i>pond</i> of <i>outfall 2D</i>
Other	= overig systeemtype
Outfall	= overstorput
Outfall 2D	= overstort naar afstroming op het maaiveld
Overland	= afstromend water over het oppervlak, systeemtype
Pond	= infiltratiereservoir
Pump	= gemaal
River	= waterloop
Storage	= reservoir
Storm	= hemelwaterafvoer, systeemtype
Subcatchment	= deelgebied
TIN	= <i>triangular irregular network</i> , hoogtemodel met network van driehoeken
Weir	= stuw of overstortdrempel
2D simulation polygon	= grenzen van een gebied waarbinnen bovengronds waterstroming gemodelleerd wordt

BIJLAGE

5

Hoogtemodel Prinsenbeek



Hoogte (m)

	2 - 2.3
	2.4 - 2.7
	2.8 - 3.1
	3.2 - 3.4
	3.5 - 3.8
	3.9 - 4.2
	4.3 - 7

Breda Prinsenbeek

Hoogtemodel op basis van
interpolatie van meetputhoogtes

ARCADIS

Divisie Water - Stedelijk Waterbeheer

Postbus 1018

5200 BA 'S-HERTOGENBOSCH



Get E.G.B. Wilbrink

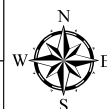
dd. 3-6-2010

Projectnummer

Schaal 1:89,009

Formaat A4

geen



BIJLAGE

6

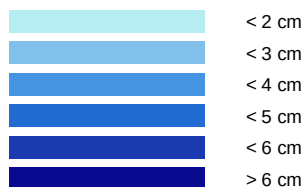
Water op straat bij bui 08, Prinsenbeek



340700 340 680 1020 1360 Meters



Water op straat (cm)



Breda Prinsenbeek

Water op straat bij bui 08

ARCADIS

Divisie Water - Stedelijk Waterbeheer

Postbus 1018

5200 BA 'S-HERTOGENBOSCH



Get. E.G.B. Wilbrink

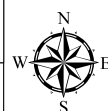
dd. 4-6-2010

Projectnummer

Schaal 1:47,382

Formaat A4

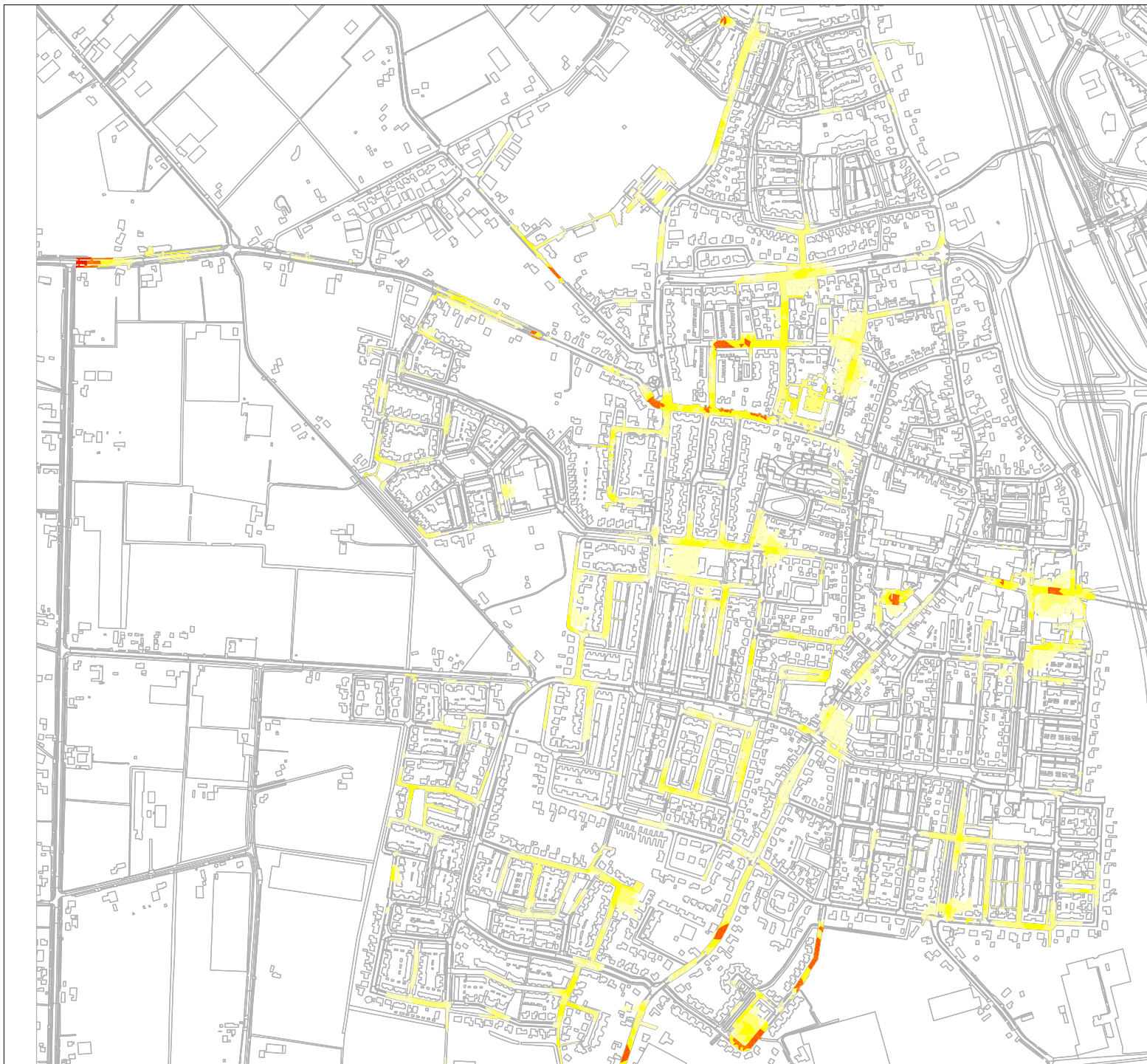
geen



BIJLAGE

7

Risicokaart water op straat



Breda Prinsenbeek

Risicokaart van water op straat

Legenda

Herhalingstijd, eens per

- 0.5 jaar
- 1 jaar
- 2 jaar
- 5 jaar
- 10 jaar



ARCADIS
Divisie Water - Stedelijk Waterbeheer

Postbus 1018
5200 BA 'S-HERTOGENBOSCH



Get. E.G.B. Wilbrink	dd. 4-6-2010	Projectnummer
Schaal 1:10,395	Formaat A4	geen



