

# Vergelijking modelconcepten voor bepaling water-op-sstraat

## Gevoeligheid voorspelling water-op-sstraat voor keuze modelconcept en parameterkeuze

E. van Dijk, J. van der Meulen, J. Kluck en J.H.M. Straatman  
Hogeschool van Amsterdam

E-mail: e.van.dijk@hva.nl,  
j.van.der.meulen2@hva.nl,  
j.kluck@hva.nl,  
j.h.m.straatman@hva.nl

**Trefwoorden:** Water-op-sstraat, wateroverlast, gevoeligheid, modellering, hemelwaterafvoer, onzekerheid

*Bij extreem hevige kortstondige neerslag kan de riolering het regenwater niet voldoende snel afvoeren en kan wateroverlast ontstaan. Door verharding van binnensteden, klimaatontwikkelingen en verandering van straatprofielen zal deze wateroverlast steeds vaker voorkomen en ernstiger worden. Opdat beheerders van de openbare ruimte kunnen besluiten hoe zij met deze dreiging om kunnen gaan, is het onderzoek "anticiperen op extreme neerslag" gestart. Een van de onderdelen in dit onderzoek is het analyseren van het functioneren van de regenwaterafvoer bij hevige, kortstondige neerslag. Hierbij is naar verschillende modelconcepten en gevoeligheden van modelresultaten voor waarden van modelparameters gekeken. Daartoe zijn voor drie locaties modelresultaten (bij verschillende modelconcepten en waarden van modelparameters) met elkaar vergeleken. De belangrijkste conclusie is dat het belangrijk is een tweedimensionale analyse te doen van de bovengrondse stroming van water. De wijze waarop is daarbij minder van belang. De vergelijking laat zien dat in de meeste gevallen een analyse van de maaiveldhoogten ongeveer hetzelfde inzicht geeft als de meest nauwkeurige modelopzet met koppeling van bovengronds en ondergronds systeem. Voor specifieke gevallen geeft het gekoppeld simuleren van bovengrondse waterstroming en stroming door de riolering realistischere resultaten. Voor alle modelconcepten geldt dat de uitkomsten sterk worden beïnvloed door keuzes in de schematisatie. Hierbij is de omvang van het afvoerende onverharde oppervlak een parameter die duidelijk van invloed is op resultaten. De ruwheid van het maaiveld is daarentegen nauwelijks van invloed, omdat de afstroomafstanden relatief kort zijn. Het schematiseren van de uitwisseling tussen boven en ondergrond heeft vooral invloed op de (toename van de) duur van water-op-sstraat.*

### Inleiding

#### Anticiperen op extreme neerslag in de stad

Door de voorziene klimaatverandering en menselijke ingrepen in bebouwd gebied neemt de kwetsbaarheid voor schade en overlast als gevolg van extreme neerslag toe. Aangezien in die situaties het water gewoonweg niet meer in het riool past, is het voor gemeenten verstandig om – naast de ondergrondse afvoercapaciteit – ook te analyseren wat er dan bovengronds met het water gebeurt en voor die situaties rekening te houden met water op het maaiveld.

Het onderzoeksprogramma "Anticiperen op extreme neerslag in de stad" van de Hogeschool van Amsterdam ontwikkelt een toepasbare aanpak voor de omgang met hemelwater op straat, los van de gangbare normen. Voor dit onderzoekprogramma zijn ervaren adviseurs op het gebied van stedelijk water

en riolering als onderzoeker op de hogeschool aangenomen. Het onderzoek wordt ondersteund door de gemeenten Amsterdam, Apeldoorn, Eindhoven, Bergen-NH, Beverwijk, Stichting RIONED, UNESCO-IHE, de Urbanisten en Tauw.

Vanaf begin 2011 tot en met begin 2013 wordt onderzocht hoe gemeenten kunnen anticiperen op kortdurende extreme neerslag. Dit onderzoek omvat de volgende onderzoeksthema's de modelmatige analyse van bovengrondse hemelwaterafvoer, de kortdurende extreme neerslag en de implementatie en voorbeelden van maatregelen. De onderzoeksresultaten dienen als onderbouwing en input voor een methodiek omtrent het anticiperen op extreme neerslag in de stad. Dit artikel betreft de modelmatige analyse van bovengrondse hemelwaterafvoer. Resultaten van de overige onderzoeksthema's zullen in vervolgartikelen worden gepubliceerd.

## Modellering van regenwaterafvoer bij zeer extreme neerslag

De Nederlandse riolen zijn er doorgaans grofweg op ontworpen dat wordt verwacht dat niet vaker dan eens per twee jaar de capaciteit van de riolering te klein is. Als het wat harder regent, blijft water op straat staan. Maar soms regent het in stedelijk gebied zo hevig dat niet al het water in het riool past en zich over straat een weg zoekt. Het gaat hierbij om buien met een duur van een half uur tot enige uren. Het gaat om echte extreme buien die aanzienlijk minder vaak dan eens per 2 jaar voorkomen (bijvoorbeeld eens per 10, eens per 100 jaar of nog extremer). Van belang is of bij zulke extreme situaties het water 'alleen op straat/op het maaiveld staat' of mogelijk ergens naar binnen loopt. Van belang is ook of de overlast en schade die dan ontstaat acceptabel is of niet.

Om daar iets over te kunnen zeggen, is inzicht nodig in de regenwaterafvoer bij zulke extreme neerslag. Aangezien meetgegevens of praktijkervaring amper beschikbaar zijn (door het zeer zelden optreden van zulke extreme buien), zijn modelberekeningen een uitkomst.

Rekenmodellen voor het berekenen van het functioneren van rioolstelsels zijn oorspronkelijk niet ingericht op de simulatie van bovengrondse hemelwaterafvoer (Russo et al., 2011). De laatste jaren zijn verschillende modelconcepten ontwikkeld voor de simulatie van bovengrondse regenwaterafvoer. De verschillende modelconcepten en ook de modelparameters beïnvloeden vanzelfsprekend de modelresultaten en daarmee mogelijk de keuzes die gemaakt worden in het omgaan met extreme neerslag. Welk modelconcept nu (in welke situatie) gebruikt moet worden is niet duidelijk.

## Vraagstelling

Om inzicht te geven in welk modelconcept gebruikt moet worden en welke keuzes daarbij gemaakt moeten worden, hebben we de invloed van modelconcept en modelparameters op de voorspelling van water op straat in drie vergelijkende casestudies nader geanalyseerd. De vraagstelling is driedelig:

1. In hoeverre is het berekende water-op-straat beeld bij extreme neerslag gevoelig voor de keuze voor een bepaald modelconcept?
2. Voor welke invoerparameters zijn de modelresultaten het meest gevoelig?
3. Welk modelconcept is het meest geschikt om wateroverlast te analyseren en te ondersteunen in het maken van keuzes ten aanzien van oplossingen?

## Leeswijzer

Dit artikel gaat verder met een beschrijving van de verschillende concepten voor modellering van regenwaterafvoer bij extreme kortdurende neerslag. Daarna wordt de opzet van de casestudies toegelicht en wordt beschreven welke parameters zijn gevarieerd. Vervolgens worden de resultaten van de casestudies beschreven. Tenslotte worden uit deze resultaten conclusies getrokken en worden deze bediscussieerd.

## Modelconcepten

In de modellering van de regenwaterafvoer bij extreme kortdurende neerslag maken we onderscheid tussen de bovengrondse en ondergrondse stroming (afvoer) van het water. Indien deze in één model

gekoppeld en doorgerekend worden, spreken we van een gekoppeld model (van boven en ondergrond). Voor de zeer extreme neerslag zijn bij niet gekoppelde modellen, modellen die alleen de bovengrondse waterafvoer simuleren relevant. Omdat het gaat om de analyse van afstroming over maaiveld noemen we deze in dit artikel “maaiveldanalyse”.

De riolering wordt altijd met 1D-modellen (1-dimensionaal genoemd omdat het water alleen de richting van de leidingen kan volgen) doorgerekend. Bij een gekoppeld model kan de bovengrondse waterstroming daarbij in 1D of 2D worden berekend, waarbij de bovengrondse stroming doorgaans zo goed mogelijk hydrodynamisch wordt gesimuleerd.

Daarmee zijn er drie hoofdtypen modelconcepten voor de beschrijving van de afvoer van hemelwater over straat:

- Maaiveldanalyses;
- Gekoppelde 1D/1D-modellen;
- Gekoppelde 1D/2D-modellen.

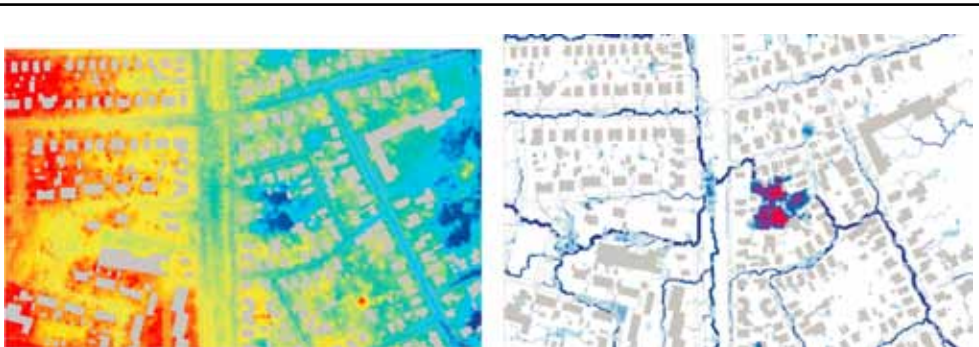
## Maaiveldanalyses

Bij maaiveldanalyses geeft een Geografisch Informatie Systeem (GIS), gebruikmakend van een nauwkeurig hoogtebestand, inzicht in de route die water op basis van de hoogte kiest om van hoog naar laag te stromen. Dit geeft een beeld van de opvulling van lage delen (depressies) bij een gekozen extreme neerslaghoeveelheid. Het effect van de riolering wordt zeer eenvoudig vooraf verrekend door aan te nemen dat deze een deel van de neerslag draineert en dat de rest van de neerslag oppervlakkig tot afstroming komt. Op deze wijze kan men met beperkte inspanning een beeld krijgen van wat gebeurt bij extreme neerslag. Rekestijden liggen in de orde grootte van enkele uren voor hele gemeenten. Afbeelding 1 geeft een voorbeeld van een maaiveldanalyse.

Maaiveldanalyses kunnen worden onderverdeeld in:

- Stationaire maaiveldanalyses (bijvoorbeeld WOLK van TAUW). Deze brengen op basis van een analyse van het maaiveld depressies en stroombanen in kaart;
- Dynamische maaiveldanalyses (bijvoorbeeld WODAN123 van Grontmij). Deze analyses houden ook rekening met de tijdsduur tussen het optreden van water op straat en het ontstaan van overlast. Het resultaat is dus, in tegenstelling tot stationaire analyses, dynamisch.

Hoewel de maaiveldanalyses niet zijn gekoppeld met analyses van ondergrondse regenwaterafvoer, kunnen de resultaten vanzelfsprekend wel gepresenteerd worden naast of in combinatie met resultaten van ondergrondse regenwaterafvoersimulaties.



**Afbeelding 1: Links: de hoogte van het maaiveld (rood is hoog, blauw is laag). Rechts: waterdieptes (paars is diep, lichtblauw is ondiep) en stroombanen.**

Belangrijke aandachtspunten bij maaiveldanalyses zijn:

- Er wordt geen rekening gehouden met interactie tussen bovengrond en riolering, met name plaatsen waar meer water in het riool past of juist veel water het riool uitkomt behoeven extra aandacht;
- Ze rekenen de bovengrondse waterstroming sterk vereenvoudigd mee. In de stationaire berekening zit zelfs geen tijdscomponent;
- De duur van water-op-straat wordt niet bepaald.

## Gekoppelde 1D/1D-modellen

Hydrodynamische 1D/1D-modellen betreffen een combinatie van een 1D-modellering van de riolering met een 1D-modellering van de bovengrondse afvoer. Dit bovengrondse afvoer vindt plaats door straten als een set van open leidingen te schematiseren op het niveau van het maaiveld, zodat het bovengrondse water ook alleen via deze straten van knooppunt naar knooppunt kan stromen (1D). De boven- en ondergrondse modellen zijn ter plaatse van de meeste putten met elkaar verbonden. Voor elke rekentijdstep wordt de waterhoogte ter plaatse van inspectieputten en debiet en stroomsnelheid tussen de putten berekend. De ervaring leert dat dit type modelconcept ongeveer twee keer zoveel rekentijd kent als de traditionele 1D-berekening, wat in de praktijk vaak neerkomt op rekentijden tussen de 1-10 minuten. Dit modelconcept is daarmee veel sneller in vergelijking tot concepten waarbij een 2D-component wordt meegenomen.

Belangrijke aandachtspunten bij 1D/1D-modellen zijn:

- Tweedimensionale elementen in de bovengrondse omgeving, zoals drempels, worden normaal gesproken niet geschematiseerd, dus extra aandacht is nodig om deze wel mee te nemen;
- Veel aandacht gaat uit naar het meenemen van alle relevante bovengrondse verbindingen. Er kunnen bovengrondse verbindingen zijn die in het rioolstelsel afwezig zijn en andersom;
- De putdekselhoogtes vormen de basis voor de maaiveldschematisering. Een foutieve putdekselhoogte verstoort de lokalisatie van water-op-straat dus veel meer dan wanneer met een tweedimensionale maaiveldmodellering wordt gewerkt;
- Lage punten en berging tussen de putten of buiten de leidingtracés worden, tenzij expliciet ingebracht, gemist;
- Men kan niet analyseren wat er gebeurt als het waterniveau stijgt tot buiten het gedefinieerde open leidingprofiel. Ook kan het modelconcept ontoereikend zijn op plaatsen waar de stroming een ruimtelijk meerdimensionaal karakter krijgt.

## Gekoppelde 1D/2D-modellen

Hydrodynamische 1D/2D-modellen van de riolering (1D) en de bovengrondse omgeving (2D) combineren enkele voordelen van maaiveldanalyses en rioleringsmodellen door zowel de riolering mee te nemen als de bovengrondse stroming tweedimensionaal te simuleren. Ze bieden de mogelijkheid om het effect van ondergrondse en bovengrondse interventies in stedelijk gebied gecombineerd te evalueren.

De maaiveldschematisering bestaat uit een grid (Sobek) of Triangular Irregular Network (TIN, Infoworks), waarbij cellen water uitwisselen met naastliggende cellen en gekoppelde putten of kolken. Met behulp van de continuïteits- en impulsvergelijkingen wordt de maaiveldstroming berekend. Rekentijden zijn sterk afhankelijk van het aantal elementen in het 2D-domein en de tijdstep om de stabiliteit van de berekening te waarborgen, maar bedragen al snel enkele uren tot langer dan een dag voor gebieden met de omvang van een middelgrote stedelijke kern.

Belangrijke aandachtspunten van 1D/2D-modellen zijn:

- De lange rekentijden vormen voor de huidige modelinstrumentaria een belemmering om snel analyses uit te voeren;
- In de praktijk ontstaat er vrij snel een spanningsveld tussen de gewenste omvang van het door

te rekenen gebied en de gewenste resolutie van het 2D-model (fijnmazigheid). Om rekentijden te beperken, kan er ook voor gekozen worden om slechts een beperkt deel van het maaiveld tweedimensionaal te modelleren en het overige maaiveld eendimensionaal;

- Aangenomen wordt dat de interactie tussen het bovengrondse en ondergrondse systeem geen verlies van drukhoogte oplevert. Het verfijnen van de schematisering door het simuleren van verliezen is wel mogelijk, maar vergt meer tijd en vereist ook lastig te verwerven informatie over de plaats en het functioneren van de kolken. Daarbij is ook van belang dat de uitwisseling tussen boven en ondergronds systeem in de praktijk mogelijk wordt beïnvloed door bijvoorbeeld toevalligheden als verstoppingen in kolken, bladeren op kolken of opgeduwde putdeksels;
- Bij de huidige beschikbare modelinstrumentaria is het afvoerend oppervlak, en dus de neerslag, direct gekoppeld aan de leidingen of putten van de riolering. Water-op-straat door beperkingen in de inloop vanaf de straten naar de riolering wordt dus niet in beschouwing genomen. Pas als het water uit de riolering treedt kan het op het maaiveld worden geborgen of oppervlakkig afstromen.

## Algemene tekortkomingen en onzekerheden

Naast tekortkomingen en onzekerheden die samenhangen met het gekozen modelconcept, zijn er nog algemene tekortkomingen en onzekerheden voor alle typen modelconcepten. Welk modelconcept er dus ook wordt gekozen, de modelleur heeft altijd te maken met een zekere onzekerheid, waardoor hij of zij modelresultaten altijd kritisch onder de loep zal moeten nemen.

De grootste algemene tekortkomingen en onzekerheden zijn:

- Voor een goede beschrijving van de bovengrondse infrastructuur wordt door (Mark et al, 2004; Bertram et al, 2009) een ruimtelijke resolutie kleiner of gelijk aan 0,50 m geadviseerd. Als data niet met een dergelijke resolutie voorhanden zijn, kunnen lokale oneffenheden in het maaiveld er voor zorgen dat de stroming niet correct wordt bepaald. Volgens Klok (2012) is een ruimtelijke resolutie van 1,00 m ook voldoende. Om de omvang van de dataset te beperken is bij deze casestudy dan ook gerekend met een ruimtelijke resolutie van 1,00 m;
- Afstroming vanaf onverhard gebied is bijzonder lastig in te schatten. Zo zal de configuratie (zoals bodemgesteldheid, helling en begroeiing) een rol spelen, maar ook de intensiteit en duur van neerslag. Op basis van veldinventarisatie kan per locatie een keuze worden gemaakt. Een andere optie is een uniforme factor op het onverharde gebied toe te passen.

## Invloed van keuze modelconcept op voorspelling water-op-straat in de verschillende casestudies

### Werkwijze

Voor de vergelijking van de modelconcepten hebben we een casestudy gedaan voor drie verschillende delen van het stedelijk gebied van de gemeente Noordwijk. Deze gemeente is de afgelopen jaren diverse malen getroffen door hevige regenval en heeft derhalve een goed beeld van overlastlocaties in de praktijk. Daarnaast was een up-to-date beheerbestand van het rioelstelsel beschikbaar, inclusief ingemeten putdekselhoogtes, en een actuele inventarisatie van het aangesloten afvoerend oppervlak.

Voor de vergelijking is de situatie bij extreme neerslag geanalyseerd volgens de drie hoofdtypen modelconcepten. Omdat er voor de maaiveldanalyse twee verschillende softwarepakketten zijn gebruikt zijn er in totaal vier analyses uitgevoerd:

- Een stationaire maaiveldanalyse (WOLK van Tauw)
- Een dynamische maaiveldanalyse (WODAN123 van Grontmij)
- Een 1D/1D-simulatie (Sobek 1DFLOW Urban)
- Een 1D/2D-simulatie (Sobek 1DFLOW Urban gecombineerd met Sobek Overland Flow).

Er is gewerkt onder de volgende condities:

- De afvoer van regenwater is geanalyseerd voor een bui van 60 mm in 1 uur met een uniform ver-

deelde intensiteit gevolgd door twee droge uren. Dit zou als een eenvoudige projectie kunnen worden gezien van een  $T=100$  inclusief een schatting van de toename door klimaatverandering. De reden voor de uniform verdeelde intensiteit is het mogelijk maken van een vergelijking tussen de dynamische en stationaire modelconcepten. Daarnaast is het niet te bepalen wat een relevante realistische variatie van de intensiteit over de tijd is;

- In dit onderzoek is in de riolering als standaardwaarde voor ruwheid  $k_{\text{beton}} = 3,0 \text{ mm}$  (White-Colebrook) aangehouden voor de betonleidingen,  $0,004 \text{ mm}$  voor de PVC-leidingen en  $0,015$  (Manning) voor de straatprofielen;
- Voor de vergelijking van de modelconcepten is uitgegaan van het afvoerend oppervlak zoals getypeerd door de Leidraad Riolering, module C2100 ten behoeve van het Sobek-rekenmodel;
- Voor de maaiveldanalyses en de analyse van de bovengrondse stroming in het 1D/2D concept is de gefilterde AHN2 gebruikt die verschaald is naar een horizontale resolutie van  $1 \times 1 \text{ m}$ . Dit is een praktisch uitgangspunt om te voorkomen dat het door te rekenen gebied in Sobek 1D/2D (in verband met rekentijd en omvang van het gebied) te klein wordt om een analyse te kunnen uitvoeren.

Voor de volgende drie gebieden zijn de drie verschillende modelconcepten toegepast (afbeelding 2):

- Noordwijk aan Zee (A): een komvormig gebied in de duinen met hoogteverschillen tot 20 meter waar de riolering onder vrij verval afvoert naar het lager gelegen Noordwijk Binnen;
- Noordwijk, Van Panhuysstraat (B): een gebied op de overgang van Noordwijk aan Zee naar Noordwijk Binnen. Dit gebied ligt onderaan een helling met een hoogteverschil van circa 7 meter en heeft via de riolering een grote toevoer van het water van een flink deel van Noordwijk aan Zee;
- Noordwijk Binnen (C): een vlak gebied met een hoogteverschil van minder dan 1 meter.



**Afbeelding 2: Hoogteverloop Noordwijk en aanduiding locaties casestudy.**

## Ervaren wateroverlast in de praktijk

In Noordwijk wordt op diverse plaatsen wateroverlast in de praktijk ervaren. Dit varieert van forse hoeveelheden water-op-straat, waarbij het verkeer er soms niet doorheen kan rijden of zeer fors wordt gehinderd, tot water in woningen en winkels. In 2010 werd Noordwijk getroffen door een wolkbreuk



waarbij vele tonnen schade werd geleden. In Noordwijk wordt op diverse plaatsen wateroverlast in de praktijk ervaren. Dit varieert van forse hoeveelheden water-op-sstraat, waarbij het verkeer er soms niet doorheen kan rijden of zeer fors wordt gehinderd, tot soms water in woningen en winkels. In 2007 werd Noordwijk getroffen door een wolkbreuk waarbij vele tonnen schade werd geleden. Exacte neerslaggegevens van die bui zijn niet beschikbaar. Sinds 2009 wordt neerslag gemeten in de gemeente. De zwaarste bui is opgetreden op 26 augustus 2010, waarbij in 3 uur tijd 41,8 mm is geregistreerd met een maximale uursom van 25 mm in 1 uur en een piekintensiteit van 4 mm in 5 minuten. Wateroverlast vond hier voornamelijk plaats in het lage deel van Noordwijk. In de uren voorafgaand aan deze bui had het echter al zoveel licht geregend dat het stelsel bij aanvang van de bui met name in dit deel nog nagenoeg vol stond.

## Resultaten Noordwijk aan Zee (A)

Alle modelconcepten voorspellen een beeld van water-op-sstraat dat goed overeenkomt met bekende klachtenlocaties en met elkaar (afbeelding 3). Er zijn ook locaties waar deze modellen water-op-sstraat voorspellen, maar die niet bekend zijn bij de gemeente. Dit is niet per definitie een modelafwijking. Het kan ook zijn dat water-op-sstraat hier niet als hinderlijk wordt ervaren.



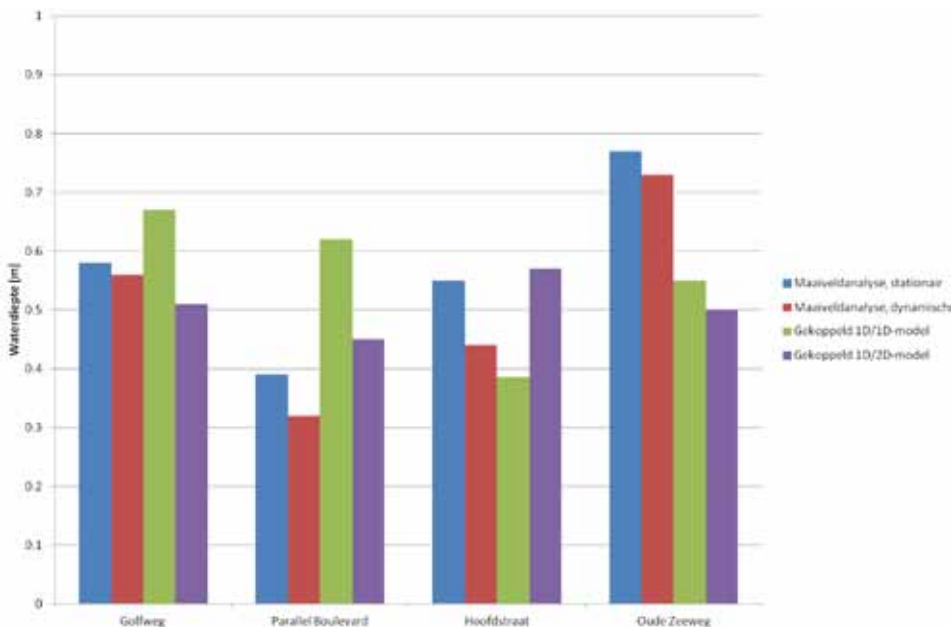
**Afbeelding 3: Waterdieptes voor Noordwijk aan Zee, bepaald met een stationaire maai-veldanalyse (linksboven), een dynamische maai-veldanalyse (rechtsboven), een gekoppeld 1D/1D-model (linksonder) en een gekoppeld 1D/2D-model (rechtsonder). Met een rode stip zijn bekende knelpuntlocaties aangegeven en de pijlen geven de locatie aan van een verkeerde putdekselhoogte in het 1D/1D-model.**

Er zijn op specifieke locaties wel verschillen tussen de modelresultaten. Zo wordt in de Trompstraat wel water-op-straat berekend met de maaiveldanalyses, maar niet met het gekoppelde 1D/2D-model. Ook wordt hier in de praktijk geen water-op-straat gesignaleerd. Waarschijnlijk kan de riolering hier dus meer afvoeren dan de voor de maaiveldanalyses aangenomen 20 mm/u, zodat het voor deze locatie belangrijk blijkt de riolering juist in beschouwing te nemen in de modellen.

Daarnaast valt op dat de stationaire maaiveldanalyse een aanzienlijke waterdiepte berekent ter plaatse van de roze vlek. Dit wordt in de praktijk niet waargenomen. Hier ligt een laag hofje dat wordt gevoed door het water-op-straat op de Golfweg (omcirkeld in afbeelding 3). In deze analyse wordt een stroombaan door een steeg berekend waar in de praktijk waarschijnlijk weinig debiet doorheen zal kunnen stromen. Door het wel meenemen van de afvoerbepalingen van de steeg (dynamische maaiveldanalyse en 1D/2D-modellering) wordt het aanvoervolume, dat ontoereikend is om het hofje geheel te vullen, beter ingeschat. Dat het een risicovol gebied is, is wel duidelijk.

Het 1D/1D model voorspelt de omvang van de wateroverlast in de Hoofdstraat en de Trompstraat (omcirkeld in afbeelding 3) niet correct, doordat in beide straten op één locatie de putdekselhoogte uit het rioleringsmodel enkele decimeters hoger ligt dan de gridhoogte uit de AHN (de pijlen in afbeelding 3). Hierdoor ontstaat bovenstreams van deze afwijking een overschatting van de waterdiepte en benedenstreams een onderschatting. Op basis van vergelijking met naastliggende maaiveldhoogtes en putdekselhoogtes lijken de waarden uit de AHN waarschijnlijker dan de putdekselhoogtes uit het rioleringsmodel. Geconcludeerd kan worden dat dit modelconcept gevoelig is voor niet goed gedefinieerde stratelementen.

Afbeelding 4 toont de maximale waterstanden volgens de vier modelconcepten op vier locaties waar in Noordwijk aan Zee wateroverlast is ervaren. Uit de figuur blijkt dat met het 1D/1D-model meestal de hoogste waterstanden worden berekend. Dit komt omdat voor de hele kern een standaard wegprofiel is gedefinieerd. Met name op locaties met veel wateroverlast lijkt de omvang van dit wegprofiel te klein,



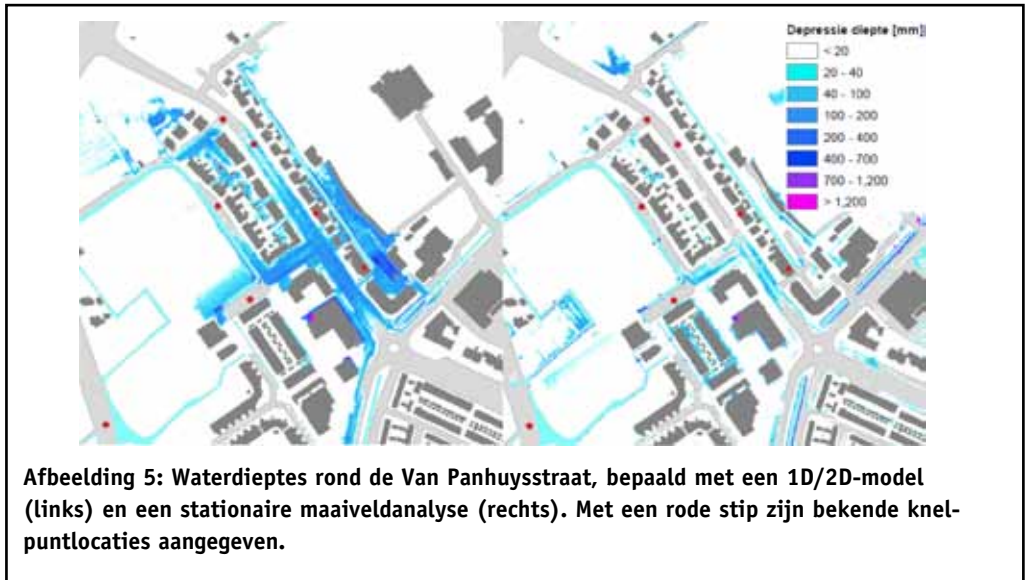
**Afbeelding 4: Maximale waterstanden per modelconcept op klachtenlocaties in Noordwijk aan Zee.**



zodat een te hoge waterstand wordt berekend. Een vergelijking van het volume water-op-straat is voor dit modelconcept dan ook zuiverder dan een vergelijking van de waterdiepte omdat bij de maaiveldanalyses en de 1D/2D-modellen het water zich mogelijk over een groter oppervlak kan verspreiden. Berekende waterdieptes bij 1D/1D-modellen kunnen dan ook niet zonder meer vertaald worden naar de ruimtelijke spreiding en relatie tot de bebouwing. Dit bezwaar kan in een verfijningsslag worden verbeterd, maar hiervoor is tweedimensionale informatie noodzakelijk. Als deze informatie beschikbaar is, kan men zich afvragen of het wel zinvol is 1D-straatmodellering gebiedsdekkend toe te passen of dat lokaal of gebiedsdekkend 2D-straatmodellering toegepast kan worden.

## Noordwijk, Van Panhuysstraat (B)

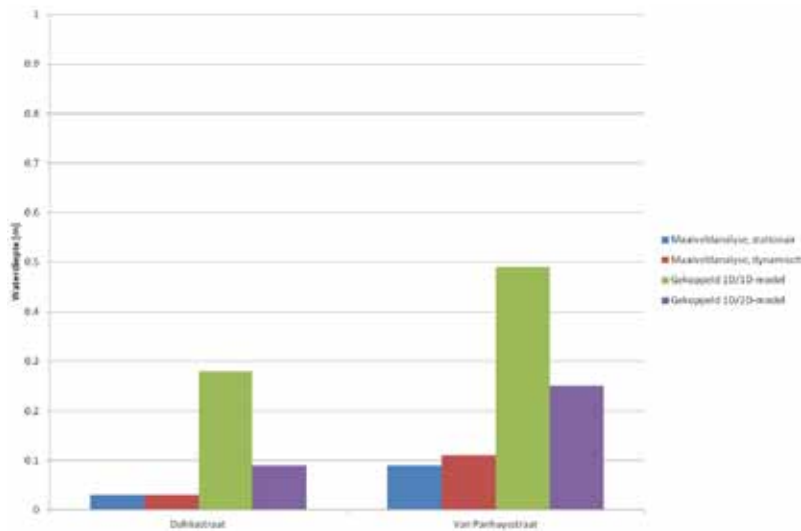
Voor gebieden op de flank van een helling is het cruciaal om de riolering mee in beschouwing te nemen. Zo berekent het 1D/2D-model voor het gebied rondom de Van Panhuysstraat (afbeelding 5) aanzienlijk meer water-op-straat dan de maaiveldanalyses, wat beter aansluit bij de praktijkervaringen. Via dit tracé wordt immers een groot deel van de neerslag die binnen het hoge gebied valt naar het lage gebied afgevoerd.



Voor de twee bekende klachtenlocaties in het gebied worden met het gekoppelde 1D/2D-model waterdieptes voorspeld die aanzienlijk hoger zijn dan met de maaiveldanalyses (Afbeelding 6). Gezien het feit dat bij een lagere neerslagintensiteit dan de doorgerekende intensiteit al waterdieptes worden ervaren die hoger zijn dan berekend met de maaiveldanalyses, geven deze analyses hier een onderschatting van de waterdiepte. Het gekoppelde 1D/1D-model voorspeld nog hogere waterdieptes dan het gekoppelde 1D/1D-model. Deze dieptes kunnen in de praktijk echter niet optreden, omdat het water dan buiten het straatprofiel treedt. Het verwaarlozen van de berging buiten het straatprofiel leidt hier dus tot overschatting van de waterdieptes. Het gekoppelde 1D/2D-model geeft hier dus de meest realistische voorspelling.

## Noordwijk Binnen (C)

Wanneer voor Noordwijk Binnen het beeld van water- op-straat, zoals voorspeld door het gekoppelde 1D/2D-model en de maaiveldanalyse met elkaar worden vergeleken, zijn nauwelijks verschillen zichtbaar (afbeelding 7). Beide modelconcepten berekenen een aanzienlijke hoeveelheid water-op-straat, terwijl in de praktijk weinig klachten gemeld worden. Dit hoeft echter geen verkeerde voorspel-



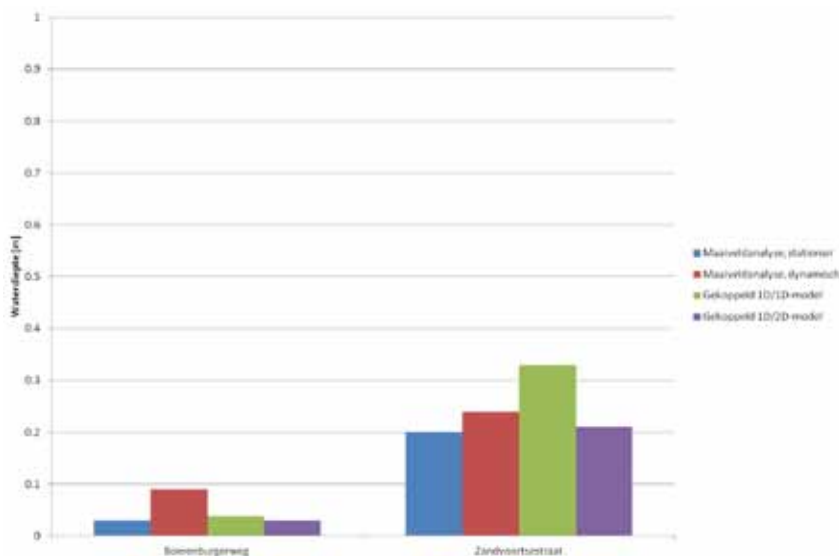
**Afbeelding 6: Maximale waterstanden per modelconcept op klachtenlocaties rondom de Van Panhuysstraat.**

ling door de modellen te zijn, omdat de doorgerekende uurintensiteit de laatste jaren niet gevallen is. Bij de ervaren intensiteit zouden dan mogelijk geen problemen ontstaan, terwijl vanaf een gegeven kritieke intensiteit de hoeveelheid water op straat sterk toeneemt (Gersonius et al., 2011).



**Afbeelding 7: Waterdieptes rond de Zandvoortsestraat en omgeving, bepaald met een 1D/2D-model (links) en een stationaire maaiveldanalyse (rechts). Met een rode stip zijn bekende knelpuntlocaties aangegeven.**

Maaiveldanalyses voorspellen voor het vlakke gebied van Noordwijk Binnen ongeveer dezelfde waterdieptes als gekoppelde 1D/2D-modellen (afbeelding 8). De aan- en afvoer van riolering blijkt voor deze gebieden dus minder een rol te spelen dan voor de gebieden aan de rand van een helling. Ook hier valt weer op dat – zolang het water in het straatprofiel blijft – het 1D/1D-model ongeveer dezelfde waterdiepte voorspelt als de overige modelconcepten, maar de waterdiepte overschat zodra deze boven het straatprofiel uitkomt en ook naast het profiel geborgen wordt.



**Afbeelding 8: Maximale waterstanden per modelconcept op klachtenlocaties in Noordwijk Binnen.**

## Invloed van parameterkeuze op voorspelling water-op-sstraat voor gekoppelde 1D/2D-modellen

### Werkwijze

Omdat naar verwachting de inzet van gekoppelde 1D/2D-modellen de komende decennia zal toenemen is voor dit modelconcept tevens bekeken hoe onzekerheden in invoerparameters doorwerken in modelresultaten en of deze gevoeligheden verschillen tussen verschillende typen gebieden. Met een 1D/2D-model worden meer processen in beschouwing genomen dan in een 1D-model of een maaiveldanalyse. Daarnaast kunnen modelverfijningen worden toegepast die in andere modelconcepten niet mogelijk zijn, bijv. het simuleren van het effect van kolken, of de keuze voor neerslag op het maaiveld of via de rekenpunten van het 1D-model zoals gebruikelijk. Tenslotte is het mogelijk de duur van water-op-sstraat te analyseren. Met het gekoppelde 1D/2D-model van Noordwijk aan Zee is een aantal parameters gevarieerd en is onderzocht welke invloed deze variatie heeft op de voorspelling van water-op-sstraat. De volgende parameters zijn gevarieerd:

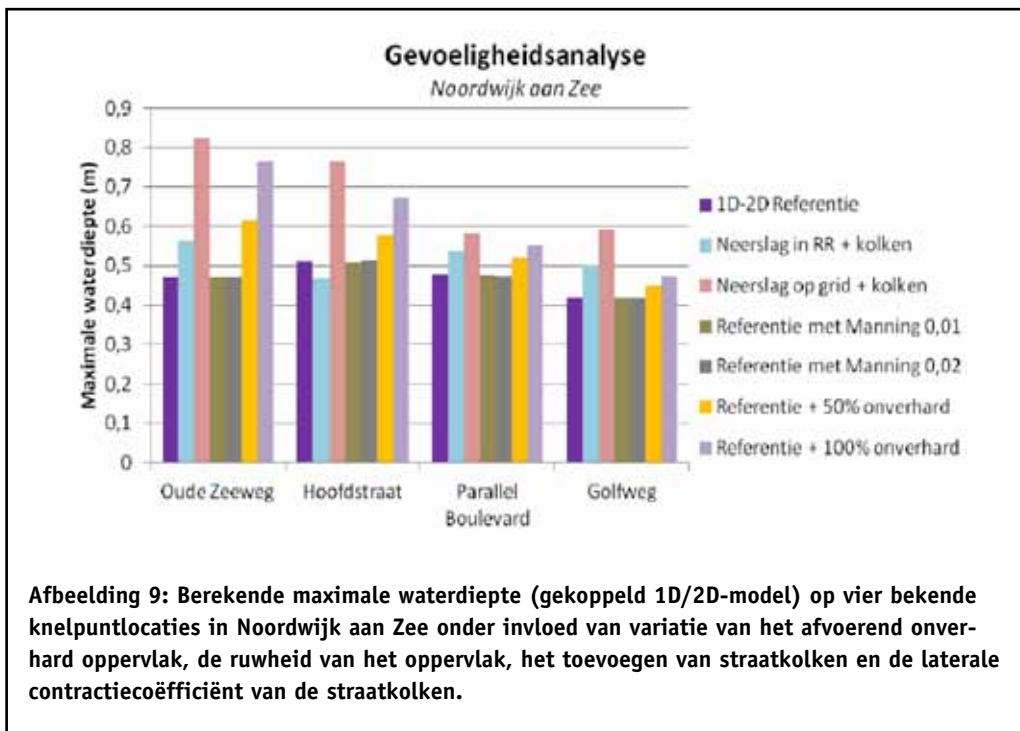
- Afstroming vanaf onverhard gebied. Het wel of niet meenemen van tuinen in de berekening heeft invloed op de hoeveelheid afstromend oppervlak. Voor de casestudy zijn, naast de referentiecasse waar de verharde oppervlakken op basis van veldinventarisatie zijn toegewezen, aanvullende berekeningen uitgevoerd waarbij 50 en 100% van het onverharde oppervlak afvoert.
- Ruwheid oppervlak. Er is onderzocht of Manning-waarden van 0,01 (-33%) en 0,02 (+33%) tot andere resultaten leiden.
- Wel of niet toevoegen van kolken. In de referentieberekening is uitgegaan van een model waar afstromende regen direct onder in de rioolput terecht komt en waar water zonder vertraging bij de inspectieputten de riolering in of uit kan stromen. Door per leiding twee kolken aan het model toe te voegen en deze met doorlaten aan de riolering te koppelen is een energiehoogteverlies, en daarmee een vertraging, in de in- en uitloop ingebouwd. Dit energiehoogteverlies wordt in het model op de volgende manier bepaald:

$$\Delta H = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot c_w^2 \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g}}$$

waarin:

- $\Delta H$  = Energiehoogteverlies [m]
- $Q$  = Inloopdebiet [m<sup>3</sup>/s]
- $\mu$  = Contractiecoëfficiënt (= 0,63)
- $c_w$  = Laterale contractiecoëfficiënt (-)
- $A$  = Doorstromend oppervlak doorlaat [m<sup>2</sup>]
- $g$  = Zwaartekrachtversnelling [m/s<sup>2</sup>]

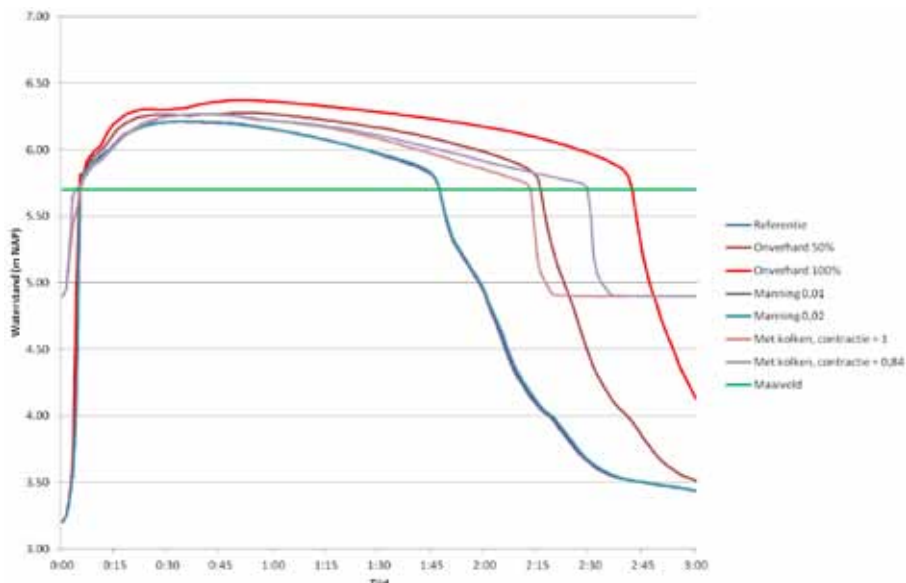
- Laterale contractiecoëfficiënt kolken. Voor een aantal kolken is, met behulp van standaard verliescoëfficiënten en een aangenomen debiet van 0,020 m<sup>3</sup>/s, een inschatting gemaakt van het verwachte energiehoogteverlies. De waarde van de laterale contractiecoëfficiënt is zo gekozen dat het energieverlies overeenkomt met het totale verlies in een straatkolk en een ronde aansluitleiding met diameter Ø 110 mm. Daarbij is rekening gehouden met energieverlies door inloop in de klok, door wandwrijving, door instroom in het riool en door één haakse bocht in de verbindende leiding. Dit energiehoogteverlies correspondeert met een laterale contractiecoëfficiënt die voor de meeste kolken rond de 0,84 bleek te liggen. Voor de modellering is naast deze waarde tevens een waarde van 1,00 doorgerekend om het effect van deze parameter inzichtelijk te maken.



**Afbeelding 9: Berekende maximale waterdiepte (gekoppeld 1D/2D-model) op vier bekende knelpuntlocaties in Noordwijk aan Zee onder invloed van variatie van het afvoerend onverhard oppervlak, de ruwheid van het oppervlak, het toevoegen van straatkolken en de laterale contractiecoëfficiënt van de straatkolken.**

## Resultaten

Afbeelding 9 toont voor vier locaties de verschillen in maximale waterdiepten op het maaiveld bij verschillende waarden voor de modelparameters.



**Afbeelding 10: Berekende verloop van de waterdiepte (gekoppeld 1D/2D model) in de Hoofdstraat in Noordwijk aan Zee onder invloed van variatie van het afvoerend onverhard oppervlak, de ruwheid van het oppervlak, het toevoegen van straatkolken en de laterale contractiecoëfficiënt van de straatkolken**

### Onverhard oppervlak

Daarnaast is de keuze het onverhard gebied niet, gedeeltelijk of geheel tot afstroming te laten komen duidelijk van invloed op de resultaten. Hoe sterk een locatie wordt beïnvloed door deze keuze hangt vooral af van de relatie tussen waterdiepte en bergend oppervlak. Hoe meer het bergend oppervlak afhankelijk is van de hoogte, hoe gevoeliger de locatie zal zijn voor afwijkingen in de berekende waterdiepte.

### Ruwheid maaiveld

Uit de uitgevoerde berekeningen blijkt dat de keuze van de ruwheid van het maaiveld, bij de onderzochte variatie van -33% en +33%, tot maximaal enkele millimeters verschil in de waterstanden leidt. Naar verwachting zal dit voor de meeste situaties in Nederland het geval zijn doordat de afstroomafstanden relatief kort zijn en de stroomsnelheden (behoudens sterk hellende gebieden) meestal vrij laag.

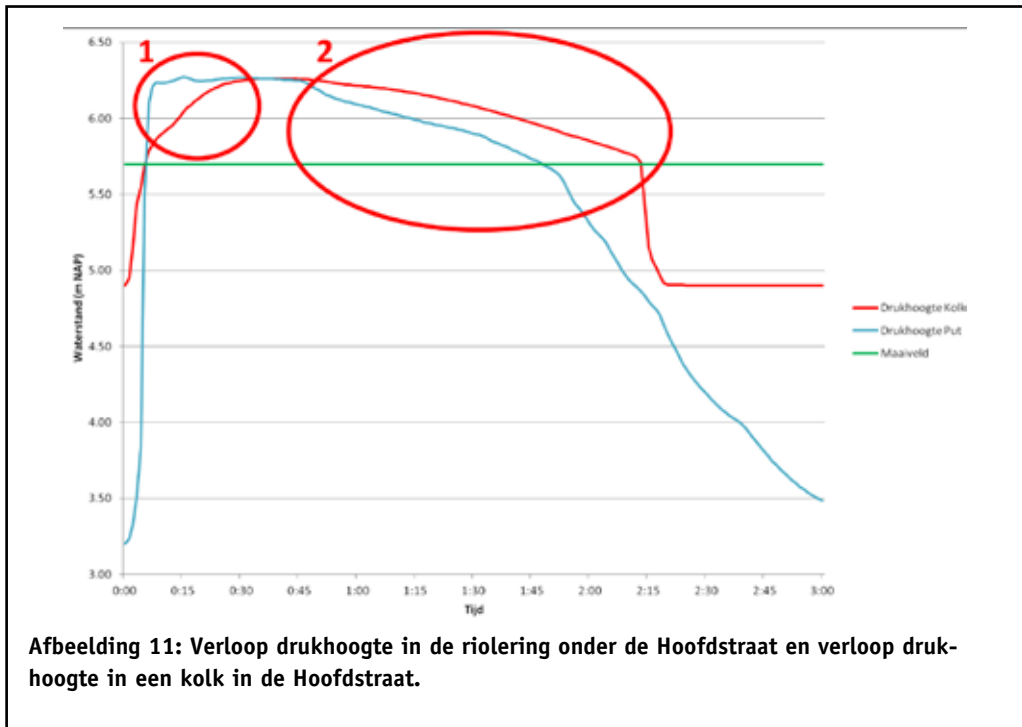
### Wel of niet toevoegen van kolken

Toevoegen van kolken aan het model blijkt vooral effect te hebben op de waterstand in laaggelegen straten. Het water zal hier langzamer in en uit de riolering stromen. De resultaten (afbeelding 10) laten zien dat dit vooral invloed heeft op de duur van het water-op-straat en in mindere mate op de maximale waterdiepte.

### Contractiecoëfficiënt kolken

Ook de waarde van de contractiecoëfficiënt van de kolken heeft nagenoeg geen invloed op de maximale waterdiepte, maar wel op de duur van het water-op-straat. Deze coëfficiënt is dus van invloed tijdens de instroom vanaf de straten in de riolering als deze weer ruimte biedt voor afvoer. Als de riolering nog vol is, is de invloed echter zeer beperkt. De weerstand van het maaiveld blijkt ook hier weer niet van belang.





Als het verloop van de drukhoogte in de kolk en het riool met elkaar wordt vergeleken (afbeelding 11) is steeds hetzelfde patroon zichtbaar. (1) Aanvankelijk stijgt de drukhoogte in het riool sneller dan op straat. (2) Daarna is de drukhoogte op straat hoger dan in het riool, maar zal deze maar langzaam afnemen door beperking van het inloopdebiet. Zelfs al er al een geruime tijd weer ruimte in het riool is, staat het water nog op straat. Hoe kleiner de gebruikte contractiecoëfficiënt, hoe langzamer dit proces verloopt.

## Conclusies

Het onderzoek naar de gevoeligheid van de voorspelling van water-op-sstraat voor keuze modelconcept en parameterkeuze laat het volgende zien:

Zowel gekoppelde 1D/2D-modellen als maaiveldanalyses geven op veel plaatsen hetzelfde water-op-sstraat beeld, een beeld dat bovendien wordt bevestigd door de klachtenregistratie. Om snel inzicht te krijgen in de situatie bij extreme neerslag kan dus prima een maaiveldanalyse ingezet worden. De stationaire en dynamische maaiveldanalyse geven daarbij overeenkomende resultaten.

Een belangrijk aandachtspunt zijn de situaties waarbij het ondergrondse aanvoergebied naar de knelpuntlocatie aanzienlijk afwijkt van het bovengrondse aanvoergebied. De maaiveldanalyses geven namelijk mogelijk geen goed beeld in situaties waar de riolering water van een veel groter gebied water aanvoert dan het bovengrondse afstroomgebied of in gebieden waar de riolering juist veel meer water afvoert (naar lager gelegen gebieden).

Het 1D/1D-model voorspelt over het algemeen grotere waterdieptes dan de overige modelconcepten. Dit modelconcept is minder goed in het kwantificeren van wateroverlast dan 1D/2D-modellen, vooral waar berging op het maaiveld zich niet beperkt tot het straatprofiel. Daarnaast is dit modelconcept gevoelig voor ontbrekende of niet goed gedefinieerde 1D-straatelementen. De rekentijden zijn echter lager dan die van 1D/2D-modellen.

Voor alle modelconcepten geldt dat onzekere keuzes in de schematisatie de uitkomsten sterk beïnvloeden. Hierbij is de omvang van het afvoerend onverhard oppervlak een parameter die duidelijk van

invloed is op resultaten. De onzekerheid in de resultaten door onzekerheid in de omvang van het afvoerend onverhard oppervlak is groter (enkele decimeters extra maximale waterdiepte) dan de onzekerheid door de keuze voor een bepaald modelconcept. De ruwheid van het maaiveld is daarentegen nauwelijks van invloed, omdat de afstroomafstanden relatief kort zijn. Het schematiseren van kolken en de gebruikte contractiecoëfficiënt hebben vooral invloed op de (toename van de) duur van water-op-straat.

## Discussie

Zowel landelijk als internationaal is een verschuiving van traditionele 1D-rioleringsmodellen naar maaiveldanalyses en 1D/2D-simulatiemodellen zichtbaar. Die verschuiving is ook op basis van de uitkomsten in dit onderzoek gerechtvaardigd. Lastiger is het om voor een specifiek vraagstuk een uitspraak te doen over welk modelconcept gekozen dient te worden. Het antwoord op de vraag welk modelconcept het meest geschikt is om wateroverlast te analyseren en te ondersteunen in het kiezen van oplossingen, hangt af van het type gebied dat gemodelleerd wordt, de urgentie voor maatregelen en het type maatregelen. Hierbij dienen de kosten voor analyse in verhouding te staan met de kosten voor de maatregelen. Naast geografische en economische motieven zijn ook rekensnelheid, databehoeftes en communicatiemogelijkheden bepalend voor de keuze voor een modelconcept. Deze aspecten willen wij de komende periode onderzoeken in andere case studies, zodat we een gedegen advies kunnen geven ten aanzien van de analysemethodes.

Aangezien het juiste modelconcept op voorhand niet bekend is, stellen wij een getrapte benadering voor, waarbij begonnen wordt met een maaiveldanalyse als verkenning van de situatie en mogelijke maatregelen. Vervolgens kunnen, indien daar aanleiding voor is, met een gekoppeld model de resultaten van deze analyse worden bevestigd en wordt meer inzicht verkregen worden in het effect van maatregelen bij interactie met riolering.

Voor deze nadere analyse zijn gekoppelde 1D/2D-modellen het meest geschikt, omdat verwacht wordt dat deze modellen betrouwbaardere resultaten geven dan de overige modelconcepten (er worden immers meer fysische processen gesimuleerd). Er blijft in gekoppelde 1D/2D-modellen echter nog steeds een aantal belangrijke onzekerheden in de schematisatie over. Dit betreft met name de interactie tussen het boven- en ondergrondse systeem (kenmerken van straatkolken en aansluitleidingen en de aanwezigheid van vervuiling) en het feit of rekenkundig de neerslag eerst via het maaiveld tot afstroming komt of direct aan het 1D-rioleringsmodel wordt toegekend. Daarnaast is van belang dat een kleine helling al veroorzaken dat een deel van het water onder invloed van impuls aan de kolken voorbij stroomt. Dit proces wordt in de huidige modellen buiten beschouwing gelaten. Dus ook de resultaten van deze beste modelmethode dienen kritisch te worden beschouwd. ■

## Vervolg van het onderzoek

In het vervolg van het onderzoek zullen we nader voor- en nadelen van het gebruik van de verschillende modelconcepten ook op andere aspecten dan modelresultaat beoordelen. Daarnaast richt het onderzoeksprogramma richt ook op twee andere facetten, waarvan de resultaten in vervolgartikelen nader zullen worden toegelicht:

- Kortdurende extreme neerslag. Omdat voor de ene locatie een hogere neerslagintensiteit en/of – volume nodig is dan voor de andere, is het zaak te weten wat een bui met een grotere of kleinere intensiteit dan 60 mm/u voor verschillen oplevert. In het artikel zal daarom verder worden ingegaan op kortdurende extreme neerslag en de gevolgen voor het stedelijk gebied.
- Implementatie. Op welke wijze kunnen maatregelen verankerd en geïmplementeerd worden. Welke actoren spelen een rol in de openbare ruimte en wat zijn hun belangen.

## Literatuur

- Bertram D., Minto J., Haynes H. & Roberts M. (2009). Developing Surface Water Management Models: Integrating Urban Drainage Features. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a

Sustainable Environment.

- Gersonius B., Ashley R., Jeuken A., Pathirana A. & Zevenbergen C. (2011). Accounting for Climate Change in Urban Drainage and Flooding: Contrasting Alternative Approaches to Devising Adaptive Strategies. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Klok T. (2012). Modelling of Stormwater Overland Flow in Urban Areas: Assessment of WOLK as an Overland Flow Modeling Tool. University of Twente, Msc. Thesis.
- Mark O., Weesakul S., Apirumanekul C., Boonya-aroonnet S. & Djordjevic S. (2004). Potential and Limitations of 1D Modelling of Urban Flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 284-299.
- Melger E. (2007). Wateroverlast in een Model. RIONEDdag 2007, sessie Tussen water op straat en wateroverlast.
- Russo B., Pouget L., Sunyer D., Malgrat P. & Theias H. (2011). Flood Risk Assessment through a 2D-1D Coupled Modeling Approach including Impact of Climate Change in Barcelona. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Schellart A., Ochoa S., Simões N., Wang L.P., Rico-Ramirez M., Liguori S., Duncan A., Chen A.S., Keedwell E., Djordjevic S., Savic D.A., Saul A. & Maksimovic C. (2011). Urban Pluvial Flood Modelling with Real Time Rainfall Information – UK Case Studies. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.

Op de website van het onderzoek ([www.water-hva.nl](http://www.water-hva.nl)) kunt u meer informatie vinden, waaronder de figuren uit deze publicatie in groter formaat.