

Neerslag- afvoermodellering met SOBEK-RR

- **Geert Prinsen** Deltares Delft (geert.prinsen@deltares.nl)
- **Hans Hakvoort** HKVLijn in Water (hans.hakvoort@hkv.nl)
- **Ruben Dahm** Deltares Delft (ruben.dahm@deltares.nl)

In het Nederlandse waterbeheer maakt een hydroloog continu keuzes welke model-concepten te gebruiken om zijn vragen te beantwoorden. Voor het modelleren van het neerslag-afvoerproces zijn verschillende modelcodes veelvuldig toegepast. SOBEK-RR is een veel gebruikt neerslag-afvoermodel in de Nederlandse waterwereld voor hoogwater- en normeringsstudies, maar ook voor jaarrond simulaties en waterbalansstudies. In dit artikel geven we de lezers achtergrondinformatie over de mogelijkheden binnen deze modelcode. We schetsen het ontstaan van SOBEK-RR, de ontwikkeling die het heeft doorgemaakt, de plaats die het inneemt ten opzichte van andere neerslag-afvoermodellen en de toepassingsmogelijkheden.

Inleiding

In de vorige eeuw hebben Nederlandse wetenschappers veel onderzoek gedaan naar het neerslag-afvoerproces in landbouwgebieden. Al in 1940 publiceerde Hooghoudt resultaten van zijn onderzoek van stroming naar drains (Hooghoudt, 1940). Meer onderzoek, vooral gericht op afvoeren van stroomgebieden, is uitgevoerd door onder andere De Zeeuw en Hellinga (1958), Kraijenhoff van de Leur (1958) en Ernst (1978). Onderzoek naar neerslag-afvoerprocessen van andere typen landgebruik is minder talrijk. Hamaker (1984) voerde onderzoek uit naar de waterbehoefte in glastuinbouwgebieden. NWRW (1989) en Stichting Rioned (1995) beschrijven onderzoek op het gebied van inloop naar, berging in en afvoer van rioolstelsels.

Met de opkomst van de computer is ook de vergaarde kennis van de neerslag-afvoerprocessen in modelcode geprogrammeerd en beschikbaar gekomen voor een groeiende schare gebruikers. De laatste decennia is een trend naar standaardisatie in modelcodes ingezet. Enkele voorbeelden van modelcodes die voor neerslag-afvoervraagstukken gebruikt worden zijn Aquarius (STOWA, 1997), RAM (Salverda, 1996), SIMGRO (van Walsum e.a., 2006) en het Wageningen model (Warmerdam e.a., 1996).

SOBEK-RR is in diezelfde tijd ontstaan, midden jaren negentig van de vorige eeuw. Men had behoefte aan een modelcode die het samenspel van afvoer, berging en (kunstwerk)beheer in bemalen gebieden op een gebruikersvriendelijke manier simuleerde. Om in deze behoefte te

voorzien is Delft-3B ontstaan, met de 3B voor Berging, Bemaling, Beheer. Delft-3B is vrij snel daarna opgenomen in de SOBEK-familie en de naam is gewijzigd in SOBEK-RR. Enkele van de eerste toepassingen en beschrijvingen van SOBEK-RR zijn gegeven in Schuurmans e.a. (1995) en in Hendriks e.a. (1997). De eerste jaren gebruikte men SOBEK-RR alleen voor hoogwater-berekeningen, en dan vooral in poldergebieden. Al snel ontstond de behoefte om de modelcode ook op niet-bemalen gebieden toe te kunnen passen en jaarrond berekeningen uit te voeren. Voor dit laatste is in 1998 in samenwerking met Alterra de modelcode CAPSIM (Wesseling, 1991) voor de onverzadigde zone geïmplementeerd. Hierdoor beschikt SOBEK-RR over processen als een grondwaterstandsafhankelijke freatische bergingscoëfficiënt, berging van water in de wortelzone en verdampingsreductie.

Vanaf het begin is SOBEK-RR veel gebruikt voor en door de waterschappen. Belangrijke redenen hiervoor zijn:

- SOBEK-RR biedt een compleet pakket aan functionaliteiten voor simulatie van het neerslag-afvoerproces, voor zowel onverharde, stedelijke als glastuinbouwgebieden.
- De grafische user interface (GUD).
- De eenvoudige koppeling van SOBEK-RR met andere SOBEK modules. Vooral de koppeling met de SOBEK-1DFLOW module wordt veel gebruikt. Naar wens is deze koppeling sequentieel of simultaan. Er bestaan ook koppelingen met de real-time control module (SOBEK-RTC) en de nieuwe Emissiemodule (Deltares en Stowa, 2009).

Het vervolg van dit artikel beschrijft de beschikbare modelconcepten van SOBEK-RR en geeft voorbeelden van enkele typische toepassingen.

SOBEK-RR: een bibliotheek van neerslag-afvoerconcepten

In tegenstelling tot wat menigeen denkt, beschikt SOBEK-RR over meerdere neerslag-afvoerconcepten. Het meest bekend is het gebruik van SOBEK-RR als een netwerk met knooptypen voor verhard gebied (RR-paved) en onverhard gebied (RR-unpaved) gekoppeld aan een SOBEK-1DFLOW model van een aantal waterlopen. In een aantal toepassingen gebruiken we de RR-greenhouse knopen als representatie van glastuinbouwgebieden met waterbergingsbassins. We gebruiken RR-open water knopen en RR-kunstwerken (stuw, onderlaat, pomp) om (polder)water en kunstwerken te modelleren.

Maar SOBEK-RR beschikt over meerdere modelconcepten. Al geruime tijd is het Sacramento modelconcept (Burnash e.a., 1973) beschikbaar in SOBEK-RR. Sacramento wordt veel in het buitenland gebruikt. In Nederland past onder andere waterschap Hunze en Aa's dit concept toe. Medio 2007 zijn internationaal bekende modelconcepten zoals HBV (Lindström e.a., 1997) en de SCS-methode (Soil Conservation Service, 1973) aan SOBEK-RR toegevoegd. Prinsen (2007) beschrijft de concepten en implementatie van HBV en de SCS-methode in SOBEK-RR. Ook is het mogelijk een afvoertijdreeks, die berekend is met een willekeurig ander model, op te leggen in SOBEK-RR.

Het gebruik van SOBEK-RR als inloopmodel voor rioleringsberekeningen is een andere toepassing. Bij gebruik van SOBEK-RR in combinatie met de riolerings-1DFlow module (SOBEK-Urban) is dit inloopmodel als extra functionaliteit beschikbaar. De Leidraad Riolerings (Stichting Rioned, 1995) beschrijft dit inloopmodel.

De transformatie van het oorspronkelijke SOBEK-RR naar een module met een bibliotheek aan neerslag-afvoerconcepten maakt dat het geschikt is voor neerslag-afvoermmodellering over een groot toepassingsbereik: van grootschalige stroomgebieden (bijvoorbeeld het stroomgebied van de Rijn) tot een afwateringseenheid in een Nederlandse polder met eenheden van kleiner dan 25 hectare. Het detail van de schematisatie varieert zo van ruimtelijk grof geaggregeerde schematisaties tot semi-gedistribueerde toepassingen. SOBEK-RR schematisaties worden steeds meer automatisch gegenereerd op basis van GIS-bestanden en databases, rekening houdend met de ruimtelijke variatie van voor de hydrologie relevante kenmerken zoals bodemtype, landgebruik en neerslag.

Modelleren met SOBEK-RR

SOBEK-RR is een modelcode voor 0-D modellering van neerslag-afvoerprocessen en voor vereenvoudigde modellering van hydraulische processen. SOBEK-RR onderscheidt diverse knooptypen met verschillende functies. De RR-openwaterknoop en de verschillende typen RR-kunstwerken worden voor de vereenvoudigde hydraulica gebruikt, terwijl de andere knooptypen focussen op het neerslag-afvoerproces. SOBEK-RR kent ook een beperkt aantal typen takken, die de knopen verbinden.

Onderstaande figuur toont de symbolen van de SOBEK-RR knooptypen.



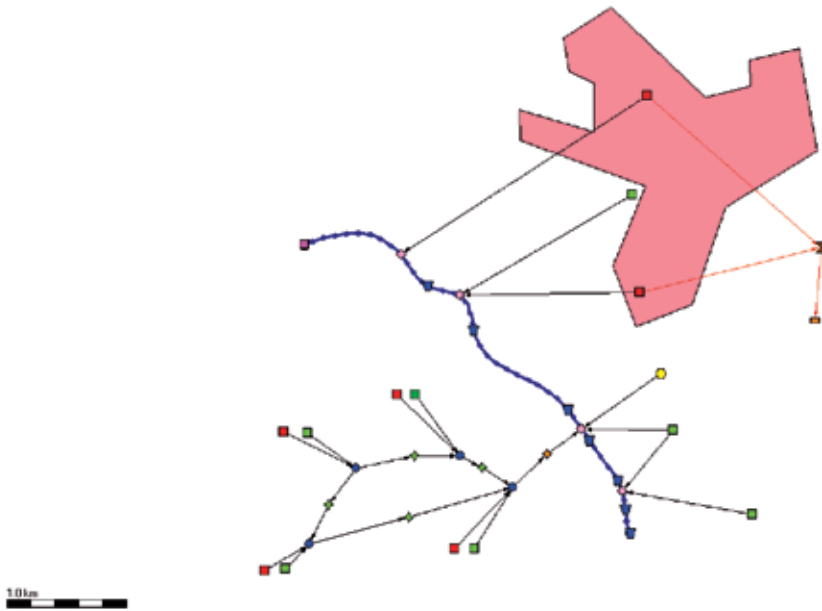
Tabel 1 benoemt de knoop- en taktypen en hun functie.

RR-knooptype	Functie
RR-Flow connection on branch	Koppeling met SOBEK-1DFLOW module op een Flow tak
RR-Flow connection on node	Koppeling met SOBEK-1DFLOW module op een Flow-connection node
RR-Paved	Verhard gebied
RR-Unpaved	Onverhard gebied
RR-Greenhouse	Kassen met bergingsbassins
RR-Open water	Open water
RR-Boundary	RR-rand
RR-Weir	Stuw
RR-Orifice	Onderlaat
RR-Friction	Weerstand
RR-Qh relation	Q-h relatie
RR-Sacramento	Sacramento model
RR-Industry	Invoer van onttrekkingen en/of lozingen
RR-WWTP (waste water treatment plant)	Verzamelen van rioolwater uit verhard gebied
RR-External runoff	Invoer van een extern berekende afvoer tijdreeks
RR-HBV	HBV model
RR-SCS	SCS model
RR-taktype	Functie
RR-Link	Standaard RR-taktype
RR-Sewerage link	Alleen visualisatie doeleinden
RR-Routing link	Muskingum routing
RR-Unpaved Surface Flow Link	Optioneel taktype, om afvoer over oppervlak en drainage uit onverhard gebied te kunnen scheiden

■ Tabel 1: Knoop- en taktypen in SOBEK-RR

Een SOBEK-RR netwerk kan bestaan uit meerdere (niet in SOBEK-RR verbonden) deelnetwerken. Een netwerk kan bestaan uit alleen afvoerende oppervlakken zoals RR-*paved*, RR-*unpaved*, RR-*greenhouse*, RR-HBV, RR-SCS of RR-Sacramento knopen. Bij elke afvoerende knoop specificeert de gebruiker een neerslagstation, zodat met ruimtelijk variabele neerslag kan worden gerekend (bijvoorbeeld afgeleid van radarbeelden). Een combinatie van deze knopen met een simpele modellering van een vermaasd netwerk van open water knopen en kunstwerken is mogelijk. De structuur van een SOBEK-RR netwerk is vrij. Een boomstructuur met duidelijke bovenstroomse en benedenstroomse richting is niet noodzakelijk.

Figuur 1 toont een typisch SOBEK-RR netwerk gekoppeld aan een SOBEK-1DFLOW netwerk. De dikke blauwe lijn representeert het SOBEK-1DFLOW netwerk. Het gebied ten oosten van de rivier is gemodelleerd met neerslag-afvoerknopen die rechtstreeks zijn gekoppeld met de 1DFLOW schematisatie. Ten westen van de rivier is een polder met meerdere peilvakken geschematiseerd. Er is gebruik gemaakt van RR-*paved* en RR-*unpaved* knopen, een RR-Sacramento knoop, RR-*open water* knopen en kunstwerken. Via een gemaal lost de polder op de rivier.



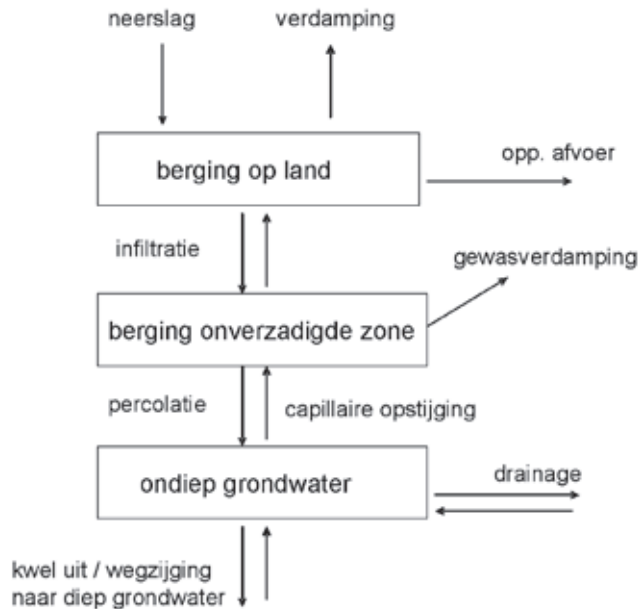
■ Figuur 1: Typisch Sobek-RR netwerk, gekoppeld aan SOBEK-1DFLOW

Het stedelijk gebied aan de oostkant van de rivier is geschematiseerd door twee verharde RR-*paved* knopen (gebied) en een RR-*unpaved* (onverhard gebied) knoop. De RR-*paved* knopen voeren beide af naar een rioolwaterzuivering (RWZI, een RR-*WWTP* knoop), en storten over op verschillende locaties in de rivier. Voor het onderscheid is voor de takken naar de RWZI een ander taktype gebruikt. Verder ligt ten oosten van de rivier nog een landelijk gebied met kassen, geschematiseerd door twee RR-*unpaved* knopen en een kasknoop. Eén van de RR-*unpaved* knopen is met twee takken verbonden met de rivier, een gewone RR-*link* en een RR-*unpaved surface flow link*. Hierdoor kan de afvoer over het oppervlak en de drainage uit onverhard gebied apart aan de 1DFLOW module worden doorgegeven, zodat in een waterkwaliteitsberekening onderscheid mogelijk is in de verschillende kwaliteiten (stofconcentraties) van deze afvoeren.

Onverhard gebied

De RR-*unpaved* knoop onderscheidt berging op land, in de onverzadigde zone en in het ondiep grondwater. Diepere grondwaterlagen worden niet in SOBEK-RR gemodelleerd. **Figuur 2** geeft de functionaliteit weer.

Neerslag die op land valt, kan infiltreren tot een opgegeven maximum infiltratiecapaciteit. Als de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overschrijdt, dan bergt SOBEK-RR neerslag op land en kan vanuit daar verdampen. Boven een drempelwaarde stroomt het water via het oppervlak af. Water infiltreert van het oppervlak in de onverzadigde zone, waaruit de vegetatie water onttrekt voor de gewasverdamping. Er treedt percolatie op als het vochtgehalte in de onverzadigde zone hoger is dan het evenwichtsvochtgehalte. Capillaire opstijging treedt op als het vochtgehalte lager is dan het evenwichtsvochtgehalte. Afhankelijk van de grondwaterstand en het open water peil draineert het ondiepe grondwater naar lokaal oppervlaktewater. Als het open water peil hoger is dan de grondwaterstand, infiltreert open water naar het onverhard gebied.



■ Figuur 2: Concept RR-unpaved knoop

De modelcode CAPSIM berekent de processen in de onverzadigde-zone. CAPSIM is eind vorige eeuw door SC-DLO (tegenwoordig: Alterra) ontwikkeld en als dll in SOBEK-RR geïmplementeerd. Het is een quasi-stationaire benadering van de onverzadigde zone. Van tijdstap naar tijdstap bepaalt CAPSIM het evenwichtsvochtgehalte als functie van grondwaterstand, gewas- en bodemtype via een aantal tabellen, die voor de 21 bodemtypen uit de Staring-reeks door Alterra zijn ingevuld op basis van CAPSEV-berekeningen (Wesseling, 1991). Op basis van deze tabellen bepaalt SOBEK-RR de capillaire opstijgingsflux en verdampingsreductie.

In natte omstandigheden percoleert overtollig water direct naar het ondiepe grondwater. In droge omstandigheden treedt capillaire opstijging en mogelijk verdampingsreductie op. CAPSIM is gebruikt in SIMGRO 3.0. SIMGRO 6.0 maakt inmiddels gebruik van MetaSWAP. Een koppeling van SOBEK-RR met MetaSWAP kan de berekening van de onverzadigde zone verbeteren en wij staan er voor open om een dergelijke koppeling te realiseren.

Drainage

Het stijghoogteverlies van grondwater dat stroomt naar een drain kan worden onderverdeeld in verliezen door verticale stroming, horizontale stroming, radiale stroming bij de drain en de intree in de drain. De formulering van De Zeeuw-Hellinga beschouwt stijghoogteverlies veroorzaakt door radiale stroming en intree in de drain. De formulering gaat uit van een lineair verband tussen afvoer en het verschil tussen grondwaterstand en open water peil. In termen van specifieke afvoer:

$$q = \alpha * \mu * dh \quad (1)$$

Hierin is q de specifieke afvoer [m/dag], dh het verschil tussen de grondwaterstand en het open water peil [m], α de reactie-factor [1/dag] en μ de bergingscoëfficiënt [m/m].

Op basis van de continuïteitsvergelijking (voor tijdstap dt) geldt dat de som van infiltratie I en kwel S [m/dag], verminderd met de specifieke afvoer q , gelijk is aan de geborgen waterschijf:

$$(I + S - q) * dt = \mu * dh \quad (2)$$

Combineren van vergelijking 1 en 2 resulteert in een bekende vorm van de formule van de Zeeuw-Hellinga waarin q_t , de specifieke afvoer op tijdstip t [m/dag] is uitgedrukt in de specifieke afvoer op tijdstip $t-1$ [m/dag], tijdstap Δt [dagen], en infiltratie I , kwel S , reactiefactor α als hierboven gedefinieerd:

$$q_t = q_{t-1} * e^{-\alpha \Delta t} + (I + S)(1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (3)$$

Vermenigvuldigen met het oppervlak A [m²], integreren in de tijd en gebruik maken van q_{t-1} uit de vergelijking te verwijderen, resulteert in vergelijking 4 voor de gemiddelde afvoer [m³/dag] in tijdstap t :

$$Q_{t, \text{gemiddeld}} = \frac{A * \alpha * \mu * h_{t-1} - A(I + S)}{\alpha * \Delta t} * (1 - e^{-\alpha \Delta t}) + A(I + S) \quad (4)$$

In deze vergelijking is de bergingscoëfficiënt μ expliciet en wordt in elke tijdstap de hoogte h bepaald als het verschil tussen de grondwaterstand en het open water peil. In de berekening kunnen I en S per tijdstap variëren.

De formule van Ernst en de formule van Krayenhoff van de Leur zijn ook in SOBEK-RR beschikbaar. De formule van Ernst gaat eveneens uit van een lineair reservoir en gebruikt een zogenaamde drainageweerstand:

$$q = \frac{dh}{\gamma * f} \quad (5)$$

Hierin is q de specifieke afvoer [m/dag], dh het verschil tussen grondwaterstand en drainagebasis in [m], γ de drainageweerstand in [dagen] en f een vormfactor. Typische waarden voor de vormfactor zijn 0,65 tot 0,85 (Ernst, 1978). De vormfactor is in SOBEK-RR geen invoerparameter; de gebruiker moet deze verwerken in de drainageweerstand γ . Met $\gamma = 1 / (\alpha * \mu)$ is de vergelijking van Ernst vergelijkbaar met de formule van De Zeeuw-Hellinga.

De formule van Krayenhoff van de Leur (Krayenhoff van de Leur, 1958) gebruikt een reservoircoëfficiënt en houdt rekening met horizontale weerstand. Dit is duidelijk een ander uitgangspunt dan de vergelijking van de Zeeuw-Hellinga, waarbij de horizontale weerstand juist wordt verwaarloosd. De methode van Krayenhoff van de Leur wordt voor zover wij weten zelden meer in SOBEK-RR toepassingen gebruikt. Daarom lichten wij de formule niet nader toe.

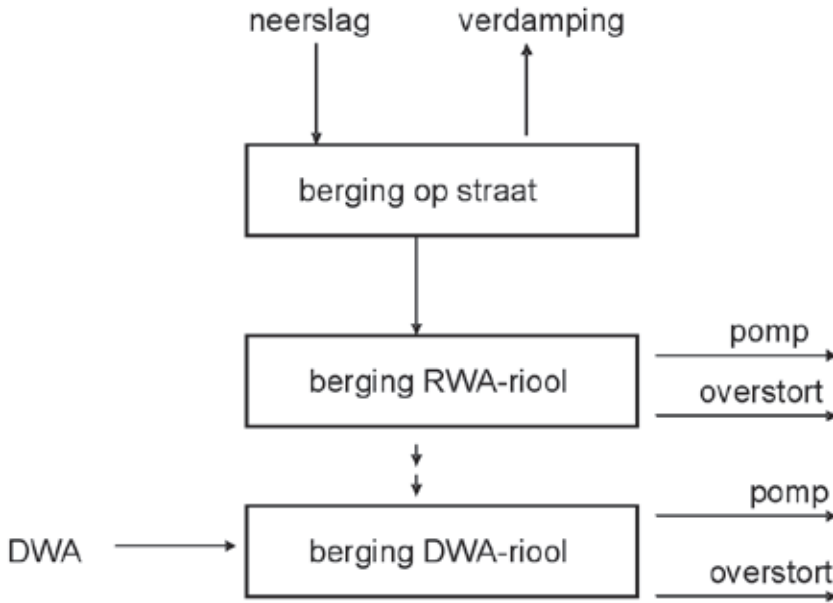
Als men processen in de onverzadigde zone wil simuleren en daarvoor CAPSIM gebruikt, adviseren wij de drainageformulering van Ernst te gebruiken. In de formule van de Zeeuw-Hellinga is de bergingscoëfficiënt μ opgenomen, en deze coëfficiënt is bij gebruik van CAPSIM variabel in de tijd. De CAPSIM-bergingscoëfficiënt neemt af naarmate de grondwaterstand hoger wordt, wat leidt tot onrealistisch kleine afvoeren volgens de formule van de Zeeuw-Hellinga. Om dat te voorkomen is het in SOBEK-RR mogelijk om de initiële waarde van de bergingscoëfficiënt (de waarde op $t=0$) te gebruiken in de formule van De Zeeuw-Hellinga, maar het is beter om direct gebruik te maken van de formulering van Ernst.

In de RR-*unpaved* knoop is het mogelijk meerdere drainagelagen met verschillende drainageweerstanden aan te geven. Hierdoor maakt men onderscheid tussen snelle en langzame componenten in de drainage, en kan het complex van verschillende drainagemiddelen (buizen, greppels, diepere sloten en beken) worden gemodelleerd. De interactie met diepere grondwaterpakketten kan worden geschematiseerd met het opleggen van kwel (of wegzijging) als constante, als tijdreeks, als functie van een tijdreeks van stijghoogten van het diepere grondwaterpakket, of met een OpenMI-koppeling.

Verhard gebied

Het concept van de modellering van verhard gebied in een RR-paved knoop is weergegeven in figuur 3. Neerslag valt op het verharde oppervlak en stroomt het riool in. Als er water op het verharde oppervlak staat, kan verdamping optreden. Eén of twee bergingsreservoirs stellen schematisch het riool voor. Bij een gemengd rioelstelsel is dat één reservoir. Bij een gescheiden of verbeterd gescheiden rioelstelsel zijn twee reservoirs actief. De termen 'gemengd

stelsel' en 'gescheiden stelsel' hebben betrekking op het al of niet scheiden van de rioolstelsels voor regenwaterafvoer (RWA) en droogweerafvoer (DWA, huishoudelijk afvalwater). Bij een verbeterd gescheiden stelsel stort het RWA-riool eerst over in nog beschikbare vrije berging in het DWA-riool. Alleen als het DWA-riool vol is stort het RWA stelsel 'naar buiten' over. Voor elk van de rioolstelsels (RWA en DWA) kan een pompcapaciteit en een maximale berging worden opgegeven.



■ Figuur 3: Concept RR-paved knoop

De RR-*paved* knoop kan worden gekoppeld met een RR-*WWTP*, RR-*boundary* of RR-*Flow connection node*, en een RR-*open water*. De gebruiker geeft in de GUI op naar welke knoop de rioolgemalen pompen, en op welke knopen overstort plaats vindt.

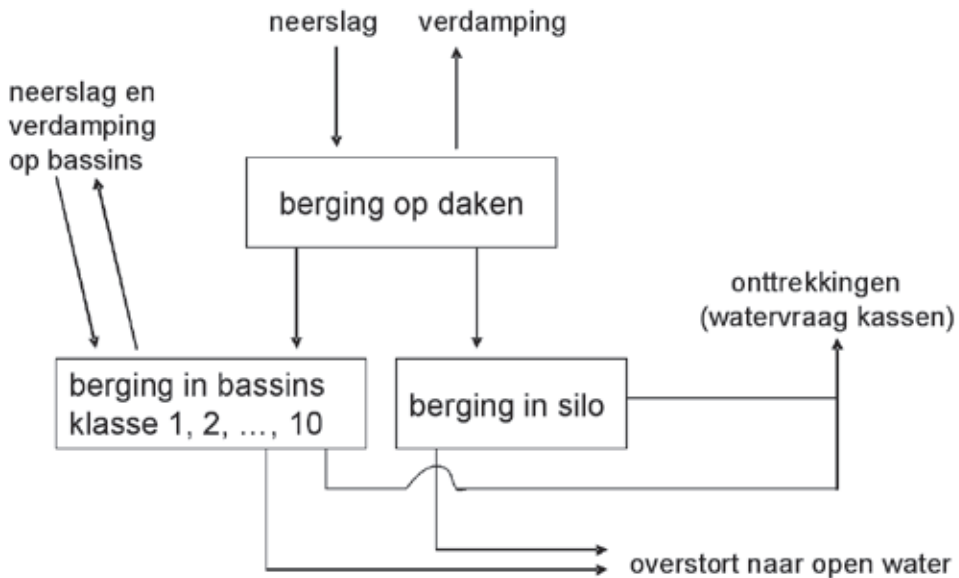
Er is terugkoppeling van het waterpeil op de benedenstroomse knoop (een RR-*open water*, een RR-*boundary*, of een RR- *Flow connection node*): als de waterstand boven maaiveld is wordt de overstort gestremd en afhankelijk van de schematisatie vindt berging op maaiveld plaats. Modelleren van de overstort kan zowel instantaan als met vertraging volgens een lineair reservoirmodel.

Kasgebieden

Een gebied met kassen reageert anders dan stedelijk of regulier landelijk gebied. Daarom bevat SOBEK-RR een apart knooptype voor kassen. Het concept van dit knooptype en achterliggende data zijn in nauwe samenwerking met Alterra midden jaren negentig ontwikkeld (Schuurmans e.a., 1995). Het knooptype houdt rekening met berging op de kassen (interceptie

op de daken) en berging in regenwaterbassins. Berging van water in een ondergronds bassin of silo is optioneel. De regenwaterbassins zijn standaard in een tiental klassen onderverdeeld, van 0 tot 4500 m³ berging per hectare glas. In een gebied waar bedrijven verschillende basingroottes hanteren, wordt een onderverdeling in klassen opgegeven. Immers, een gebied met alleen kassen met typische berging 2000 m³/ha reageert anders dan een gebied met voor 50% een typische berging van 1000 m³/ha en voor 50% een typische berging van 3000 m³/ha. Gegeven typische maximale dieptes van bassins en de opgegeven oppervlakken van de kasgebieden bepaalt SOBEK-RR welk deel 'echt' kasoppervlak is, en welk deel door bassins in gebruik is.

Berging van neerslag op de daken vindt plaats in de bassins. Uit de bassins kan water verdampen en wordt water gebruikt voor beregening in de kassen. Dit gebruik stopt als het waterniveau beneden een drempelwaarde daalt, vanaf dat moment veronderstelt SOBEK-RR dat water van elders wordt aangevoerd. Voor hoogwaterstudies is juist de overstort van belang. Bij intensieve of langdurige neerslag kunnen de bassins immers vollopen en overstorten in naburig open water. Voor de initiële vrije ruimte in de bassins en de watervraag van een aantal typische gewassen in de kassen zijn destijds tijdreeksen afgeleid met een kasmodel (Hamaker, 1984).



■ Figuur 4: Concept RR-greenhouse knoop

Open water

De gebruiker heeft bij het schematiseren van een gebied met SOBEK de keus om het open water in SOBEK-RR te modelleren of hydrodynamisch met de SOBEK-1DFLOW module. In het algemeen hangt de keuze af van het doel van de studie en beschikbaarheid van data. Er zijn veel toepassingen in polder-boezemsystemen waarbij het polderwater in SOBEK-RR is gemodelleerd, en het boezemwater in SOBEK-1DFLOW. Dat is eenvoudig als er een duidelijke grens

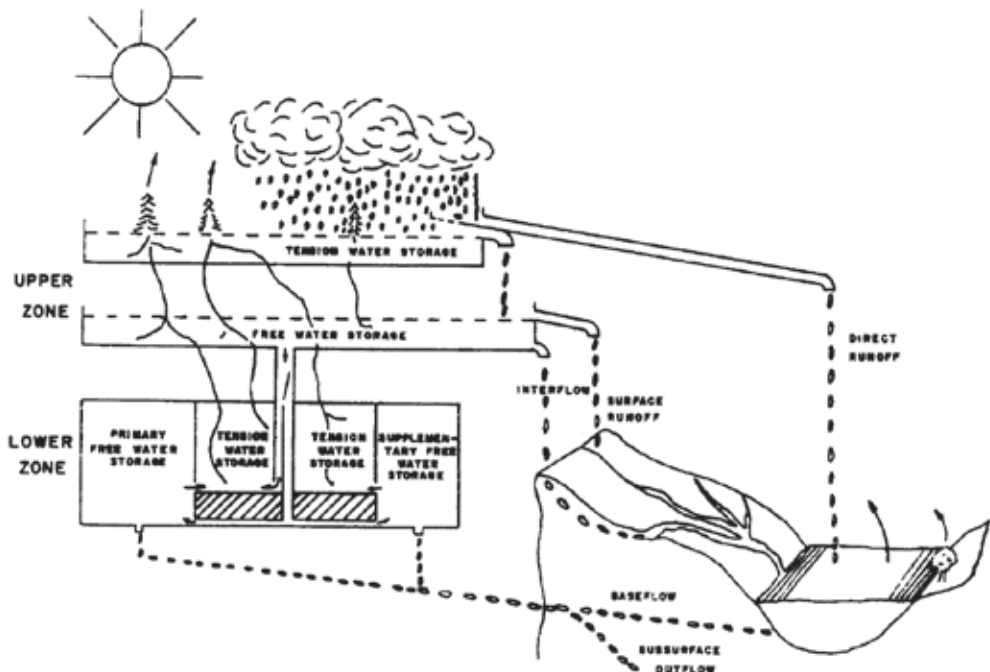
is, bijvoorbeeld een poldergemaal. Als er geen duidelijke grens is moet het open water in één van beide modules worden geschematiseerd. Een schematisatie waarbij een RR-*open water* via een RR-*Friction node* (weerstand) is gekoppeld aan een RR-*Flow connection node* raden we af.

Bij de eerste gecombineerde toepassingen van SOBEK-RR en SOBEK-1DFLOW werd het open water regelmatig in SOBEK-RR gemodelleerd. Door de toenemende rekenkracht van PC's is de rekentijd vaak geen probleem meer en modelleren wij het open water steeds vaker volledig in SOBEK-1DFLOW. Afhankelijk van de kenmerken van het gebied schematiseren we een deel van het open water in de SOBEK-1DFLOW module als bergingsknoop, zodat alleen hydrodynamisch wordt gerekend waar nodig.

Sacramento

Modelconcepten als Sacramento en HBV modelleren een gebied door middel van een aantal conceptuele reservoirs die met elkaar in verbinding staan, en waarbij de afvoer wordt samengesteld uit verschillende afvoercomponenten uit de verschillende reservoirs. Deze modelconcepten aggregeren een gebied in één knoop.

In Sacramento geeft de modelleur expliciet het percentage niet-doorlatend oppervlak aan (*impervious area*). Het concept onderscheidt twee reservoirs voor de bovengrond of wortelzone (*upper zone*), en drie voor de ondergrond (*lower zone*). In beide zones zijn reservoirs met spanningswater (*tension water*) dat door de bodem wordt vastgehouden, en reservoirs met vrij water (*free water*) die volgens het concept van een lineair reservoir leeglopen. **Figuur 5** toont het modelconcept van Sacramento.



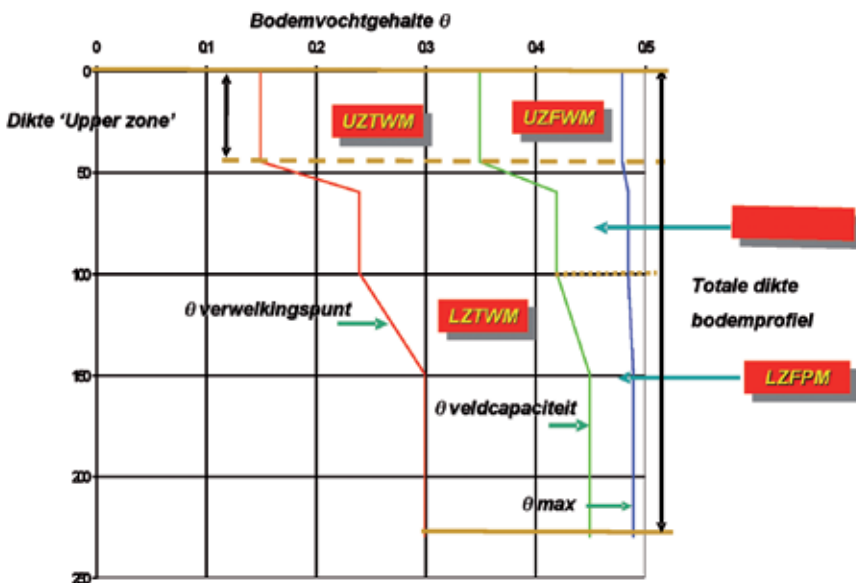
■ Figuur 5: Concept Sacramento knoop (Burnash e.a. 1973)

De neerslag die op verhard gebied valt, leidt tot *direct runoff*. De overige neerslag komt in het *Upper Zone Tension Water* reservoir. Als dit vol is, komt water in het *Upper Zone Free Water* Reservoir. Dit reservoir stroomt leeg als een lineair reservoir en representeert *interflow*. Overtollig water uit dit reservoir stroomt af over het oppervlak. Water percoleert vanuit het *Upper Zone Free Water* reservoir naar de *Lower Zone*. Deze percolatie is niet-lineair afhankelijk van het vochtgehalte van de *Upper Zone* en de *Lower Zone*. Gepercoleerd water komt in zowel het *Lower Zone Tension Water* reservoir, als in de *Lower Zone Free Water* reservoirs volgens een op te geven verdeling. Er zijn twee *Lower Zone Free Water* reservoirs, die elk als een lineair reservoir leeglopen. Met deze reservoirs worden verschillende basisafvoercomponenten gemodelleerd. Hiermee kan een vergelijkbaar effect als met de meerdere drainagelagen in de RR-*unpaved* knoop worden bereikt.

Als de grondwaterscheiding afwijkt van de oppervlaktewater-stroomgebiedsgrens kan een deel van de basisafvoer buiten het gemodelleerde oppervlaktewatergebied optreden. Dit kan bij Sacramento eenvoudig worden aangegeven. Bij gebruik van kleine rekentijdstappen is het zinvol om de snelle afvoer (*direct runoff*, *surface runoff*, *interflow*) via een *unit hydrograph* te verdelen over meerdere rekentijdstappen, en daarmee dus de snelle afvoer te vertragen.

De opgegeven potentiële verdamping in de invoer wordt door de gewassen onttrokken uit de *Upper* en *Lower Zone Tension Water* reservoirs. Als deze niet volledig gevuld zijn, kan de actuele verdamping kleiner zijn dan de potentiële verdamping. Het Sacramento-concept bevat dus ook verdampingsreductie.

Figuur 6 toont een fysische interpretatie van de Sacramento-reservoirs. De afkortingen voor de maximum inhoud van de verschillende bodemvochtreservoirs spreken voor zich (*UZTWM=Upper Zone, Tension Water Maximum*; *LZFPFM=Lower Zone Free Primary Maximum* etc.)

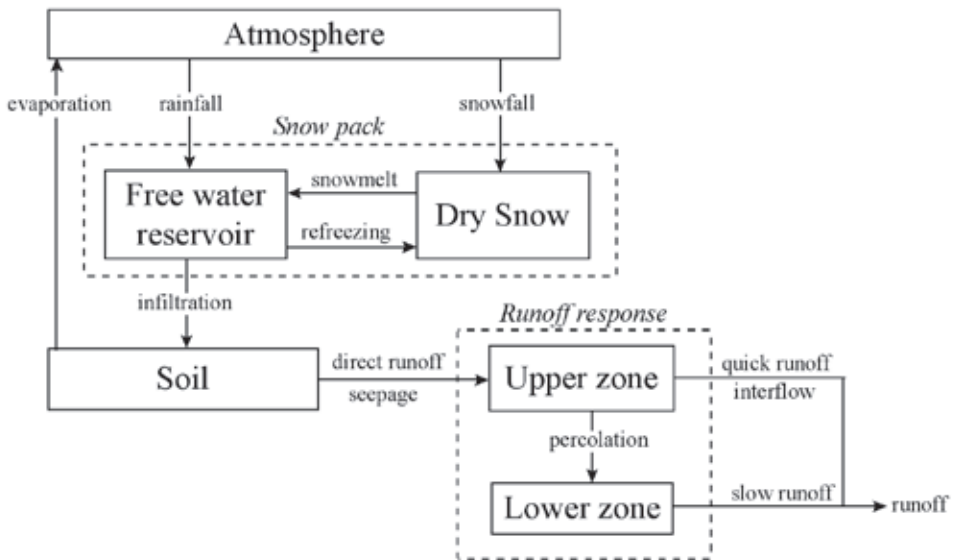


■ **Figuur 6:** Fysische interpretatie Sacramento reservoirs

Toepassingen van RR-Sacramento zijn in Nederland, maar toch vooral in het buitenland te vinden. In het Jakarta Flood Hazard Mapping project is door Deltares en anderen een gedetailleerde SOBEK-schematisatie opgezet van het watersysteem van Jakarta en omgeving. We rekenen daar met SOBEK-RR (RR-Sacramento en RR-SCS) en de 1DFLOW module.

HBV

Het HBV modelconcept verschilt met de andere concepten in de SOBEK-RR bibliotheek omdat sneeuw expliciet kan worden gemodelleerd. Dit vereist invoer van een tijdreeks met de temperatuur. Bij gebruik van de andere SOBEK-RR concepten is een preprocessing op de neerslagdata vereist indien sneeuwval, smelten en bevriezen het neerslag-afvoerproces substantieel beïnvloedt. **Figuur 7** illustreert het HBV concept.



■ Figuur 7: Concept RR-HBV knoop

Als de hoeveelheid water een drempelwaarde overschrijdt, kan water in de bodem infiltreren. Overtollig water (als het bodemvochtgehalte maximaal is) gaat door naar de zogenaamde *runoff response* routine. Een deel van het infiltratiewater gaat direct door naar de *runoff response* routine, volgens een machtsfunctie waarbij meer water doorgaat naarmate het bodemvocht reservoir meer gevuld is. Gewasverdamping vindt plaats uit het bodemvochtreservoir. Beneden een op te geven drempelwaarde reduceert HBV de gewasverdamping naar rato van het actuele bodemvochtgehalte en de drempelwaarde.

De runoff response routine bevat een *Upper Zone* en een *Lower Zone*. Aanvullingen vanuit het bodemvocht zorgen in principe voor aanvulling van de *Lower Zone*, tenzij de opgegeven maximum percolatie wordt overschreden. In dat geval vult HBV ook de *Upper Zone* aan. De *Upper Zone* in HBV bestaat uit twee lineaire reservoirs met hun eigen reservoircoëfficiënten voor de snelle afvoer. De *Lower Zone* in het HBV modelconcept bestaat uit één lineair reservoir dat

basisafvoer genereert. Voor het genereren van afvoer via lineaire reservoirs zijn HBV en Sacramento dus redelijk vergelijkbaar qua opzet, hoewel er verschillen zijn in de wijze waarop de reservoirs aanvullen.

Waterschap Roer en Overmaas past in hun modellen voor de Geul en Geleenbeek het HBV concept toe, net als Rijkswaterstaat in de hoogwatervoorspellingsmodellen voor de Rijn en Maas (FEWS-NL). De stroomgebieden in Duitsland en België zijn gemodelleerd met HBV om de laterale afvoeren voor een SOBEK-1DFLOW model te berekenen.

Vergelijking modelconcepten

De gebruiker kan een gebied schematiseren in een RR-Sacramento knoop, een RR-HBV knoop of een combinatie van RR-*paved* en RR-*unpaved* knopen. Een belangrijk conceptueel verschil tussen Sacramento en HBV enerzijds en de RR-*unpaved* knoop anderzijds is dat bij Sacramento en HBV de benedenstroomse waterstand het neerslag-afvoerproces niet beïnvloedt. De drainage uit een onverhard gebied in de RR-*unpaved* knoop is juist wel afhankelijk van de benedenstroomse waterstand. Bij de afvoer uit een RR-*unpaved* knoop is de aandrijvende kracht het peilverschil tussen de berekende grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand benedenstrooms. De afvoer uit een RR-*unpaved* knoop kan negatief zijn als de oppervlaktewaterstand hoger is dan grondwaterpeil. Deze infiltratie vanuit het oppervlaktewater is in Sacramento en HBV niet aanwezig.

Een ander verschil is dat bij de RR-*paved* knoop rekening wordt gehouden met berging in een rioelstelsel, terwijl dit bij Sacramento en HBV niet het geval is.

Andere neerslag-afvoerconcepten

SOBEK-RR bevat ook nog de in het buitenland veel gebruikte Amerikaanse SCS-methode. Deze methode bepaalt de afvoer op basis van stroomgebiedskarakteristieken. Deze zijn samengevat in het *curve number*, de helling en de gemiddelde lengte tot het uitstroompunt van het stroomgebied. De SCS-methode is in tegenstelling tot andere RR-concepten niet bruikbaar voor jaarrond modelleren, omdat de methode zich alleen richt op extreme gebeurtenissen en geen adequate beschrijving van de basisafvoer bevat.

In Hong Kong bouwt Deltares een SOBEK model voor een deel van de *Northern Territories* om het watersysteemgedrag bij extreme neerslag door te rekenen en maatregelen te analyseren. Hierbij worden SOBEK-RR en 1DFLOW gebruikt om perioden van extreme neerslag (bijvoorbeeld 380 mm in 8 uur, waarvan 135 mm in 1 uur) door te rekenen. We passen in SOBEK-RR de SCS methode toe, omdat Hong Kong deze methode als standaard voorschrijft.

Tenslotte willen we niet onvermeld laten dat al langere tijd ideeën leven om de RR-*unpaved* knopen onderling te koppelen, zodat grondwaterstroming van het ene onverhard gebied naar het andere onverhard gebied kan worden gesimuleerd. Wij verwachten deze functionaliteit in het voorjaar van 2010 te realiseren.

Koppelingen met andere modelcodes

Zoals gesteld bevat SOBEK-RR een bibliotheek aan neerslag-afvoerconcepten. Maar SOBEK-RR kan binnen de SOBEK-familie óók communiceren met een aantal andere modules zoals SOBEK-1DFLOW en SOBEK-RTC. Sinds enige tijd bestaat de koppeling met EM, de Emissiemodule (Deltares en STOWA, 2009). Dat is een instrument dat waterbeheerders helpt bij het uitvoeren van bronnenanalyses en berekeningen van emissies. EM koppelt de Emissie-Registratie en rekenmodellen. EM genereert een emissienetwerk op basis van een SOBEK-RR schematisatie met RR-paved en RR-unpaved knopen. EM rekent met de afvoeren van SOBEK-RR stofvrachten en stofconcentraties uit, die als randvoorwaarde bij een SOBEK-WQ waterkwaliteitsberekening gebruikt worden.

Voor koppeling met andere modellen is OpenMI sinds enige jaren de standaard. Als een simulatieprogramma OpenMI-compliant is, betekent dit dat het programma volgens een algemeen protocol simultaan data met andere modellen kan uitwisselen. Een OpenMI-koppeling betekent dan ook dat modellen afzonderlijk kunnen worden opgezet met behoud van specifieke functionaliteit. Voor meer informatie over OpenMI verwijzen wij naar Dirksen en Blind (2006), Gregersen e.a. (2007) en www.openmi.org.

SOBEK-RR is OpenMI-compliant en daardoor te gebruiken als model van het topsysteem in koppelingen met grondwatermodelcodes zoals MODFLOW en FLAIRS. Velstra e.a. (2006) beschrijft een eerste toepassing waarbij weliswaar nog geen sprake was van volledige OpenMI-compliant modellen, maar waarbij wel OpenMI concepten zijn gebruikt. Momenteel werkt Deltares aan de OpenMI koppeling tussen SOBEK-RR en Wanda. Wanda is een model voor simulatie van stroming door persleidingen en het gedrag van pompen. Via een koppeling wordt het mogelijk gedetailleerde simulaties te maken van de werking van een gemaal (denk aan pompkrommes, rendementskrommes, bepaling werkgebied) in relatie tot het waterbeheer in het bemalen gebied.

Conclusies

SOBEK-RR, oorspronkelijk ontwikkeld voor het simuleren van berging en afvoer in bemalen gebieden, heeft zich ontwikkeld tot een open systeem waarin een bibliotheek aan neerslag-afvoerconcepten beschikbaar is. Hierdoor wordt SOBEK-RR in Nederland en het buitenland voor vele stroomgebieden toegepast, die qua grootte sterk verschillen. De toepassingen zijn gekenschetst als ruimtelijk geaggregeerd en/of semi-gedistribueerd modelleren. Via de OpenMI-koppeling kan SOBEK-RR bijvoorbeeld gekoppeld met MODFLOW in gedistribueerde hydrologische modeltoepassingen worden ingezet.

Deltares streeft ernaar deze lijn van open modellering in de gehele SOBEK-familie door te zetten via de nieuwe Delft-shell, een GUI die momenteel gebouwd wordt. Eind 2009 is SOBEK-1DFLOW naar verwachting operationeel in deze Delft-shell. SOBEK-RR volgt snel daarna.

Referenties

- **Burnash, R.J.C., R.L. Ferral en R.A. Mc.Guire (1973)**
A generalized streamflow simulation system, Conceptual modelling for digital computers; Department of Water Resources, Sacramento.
- **Deltares en Stowa (2009)**
Emission Module manual.
- **Dirksen, P.W. en M.W. Blind (2006)**
Wat is OpenMI en wat kan het betekenen?; in: Stromingen, jrg 12, nr 2, pag 37-48.
- **Ernst, L.F. (1978)**
Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables I. A drainage formula based on a constant hydraulic head ratio; in: Journal of Hydrology 39, pag 1-30.
- **Gregersen, J.B., P.J.A. Gijsbers en S.J.P. Westen (2007)**
OpenMI: Open modelling interface; in: Journal of Hydroinformatics, Vol 9, Nr 3, pag 175-191.
- **Hamaker, P. (1984)**
Dekking van de waterbehoefte van glastuinbouwbedrijven in het Zuidhollands Glasdistrict door gebruik van drinkwater of gecombineerd gebruik van regenwater en drinkwater; Nota 1592, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- **Hendriks, T. en W. Schuurmans (1997)**
Berekening van bergings- en bemalingsbehoefte van polders: Mededeling van de Vakgroep Waterbeheer, Milieu- en Gezondheidstechniek, Civiele Techniek, TU Delft.
- **Hooghoudt, S.B., (1940)**
Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, deel 7; Versl. Landbouwk. Onderz. 46 (14) B, pag 515-707.
- **Kraijenhoff van de Leur, D.A. (1958)**
A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient; in: De Ingenieur 70 (19), pag 87-94.
- **Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, en S. Bergström, (1997)**
Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model; in: Journal of Hydrology 201, pag 272-288.
- **Mackay, C. (2002)**
Extension of the SOBEK Rainfall-Runoff module; M.Sc. Thesis HH436, IHE and WL | Delft Hydraulics, Delft.
- **Nationale Werkgroep Riolering en Waterkwaliteit (1989)**
Neerslag, inloop, overstort modelbeschrijving en analyse; NWRW publicatie 4.3, Staatsuitgeverij, Den Haag, juni 1989.
- **Prinsen, G.F. (2007)**
RR Subcatchment node; WL | Delft Hydraulics rapport Q4367.05, WL | Delft Hydraulics, Delft.
- **Salverda A.P., J. Noort en L. Wentholt (1996)**
Ontwikkeling neerslagafvoermodule RAM; in: H2O nr 8, pag 129-132.
- **Schuurmans, W., Ph. Hamaker, P. Kabat, G.F. Prinsen en C.J. Spengers (1995)**
Beschrijving en toepassing Delft-3B, Berging, Bemaling en Beheer; Waterloopkundig Laboratorium | WL en SC-DLO, rapport T1512/T1419, Delft.
- **SCS (1973)**
A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds; Technical Paper 149, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.

- **Stichting Rioned (1995)**
Leidraad riolering module C2100,
Rioleringsberekeningen, hydraulisch
functioneren.
- **STOWA (1997)**
Dynamische sturing van watersystemen,
Ontwerp en beheer van regionale
watersystemen.
- **Velstra J., W.J. Zaadnoordijk, S. Hummel
en R. Ververs (2006)**
Geïntegreerde koppeling SOBEK
TRIWACO volgens OpenMI; in: Stromingen,
jrg 12, nr 3, pag 19-30.
- **Walsum, P.E.V. e.a. (2006)**
SIMGRO 6.0.3 Theory and model
implementation.
- **Warmerdam P., J. Kole en J. Chormanski
(1996)**
Modelling rainfall-runoff processes in the
Hupselse Beek research basin; Proceedings
Strasbourg Conference on Ecohydrological
processes in small basins, Technical
Documents in Hydrology nr 14 UNESCO
Paris.
- **www.sobek.nl (www.delftsoftware.com)**
- **Wesseling, J.G. (1991)**
CAPSEV, Steady state moisture flow
theory, User Manual; Report 37 DLO
Winand Staring Centre, Wageningen, The
Netherlands.
- **Zeeuw, J.W. de, en F. Hellinga (1958)**
Neerslag en afvoer; in: Landbouwkundig
Tijdschrift, nr 70, pag 406-422.