

De toegevoegde waarde van hoge-resolutie neerslagradar voor het waterbeheer

Case-study binnen het "Daring Applications & Innovations in Sensor Systems" (DAISY) project

April 2015

Auteur

W. Terink

P. Droogers

G.A.P.H. van den Eertwegh

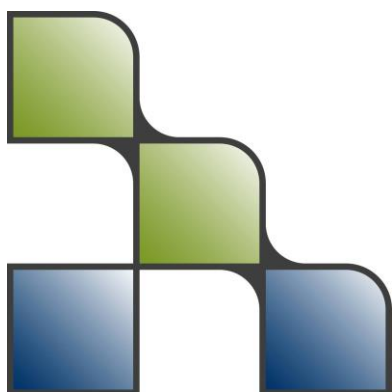
Opdrachtgevers

Provincie Gelderland

Provincie Overijssel

Regio Twente

Report FutureWater: [135]



FutureWater

Costerweg 1V

6702 AA Wageningen

The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Voorwoord

In opdracht van de provincies Gelderland en Overijssel en de Regio Twente is in samenwerking met Thales Nederland en Wageningen Universiteit het project “Daring Applications & Innovations in Sensor Systems” (DAISY) uitgevoerd. De rol van FutureWater binnen dit project was om de toepasbaarheid en potentie van hoge resolutie neerslagradar binnen de watersector te onderzoeken. FutureWater wil in het bijzonder Remko Uijlenhoet, Maximiliano Sassi, en Claudia Brauer van de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer en Hidde Leijnse van het KNMI bedanken voor het aanleveren en bewerken van de neerslag(radar) data. Tot slot willen we de provincies Gelderland en Overijssel en de Regio Twente bedanken voor het mogelijk maken van dit project.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en aanleiding	7
1.2	DAISY en Thales	7
1.3	Doel	8
2	Case-study: Hupselse Beek stroomgebied	9
3	Methodiek	11
4	Spatial Processes in HYdrology (SPHY)	12
4.1	Achtergrond	12
4.2	Model concepten	12
5	Data	14
5.1	KNMI gegevens	14
	5.1.1 Neerslag	14
	5.1.2 Referentie gewasverdamping	15
5.2	Synthetische neerslagradarproducten	17
5.3	Afvoer	19
5.4	Bodem	20
5.5	Landgebruik	24
5.6	Waterlopen	25
6	Model kalibratie	26
6.1	Kalibratie op dag-basis	26
6.2	Kalibratie op uur-basis	31
7	Resultaten	36
7.1	Verschillen in neerslag	36
	7.1.1 Gebiedsgemiddelde neerslag	36
	7.1.2 Cumulatieve gebiedsneerslag	36
	7.1.3 Coefficient of Variation (CV)	40
	7.1.4 Periode 9-14 december 1993	42
	7.1.5 11 december 1993	43
7.2	Effecten op de afvoer	44
	7.2.1 Cumulatieve afvoer	44
	7.2.2 Tijdreeksen afvoer	45
8	Conclusies en aanbevelingen	49
8.1	Conclusies	49
8.2	Aanbevelingen	50
9	Referenties	52



Tabellen

Tabel 1: Combinatie van verschillende ruimtelijke en temporele resoluties resulteert in 8 neerslag producten waarmee het model geforceerd wordt.....	19
Tabel 2: Bodemfysische eigenschappen voor het wortelzone-reservoir in het SPHY-model.....	22
Tabel 3: Bodemfysische eigenschappen voor het “subzone”-reservoir in het SPHY-model.....	22
Tabel 4: Gekalibreerde modelparameters voor het SPHY-model op dag-basis.....	26
Tabel 5: Model efficiëntie voor het SPHY-model op dag-basis voor de periode 2001-2009.....	27
Tabel 6: Gemiddelde jaarlijkse waterbalans voor het SPHY-model op dag-basis voor de periode 2001-2009.....	28
Tabel 7: Model efficiëntie voor het SPHY-model op dag-basis voor het jaar 2001.....	30
Tabel 8: Waterbalans voor het SPHY-model op dag-basis voor het jaar 2001.....	30
Tabel 9: Gekalibreerde model parameters voor het SPHY-model op uur-basis.....	31
Tabel 10: Model efficiëntie voor het SPHY-model op uur-basis voor de periode 2001-2009.....	32
Tabel 11: Gemiddelde jaarlijkse waterbalans voor het SPHY-model op uur-basis voor de periode 2001-2009.....	32
Tabel 12: Model efficiëntie voor het SPHY-model op uur-basis voor het jaar 2001.....	34
Tabel 13: Waterbalans voor het SPHY-model op uur-basis voor het jaar 2001.....	34

Figuren

Figuur 1: Het Hupselse Beek stroomgebied met primaire en secundaire waterlopen.....	9
Figuur 2: SPHY modelconcepten (Terink et al., 2014; 2015).....	13
Figuur 3: Overzicht van het Hupselse Beek stroomgebied met daarin het KNMI meetstation en de afvoermetstuw.....	14
Figuur 4: Gemeten dagelijkse neerslag door KNMI station Hupsel gedurende de periode 2000-2009.....	15
Figuur 5: Gemeten uurlijkse neerslag door KNMI station Hupsel gedurende de periode 2000-2009.....	15
Figuur 6: Berekende dagelijkse referentiegewas-verdamping (ET _{ref}) volgens de Makkink-methode voor station Hupsel voor de periode 2000-2009.....	16
Figuur 7: Berekende uurlijkse referentiegewas-verdamping (ET _{ref}) volgens de Makkink-methode voor station Hupsel voor de periode 2000-2009.....	16
Figuur 8: Berekende dagelijkse referentie-gewasverdamping (ET _{ref}) volgens de Makkink-methode voor station Rotterdam voor de periode mei 1993 – april 1994.....	17
Figuur 9: Voorbeeld van afgeleide uurlijkse referentie-gewasverdamping (ET _{ref}) op basis van de dagelijkse ET _{ref} en een sinusfunctie.....	17
Figuur 10: Bereik en dekking van de SOLIDAR radar in Delft (Van de Beek et al., 2010).....	18
Figuur 11: Gemeten dagelijkse afvoer bij de meetstuw in de Hupselse Beek gedurende de periode 2000-2009. Y-as in [mm/d].....	19
Figuur 12: Gemeten uurlijkse afvoer bij de meetstuw in de Hupselse Beek gedurende de periode 2000-2009. Y-as in [mm/uur].....	20
Figuur 13: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).....	21
Figuur 14: Bodemkaart voor het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.....	22
Figuur 15: Verzadigde doorlatendheid (K-waarde) [mm/d] van het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.....	23
Figuur 16: Kleidiepte [m-mv] in het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.....	23



Figuur 17: Landgebruik in het Hupselse Beek stroomgebied op een ruimtelijke resolutie van 250 m.....	25
Figuur 18: Stromingsrichtingskaart voor het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m. Het zwarte blokje is het uitstroompunt van het stroomgebied. Deze kaart is gemaakt op basis van de hoogtekartaart van het gebied (Figuur 1).....	25
Figuur 19: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op dag-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied voor de periode 2001-2009.....	28
Figuur 20: Jaarlijkse neerslag, gesimuleerde verdamping (ET_a), gesimuleerde afvoer (Q_{sim}), en gemeten afvoer (Q_{obs}) voor de Hupselse Beek voor de periode 2001-2009. De gesimuleerde verdamping en gesimuleerde afvoer zijn van het SPHY-model op dag-basis.....	29
Figuur 21: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op dag-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied gedurende 2001.	30
Figuur 22: Potentiële (ET_p) en actuele gesimuleerde verdamping (ET_a) per dag voor Hupsel voor het jaar 2001.	31
Figuur 23: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op uur-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied voor de periode 2001-2009.....	32
Figuur 24: Jaarlijkse neerslag, gesimuleerde verdamping (ET_a), gesimuleerde afvoer (Q_{sim}), en gemeten afvoer (Q_{obs}) voor de Hupselse Beek voor de periode 2001-2009. De gesimuleerde verdamping en gesimuleerde afvoer zijn van het SPHYmodel op uur-basis.....	33
Figuur 25: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op uur-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied gedurende 2001.....	34
Figuur 26: Potentiële (ET_p) en actuele gesimuleerde verdamping (ET_a) per uur voor Hupsel voor het jaar 2001.....	35
Figuur 27: Gebiedsgemiddelde dagneerslag (boven) en urneerslag (onder) voor de periode mei 1993 t/m april 1994. Gebiedsgemiddelden zijn bepaald op basis van het 250 m radar product op dag-basis (R2, boven) en uur-basis (R1, onder).....	36
Figuur 28: Boven: cumulatieve gebiedsneerslag op dag-basis gebaseerd op de neerslagproducten R2, R8, R6, en R4. Onder: per neerslagproduct de geselecteerde pixel met de maximale- en minimale cumulatieve dagneerslag. Voor R4 (één station) is geen maximale- en minimale cumulatieve dag neerslag, en daarom is één lijn zichtbaar voor de cumulatieve dagneerslag van dit station.	37
Figuur 29: Ruimtelijke variatie van de cumulatieve neerslag per pixel op basis van het 250 m dagelijkse radarproduct.	39
Figuur 30: Boven: dagelijkse neerslag van pixel met de hoogste cumulatieve jaar som. Onder: Scatter-plot van de dagelijkse neerslag van de pixel met de hoogste vs. de pixel met een representatieve neerslag.....	39
Figuur 31: Boven: scatter-plots voor de Coefficient of Variation (CV) van de 250 m dagneerslag (R2) versus de 500 m dagneerslag (R8), en de geïnterpoleerde neerslag op basis van twee stations (R6). Onder: idem, maar voor de uurlijkse neerslagproducten.....	41
Figuur 32: Verschil in Coefficient of Variation (CV) van de verschillende neerslagproducten t.o.v. het 250 m radar product. De plots links laten de verschillen zien tussen de dagelijkse neerslagproducten, en de plots rechts tussen de uurlijkse neerslagproducten.	42
Figuur 33: Cumulatieve gebiedsgemiddelde neerslag voor de Hupselse Beek gedurende de periode 9 december 1993 t/m 14 december 1993. De dagelijkse neerslagwaarden van de neerslagproducten R2, R8, R6, en R4 zijn per dag gedeeld door 24 om ze te kunnen vergelijken met de uurlijkse neerslagproducten.	43
Figuur 34: Boxplots van de uurlijkse neerslagproducten R1, R7 en R5 voor de Hupselse Beek gedurende 11 december. De zwarte lijn is de neerslag gemeten door het station (R3).....	44
Figuur 35: Cumulatieve afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende radarproducten.	45



Figuur 36: Links: uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende uurlijkse radarproducten. Rechts: scatter-plots van afvoeren gegenereerd door de verschillende uurlijkse radarproducten.	46
Figuur 37: Links: uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende dagelijkse radarproducten. Rechts: scatter-plots van afvoeren gegenereerd door de verschillende dagelijkse radarproducten.	47
Figuur 38: Uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gedurende een aantal dagen in oktober 1993, gegenereerd door de verschillende radarproducten.	47



1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

Elektronische sensoren hebben een sterk toenemende invloed op de samenleving. Dergelijke sensoren zijn er in allerlei soorten en maten, en worden ingezet in een breed scala aan toepassingen op het gebied van veiligheid (bijvoorbeeld kust- en havenbewaking, monitoren van waterpeilen/afvoeren t.b.v. overstromingsrisico's, en de beveiliging van kritische infrastructuur en grootschalige evenementen), het voorspellen en monitoren van (extreme) neerslag gebeurtenissen, het meten van veranderingen van waterstromen, het meten van de gezondheid van mensen, en voor navigatie doeleinden. Het gebruik en de verdere ontwikkeling van dergelijke sensoren is van cruciaal belang voor de Nederlandse samenleving.

Op het gebied van waterbeheer is het hebben van de juiste kwantitatieve hydrologische informatie op elk willekeurig tijdstip en locatie van cruciaal belang om onze veiligheid te garanderen. Een voorbeeld hiervan is het real-time monitoren van rivierwaterstanden, zodat in geval van hoogwater mensen tijdig geëvacueerd kunnen worden. Het tijdig en correct voorspellen van de te verwachten neerslag voor de aankomende paar dagen kan agrariërs helpen bij het optimaliseren van hun irrigatieplanning, en kan waterschappers aanzetten tot het inlaten van water in geval van een te verwachten droogte. Binnen Nederland wordt veelvuldig gebruik gemaakt van het netwerk van KNMI neerslagstations. Omdat dit puntmetingen zijn bieden deze geen vlakdekkend neerslagbeeld waardoor mogelijk een plaatselijk lokale bui over het hoofd gezien wordt. Radarsensoren bieden wel een vlakdekkend neerslagbeeld, en bieden tevens de mogelijkheid om een neerslagbui een paar uur van tevoren te traceren.

Een sterk in opkomst zijnde categorie van sensoren zijn de zogenaamde "Active Electronically Scanned Arrays" (AESA). Momenteel worden de AESA sensoren alleen nog gebruikt voor high-end defensietoepassingen. AESA sensoren zijn opgebouwd uit duizenden zend- en ontvangstmodules waarmee snel bewegende objecten tot op honderden kilometers afstand gedetecteerd en onderschept kunnen worden. Wanneer AESA sensoren compacter en lichter kunnen worden gebouwd, komen nieuwe applicatiegebieden binnen handbereik. Een systeem met AESA sensoren zou bijvoorbeeld op het gebied voor het waterbeheer en de agro-food sector veel potentie hebben om snel en lokaal specifiek te kunnen reageren op hevige neerslag.

1.2 DAISY en Thales

Binnen het project "Daring Applications & Innovations in Sensor Systems" (DAISY) zijn, onder leiding van Thales Nederland, bedrijven en kennisinstellingen bij elkaar gebracht in een consortium om de ontwikkeling en industrialisatie van deze unieke sensortechnologie te verwezenlijken. Thales Nederland is wereldwijd leverancier voor AESA sensoren. Een van de doelstellingen binnen het DAISY project is om de toepasbaarheid en potentie van AESA sensoren op de applicatiegebieden agro-food en life-sciences aan te tonen.



1.3 Doel

De rol van FutureWater binnen het DAISY project is om de toepasbaarheid en potentie van AESA sensoren binnen de watersector (agro-food) te onderzoeken. De specifieke onderzoeksvraag die hierbij beantwoord moet worden is:

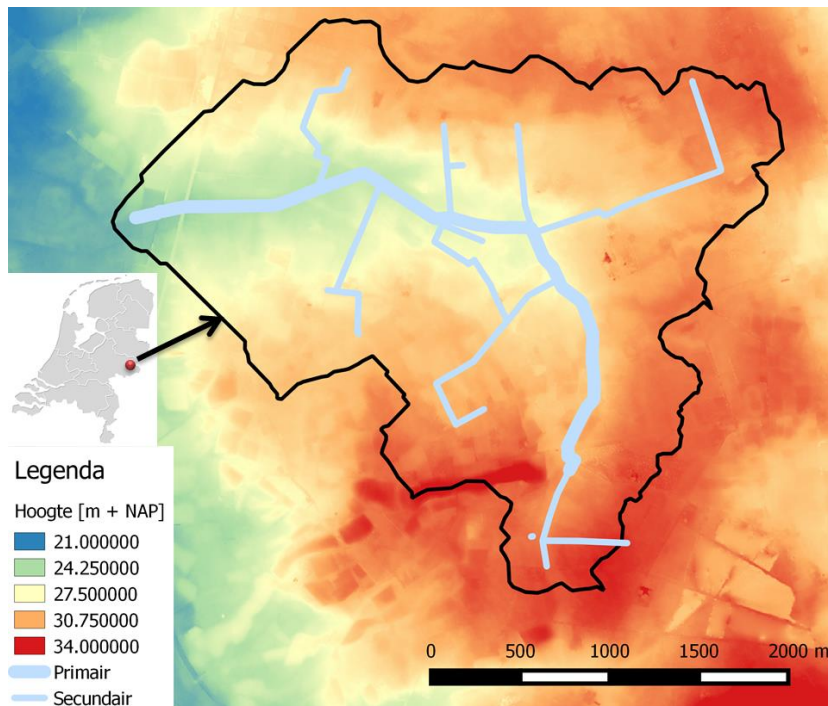
“Wat is de toegevoegde waarde van hoge resolutie neerslagradar voor het waterbeheer?”

Aangezien de ontwikkeling van de AESA sensoren in een compacter en lichter formaat plaatsvond tijdens de looptijd van het DAISY project, kon het werkelijke AESA eindproduct niet getest worden voor toepassingen binnen het waterbeheer. Om de onderzoeksvraag toch te kunnen beantwoorden is daarom gebruik gemaakt van een bestaand radarproduct. Dit radarproduct heeft een vergelijkbare (hoge) resolutie als het te ontwikkelen AESA radar product, maar is alleen minder compact. Dit laatste heeft echter geen invloed op de te beantwoorden onderzoeksvraag. De onderzoeksvraag zal beantwoord worden door middel van een “case-study” voor een stroomgebied in Nederland.



2 Case-study: Hupselse Beek stroomgebied

Het Hupselse Beek stroomgebied (Figuur 1) met een oppervlakte van 6,5 km² is gelegen in het oosten van Nederland, en is hydrologisch gezien het meest bemeten stroomgebied van Nederland. Het gebied bestaat voor circa 59% uit grasland, 33% uit akkerbouw, 3% uit bos, en is voor 5% bebouwd (Brauer et al., 2011). De hoogte binnen het stroomgebied varieert van 22 tot 35 m +NAP (Van der Velde et al., 2009). De Hupselse Beek heeft zelf een lengte van 4 km, en beschikt over een zevental zijtakken.



Figuur 1: Het Hupselse Beek stroomgebied met primaire en secundaire waterlopen.

Het Hupselse Beek stroomgebied is gekozen als “case-study” stroomgebied omdat het hydrologisch gezien een erg interessant gebied is: het is namelijk aan de onderzijde voorzien van een bijna ondoorlatende kleilaag van meer dan 20 meter dik. Hierdoor zijn de randen van het stroomgebied duidelijker in vergelijking met andere stroomgebieden, en resulteert dit dus in een betere en duidelijkere afbakening van de in- en uitgaande fluxen. Bovenop de ondoorlatende kleilaag bevindt zich een pakket van lemig zand met hier en daar wat klei en gravel. De samenstelling van de bodem resulteert hierdoor in één watervoerende laag, die afvoert op de Hupselse Beek.

Sinds 1960 zijn er veel duikers en drains aangelegd. De drains en het dichte netwerk van slootjes zorgt voor een snelle afvoer wanneer de bodem (bijna) verzadigd is (Van der Velde et al., 2009). Een studie van Brauer et al. (2011) heeft beschreven hoe een klein stroomgebied zoals dat van de Hupselse Beek kan reageren op een extreme bui. Op 26 augustus 2010 viel er namelijk 160 mm neerslag binnen 24 uur in het Hupselse Beek stroomgebied. Een dergelijke bui is zeer zeldzaam, en komt overeen met een bui die gemiddeld minder dan eens per 1000 jaar voor kan komen op die plaats. Het hydrologische gevolg van deze bui was dat binnen korte tijd de afvoer toenam van 0,0044 m³/s tot bijna 5,0 m³/s (Brauer et al., 2011), en dat bepaalde delen van het stroomgebied onder water stonden. Deze extreme neerslag gebeurtenis plaatst het huidige onderzoek in het juiste perspectief; het hebben van een hoge resolutie radar product

kan in dergelijke situaties mogelijk resulteren in het tijdig en adequaat handelen om schade te kunnen voorkomen.



3 Methodiek

Om de toegevoegde waarde van hoge-resolutie neerslagradar voor het waterbeheer te onderzoeken wordt in deze studie gebruik gemaakt van een hydrologisch neerslag-afvoer model. Het hydrologische neerslag-afvoer model dat in deze studie toegepast wordt is het Spatial Processes in HYdrology (SPHY) model (Terink et al., 2015; Terink et al., 2014). Een beknopte beschrijving van dit model is weergegeven in Hoofdstuk 4.

Het SPHY-model is opgezet voor het Hupselse Beek stroomgebied, gekalibreerd op een historische afvoerreeks, en vervolgens geforceerd met neerslagproducten van verschillende ruimtelijke en temporele resoluties. Zoals in paragraaf 1.3 is beschreven, was het AESA radarproduct in ontwikkeling gedurende de looptijd van deze studie, en daardoor nog niet beschikbaar voor gebruik. Daarom is in deze studie gebruik gemaakt van een “synthetisch” radarproduct met vergelijkbare specificaties (qua resolutie) als het te ontwikkelen radarproduct. Uit het “synthetische” radarproduct zijn in totaal 8 radarproducten afgeleid (die verschillen in ruimtelijke en temporele resolutie), welke in detail zijn beschreven in paragraaf 5.2 en weergegeven in Tabel 1.

Omdat het een “synthetisch” radarproduct is dat gemeten is in het westen van Nederland, en deze studie zich focust op het Hupselse Beek stroomgebied, is aangenomen dat de neerslag van dit radarproduct op het Hupselse Beek stroomgebied is gevallen. Om tot het gewenste eindresultaat te komen zijn samengevat de volgende stappen achtereenvolgens genomen:

1. Opzetten van 250 m resolutie SPHY-model dat rekent op dag-basis.
2. Opzetten van 250 m resolutie SPHY-model dat rekent op uur-basis.
3. Kalibratie van bovengenoemde 2 modellen.
4. Foreceren van de modellen met de 8 neerslagproducten zoals beschreven in paragraaf 5.2.
5. Analyseren van de effecten van het gebruik van de verschillende radarproducten op de afvoer benedenstrooms.



4 Spatial Processes in HYdrology (SPHY)

4.1 Achtergrond

Gedurende de afgelopen jaren heeft FutureWater het Spatial Processes in HYdrology (SPHY) model (Terink et al., 2015, Terink et al., 2014) ontwikkeld en toegepast in verschillende (onderzoeks)projecten (Lutz et al., 2014, Lutz et al., 2013, Lutz et al., 2012, Terink et al., 2012). De meest recente versie van het SPHY-model is v2.0, die ook is toegepast in dit project. SPHY is ontwikkeld met als doel om hydrologische (afvoer)processen te simuleren in studies waarin i) een verschil is in ruimtelijke resolutie, ii) gebieden zijn die orografisch van elkaar verschillen, iii) gebieden zijn met verschillende landgebruikstypen, en iv) klimaatverandering een rol speelt.

SPHY is ontwikkeld door gebruik te maken van de beste concepten van bestaande en gevalideerde modellen: HydroS (Droogers en Immerzeel, 2010), SWAT (Neitsch et al., 2009), PCRGLOB-WB (Sperna Weiland et al., 2012), SWAP (Van Dam et al., 1997), en HimSim (Immerzeel et al., 2011). De belangrijkste processen die in SPHY geïntegreerd zijn, zijn neerslag-afvoer processen, glacio-hydrologie, verdamping, de dynamische simulatie van de vegetatiegroei, het bufferende effect van meren, en bodemvocht processen. SPHY is ontwikkeld in Python¹ gebruik makend van het “PCRaster dynamic modelling framework” (Karszenberg et al., 2001, Karszenberg et al., 2010).

4.2 Model concepten

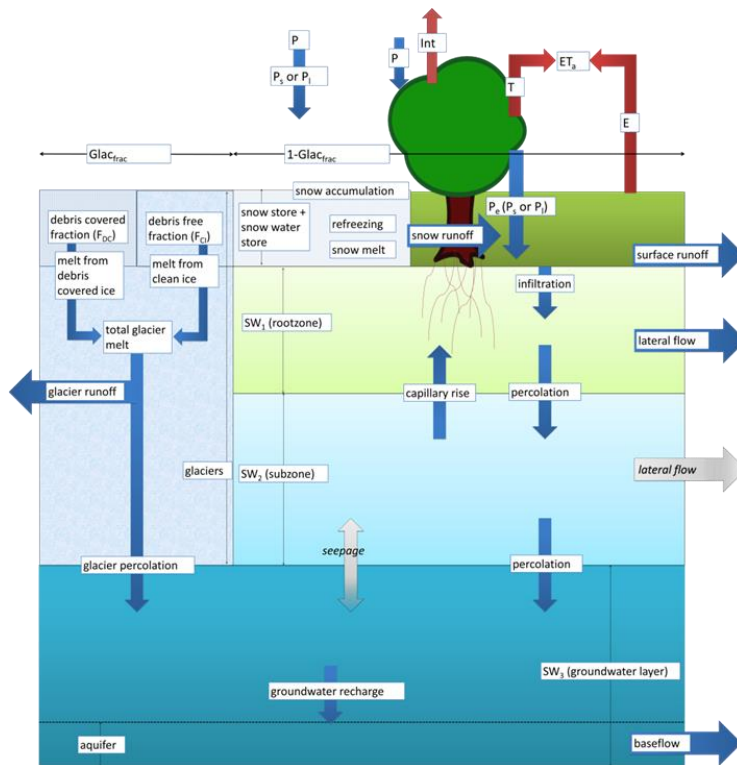
SPHY is een ruimtelijk gedistribueerd conceptueel hydrologisch model waarbij de individuele celwaarden het celgemiddelde vertegenwoordigen. Als er zich gletsjers in het gebied bevinden, dan houdt SPHY rekening met sub-grid variabiliteit: een cel kan volledig gletsjer-vrij zijn, voor een deel uit gletsjers bestaan, of volledig bedekt zijn met gletsjers. Het niet-gletsjer deel kan bedekt zijn met sneeuw, of is vrij van sneeuw. Het gedeelte dat is vrij van sneeuw kan bestaan uit vegetatie, oppervlaktewater of kale grond. De dynamische vegetatiemodule houdt rekening met een tijdsafhankelijke vegetatiebegroeiing. Dit heeft een gunstig effect op processen zoals interceptie, effectieve neerslag, en verdampingsprocessen. Een overzicht van de SPHY modelconcepten is schematisch weergegeven in Figuur 2.

Elke SPHY-cel bestaat uit twee bovenste bodemreservoirs en een derde grondwaterreservoir. Voor elke cel simuleert SPHY neerslag in de vorm van regen of sneeuw, afhankelijk van de temperatuur. Een deel van deze neerslag kan via interceptie geheel of gedeeltelijk verdampen. Aan de oppervlakte kan sneeuw accumuleren. Elke tijdstap wordt deze sneeuwberging ge-update met sneeuwaccumulatie en/of sneeuwsmelt. Een deel van de effectieve neerslag verlaat de cel als “surface runoff” en het resterende deel infiltreert in het eerste bodemreservoir. Een deel van het bodemvocht in dit reservoir zal verdampen, terwijl een ander deel het reservoir verlaat via “lateral flow” en/of percoleert naar het tweede reservoir. Gletsjers kunnen bijdragen aan de rivierafvoer via een snelle (“glacier runoff”) en een langzame component (“glacier percolation”). De “glacier percolation” bereikt samen met de “percolation” van het tweede naar het derde grondwaterreservoir middels “groundwater recharge” het grondwaterreservoir. Uiteindelijk verlaat het water uit het derde grondwaterreservoir de cel via “basisafvoer”. De totale afvoer uit één cel bestaat dus uit de som van “surface runoff”, “lateral flow”, “snow runoff”,

¹ <https://www.python.org/>



“glacier runoff” en “basisafvoer”. Via het gedefinieerde rivienetwerk wordt het water uit elke cel vervolgens afgevoerd naar zijn benedenstroomse cel. De totale afvoer bij het uitstroompunt is dus de som van de afvoer van alle bovenliggende cellen plus de afvoer uit zijn eigen cel. Middels een recessie-coëfficiënt kan ervoor gezorgd worden dat de afvoer vertraagd afgevoerd wordt.



Figuur 2: SPHY modelconcepten (Terink et al., 2014; 2015).

De opzet van SPHY is modulair, wat betekent dat sommige irrelevante processen uitgeschakeld kunnen worden. Voor deze studie zijn de gletsjer- en sneeuwmodules uitgezet omdat deze minder relevant zijn voor het Hupselse Beek stroomgebied.

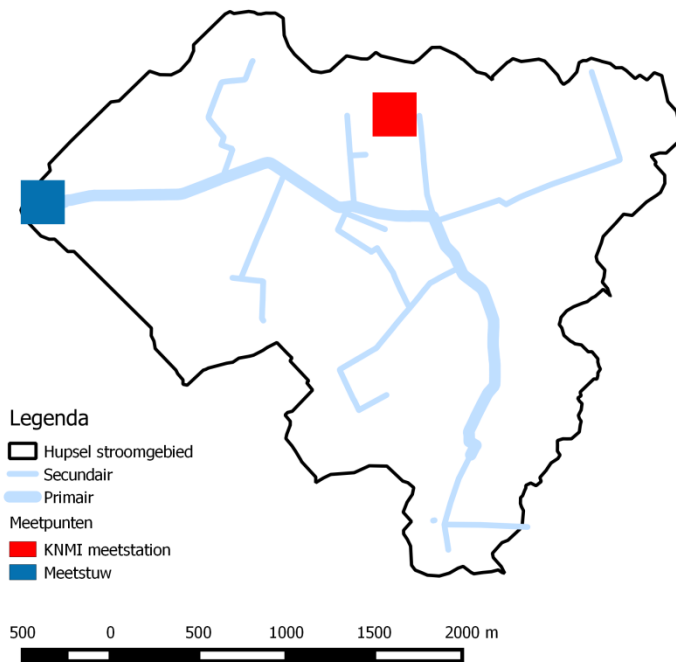
Een gedetailleerde beschrijving van het SPHY-model is te vinden in Terink et al. (2015) en Terink et al. (2014).



5.1 KNMI gegevens

5.1.1 Neerslag

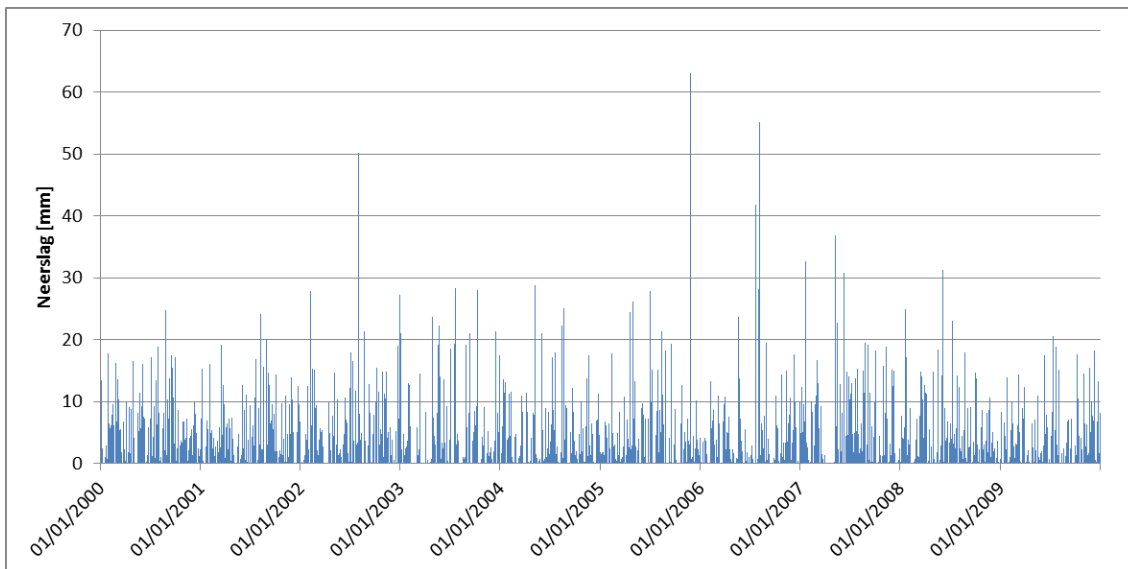
Voor de kalibratie van het SPHY-model is gebruik gemaakt van de neerslagdata afkomstig van KNMI meetstation Hupsel (ID 283). Dit station bevat een langjarige reeks aan metingen op zowel uur- als dagbasis. Het station ligt in het Hupselse Beek stroomgebied (Figuur 3), en wordt daarom representatief verondersteld voor het hele stroomgebied.



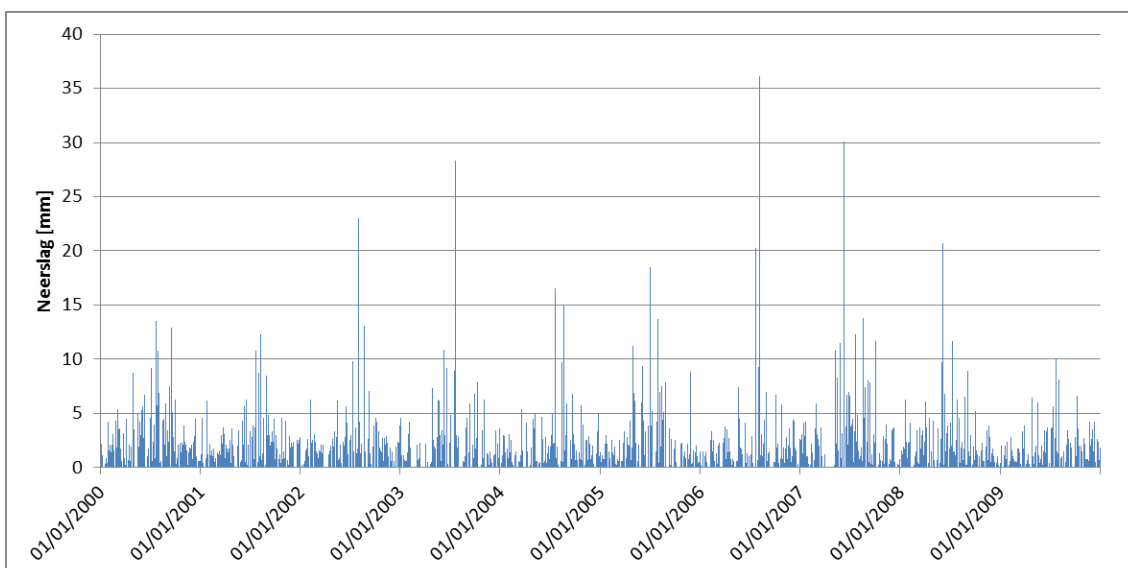
Figuur 3: Overzicht van het Hupselse Beek stroomgebied met daarin het KNMI meetstation en de afvoermeetstuw.

Het SPHY-model is gekalibreerd op de afvoer van de periode 2001-2009, waarbij het jaar 2000 gebruikt is om het model te initialiseren. De dagelijkse neerslag voor deze periode is weergegeven in Figuur 4 en de uurlijkse neerslag is weergegeven in Figuur 5. De gemiddelde jaarlijkse neerslag voor deze periode is 800 mm. De maximale dagelijkse neerslag tijdens deze periode bedroeg 63 mm en de maximale uurlijkse neerslag bedroeg 36 mm.





Figuur 4: Gemeten dagelijkse neerslag door KNMI station Hupsel gedurende de periode 2000-2009.



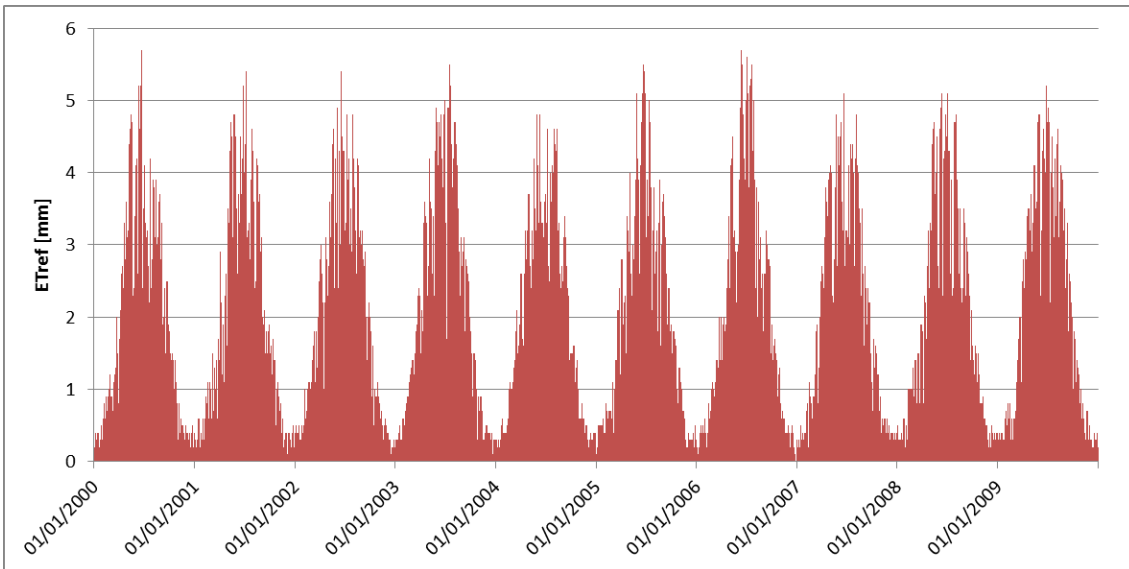
Figuur 5: Gemeten uurlijkse neerslag door KNMI station Hupsel gedurende de periode 2000-2009.

5.1.2 Referentie gewasverdamping

5.1.2.1 Kalibratieperiode

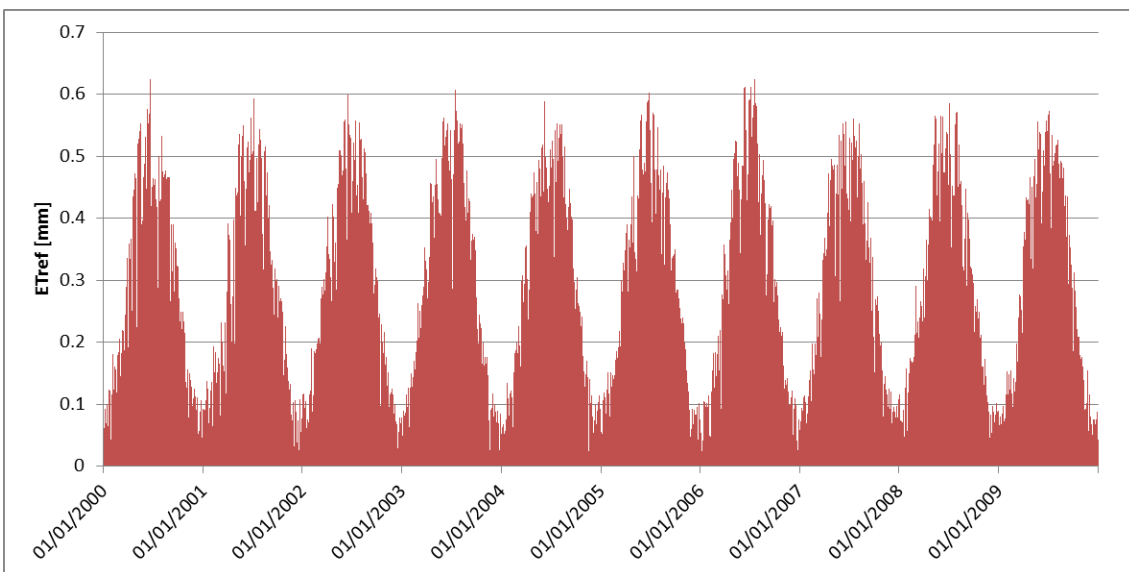
Naast de neerslag wordt voor station Hupsel ook de referentiegewas-verdamping berekend volgens de Makkink-methode (Makkink, 1957). De dagelijkse referentiegewas-verdamping (ETref) voor station Hupsel voor de periode 2000-2009 is weergegeven in Figuur 6. Hierin is duidelijk de variatie van de verdamping met de seizoenen te zien. De dagelijkse ETref varieert van bijna 0 mm gedurende de wintermaanden tot bijna 6 mm gedurende de zomermaanden. De gemiddelde jaarlijkse ETref bedraagt 587 mm.





Figuur 6: Berekende dagelijkse referentiegewas-verdamping (ETref) volgens de Makkink-methode voor station Hupsel voor de periode 2000-2009.

De uurlijkse ETref voor Hupsel is weergegeven in Figuur 7. De uurlijkse ETref varieert tot bijna 0 mm in de wintermaanden tot ca. 0,6 mm gedurende de zomermaanden.

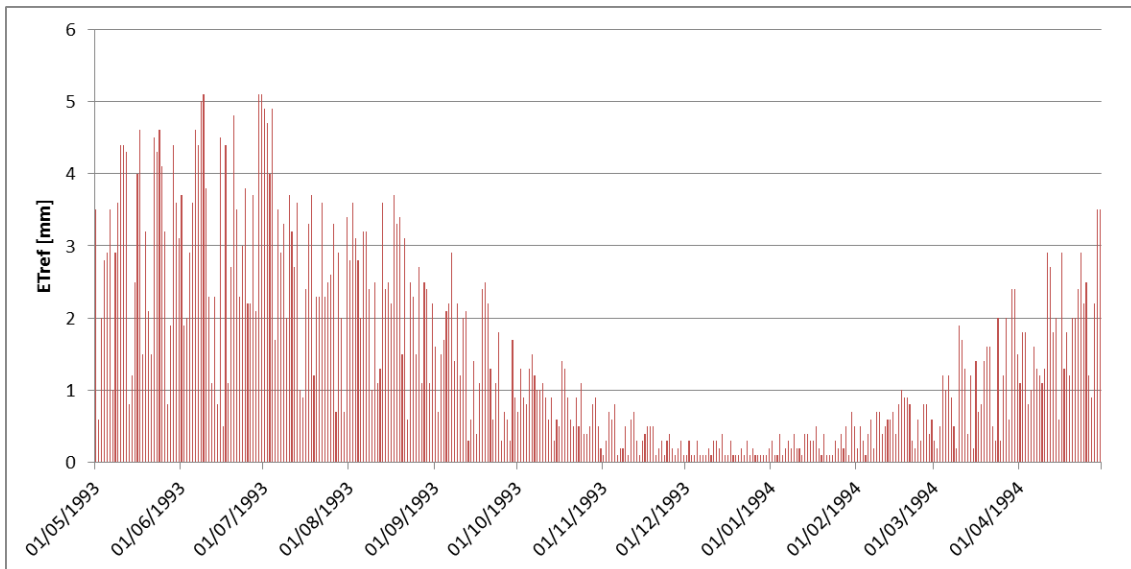


Figuur 7: Berekende uurlijkse referentiegewas-verdamping (ETref) volgens de Makkink-methode voor station Hupsel voor de periode 2000-2009.

5.1.2.2 Periode mei 1993 – april 1994

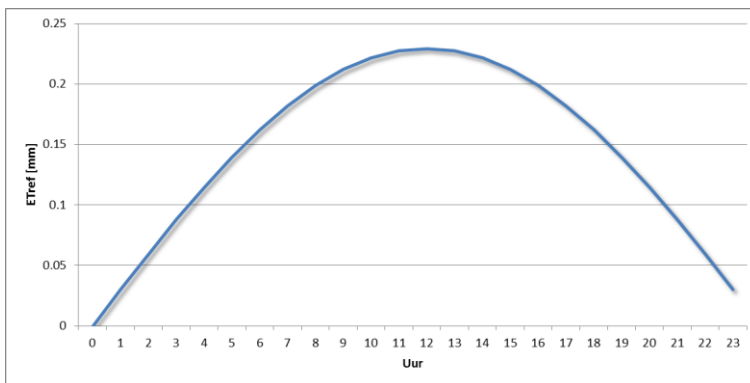
De neerslagradar data is beschikbaar voor de periode van 1 mei 1993 t/m 30 april 1994, en is afkomstig uit een andere regio, namelijk uit de omgeving van Delft (zie paragraaf 5.2). Er is daarom voor een bijpassende ETref gekozen door gebruik te maken van KNMI station Rotterdam (ID 344). De ETref voor dit station wordt evenals voor station Hupsel berekend m.b.v. de Makkink-methode. De ETref voor dit station is weergegeven in Figuur 8 voor de periode mei 1993 t/m april 1994. De ETref voor dit station varieert van bijna 0 mm in de wintermaanden tot ca. 5 mm in de zomermaanden.





Figuur 8: Berekende dagelijkse referentie-gewasverdamping (ETref) volgens de Makkink-methode voor station Rotterdam voor de periode mei 1993 – april 1994.

Omdat het SPHY-model naast op dagbasis ook op uurbasis moet draaien, is een uurlijkse ETref nodig. Aangezien de uurlijkse ETref voor het station Rotterdam niet berekend is, is deze afgeleid op basis van de dagelijkse ETref in combinatie met een sinusfunctie. De hoogste ETref zal ongeveer plaatsvinden op het midden van de dag (12:00 uur), en de laagste ETref rond middernacht (0:00). Figuur 9 geeft een voorbeeld waarin de totale ETref van 3,5 mm van 1 dag m.b.v. een sinusfunctie verdeeld is over 24 uur. Het is duidelijk dat door deze methode de hoogste ETref plaatsvindt op het midden van de dag, en de laagste ETref middernacht.

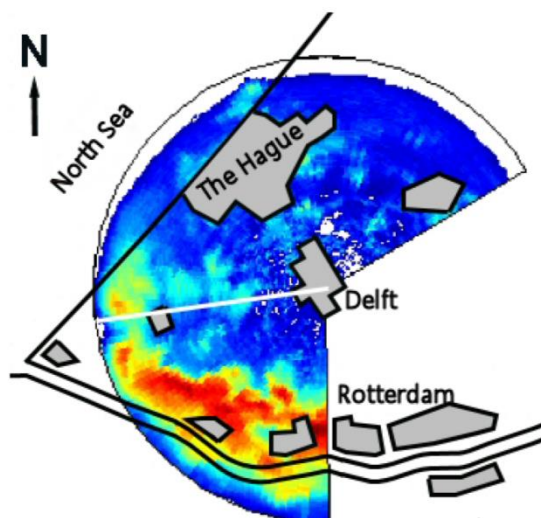


Figuur 9: Voorbeeld van afgeleide uurlijkse referentie-gewasverdamping (ETref) op basis van de dagelijkse ETref en een sinusfunctie.

5.2 Synthetische neerslagradarproducten

Het AESA radarproduct was in ontwikkeling gedurende de looptijd van dit project. Er is daarom gebruik gemaakt van een bestaand “synthetisch” radarproduct met vergelijkbare specificaties (qua resolutie) als het te ontwikkelen product. Het radarproduct dat in deze studie gebruikt is, is de X-band FM-CW (Frequency Modulated – Continuous Wave) Solid-State Weather Surveillance Radar (SOLIDAR), die zich bevond op het dak van het “Electrical Engineering” gebouw van de Technische Universiteit Delft. De radardata afkomstig van deze radar is uitvoerig beschreven en geanalyseerd in Van de Beek et al. (2010) en Sassi et al. (2014). Deze

radar heeft een ruimtelijke resolutie van 120 m en een temporele resolutie van 16 s. Figuur 10 geeft het bereik en de ruimtelijke dekking van SOLIDAR weer.



Figuur 10: Bereik en dekking van de SOLIDAR radar in Delft (Van de Beek et al., 2010).

De leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer van Wageningen Universiteit heeft radardata voor de periode van mei 1993 t/m april 1994 uit de SOLIDAR-dataset geselecteerd. Zij hebben deze periode vervolgens geaggregeerd tot de volgende “synthetische” radarproducten (Sassi et al., 2014):

- 250 m resolutie, uur-basis (R1)
- 250 m resolutie, dag-basis (R2)
- 500 m resolutie, uur-basis (R7)
- 500 m resolutie, dag-basis (R8)

Dit zijn stand-alone radarproducten; geen van deze producten is aangepast m.b.v. regenmeters. Uit R1 en R2 zijn vervolgens weer elk 2 producten afgeleid, waarbij één respectievelijk twee radarpixel(s) als zijnde een synthetisch neerslagstation worden gebruikt. Het product waarbij twee pixels als zijnde twee neerslagstations zijn gebruikt, is geïnterpoleerd volgens de “inverse distance”-methode om een ruimtelijk beeld te krijgen. Alle afgeleide radarproducten zijn vermeld in Tabel 1 en een analyse van deze producten is uitgevoerd in paragraaf 7.1.

In de analyse is ervan uitgegaan dat het neerslag product met de hoogste ruimtelijke en temporele resolutie (R1) beschouwd kan worden als de meest nauwkeurige. Gesimuleerde afvoeren van het R1 product zullen daarom dienen als referentie om de andere zeven producten mee te vergelijken.

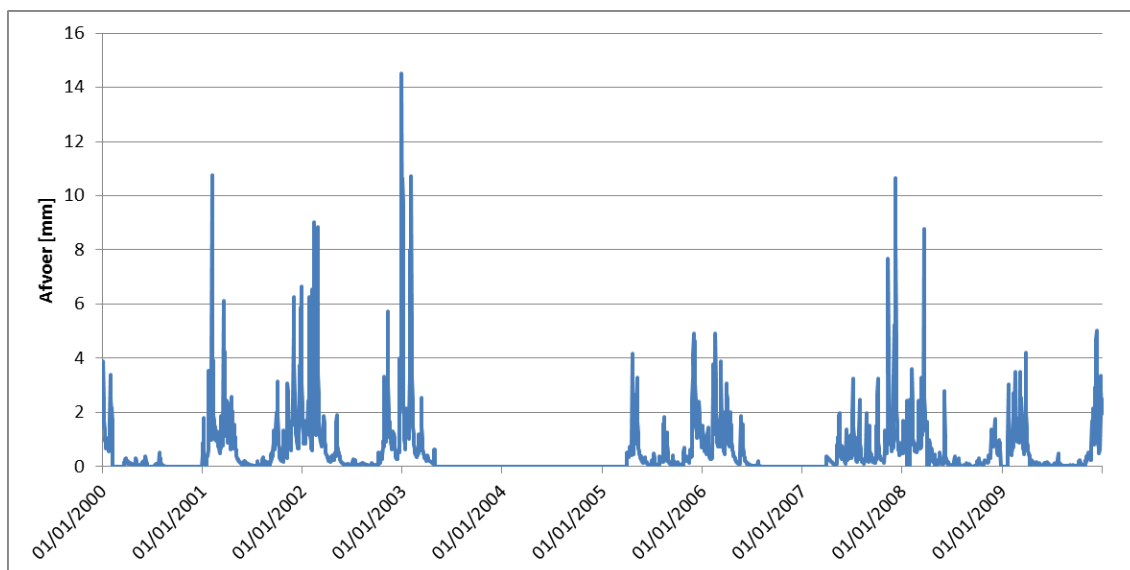


Tabel 1: Combinatie van verschillende ruimtelijke en temporele resoluties resulteert in 8 neerslag producten waarmee het model geforceerd wordt.

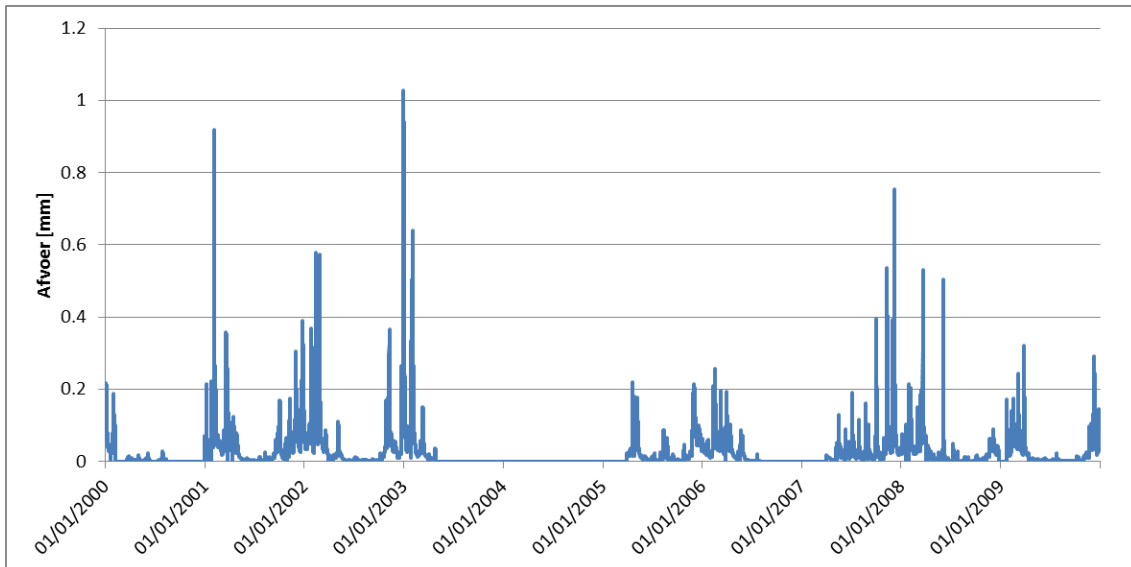
	<i>SPHY 250 m model op dag-basis</i>	<i>SPHY 250 m model op uur-basis</i>
1 neerslag station (= 1 x 250 m radar pixel)	R4	R3
2 neerslag stations (=2 x 250 m radar pixels)	R6	R5
250 m radar product	R2	R1
500 m radar product	R8	R7

5.3 Afvoer

De afvoer van de Hupselse Beek wordt al sinds de zeventiger jaren gemeten bij de geijkte meetstuw ('stuw 10A') benedenstrooms (Figuur 3). De afvoerdata voor de periode 2000-2009 is beschikbaar gemaakt via de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer van Wageningen Universiteit. Dit betreft zowel afvoer op uur- als op dag-basis. Figuur 11 geeft de gemeten dagelijkse afvoer weer voor de periode 2000-2009. Gedurende de jaren 2003-2005 en 2006-2007 komen periodes voor waarin geen afvoergegevens gemeten/beschikbaar zijn. Deze periodes zijn daarom uitgesloten tijdens de modelkalibratie. De gemeten uurlijkse afvoer is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 11: Gemeten dagelijkse afvoer bij de meetstuw in de Hupselse Beek gedurende de periode 2000-2009. Y-as in [mm/d].



Figuur 12: Gemeten uurlijkse afvoer bij de meetstuw in de Hupselse Beek gedurende de periode 2000-2009. Y-as in [mm/uur].

5.4 Bodem

De bodemkaart is nodig voor het bepalen van de volgende bodemeigenschappen:

- Veldcapaciteit;
- Verzadigd volume;
- Verwelkingspunt;
- Permanent verwelkingspunt;
- Verzadigde doorlatendheid (k-waarde).

Voor SPHY is gebruik gemaakt van de bodemkaart zoals deze ook gebruikt wordt in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI, 2008a). Deze bodemkaart is gebaseerd op de bodemkaart van Nederland (1:50.000) versie 6, de indeling volgens de PAWN-indeling (Wösten et al., 1988), en een indeling naar bodemfysische en -chemische kenmerken.

De bodemkaart 1:50.000 is de belangrijkste gegevensbron voor de bodemkaart in het NHI. Hierin is in opdracht van het Ministerie van LNV destijds de zogenaamde veenkartering verwerkt om inzicht te krijgen in de mate van verandering bij veengronden. Het nadeel van deze kaart is dat het een zeer uitgebreide legenda bevat, waarbij bepaalde onderscheidingen niet relevant zijn voor een hydrologisch model. Daarom is deze kaart geclusterd tot een beperkt aantal functionele eenheden. Een veel gebruikte indeling voor het clusteren van de eenheden van de bodemkaart is de indeling naar bodemopbouw. Deze veelgebruikte indeling wordt ook wel de PAWN-indeling (Wösten et al., 1988) genoemd. Daarin wordt onderscheid gemaakt in 21 verschillende bodemeenheden. Naast de PAWN-indeling is er gebruik gemaakt van de meer uitgebreide fysisch-chemische karakterisering (De Vries, 1999). Daarin staan voor alle eenheden van de bodemkaart van Nederland 1:50.000, met een oppervlakte van meer dan 2000 ha, een profielschets met informatie over belangrijke kenmerken in het bodemprofiel (NHI, 2008a). Bij deze schematische indelingen is het aantal onderscheiden typen veel geringer dan het aantal verschillende eenheden op de bodemkaart. Daarom is er per indeling een sleuteltabel die de link legt tussen de eenheid van de bodemkaart en de eenheid van de geschematiseerde indeling. Uiteindelijk heeft dit geleid tot de bodemkaart zoals weergegeven in



Figuur 13. Een tabel met gedetailleerde informatie over de bodemopbouw staat in Appendix 1. De bodemkaart voor het Hupselse Beek stroomgebied is op een ruimtelijke resolutie van 250 m uit deze bodemkaart geknipt (Figuur 14).



Figuur 13: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).

De fysische eigenschappen van de bodemtypes zijn afgeleid m.b.v. de pedo-transferfuncties van Nemes et al. (1999). Deze eigenschappen zijn weergegeven in Tabel 2 en Tabel 3 voor respectievelijk het “wortelzone” en “subzone”-reservoir in SPHY.

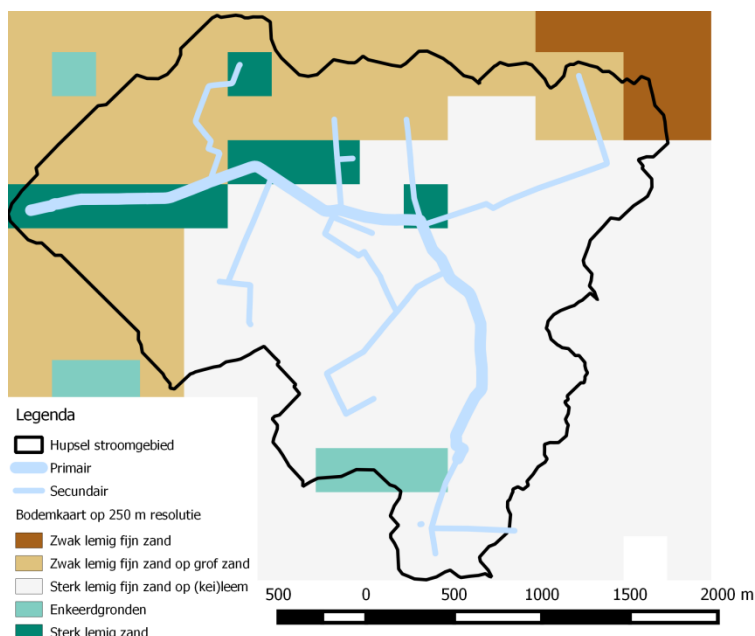
In het verleden zijn er veel grondboringen gedaan in het Hupselse Beek stroomgebied. Een resultaat hiervan is een gedetailleerde kaart met de verzadigde doorlatendheid (K-waarde) van de bodem. Omdat deze kaart meer detail bevat dan de bodemkaart zoals deze verkregen is uit het NHI, wordt deze gebruikt voor de k-waarde. Deze kaart is aangeleverd door Wageningen Universiteit, en is geïnterpoleerd naar de 250 m modelresolutie (Figuur 15). Uit deze kaart blijkt dat de K-waarde varieert van ca. 1600 mm/dag in het zuidoosten van het gebied tot ca. 7425 mm/dag in het noordwesten van het gebied. Deze extreem hoge K-waarden zullen ervoor zorgen dat de neerslag snel infiltreert en daardoor snel tot afvoer komt. De K-waarde is tijdens de modelkalibratie (Hoofdstuk 6) geoptimaliseerd.

Tabel 2: Bodemfysische eigenschappen voor het wortelzone-reservoir in het SPHY-model.

Bodem type	Volumefractie bij verzadiging [m ³ /m ³]	Volumefractie bij veldcapaciteit [m ³ /m ³]	Volumefractie bij verwelkingspunt [m ³ /m ³]	Volumefractie bij permanent verwelkingspunt [m ³ /m ³]
Zwak lemig fijn zand	0,420	0,229	0,097	0,040
Zwak lemig fijn zand op grof zand	0,420	0,229	0,097	0,040
Sterk lemig fijn zand op (kei)leem	0,460	0,293	0,122	0,044
Enkeerdgronden	0,420	0,229	0,097	0,040
Sterk lemig zand	0,460	0,293	0,122	0,044

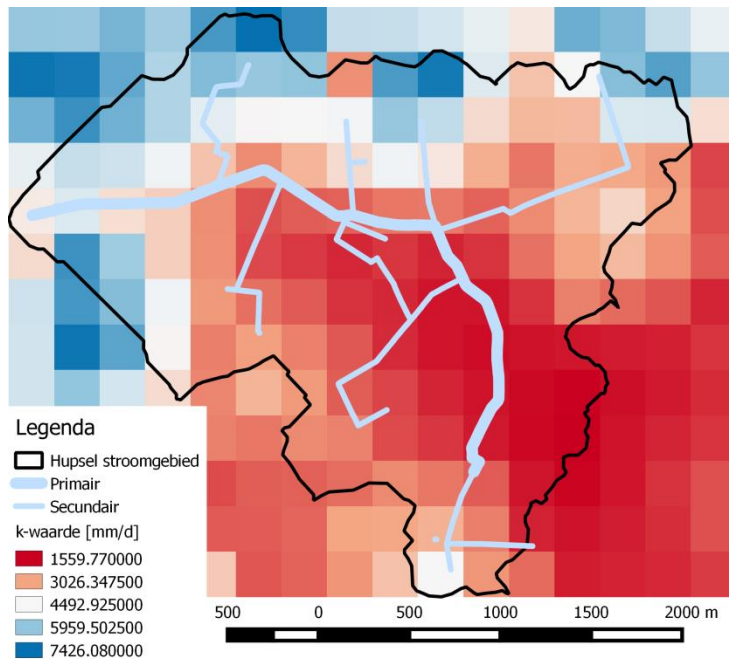
Tabel 3: Bodemfysische eigenschappen voor het “subzone”-reservoir in het SPHY-model.

Bodemtype	Volumefractie bij verzadiging [m ³ /m ³]	Volumefractie bij veldcapaciteit [m ³ /m ³]
Zwak lemig fijn zand	0,380	0,142
Zwak lemig fijn zand op grof zand	0,380	0,142
Sterk lemig fijn zand op (kei)leem	0,380	0,142
Enkeerdgronden	0,420	0,229
Sterk lemig zand	0,380	0,142

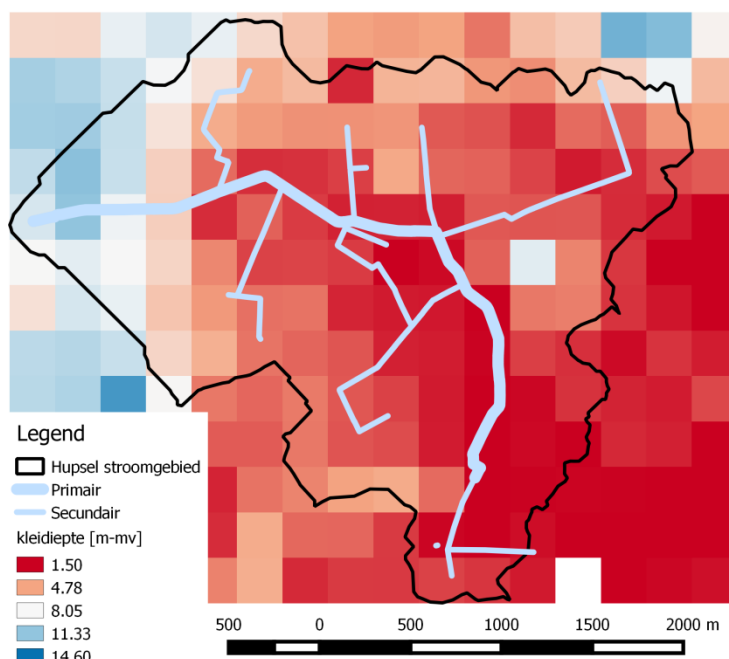


Figuur 14: Bodemkaart voor het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.





Figuur 15: Verzadigde doorlatendheid (K-waarde) [mm/d] van het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.



Figuur 16: Kleidiepte [m-mv] in het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m.

Naast de K-waarde is ook de diepte van het ondoorlatende kleipakket bekend (D). Deze kaart is tevens geïnterpoleerd naar een ruimtelijke resolutie van 250 m, en is weergegeven in Figuur 16. In het zuidoosten van het stroomgebied bevindt deze kleilaag zich op een geringe diepte van ca. 1,5 m beneden maaiveld, terwijl deze zich bevindt op een diepte van ca. 11-12 m in het westen van het stroomgebied van de Hupselse Beek.

Vanwege de veelal ondiepe ligging (1,5 m-mv) van de kleilaag op een aantal locaties binnen het stroomgebied, betekent dit dat de som van de bodemreservoirs (wortelzone + subzone +

grondwaterlaag) in het SPHY-model op deze locaties maximaal 1,5 m kan zijn. Deze dikte is gering gezien het feit dat SPHY normaliter wordt opgezet met een wortelzonedikte van 400 mm en een subzonedikte van 1600 mm. Daar bovenop komt dan nog de dikte van de grondwaterlaag. Er zal dus een schaling van de bodemreservoirs moeten plaatsvinden om alle drie de reservoirs in SPHY te kunnen gebruiken. Als er gerekend wordt met een wortelzonedikte van 400 mm, betekent dit dat de subzone en de grondwaterlaag samen maximaal 1100 mm mogen zijn wanneer de kleilaag zich op 1500 mm beneden maaiveld bevindt. Om er zeker van te zijn dat de modellagen een representatieve dikte hebben is er daarom voor gekozen om de volgende minimale laagdiktes toe te kennen:

- Subzone: 900 mm
- Grondwaterlaag: 200 mm

Afhankelijk van de kleidiepte worden de diktes van de subzone en grondwaterlaag geschaald volgens:

$$rel_x = \frac{kleidiepte_x - kleidiepte_{min}}{kloidiepte_{max} - kleidiepte_{min}}$$

$$subdikte_x = subdikte_{min} + (subdikte_{max} - subdikte_{min}) \cdot rel_x$$

$$gwdikte_x = kleidiepte_x - subdikte_x - worteldikte_x$$

Met: rel_x = relatieve kleidiepte, geschaald tussen de maximale en minimale kleidiepte [-]

$kleidiepte_x$ = kleidiepte op locatie x [mm-mv]

$kloidiepte_{min}$ = minimale kleidiepte [mm-mv]

$kloidiepte_{max}$ = maximale kleidiepte [mm-mv]

$subdikte_x$ = dikte subzone op locatie x [mm]

$subdikte_{min}$ = minimale dikte subzone [mm]

$subdikte_{max}$ = maximale dikte subzone [mm]

$gwdikte_x$ = dikte grondwaterlaag op locatie x [mm]

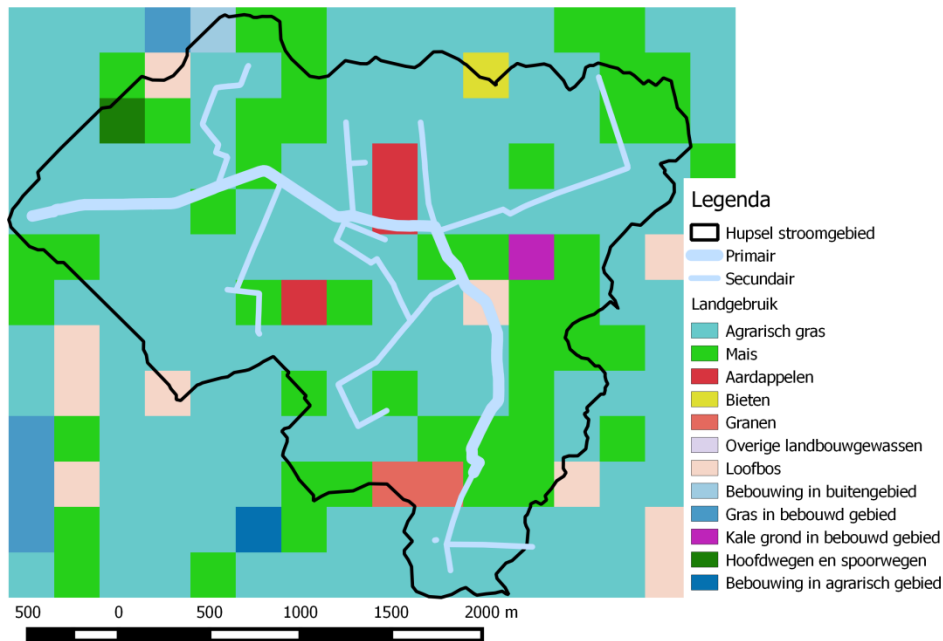
$worteldikte_x$ = dikte wortelzone op locatie x [mm]

Door de dikte van de wortelzone mee te nemen in het kalibratieproces zal de dikte van de grondwaterlaag mee veranderen. De kalibratie van de bodemparameters is verder in detail beschreven in Hoofdstuk 6.

5.5 Landgebruik

Voor het landgebruik in SPHY is gekozen voor het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN-5) (Hazeu, 2005; NHI, 2008). Het LGN bestand is een vlakdekkend rasterbestand voor Nederland, waarin 39 vormen van landgebruik zijn weergegeven. Sinds 1986 wordt dit bestand met een frequentie van 3-5 jaar gemaakt. Deze landgebruikskaart is uitgebreid met het LGN-gewassenbestand waarin 7 gewassen worden onderscheiden: gras, mais, aardappelen, bieten, granen, overige gewassen en bloembollen (Hazeu, 2005). Het landgebruik in het Hupselse Beek stroomgebied is uit deze kaart geknipt en is weergegeven in Figuur 17. Het is duidelijk dat het landgebruik in het stroomgebied van de Hupselse Beek overwegend uit agrarisch gras bestaat, met hier en daar agrarische gewassen als maïs, aardappelen en granen.

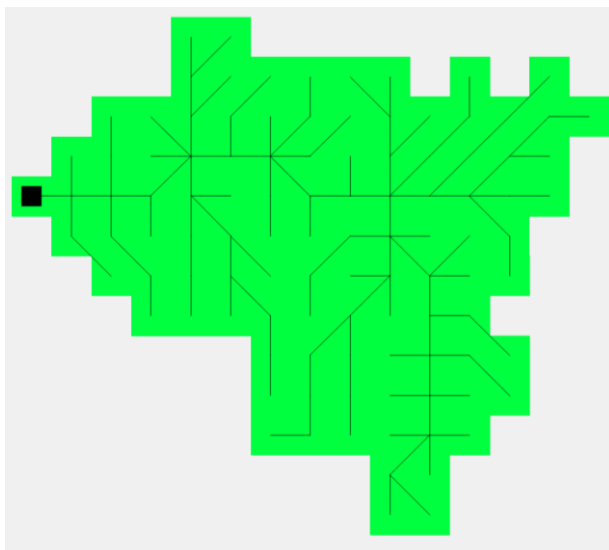




Figuur 17: Landgebruik in het Hupselse Beek stroomgebied op een ruimtelijke resolutie van 250 m.

5.6 Waterlopen

Zoals o.a. in Figuur 3 te zien is begint de primaire watergang van de Hupselse Beek in het zuiden van het stroomgebied. Daarnaast bevinden zich er secundaire en tertiaire (niet zichtbaar in figuur) watergangen. Voor het SPHY-model is een stromingsrichtingskaart nodig die voor elke cel aangeeft op welke cel deze afwatert. Door gebruik te maken van de hoogtekaart (Figuur 1) kan voor iedere cel bepaald worden in welke richting het water afstroomt. Dit resulteert in de stromingsrichtingskaart zoals weergegeven in Figuur 18. De afvoer bij het uitstroompunt wordt in SPHY berekend door de specifieke afvoer van elke cel naar benedenstrooms te accumuleren en te vertragen d.m.v. een recessiecoëfficiënt.



Figuur 18: Stromingsrichtingskaart voor het Hupselse Beek stroomgebied op een resolutie van 250 m. Het zwarte blokje is het uitstroompunt van het stroomgebied. Deze kaart is gemaakt op basis van de hoogtekaart van het gebied (Figuur 1).

6 Model kalibratie

Alvorens het SPHY-model geforceerd kan worden met de verschillende neerslagproducten, dient het model eerst gekalibreerd te worden met een historische afvoerreeks. Omdat er zowel uurlijkse als dagelijkse neerslagproducten zijn, is het SPHY-model zowel opgezet om te werken met een uurlijkse resolutie, als met een dagelijkse resolutie. Hierdoor was het noodzakelijk om het model te kalibreren voor deze verschillende temporele resoluties.

Omdat het “synthetische” radarproduct afkomstig is uit een andere regio van Nederland, kon het SPHY-model niet met deze dataset gekalibreerd worden. Het SPHY-model is daarom geforceerd met neerslagdata en ETref van het KNMI station dat in het Hupselse Beek stroomgebied aanwezig is (Figuur 3). Het SPHY-model is gekalibreerd op de afvoer voor de periode 2001-2009, waarbij het jaar 2000 is gebruikt als jaar om het model te initialiseren. De kalibratie van het dagelijkse- en uurlijkse SPHY-model is beschreven in onderstaande paragrafen. Uit de analyse van het gebruik van de verschillende neerslagproducten zal later blijken of 1 neerslagstation voldoende is om de gebiedsneerslag te schatten.

6.1 Kalibratie op dag-basis

Het SPHY-model is allereerst gekalibreerd op een dagelijkse tijdschaal, gebruik makend van het KNMI neerslagstation en het afvoormeetpunt in de Hupselse Beek. Het model is gekalibreerd m.b.v. het “Model-Independent Parameter Estimation & Uncertainty Analysis” (PEST) (Doherty, 2005) pakket. De parameters die gebruikt zijn voor de kalibratie, en waar het SPHY-model het meest gevoelig voor is, zijn:

- *rdepth*: rootzone thickness [mm].
- *deltaGw*: groundwater recharge delay time [d].
- *alphaGw*: baseflow recession coefficient [-].
- *kx*: routing recession coefficient [-].
- *rksat_x*: factor [-] multiplied with original saturated hydraulic conductivity [mm/d] of rootzone.

De *rksat_x* is geen SPHY-model parameter, maar is gebruikt om de k-waarde (Figuur 15) van het Hupselse Beek stroomgebied te optimaliseren. Door deze te laten variëren tussen 0,7 en 1,3 tijdens het kalibratieproces, kan de geoptimaliseerde verzadigde hydraulische doorlatendheid van de “wortelzone” 30% lager of hoger worden dan de originele doorlatendheid.

Tabel 4: Gekalibreerde modelparameters voor het SPHY-model op dag-basis.

<i>Parameter</i>	<i>Gekalibreerde waarde</i>
rdepth	498 [mm]
deltaGw	1,0E-04 [d]
alphaGw	4,33E-02 [-]
Kx	5,0E-9 [-]
rksat_x	0,70 [-]

De geoptimaliseerde parameters voor het SPHY-model op dag-basis zijn weergegeven in Tabel 4. De modefficiëntie en de waterbalans voor de periode 2001-2009 zijn weergegeven in Tabel 5 en Tabel 6. De “Nash-Sutcliffe” (NS) coëfficiënt en de “Bias” zijn coëfficiënten die in de



hydrologie veel gebruikt worden om de prestatie van een model weer te geven. De NS-coëfficiënt is als volgt gedefinieerd:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2}$$

Met: $E = \text{Nash-Sutcliffe coefficient [-]}$
 $Q_o^t = \text{gemeten afvoer [mm] op dag } t$
 $Q_m^t = \text{gesimuleerde afvoer [mm] op dag } t$
 $\overline{Q_o} = \text{gemiddelde gemeten afvoer [mm]}$

De NS-coëfficiënt kan variëren tussen $-\infty$ en 1, waarbij een waarde van 1 overeenkomt met een perfecte match tussen de gemeten en gesimuleerde afvoer. Een NS-coëfficiënt van 0 betekent dat de gesimuleerde afvoer net zo nauwkeurig is als het gemiddelde van de gemeten afvoer. Een NS-coëfficiënt <0 betekent dat het gemiddelde van de gemeten afvoer een betere voorspeller is dan het model. De model-bias is gedefinieerd als:

$$\text{Bias} = \frac{\overline{Q_m} - \overline{Q_o}}{\overline{Q_o}} \cdot 100$$

Met: $\text{Bias} = \text{model-bias [\%]}$
 $\overline{Q_o} = \text{gemiddelde gemeten afvoer [mm]}$
 $\overline{Q_m} = \text{gemiddelde gesimuleerde afvoer [mm]}$

De NS-coëfficiënt van 0,67 geeft aan dat het model redelijk goed in staat is om piekafvoeren te simuleren. De negatieve bias (-11,67%) geeft aan dat er een lichte onderschatting plaatsvindt van de gemiddeld gemeten afvoer. Figuur 19 geeft de gemeten versus de gesimuleerde gekalibreerde afvoer weer voor de periode 2001-2009. Het model is in staat om de timing van de afvoerpieken goed te simuleren, alleen wordt de grootte van de afvoerpiek in sommige gevallen onderschat. Dit verklaart de negatieve bias. De onderschatting van de piekafvoer is mogelijk gerelateerd aan het gebruik van 1 neerslagstation voor de gebiedsneerslag. Daarnaast spelen de modelconcepten van SPHY een rol bij deze onderschatting; in SPHY treedt de snelle afvoer (surface runoff) op zodra het eerste bodemreservoir verzadigd is ("saturation excess overland flow"). In werkelijkheid neemt de infiltratiecapaciteit van de bodem af naarmate deze natter wordt. Wanneer vervolgens de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overschrijdt treedt oppervlakkige afvoer op. Dit laatste concept is echter (nog) niet in het SPHY-model geïmplementeerd.

Tabel 5: Model efficiëntie voor het SPHY-model op dag-basis voor de periode 2001-2009.

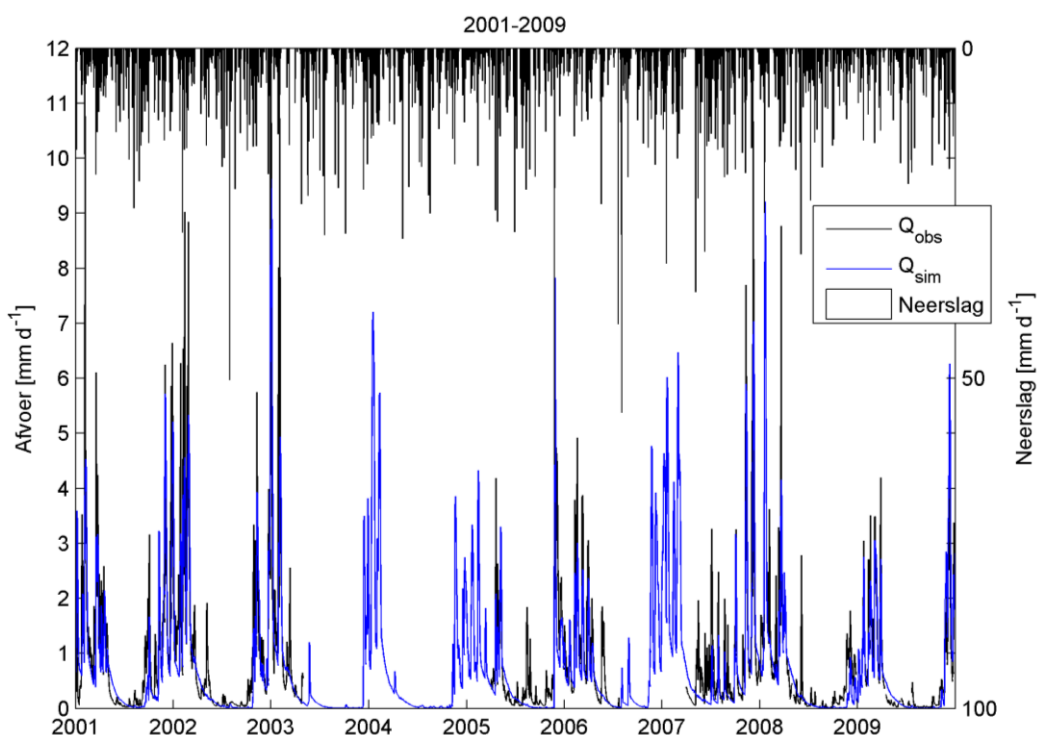
<i>Model efficiëntie indicator</i>	<i>Waarde</i>
Nash-Sutcliffe	0,67
Bias	-11,76%



Tabel 6: Gemiddelde jaarlijkse waterbalans voor het SPHY-model op dag-basis voor de periode 2001-2009.

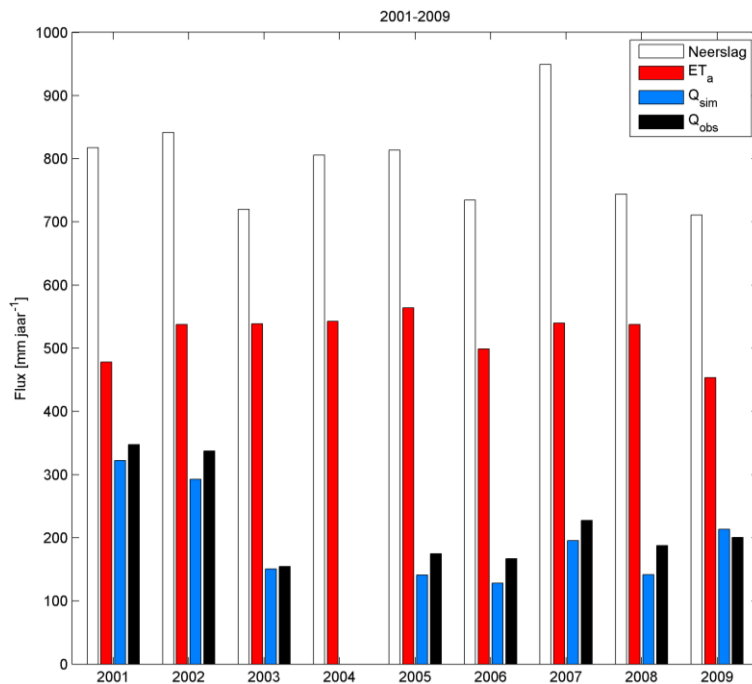
<i>Waterbalans term</i>	<i>Waarde [mm]</i>
Neerslag	793
Verdamping	521
Afvoer	270
dS	2

De waterbalans (Tabel 6) geeft aan dat er per jaar in de periode van 2001 tot 2009 gemiddeld 793 mm aan neerslag valt, 521 mm verdampt, en 270 mm tot afvoer komt (dS ongeveer nul). Dit zijn waarden die representatief zijn voor het Nederlandse klimaat. Deze fluxen zijn, inclusief de gemeten afvoer, per afzonderlijk jaar weergegeven in Figuur 20. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde- en gemeten afvoer goed met elkaar overeenkomen, maar dat er meestal een lichte onderschatting van de gemeten afvoer plaatsvindt. Voor het jaar 2004 waren geen afvoermetingen beschikbaar, en daarom is dit jaar niet meegenomen in de berekening van de modefficiëntie.



Figuur 19: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op dag-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied voor de periode 2001-2009.

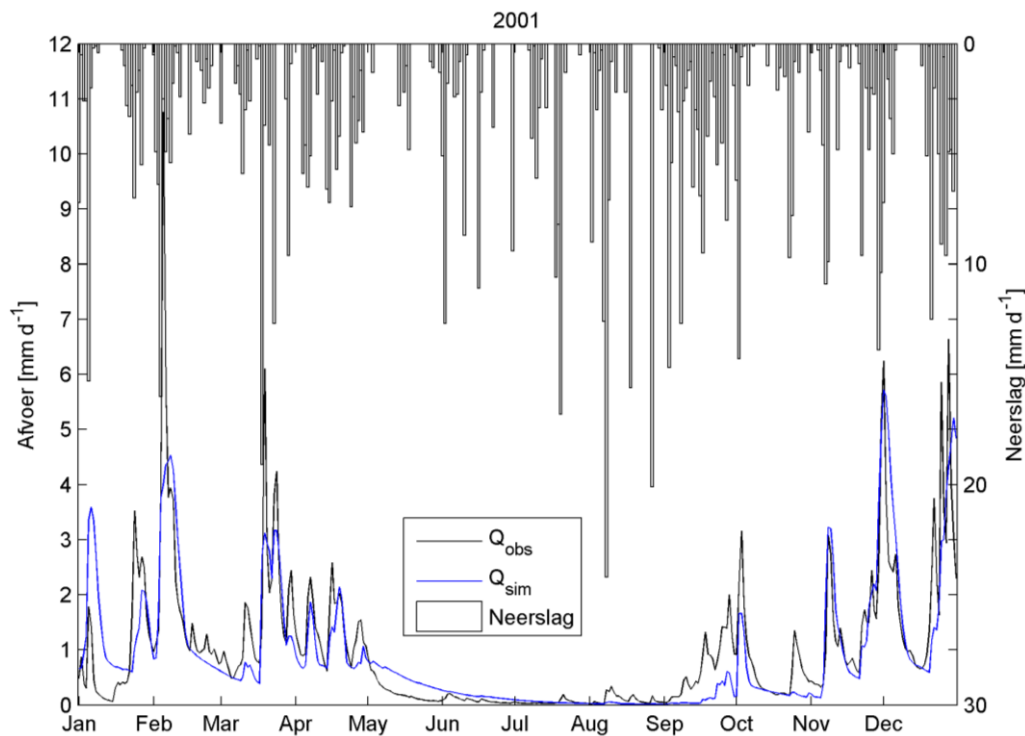




Figuur 20: Jaarlijkse neerslag, gesimuleerde verdamping (ET_a), gesimuleerde afvoer (Q_{sim}), en gemeten afvoer (Q_{obs}) voor de Hupselse Beek voor de periode 2001-2009. De gesimuleerde verdamping en gesimuleerde afvoer zijn van het SPHY-model op dag-basis.

Figuur 21 geeft de gemeten versus de gesimuleerde afvoer in detail weer voor het jaar 2001. Hierin is zichtbaar dat het SPHY-model goed in staat is om de totale afvoer te simuleren, maar dat de recessie van de basisafvoer in de maand mei te lang doorloopt en dat de afvoer in september te laat op gang komt. De simulatie van de hoge afvoer gedurende de wintermaanden, op een onderschatting van één afvoerpiek in februari na, gaat erg goed. De modefficiëntie voor deze periode is weergegeven in Tabel 7 en de waterbalans in Tabel 8. De model bias van -7,15% laat zien dat er wederom sprake is van een lichte onderschatting van de gemiddelde afvoer.





Figuur 21: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op dag-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied gedurende 2001.

Tabel 7: Model efficiëntie voor het SPHY-model op dag-basis voor het jaar 2001.

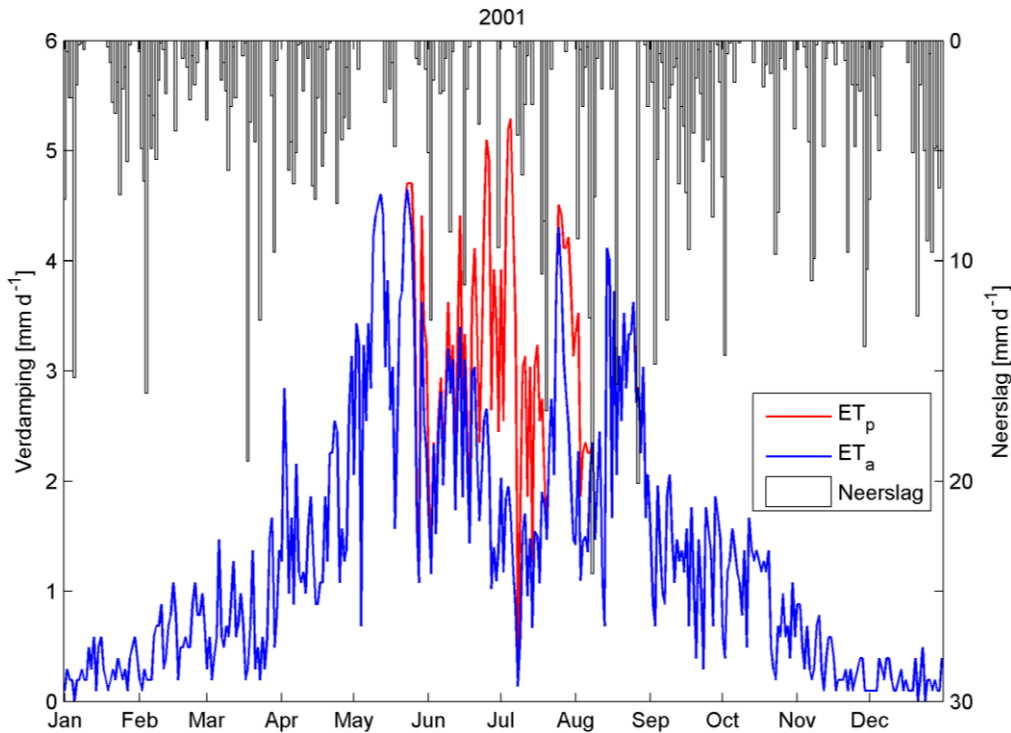
Model efficiëntie indicator	Waarde
Nash-Sutcliffe	0,64
Bias	-7,15%

Tabel 8: Waterbalans voor het SPHY-model op dag-basis voor het jaar 2001.

Waterbalans term	Waarde [mm]
Neerslag	818
Verdamping	478
Afvoer	322
dS	17

De potentiële verdamping wordt berekend door de referentiegewas-verdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor. Om te valideren of het model de potentiële verdamping gedurende de zomermaanden reduceert tot een actuele verdamping is in Figuur 22 de potentiële en gesimuleerde actuele verdamping voor het jaar 2001 weergegeven. Hieruit blijkt dat de potentiële verdamping varieert van ca. 0,2 mm/d in de wintermaanden tot ca. 5,5 mm/d in de zomermaanden. Door vochttekorten in de bodem tijdens de zomermaanden zien we dat het SPHY-model de potentiële verdamping reduceert tot een actuele verdamping, wat in werkelijkheid ook gebeurt. Aangezien de berekende afvoer voor de periode 2001-2009 gemiddeld gezien 12% (ca. 30 mm) te laag is, betekent dit dat er of te weinig neerslag gemeten is (4%), of dat het model de verdamping licht overschat (6%).





Figuur 22: Potentiële (ET_p) en actuele gesimuleerde verdamping (ET_a) per dag voor Hupsel voor het jaar 2001.

6.2 Kalibratie op uur-basis

Het SPHY-model is vervolgens gekalibreerd op een uurlijkse tijdschaal. De *rdepth* parameter is deze keer niet meegenomen in het kalibratieproces, en de waarde hiervoor is hetzelfde (498 mm) als voor het gekalibreerde SPHY-model op dag-basis. Dit betekent dat de volgende parameters gebruikt zijn voor de kalibratie:

- *deltaGw*: groundwater recharge delay time [h].
- *alphaGw*: baseflow recession coefficient [-].
- *kx*: routing recession coefficient [-].
- *rksat_x*: factor [-] multiplied with original saturated hydraulic conductivity [mm/h] of rootzone.

Tabel 9: Gekalibreerde model parameters voor het SPHY-model op uur-basis.

Parameter	Gekalibreerde waarde
deltaGw	160,53 [h]
alphaGw	1,0 [-]
Kx	0,392 [-]
rksat_x	1,3 [-]

De geoptimaliseerde parameters voor het SPHY-model op uur-basis zijn weergegeven in Tabel 9. De modefficiëntie en de waterbalans voor de periode 2001-2009 zijn weergegeven in Tabel 10 en Tabel 11. De NS-coëfficiënt is 0,68 en de bias is -14,33%. Dit betekent dat het model redelijk goed in staat is om piekafvoeren te simuleren. De negatieve bias geeft aan dat er een lichte onderschatting plaatsvindt van de gemiddeld gemeten afvoer. De onderschatting van 14% (ca. 38 mm) betekent dat er of te weinig neerslag gemeten is (4%), of dat het model de verdamping overschat (7%). Hetzelfde was het geval bij het SPHY-model op dag-basis. Figuur



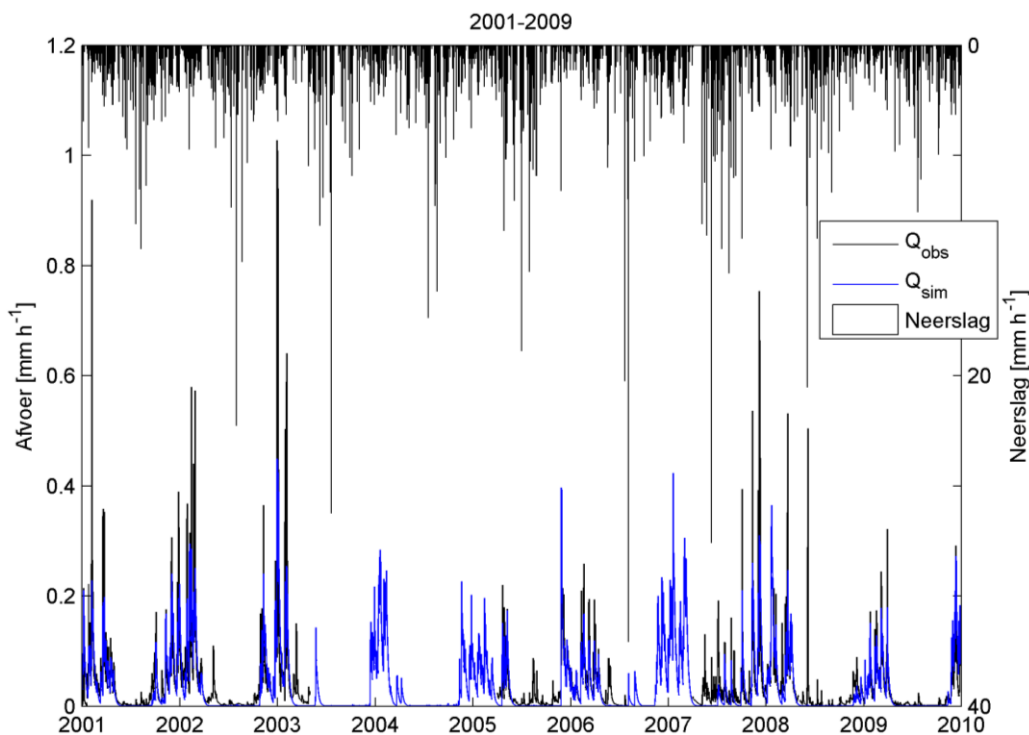
23 geeft de gemeten versus de gesimuleerde gekalibreerde afvoer weer voor de periode 2001-2009. Het model is in staat om de timing van de afvoerpieken goed te simuleren, alleen wordt de grootte van de afvoerpiek in sommige gevallen onderschat. Dit verklaart de negatieve bias. Aangezien het SPHY-model oorspronkelijk ontwikkeld is om te werken op een dagelijkse tijdschaal, is het interessant om te zien dat het model op een uurlijkse tijdschaal ook redelijk tot goed presteert.

Tabel 10: Model efficiëntie voor het SPHY-model op uur-basis voor de periode 2001-2009.

Model efficiëntie indicator	Waarde
Nash-Sutcliffe	0,68
Bias	-14,33%

Tabel 11: Gemiddelde jaarlijkse waterbalans voor het SPHY-model op uur-basis voor de periode 2001-2009.

Waterbalans term	Waarde [mm]
Neerslag	793
Verdamping	522
Afvoer	269
dS	1

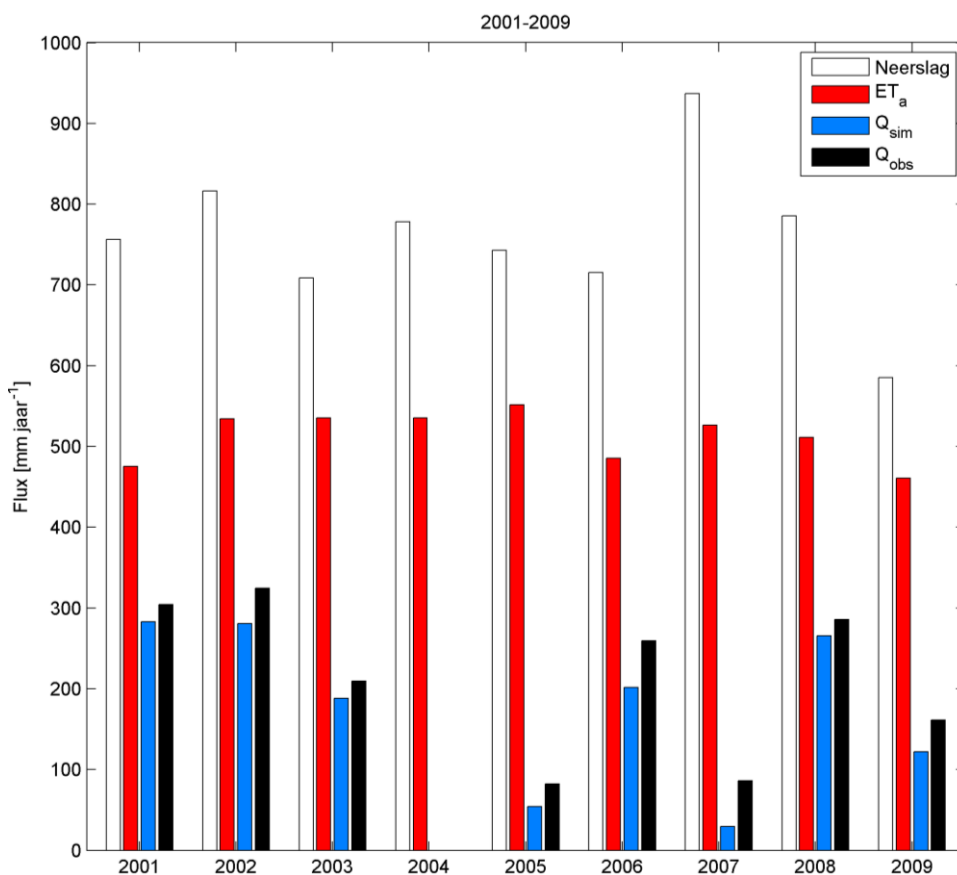


Figuur 23: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op uur-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied voor de periode 2001-2009.

De waterbalans (Tabel 11) geeft aan dat er per jaar gemiddeld 793 mm aan neerslag valt, 522 mm verdampt, en 269 mm tot afvoer komt. Deze waarden zijn in overeenstemming met de waarden uit Tabel 6 van het SPHY-model op dag-basis. De fluxen van de waterbalans zijn, inclusief de gemeten afvoer, per afzonderlijk jaar weergegeven in Figuur 24. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde- en gemeten afvoer goed met elkaar overeenkomen, maar dat er meestal een lichte onderschatting van de gemeten afvoer plaatsvindt. Het natste jaar is 2007, en hierin vindt relatief gezien de grootste onderschatting plaats van de gemeten afvoer. Het jaar 2004 is

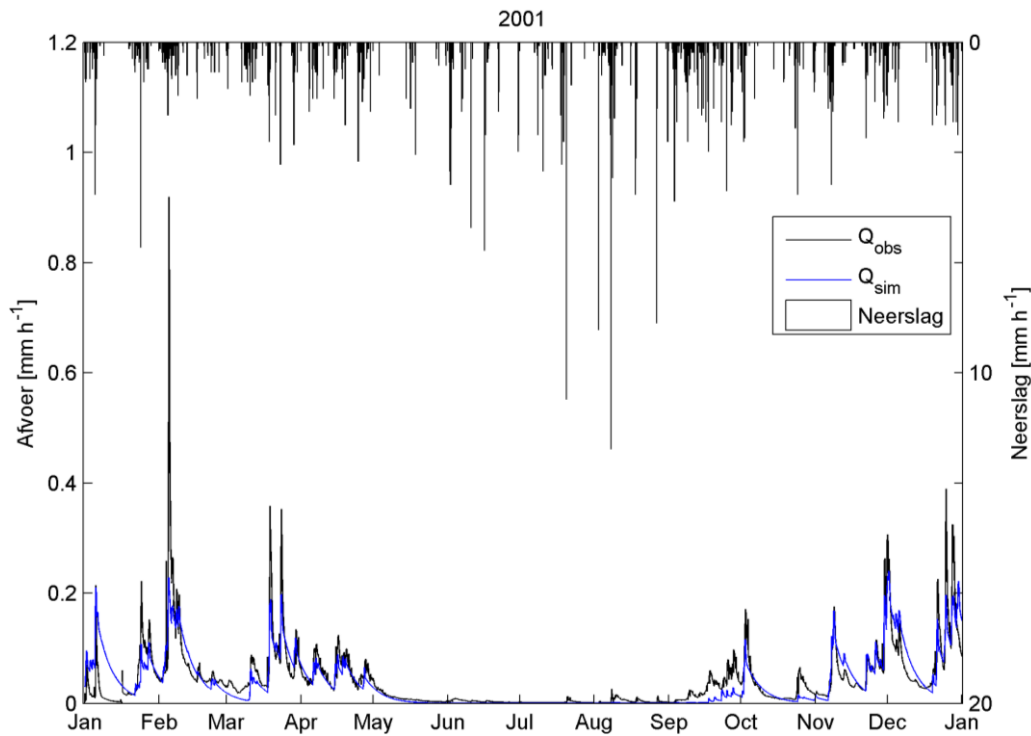


wederom niet meegenomen in het berekenen van de modefficiëntie omdat hiervan geen afvoermetingen beschikbaar waren.



Figuur 24: Jaarlijkse neerslag, gesimuleerde verdamping (ET_a), gesimuleerde afvoer (Q_{sim}), en gemeten afvoer (Q_{obs}) voor de Hupselse Beek voor de periode 2001-2009. De gesimuleerde verdamping en gesimuleerde afvoer zijn van het SPHYmodel op uur-basis.

Figuur 25 geeft de gemeten versus de gesimuleerde afvoer in detail weer voor het jaar 2001. Hierin is zichtbaar dat het SPHY-model goed in staat is om de afvoer te simuleren. De simulatie van de recessie van de basisafvoer gaat bijna perfect. Het enige minpuntje is de lichte onderschatting van de piekafvoeren. Dit was ook het geval bij het dagelijkse model. Deze onderschatting is substantieel in februari, maar het lijkt erop dat de gemeten afvoer hier incorrect is: er is namelijk geen sprake van een extreme neerslaggebeurtenis voorafgaand aan deze afvoerpiek. De modefficiëntie voor deze periode is weergegeven in Tabel 12 en de waterbalans in Tabel 13. De model bias van -7,48% laat zien dat er wederom sprake is van een lichte onderschatting van de gemiddelde afvoer.



Figuur 25: Gemeten (Q_{obs}) vs. gekalibreerde gesimuleerde afvoer (Q_{sim}) op uur-basis voor het Hupselse Beek stroomgebied gedurende 2001.

Tabel 12: Model efficiëntie voor het SPHY-model op uur-basis voor het jaar 2001.

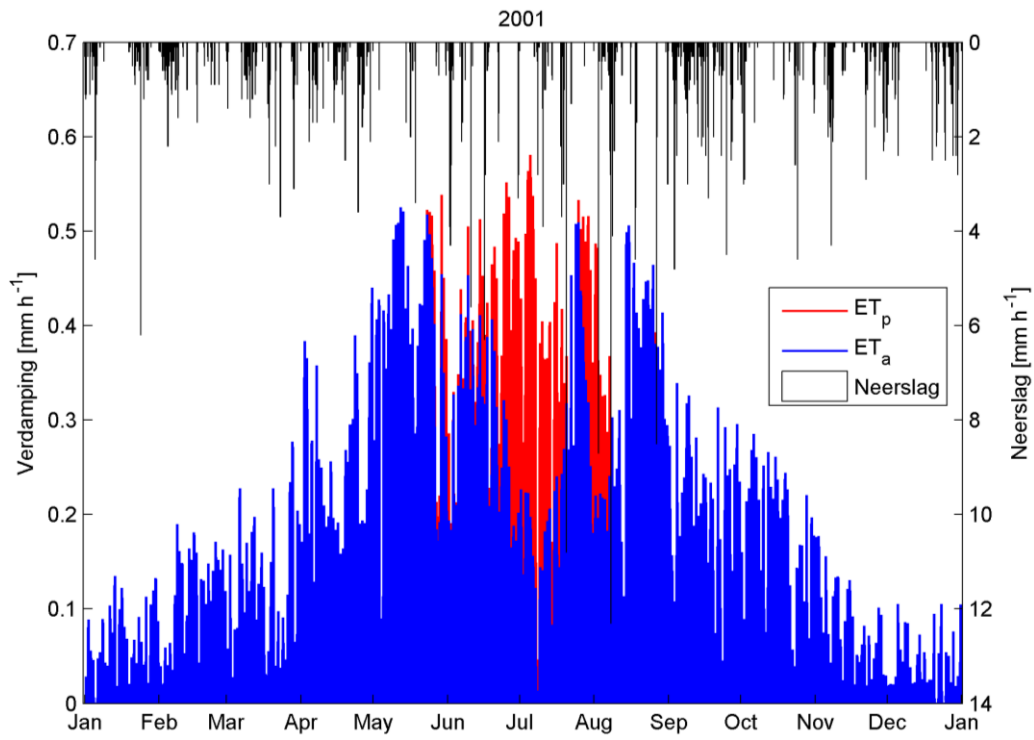
<i>Model efficiëntie indicator</i>	<i>Waarde</i>
Nash-Sutcliffe	0,67
Bias	-7,48%

Tabel 13: Waterbalans voor het SPHY-model op uur-basis voor het jaar 2001.

<i>Waterbalans term</i>	<i>Waarde [mm]</i>
Neerslag	818
Verdamping	478
Afvoer	321
dS	18

Om te valideren of het uurlijkse model de potentiële verdamping gedurende de zomermaanden ook reduceert tot een actuele verdamping is in Figuur 26 de potentiële en gesimuleerde actuele verdamping voor het jaar 2001 weergegeven. Hieruit blijkt dat de potentiële verdamping varieert van bijna 0 mm/uur in de wintermaanden tot ca. 0,6 mm/uur in de zomermaanden. Door vochttekorten in de bodem tijdens de zomermaanden zien we dat het SPHY-model de potentiële verdamping reduceert tot een actuele verdamping, wat in werkelijkheid ook gebeurt.





Figuur 26: Potentiële (ET_p) en actuele gesimuleerde verdamping (ET_a) per uur voor Hupsel voor het jaar 2001.

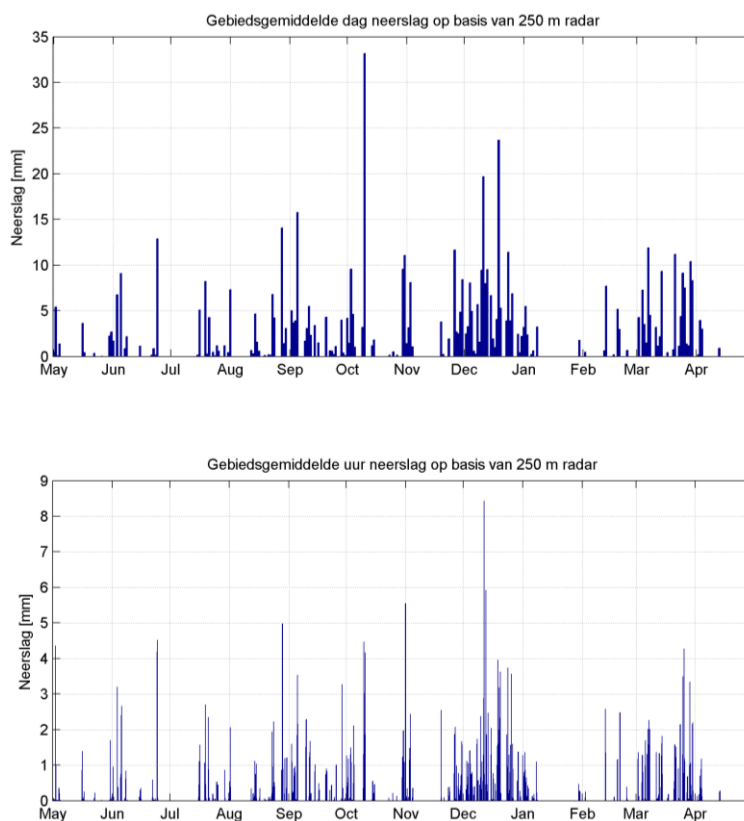
7 Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de verschillende neerslag(radar)producten onderling vergeleken, en is het gebruik van deze producten en het effect hiervan op de afvoer geanalyseerd.

7.1 Verschillen in neerslag

7.1.1 Gebiedsgemiddelde neerslag

Om een inzicht te krijgen in de neerslaggebeurtenissen in de radar-dataset gedurende de periode mei 1993 – april 1994, zijn in Figuur 27 de gebiedsgemiddelde (synthetische) dag- en uur neerslag voor het Hupselse Beek stroomgebied weergegeven. Deze zijn bepaald op basis van het meest accurate neerslagproduct, te weten het 250 m radar product. Het is duidelijk dat de meeste neerslag valt gedurende december 1993. De hoogste dagneerslag (33 mm) valt op 10 oktober 1993. Voor het analyseren van de temporele variatie zijn de neerslaggebeurtenissen in december 1993 het interessantst, want in die maand wordt op uur-basis de hoogste neerslagintensiteit gemeten (8,4 mm/uur).



Figuur 27: Gebiedsgemiddelde dagneerslag (boven) en urneerslag (onder) voor de periode mei 1993 t/m april 1994. Gebiedsgemiddelden zijn bepaald op basis van het 250 m radar product op dag-basis (R2, boven) en uur-basis (R1, onder).

7.1.2 Cumulatieve gebiedsneerslag

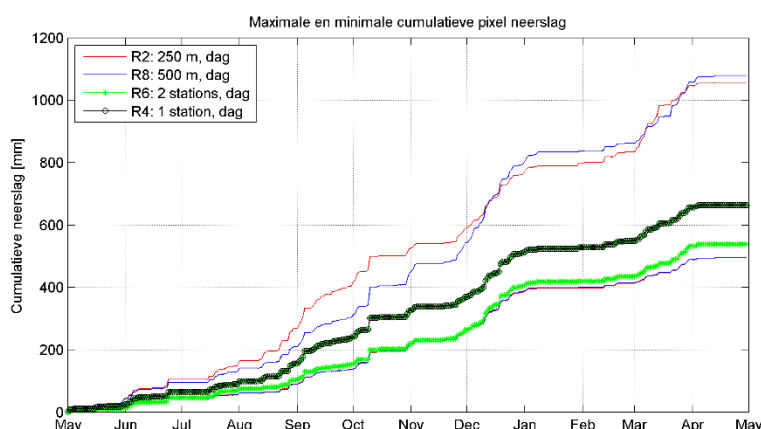
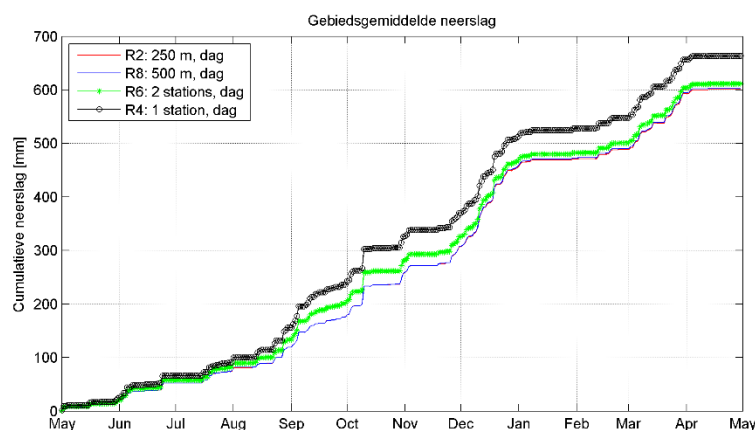
Figuur 28 geeft voor de dagelijkse neerslagproducten de cumulatieve gebiedsneerslag weer (boven), evenals per neerslagproduct de maximale- en minimale cumulatieve neerslagpixel (onder). Als we de gebiedsgemiddelde cumulatieve neerslag bekijken, dan is het duidelijk dat



de 500 m radar en 250 m radarproducten nauwelijks van elkaar verschillen. Deze geven beide ca. 600 mm neerslag op jaarbasis. Het geïnterpoleerde product van 2 synthetische neerslagstations (R6) wijkt op jaarbasis niet veel af van de 250 m en 500 m radarproducten.

Gedurende de maanden september – november is er echter een sprong te zien in de cumulatieve neerslag van R6. Dit betekent dat er gedurende deze maanden lokaal meer neerslag is gemeten door één of beide synthetische stations, en dat dit in de berekening van de gebiedsgemiddelden voor de 250 m en 500 m radarproducten wordt gecompenseerd door pixels waar minder neerslag is gemeten. Hieruit kan men concluderen dat wanneer twee stations ruimtelijk geïnterpoleerd zijn, en men deze representatief acht voor het stroomgebied, dat er dan (in dit geval) een overschatting plaatsvindt van de werkelijke neerslag. Later in het jaar (december) is te zien dat de cumulatieven weer dichterbij elkaar komen, wat erop duidt dat in dit geval de twee stations de neerslag onderschatten.

Wanneer 1 synthetisch station (R4) representatief genomen wordt voor het stroomgebied, dan zien we op jaarbasis een duidelijke overschatting van de neerslag. Het station is één van de twee stations van R6, wat erop duidt dat dit het station is dat zorgt voor de hoge neerslag. Zoals ook zichtbaar was bij het gebruik van twee stations, treedt het verschil op na de zomermaanden.



Figuur 28: Boven: cumulatieve gebiedsneerslag op dag-basis gebaseerd op de neerslagproducten R2, R8, R6, en R4. Onder: per neerslagproduct de geselecteerde pixel met de maximale- en minimale cumulatieve dagneerslag. Voor R4 (één station) is geen



maximale- en minimale cumulatieve dag neerslag, en daarom is één lijn zichtbaar voor de cumulatieve dagneerslag van dit station.

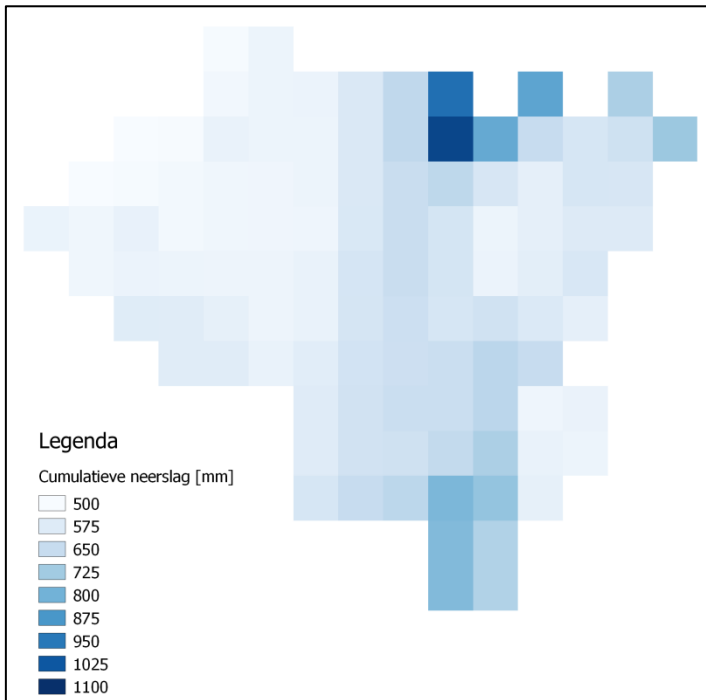
De onderste plot van Figuur 28 laat zien dat de ruimtelijke spreiding het grootst is bij de 250 m en 500 m radarproducten. De variatie in pixelneerslag varieert hierbij van ca. 500 tot ca. 1100 mm op jaarbasis. Dit kan indirect vertaald worden naar de keuze van de plaatsing van een neerslagstation: de plaatsing van één station kan in dit geval een verschil in gemeten neerslag opleveren van $1100 - 500 = 600$ mm op jaarbasis. Dit is een substantieel verschil gezien het feit dat er in Nederland op jaarbasis gemiddeld 800 mm neerslag valt.

Gedurende het grootste gedeelte van het jaar geeft het 250 m radarproduct de grootste ruimtelijke spreiding in gemeten neerslag. Gedurende december – februari lijkt het 500 m radarproduct een grotere maximale neerslag te meten. Dit is mogelijk vanwege het feit dat 500 m pixels (R8) aan de rand van het stroomgebied beïnvloed worden door 250 m pixels buiten het stroomgebied, die net een hogere waarde hebben dan de 250 m pixels (R2) aan de rand die net binnen het stroomgebied vallen.

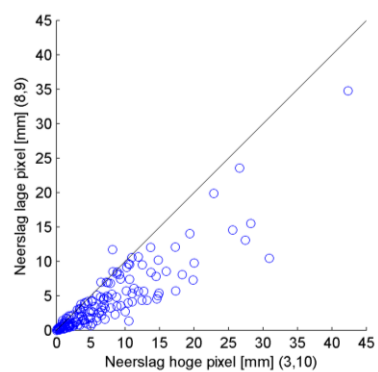
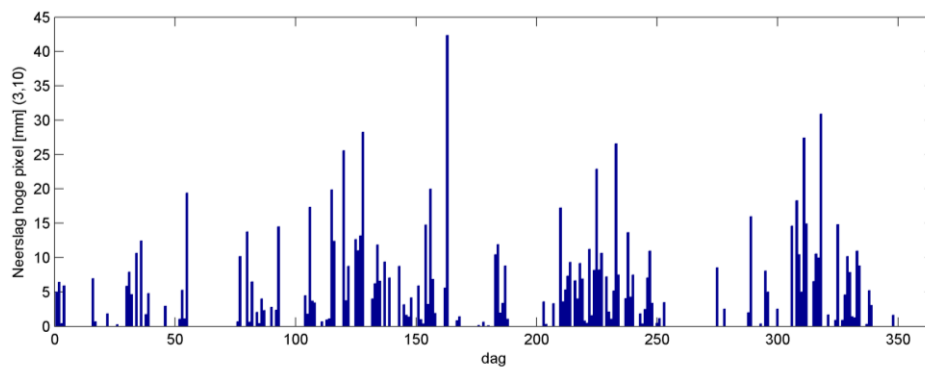
De minimale cumulatieve neerslag van de geïnterpoleerde synthetische stationsdata (R6) en de 250 m en 500 m radarproducten liggen erg dicht bij elkaar. Omdat één van de twee synthetische stations van R6 overeenkomt met het station van R4, is de maximale cumulatieve neerslag van R6 gelijk aan de cumulatieve neerslag van R4. Een vergelijkbaar figuur als Figuur 28 is gemaakt voor de uurlijkse neerslagproducten R1, R3, R5, en R7, en de resultaten waren hetzelfde. Daarom is dit figuur niet weergegeven.

Het verschil van ca. 600 mm op jaarbasis (Figuur 28, onderste plot) tussen de maximale en minimale cumulatieve neerslagpixel is echter niet realistisch voor een klein stroomgebied zoals dat van de Hupselse Beek ($6,5 \text{ km}^2$), met nauwelijks tot geen hoogteverschillen. De extreem hoge neerslagwaarden worden waarschijnlijk veroorzaakt door wat residuele radar clutter op momenten dat het licht of niet regent. Figuur 29 geeft het ruimtelijk patroon weer van de cumulatieve jaarneerslag per pixel. Hieruit blijkt dat het maar om één à twee pixels gaat die zorgen voor deze extreme neerslag. Omdat het maar één à twee pixels betreft, zal dit niet of nauwelijks invloed hebben op de afvoer. Deze pixels zijn daarom “ongecorrigeerd” gelaten voor de verdere analyses in dit rapport. Voor de praktische toepassing van AESA radarproducten wordt echter wel aanbevolen om voorbereid te zijn op dit soort fouten, en hiervoor mogelijk het radarproduct te corrigeren alvorens het in praktijk toe te passen voor hydrologische doeleinden. Om er zeker van te zijn dat de te hoge cumulatieve neerslag in deze pixels niet veroorzaakt wordt door één foute meting, geeft Figuur 30 de dagelijkse neerslag van de pixel met de hoogste cumulatieve neerslag weer, en een scatter-plot waarin de dagelijkse neerslag van deze pixel vergeleken wordt met de neerslag van een representatieve pixel. Hieruit is duidelijk dat de extreme hoge neerslag van deze pixel niet veroorzaakt wordt door één foute meting, en dat de neerslag goed correleert met de neerslag van een representatieve pixel.





Figuur 29: Ruimtelijke variatie van de cumulatieve neerslag per pixel op basis van het 250 m dagelijkse radarproduct.



Figuur 30: Boven: dagelijkse neerslag van pixel met de hoogste cumulatieve jaar som. Onder: Scatter-plot van de dagelijkse neerslag van de pixel met de hoogste vs. de pixel met een representatieve neerslag.

7.1.3 Coefficient of Variation (CV)

Om de ruimtelijke variatie van de verschillende neerslagproducten in kaart te brengen is gebruik gemaakt van de Coefficient of Variation (CV [-]), welke gedefinieerd is als:

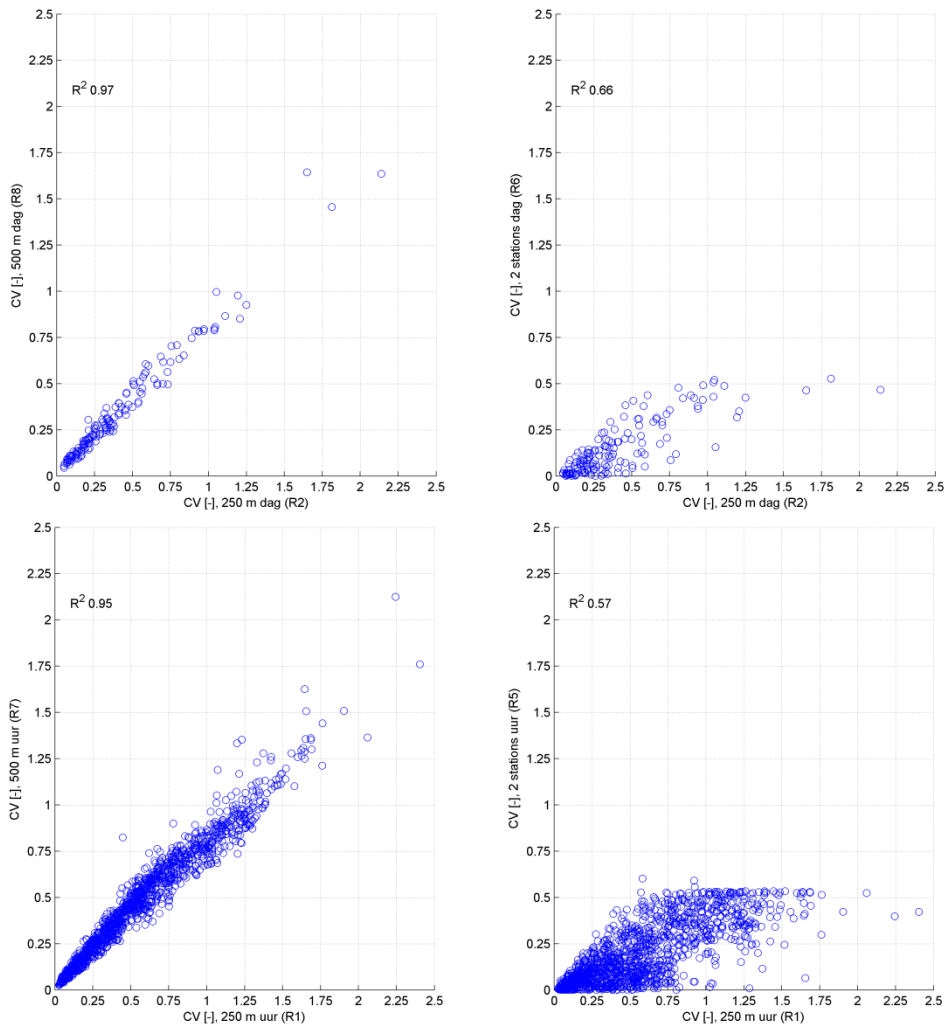
$$CV = \frac{\text{standaard afwijking}}{\text{gemiddelde}}$$

Een hogere waarde voor de CV correspondeert met een grotere (relatieve) ruimtelijke variatie. Voor elke tijdstap in de uurlijkse en dagelijkse neerslagproducten is de CV bepaald over alle pixels. Voor de dagelijkse neerslag producten R2, R6, en R8 resulteert dit in 365 waarden voor de CV. Aangezien er voor de één-stations producten (R3 en R4) geen ruimtelijke variatie is, is de CV voor deze neerslag datasets voor iedere dag 0. Voor de uurlijkse neerslag producten (R1, R5, en R7) resulteert dit in 8760 waarden voor de CV.

Figuur 31 geeft scatter-plots weer met daarin de CVs van de verschillende neerslagproducten. Er is steeds gekeken hoe de CVs van het product met de hoogste ruimtelijke resolutie (250 m, R1 en R2) zich verhouden tot de CVs van de 500 m (R7 en R8) en geïnterpoleerde synthetische stationsproducten (R5 en R6). Uit Figuur 31 (linksboven) blijkt dat de ruimtelijke variatie van het dagelijkse 250 m radarproduct (R2) lichtelijk groter is dan die van het dagelijkse 500 m radarproduct (R8). De producten zijn daarnaast goed gecorreleerd. Gaan we op uur-basis (linksonder) kijken, dan zien we een vergelijkbaar resultaat. Wel zien we dat de ruimtelijke variatie op uur-basis (R1 en R7) groter kan zijn dan wanneer de neerslag geaggregeerd is op dag-basis. Dit zijn ook resultaten die je logischerwijs zou verwachten.

De ruimtelijke variatie van de 250 m radarproducten is slechter gecorreleerd met de geïnterpoleerde producten op basis van de twee stations (R5 en R6). Dit is zichtbaar in de rechterplots van Figuur 31. Het 250 m radarproduct op dag-basis heeft een veel grotere ruimtelijke variatie dan het geïnterpoleerde stationsproduct (rechtsboven). Deze variatie wordt nog groter wanneer er gekeken wordt op uur-basis (rechtsonder).

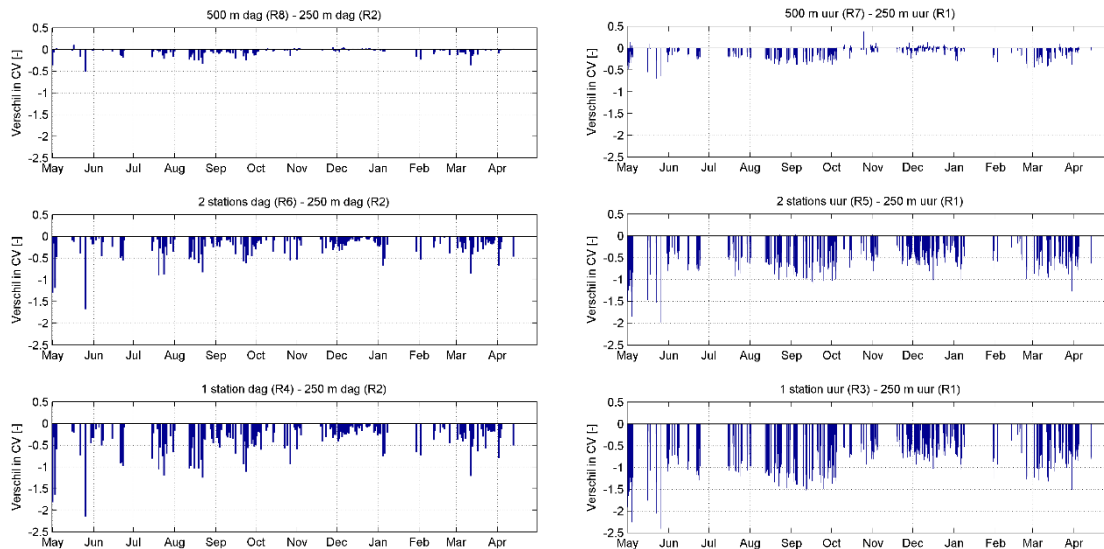




Figuur 31: Boven: scatter-plots voor de Coefficient of Variation (CV) van de 250 m dagneerslag (R2) versus de 500 m dagneerslag (R8), en de geïnterpoleerde neerslag op basis van twee stations (R6). Onder: idem, maar voor de uurlijkse neerslagproducten.

Figuur 32 geeft de verschillen in CV weer tussen de verschillende neerslagproducten gedurende de periode mei 1993 – april 1994. Zoals al gebleken was uit Figuur 31 neemt de ruimtelijke variatie logischerwijs toe als we van punt naar vlak gaan en de ruimtelijke resolutie hoger wordt (van stationsneerslag, naar geïnterpoleerd, naar 500 m radar, naar 250 m radar). Uit Figuur 32 blijkt dat deze toename groter is dan de toename in ruimtelijke variatie als men van dag- naar urneerslag gaat. Vergelijk hiervoor bijvoorbeeld de plots rechtsboven en rechts-midden met elkaar (verschil in ruimtelijke resolutie), en vervolgens de plots links-midden en rechts-midden met elkaar (verschil in temporele resolutie). Tot slot zijn de convectieve buien, die normaliter in de zomer optreden en zorgen voor een hoge variabiliteit in neerslagintensiteit, duidelijker zichtbaar bij de uurlijkse radarproducten. Een hoge variabiliteit als gevolg van de convectieve neerslag resulteert in een hoge CV, wat vooral zichtbaar is tijdens de maanden augustus/september.





Figuur 32: Verschil in Coefficient of Variation (CV) van de verschillende neerslagproducten t.o.v. het 250 m radar product. De plots links laten de verschillen zien tussen de dagelijkse neerslagproducten, en de plots rechts tussen de uurlijkse neerslagproducten.

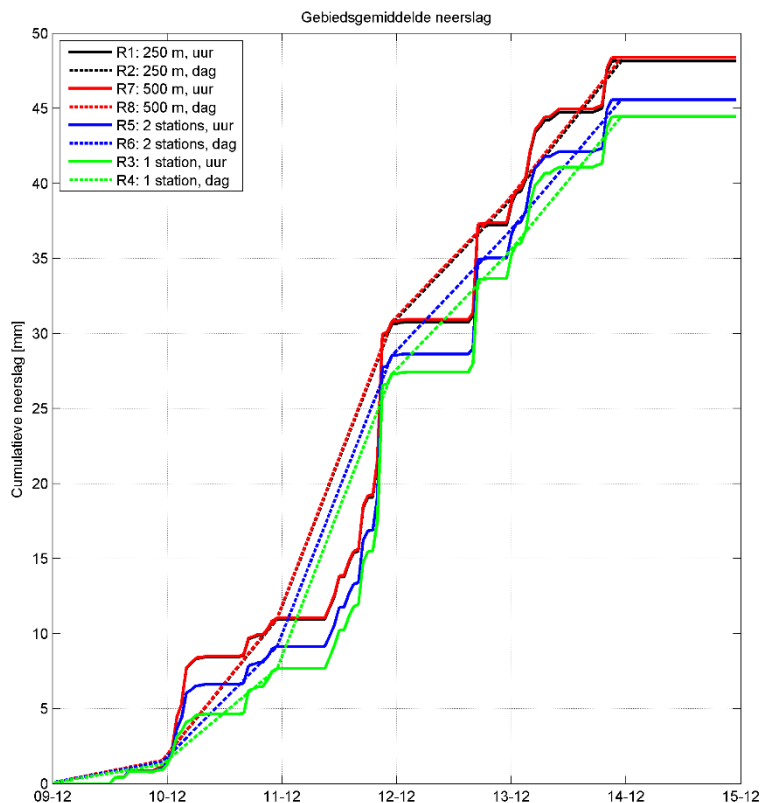
7.1.4 Periode 9-14 december 1993

Uit Figuur 27 bleek dat december 1993 de natste maand was met tevens de hoogst gemeten uurneerslag (8,4 mm). Deze neerslaggebeurtenis vond plaats op 11 december tussen 21:00 en 22:00 uur. Om deze gebeurtenis te analyseren is een periode geselecteerd waarin de eerste bui valt (9 december) tot een dag wanneer het volledig droog is (14 december). Figuur 33 geeft de cumulatieve neerslag van de verschillende neerslagproducten weer voor de periode 9-14 december 1993. Om de dagelijkse neerslagproducten goed met de uurlijkse neerslagproducten te kunnen vergelijken zijn de dagelijkse waarden opgesplitst in 24 homogene eenheden.

Op 11 december zien we de sterkste stijging in de cumulatieve neerslag. Dit geldt voor alle neerslagproducten. De stijging in cumulatieve neerslag is voor de uurlijkse neerslagproducten nagenoeg gelijk. De hogere cumulatieve neerslag van de 250 m en 500 m neerslagproducten wordt veroorzaakt door een neerslaggebeurtenis op 10 december waarbij deze twee producten meer neerslag meten dan de overige producten.

Als er alleen gebruik gemaakt zou worden van dagelijkse neerslagproducten, dan weet men niet hoeveel neerslag er per uur gevallen zou zijn. Daarom is aangenomen dat de dagneerslag in 24-uurlijkse gelijke hoeveelheden valt. Dit betekent dat we een lineaire lijn zien voor de dagelijkse neerslagproducten. De uurlijkse producten laten in dit geval zien dat de eerste helft van de dag van 11 december droog is, waarna het vervolgens begint te regenen en dat de meeste regen tussen 21:00 en 22:00 uur valt. Interessant is om te zien dat de cumulatieve som op 14 december het hoogst is voor de 250 m en 500 m radar, gevolgd door het geïnterpoleerde product en tot slot het één-stations product. Op jaarbasis was namelijk te zien dat het één-stations product de hoogste cumulatieve neerslag gaf.





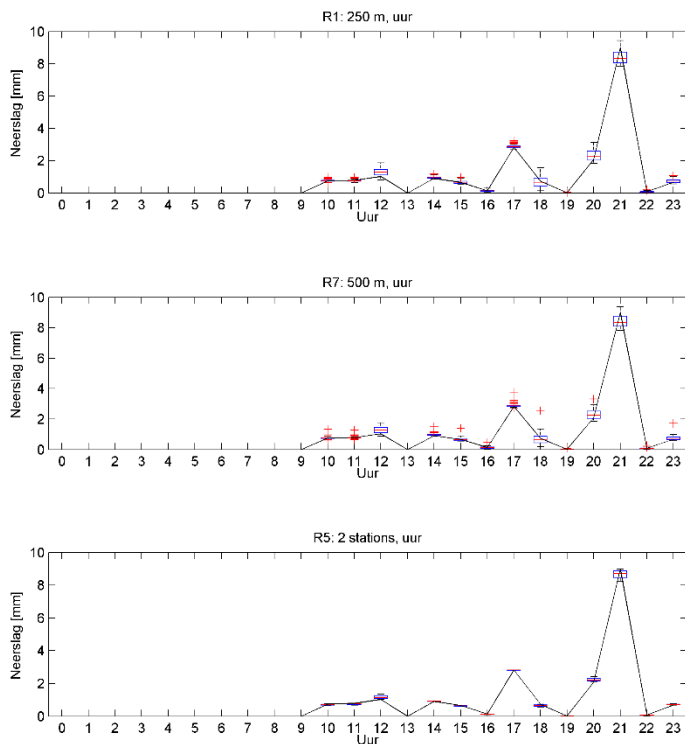
Figuur 33: Cumulatieve gebiedsgemiddelde neerslag voor de Hupselse Beek gedurende de periode 9 december 1993 t/m 14 december 1993. De dagelijkse neerslagwaarden van de neerslagproducten R2, R8, R6, en R4 zijn per dag gedeeld door 24 om ze te kunnen vergelijken met de uurlijkse neerslagproducten.

7.1.5 11 december 1993

Om de ruimtelijke spreiding van de verschillende uurlijkse neerslagproducten in beeld te brengen voor de neerslaggebeurtenissen op 11 december, geeft Figuur 34 voor elk product per uur de ruimtelijke spreiding weer in een boxplot. Aangezien het één-stations product geen ruimtelijke spreiding kent, is de zwarte lijn representatief voor dit station.

De verschillen in ruimtelijke spreiding van de radarproducten en het geïnterpoleerde product t.o.v. het één-stationsproduct zijn minimaal. Wel is te zien dat de 250 m en 500 m radar voor een iets grotere ruimtelijke spreiding zorgen dan de geïnterpoleerde neerslag. Daarnaast heeft de 500 m radar meer extremen dan de 250 m neerslagradar.

Aangezien de dagelijkse neerslagproducten geen uur-waarden geven, is de uur-waarde voor elk dagelijks neerslagproduct berekend door de dagwaarde te delen door 24. De ruimtelijke spreiding van deze uur-waarden is nihil en voor alle producten vergelijkbaar. Daarom zijn deze resultaten niet weergegeven.



Figuur 34: Boxplots van de uurlijkse neerslagproducten R1, R7 en R5 voor de Hupselse Beek gedurende 11 december. De zwarte lijn is de neerslag gemeten door het station (R3).

7.2 Effecten op de afvoer

Kort samengevat komt uit de analyse van de verschillende radarproducten naar voren dat er nauwelijks tot geen verschil is tussen de 500 m en 250 m radarproducten, en dat het gebruik van een geïnterpoleerd neerslagbeeld op basis van twee synthetische stations in dit geval een lichte overschatting geeft van de gebiedsneerslag, en het gebruik van één synthetisch station een flinke overschatting van de gebiedsgemiddelde neerslag (Figuur 28). Uiteraard hangt dit volledig af van de random keuze van de pixel die dienst doet als synthetisch station; of zoals in de werkelijkheid, de random keuze van het plaatsen van een meteo-station. Als men dus moet kiezen tussen een radarproduct of het gebruik van één station, dan heeft een radarneerslagbeeld duidelijk de voorkeur.

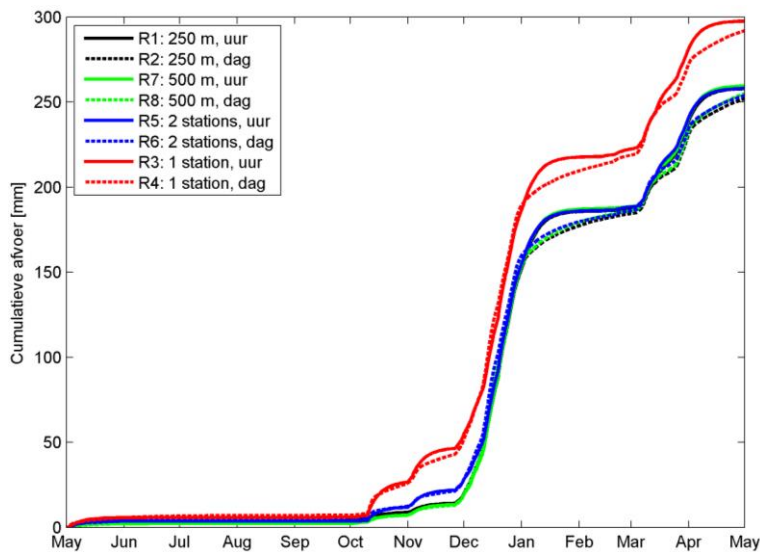
In deze paragraaf zijn de effecten van het gebruik van de verschillende neerslagproducten op de afvoer van de Hupselse Beek onderzocht. Om de afvoer uit het uurlijkse SPHY-model te kunnen vergelijken met de afvoer uit het SPHY-model dat werkt op dag-basis, zijn de afvoeren van het SPHY-model dat draait op dag-basis geconverteerd naar uurlijkse afvoeren door ze te delen door 24.

7.2.1 Cumulatieve afvoer

Figuur 35 geeft voor het Hupselse Beek stroomgebied de cumulatieve afvoer weer voor de periode mei 1993 – april 1994. Dit zijn de afvoeren die gegenereerd zijn door de verschillende neerslagproducten. De 250 m en 500 m radarproducten en het geïnterpoleerde neerslagproduct (R5 en R6) resulteren in ongeveer dezelfde cumulatieve jaarafvoer (+/- 250 mm). Het is duidelijk dat het gebruik van één synthetisch neerslagstation (R3 en R4) resulteert in de hoogste cumulatieve jaarafvoer (+/- 300 mm). Deze resultaten zijn in lijn met de hogere



cumulatieve neerslag die gemeten wordt door het ene synthetische neerslagstation (R1 en R2, Figuur 28).

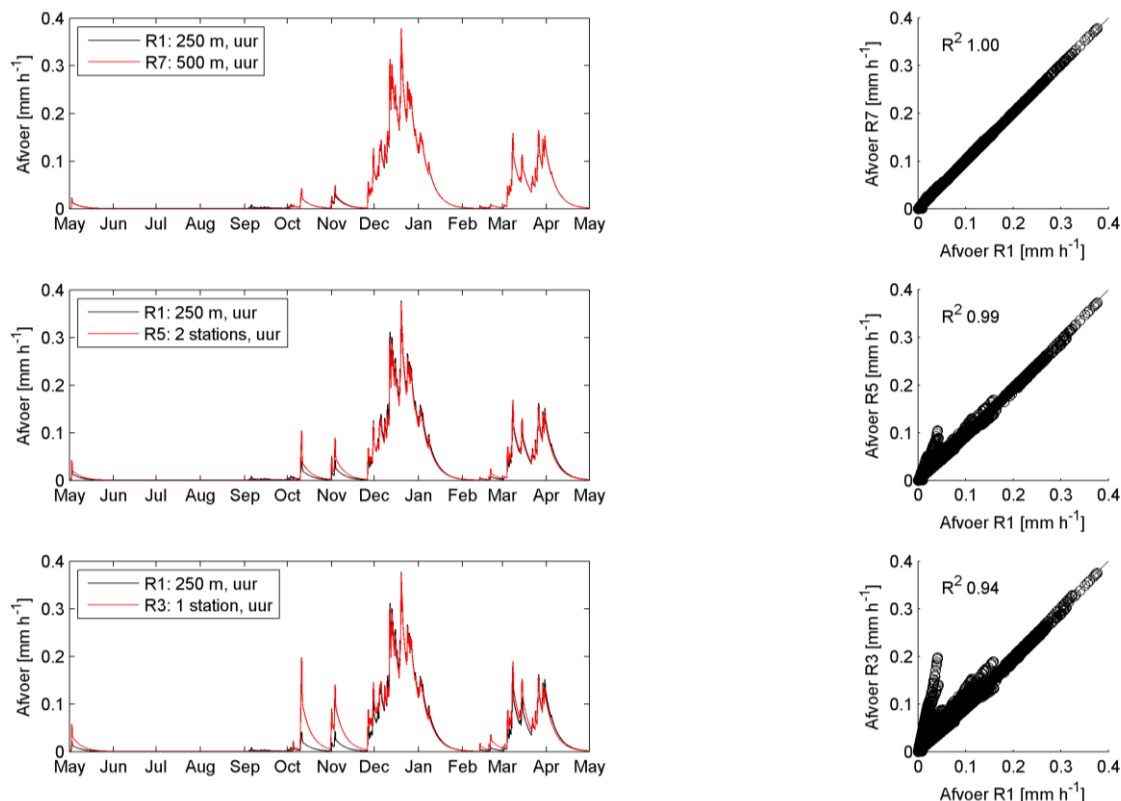


Figuur 35: Cumulatieve afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende radarproducten.

7.2.2 *Tijdreeksen afvoer*

Naast de totale jaarafvoer is het interessant om te analyseren hoe de afvoer zich door de tijd heen gedraagt onder invloed van de verschillende neerslagproducten. Figuur 36 geeft afvoertijdreeksen weer voor het Hupselse Beek stroomgebied voor de periode mei 1993 – april 1994. Aangezien het uurlijkse 250 m radarproduct (R1) het meest nauwkeurige (“realistische”) product is, zijn de afvoeren die het gevolg zijn van dit neerslagproduct vergeleken met de afvoeren van de andere uurlijkse neerslagproducten.

Het is duidelijk dat de verschillen in ruimtelijke resolutie tussen het 250 m en 500 m radarproduct geen afwijkend afvoerpatroon tot gevolg hebben. Zowel de grootte als de timing van de afvoerpieken zijn bij het gebruik van deze radarproducten nagenoeg gelijk. Het geïnterpoleerde neerslagproduct (op basis van twee synthetische stations, R5) levert een lichte overschatting op van de afvoer gedurende oktober – november. Deze overschatting is substantieel groter wanneer we de afvoer bekijken die gegenereerd wordt op basis van de neerslag van één synthetisch station (R3).

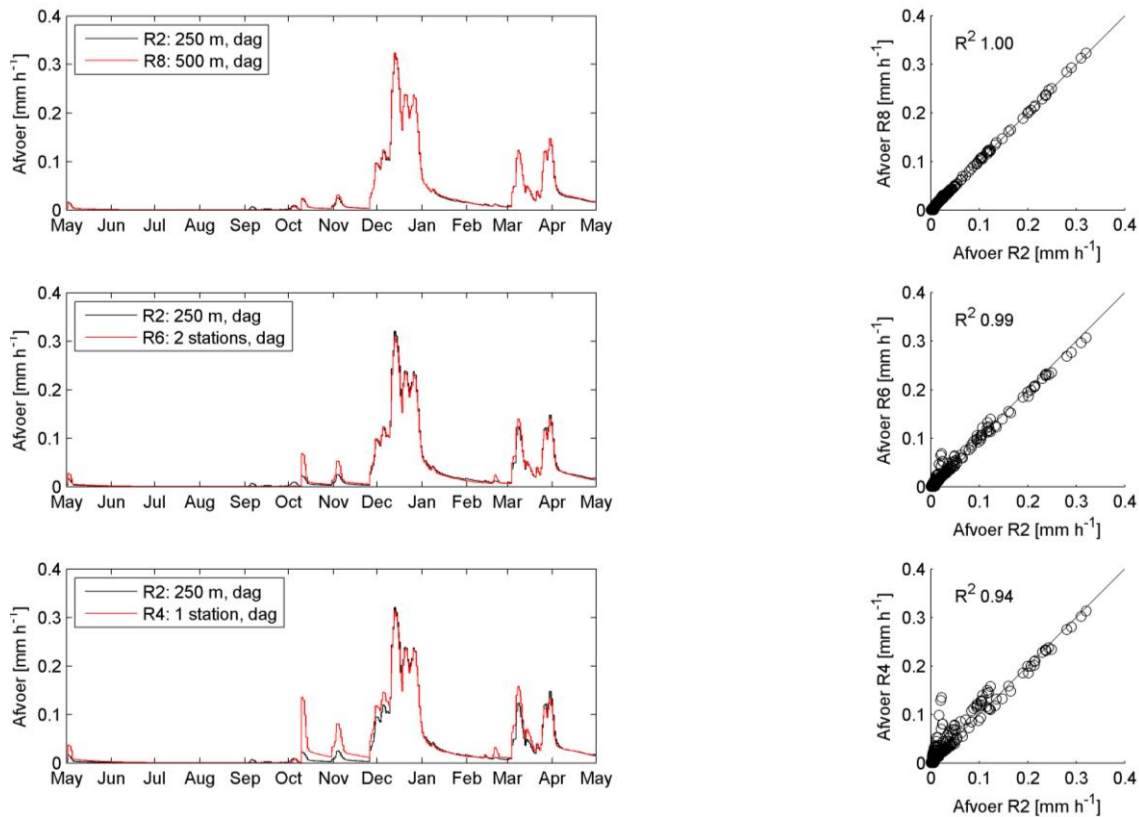


Figuur 36: Links: uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende uurlijkse radarproducten. Rechts: scatter-plots van afvoeren gegenereerd door de verschillende uurlijkse radarproducten.

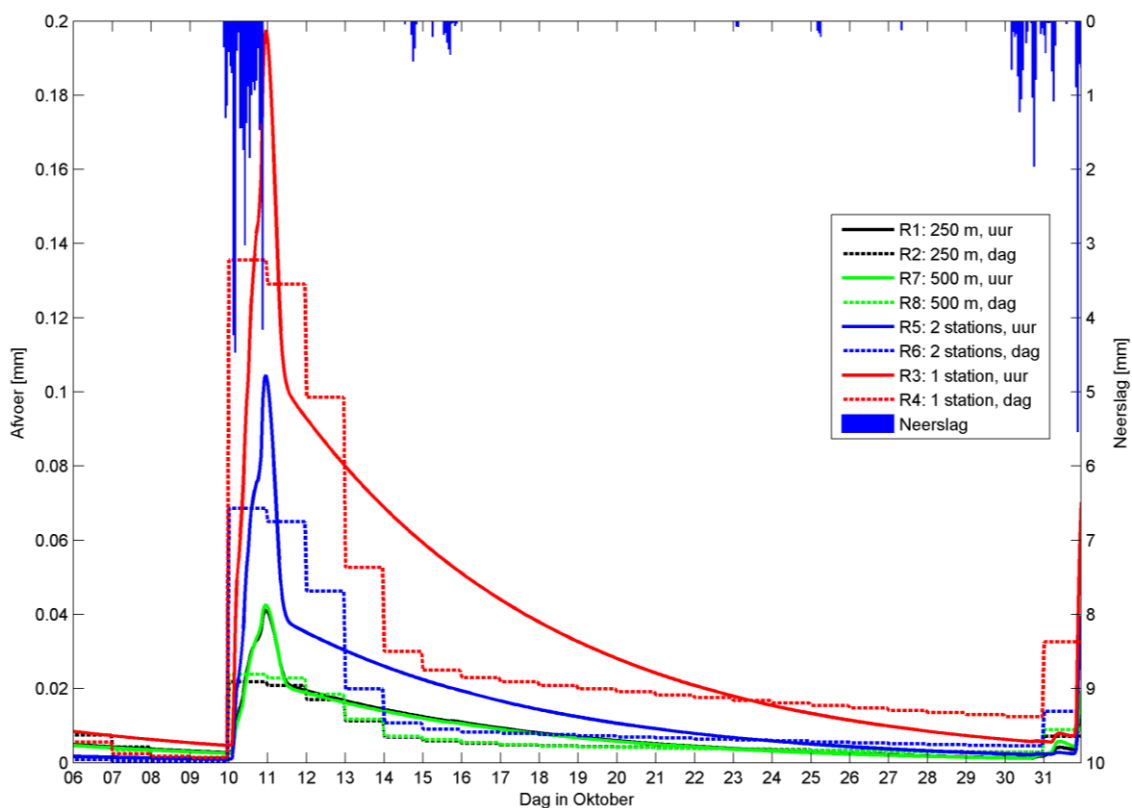
Een vergelijkbare analyse voor de dagelijkse neerslagproducten is gedaan in Figuur 37. Het is duidelijk dat de verschillen in ruimtelijke resolutie tussen de dagelijkse neerslagproducten dezelfde resultaten opleveren als de verschillen in ruimtelijke resolutie tussen de uurlijkse neerslagproducten: het gebruik van de 250 m en 500 m radarproducten levert een vergelijkbaar afvoerpatroon op, terwijl het geïnterpoleerde product resulteert in een lichte overschatting van de afvoer, en de neerslag van één station de afvoer flink overschat gedurende de periode oktober – november.

Belangrijk om te melden is dat de verschillen tussen Figuur 36 en Figuur 37 deels te wijten zijn aan de verschillen in temporele- en ruimtelijke resolutie van de invoer (neerslag), maar ook aan de verschillen tussen het uurlijkse- en dagelijkse SPHY-model. Behalve de verschillen in pieken zie je namelijk ook verschillen in het recessieverloop.





Figuur 37: Links: uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gegenereerd door de verschillende dagelijkse radarproducten. Rechts: scatter-plots van afvoeren gegenereerd door de verschillende dagelijkse radarproducten.



Figuur 38: Uurlijkse afvoer voor de Hupselse Beek gedurende een aantal dagen in oktober 1993, gegenereerd door de verschillende radarproducten.



Omdat de vorige figuren voor het neerslagstationproduct een overschatting van de afvoer lieten zien gedurende oktober, geeft Figuur 38 voor alle neerslagproducten het afvoerverloop in de Hupselse Beek weer, gedurende een aantal dagen in oktober 1993. Omdat de dagelijkse afvoeren geconverteerd zijn naar uurlijkse afvoeren, en hierdoor voor elk uur binnen dezelfde dag een homogene waarde hebben, zien deze er trapsgewijs uit. Omdat het uurlijkse 250 m radarproduct het meest nauwkeurige neerslagproduct is, is ervoor gekozen om deze neerslag weer te geven.

Op 10 oktober 1993 regent het bijna gedurende de hele dag, waarbij de hoogst gemeten neerslagintensiteit 4,5 mm/uur is. Dit figuur laat duidelijk de substantiële overschatting van de afvoer zien die het resultaat is van het gebruik van één neerslagstation (R3 en R4): het uurlijkse neerslagstation leidt tot een maximale afvoer van bijna 0,2 mm/uur, terwijl het 250 m radarproduct resulteert in een afvoer van maximaal 0,04 mm/uur. Het 250 m en 500 m radarproduct resulteren qua volume en timing in eenzelfde afvoerpatroon. Behalve het neerslagstation zorgt ook het geïnterpoleerde product op basis van twee stations voor een overschatting van de afvoer, hoewel in mindere mate.

Naast de verschillen in afvoervolumes, laat Figuur 38 ook duidelijk temporele verschillen zien. Wanneer men namelijk gebruik maakt van dagelijkse neerslagproducten (R2, R4, R6, en R8), weet men niet wanneer een bui valt. Mogelijk regent het de hele dag door, maar het kan ook zijn dat alle neerslag binnen één of twee uur valt. Hierdoor kan geen temporele variatie in het neerslagpatroon worden waargenomen. Een oplossing die dan mogelijk is, is de dagelijkse neerslag te verdelen in 24 homogene uurlijkse neerslaghoeveelheden. Een andere mogelijkheid is gebruik makend van een "Stochastic Weather Generator", maar hiervoor is wel informatie nodig over de uurlijkse verdeling. Deze moet dan komen van hetzelfde station gedurende een andere tijdsperiode, of uurlijkse data van een neerslagstation in de omgeving. Het nadeel van een homogene verdeling is, zoals blijkt uit de gestippelde lijnen in Figuur 38, dat de afvoer gedurende de dag homogeen is en je hierdoor dus niet weet op welk tijdstip je de piekafvoer kan verwachten. In werkelijkheid treedt de piekafvoer (zwarte lijn Figuur 38) namelijk pas op aan het einde van de dag op 10 oktober 1993. De hoogte van de piek is in werkelijkheid ook hoger dan wanneer de afvoer op dag-basis homogeen verdeeld wordt over 24 uurlijkse tijdstappen (vergelijk stippellijn met continue lijn).



8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Thales Nederland is wereldwijd leverancier voor AESA sensoren. AESA sensoren zijn opgebouwd uit duizenden zend- en ontvangstmodules waarmee snel bewegende objecten tot op honderden kilometers afstand gedetecteerd en onderschept kunnen worden. Wanneer AESA sensoren compacter en lichter kunnen worden gebouwd, komen nieuwe applicatiegebieden binnen handbereik. Het doel van deze studie was daarom om de toegevoegde waarde van hoge resolutie neerslag radar, die gebruik maakt van AESA sensoren, voor het waterbeheer te onderzoeken.

Om deze vraag te beantwoorden zijn verschillende neerslag(radar)producten met elkaar vergeleken, en gebruikt als input voor een hydrologisch model. Vervolgens is gekeken wat voor een effect het gebruik van deze neerslagproducten heeft op de afvoer van een klein (6,5 km²) stroomgebied in Nederland (dat van de Hupselse Beek). De volgende neerslag(radar)producten zijn met elkaar vergeleken:

- Eén synthetisch neerslagstation, op uur- en op dag-basis;
- Twee synthetische neerslagstations ruimtelijk geïnterpoleerd, op uur- en op dag-basis;
- 500 m resolutie neerslagradar, op uur- en op dag-basis;
- 250 m resolutie neerslagradar, op uur- en op dag-basis;

Er kan geconcludeerd worden dat wanneer er naar gebiedsgemiddelde neerslag gekeken wordt, het gebruik van één neerslagstation op jaarbasis een substantiële overschatting kan geven (ca. 70 mm) in tegenstelling tot de andere producten. Mocht het station op een andere locatie gestaan hebben, dan had dit ook kunnen resulteren in een flinke onderschatting. Het gebruik van radar biedt hier dus duidelijk meerwaarde. De verschillen in berekende afvoeren tussen de 250 m en 500 m radarproducten zijn minimaal. Ook het verschil tussen deze twee radarproducten en het geïnterpoleerde product op basis van twee neerslagstations is relatief klein, al resulteert de laatste wel in een lichte overschatting van de gebiedsneerslag. Uiteraard hangt dit resultaat volledig af van de toevallige keuze van de locatie van de neerslagstations, en geeft het gebruik van een radarproduct dus een veel betere afvoerschatting. Gezien de relatief kleine oppervlakte van het studiegebied, is dit een verrassend resultaat.

Als er gekeken wordt naar de ruimtelijke variatie van de neerslag in het stroomgebied, dan zien we een sterke ruimtelijke variatie voor het 250 m en 500 m neerslagproduct; op jaarbasis kan de neerslag van zowel het 250 m als het 500 m radarproduct tussen pixels in een stroomgebied zoals dat van de Hupselse Beek variëren tussen de 500 en 1100 mm. Dit verschil van 600 mm is onrealistisch voor een stroomgebied met de grootte van dat van de Hupselse Beek, met nauwelijks tot geen hoogteverschillen, en het zal onderzocht moeten worden waardoor deze afwijking ontstaan is. Deze ruimtelijke verschillen geven wel aan hoe cruciaal het is om de locatie van een neerslagstation goed te kiezen, en om niet één, maar meerdere neerslagstations te plaatsen. Verder bleek dat de ruimtelijke variatie van het 250 m en 500 m radarproduct nagenoeg aan elkaar gelijk zijn, zowel op uur- als op dag-basis, en dat de ruimtelijke variatie toeneemt naarmate de ruimtelijke resolutie hoger wordt. Hetzelfde geldt bij een kleinere temporele resolutie (van dag- naar uur-basis). Tot slot komen de convectieve



buien, die kenmerkend zijn voor neerslag in de zomer, beter tot uiting in de uurlijkse radarproducten dan in de dagelijkse radarproducten.

Wanneer de jaarafvoeren die het resultaat zijn van de verschillende neerslagproducten onderling vergeleken worden, dan resulteert het gebruik van één synthetisch neerslagstation in een overschatting van de afvoer van ca. 50 mm op jaarbasis (15-20% van gemiddelde jaarlijkse afvoer). De jaarafvoeren die het resultaat zijn van de geïnterpoleerde stationsneerslag en de radarproducten zijn nagenoeg aan elkaar gelijk. Met andere woorden, voor het berekenen van de jaarlijkse afvoer had een radarproduct dus geen meerwaarde t.o.v. een geïnterpoleerd product op basis van twee neerslagstations voor deze toevallige keuze van de twee synthetische neerslagstations. Keuze van andere pixels als synthetische neerslagstations zou tot een andere conclusie kunnen leiden.

Als de afvoerdynamiek in de tijd bekeken wordt, dan zien we dat de gesimuleerde afvoer op basis van de 250 m en 500 m radarproducten (zowel op uur- als op dag-basis) nauwelijks tot niet van elkaar verschillen. Het gebruik van de geïnterpoleerde stationsneerslag levert in oktober-november een overschatting van de afvoer op, en de neerslag van één station resulteert in dezelfde periode in een flinke overschatting van de afvoer. Als een afvoergebeurtenis in oktober in detail bekeken wordt (10 oktober), dan geeft de afvoer in werkelijkheid een piek aan het einde van de dag. Dit komt tot uiting bij alle uurlijkse neerslagproducten. Bij de dagelijkse neerslagproducten is niet bekend op welk tijdstip van de dag de neerslag valt, waardoor de resulterende afvoer gedurende de hele dag gelijk is. Wanneer men dus geïnteresseerd is in het verloop van de afvoerdynamiek binnen 24 uur, dan heeft het gebruik van neerslagproducten met een hogere temporele resolutie duidelijk meerwaarde. Voor het waterbeheer betekent dit dat de radarproducten met name geschikt zijn voor toepassing in tijden van (naderend) hoogwater, waarbij een correcte schatting van afvoeren, waterhoogten en reactietijden en nauwkeurige voorspellingen in ruimte en tijd relevant zijn.

8.2 Aanbevelingen

Radarinformatie met een resolutie van 250 m biedt meerwaarde boven het hebben van een enkel neerslagstation binnen het 6,5 km² stroomgebied van de Hupselse Beek. Deze studie heeft aangetoond dat het gebruik van 250 m t.o.v. 500 m resolutie radar voor een klein stroomgebied in Nederland, dat nauwelijks tot geen hoogteverschillen kent, geen toegevoegde waarde heeft. Het is daarom aan te bevelen om een vergelijkbare studie uit te voeren voor stroomgebieden die groter zijn qua omvang, en die daarmee grotere ruimtelijke verschillen in weersituaties te zien geven, al dan niet veroorzaakt door maaiveld-hoogteverschillen, waardoor neerslagpatronen lokaal erg dynamisch kunnen zijn. Mogelijk heeft dan het hebben van hogere resolutie neerslagradar wel een toegevoegde waarde.

De geïnterpoleerde neerslag op basis van twee synthetisch stations levert een afvoerpatroon op dat de afvoer van de 250 m en 500 m radarproducten goed benadert. De random keuze van de pixels die diende als synthetische stations was dus uitermate representatief. Een interessante vervolgvraag is daarom om te onderzoeken hoeveel stations nodig zijn om tot een vergelijkbaar afvoerpatroon te komen, zoals dat behaald wordt met de 250 m en 500 m radarproducten. Deze vraag zal dan ook voor stroomgebieden met verschillende omvang en grotere hoogteverschillen onderzocht moeten worden. Ook zou interessant zijn om te onderzoeken wat de invloed van de random keuze van één of meerdere stationslocaties is.



Deze studie heeft aangetoond dat er een enorme ruimtelijke variatie kan bestaan tussen de jaarlijkse neerslagsommen van de individuele radarpixels. Dit geeft aan dat de keuze van de locatie van een neerslagstation al voor kleine stroomgebieden cruciaal is, en dat één station onvoldoende is om het neerslagbeeld goed in beeld te brengen. Een verschil van ca. 600 mm op jaarbasis tussen individuele radarpixels is echter onrealistisch. Daarom wordt aanbevolen om de conversie van het radarsignaal naar een neerslagintensiteit goed te onderzoeken, de kwaliteit ervan te borgen, en mogelijk te corrigeren alvorens het radarproduct gebruikt wordt voor afvoersimulaties.



9 Referenties

- Brauer, C.C., A.J. Teuling, A. Overeem, Y. van der Velde, P. Hazenberg, P.M.M. Warmerdam, and R. Uijlenhoet. 2011. Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 1991-2005, doi:10.5194/hess-15-1991-2011.
- Doherty, J. 2005. PEST. Model-Independent Parameter Estimation. User Manual: 5th Edition. Watermark Numerical Computing.
- Droogers, P., and W.W. Immerzeel. 2010. What is the best model? *H2O Tijdschr. voor Watervoorzien. en waterbeheer*, 4, 38–41.
- De Vries, F. 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Staring Centrum Rapport 654. Wageningen.
- Hazeu, G.W. 2005. Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5). Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Alterra-rapport 1213. Wageningen.
- Immerzeel, W.W., L.P.H. van Beek, M. Konz, A.B. Shrestha, and M.F.P. Bierkens. 2011. Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas. *Clim. Change*, 110, 721–736, doi:10.1007/s10584-011-0143-4.
- Karssenberg, D., P. Burrough, R. Sluiter, and K. de Jong. 2001. The PCRASTER software and course materials for teaching numerical modelling in the environmental sciences. *Trans. GIS*, 5, 99–110, doi:10.1111/1467-9671.00070.
- Karssenberg, D., O. Schmitz, P. Salamon, K. de Jong, and M. F. P. Bierkens. 2010. A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environ. Model. Softw.*, 25(4), 489–502, doi:10.1016/j.envsoft.2009.10.004.
- Lutz, A.F., P. Droogers, and W.W. Immerzeel. 2012. Climate Change Impact and Adaptation on the Water Resources in the Amu Darya and Syr Darya River Basins. *FutureWater Report 110*.
- Lutz, A.F., W.W. Immerzeel, A. Gobiet, F. Pellicciotti, and M. F. P. Bierkens. 2013. Comparison of climate change signals in CMIP3 and CMIP5 multi-model ensembles and implications for Central Asian glaciers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(9), 3661–3677, doi:10.5194/hess-17-3661-2013.
- Lutz, A.F., W.W. Immerzeel, A.B. Shrestha, and M.F.P. Bierkens. 2014. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nat. Clim. Chang.*, 4, 587–592, doi:10.1038/NCLIMATE2237.
- Makkink, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Wat. Engrs*, 11, 277-288.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.
- Nemes, A., J.H.M. Wösten, A. Lilly, J.H. Oude Voshaar. 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90(3-4), 187-202.
- NHI. 2008. Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI Modelrapportage. Deelrapport landgebruik.
- NHI. 2008a. Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI Modelrapportage. Deelrapport bodem.
- Sassi, M.G., H. Leijnse, R. Uijlenhoet. 2014. Sensitivity of power functions to aggregation: Bias and uncertainty in radar rainfall retrieval. *Water Resour. Res.*, 50, doi:10.1002/2013WR015109.



- Sperna Weiland, F.C., L.P.H. Van Beek, J.C.J. Kwadijk, and M.F.P. Bierkens. 2012. Global patterns of change in discharge regimes for 2100. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1047–1062, doi:10.5194/hess-16-1047-2012.
- Terink, W., A.F. Lutz, G.W.H. Simons, W.W. Immerzeel, P. Droogers. 2015. SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 1687-1748, doi:10.5194/gmdd-8-1687-2015, 2015.
- Terink, W., A.F. Lutz, W.W. Immerzeel. 2014. SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology. Model theory and SPHY interface (v1.0) manual. FutureWater Report 131.
- Terink, W., J. Van Leuken, P. Droogers, A. Swart, and W. Van Der Hoek. 2012. “Spatial Processes in Hydrology” (SPHY) – Bodemvocht bepaling ter ondersteuning van analyse Q-koorts transmissie risico. FutureWater Rapport 122.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk, C.A. van Diepen. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Department Water Resources, Wageningen Agricultural University
- Van de Beek, C.Z., H. Leijnse, J.N.M. Stricker, R. Uijlenhoet, H.W.J. Russchenberg. 2010. Performance of high-resolution X-band radar for rainfall measurement in The Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 205-221, doi:10.5194/hess-14-205-2010.
- Van der Velde, Y., G.H. de Rooij, and P.J.J.F. Torfs. 2009. Catchment-scale non-linear groundwater-surface water interactions in densely drained lowland catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1867–1885, doi:10.5194/hess-13-1867-2009.
- Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom, A.F. van Holst. 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de Bodemkaart van Nederland, 1:250.000, ten behoeve van de Pawnstudie.



Appendix 1: Overzicht van eenheden op basis van bodemopbouw

Code bodem-opbouw	Omschrijving	Opmerkingen	Opeenvolgende bouwstenen Staringreeks
1	Veraarde bovengrond op diep veen		B18,O17
2	Veraarde bovengrond op veen op zand	Combinatie van veengronden en moerige gronden met zandondergrond. Associaties van moerige gronden en zandgronden vertaald naar zandgronden	B16,O17,O2
3	Kleidek op veen		B11,O17
4	Kleidek op veen op zand	Combinatie van veengronden en moerige gronden met kleidek en zandondergrond. Associaties van moerige gronden en zandgronden vertaald naar klei op zand (19)	B11,O17,O2
5	Zanddek op veen op zand	Combinatie van veengronden en moerige gronden met zanddek en zandondergrond. Associaties moerig en zand vertaald naar zand.	B2,O16,O2
6	Veen op ongerijpte klei	Combinatie van veengronden en moerige gronden met een kleiondergrond. Bij deze gronden kan het veen zowel als toplaag (Wo, Vk) en als tussenlaag (kVk, pVk) voorkomen. Associaties van moerige gronden met kleigronden zijn vertaald naar een kleigrond.	B18,O12
7	Stuifzand	Tot deze groep behoren de landduinen en de kustduinen, inclusief de stranden enz. Deze gronden hebben een laag leemgehalte en de humeuze bouwvoor ontbreekt veelal (Zd. en Zn.A)	O1
8	Leemarm zand	Hier gaat het vooral om de jonge dekzandruggen en om de uitgestoven laagtes temidden van landduinen. Deze gronden hebben wel een toplaag (Hd21, Y21 en Zn21)	B1,O1
9	Zwaklemig fijn zand	Met name de zwaklemige zandgronden (Hn21, pZn21, pZg21, enz.)	B2,O2
10	Zwaklemig fijn zand op grof zand	Zandgronden met grind of grof zand in de ondergrond. In de bovenlaag vooral zwak lemig, soms ook lemiger.	B2,O2,O5
11	Sterk lemig fijn zand op (kei-)leem	Zandgronden met keileem en of lössleem in de ondergrond (.x, ..t). In de bovenlaag vooral sterk lemig zand, soms ook minder lemig.	B3,O2,O6
12	Enkeerdgronden (fijn zand)	Enkeerdgronden, gronden met een dikke eerdlaag (> 50 cm), zowel lemig als zwak lemig en leemarm. Gronden met een matig dikke eerdlaag (cHn, cY..) ingedeeld op basis van leemgehalte.	B2,O2
13	Sterk lemig zand	Lemige zandgronden	B3,O3,O2
14	Grof zand	Alle grofzandige gronden	B1,O5
15	Zavel met homogeen profiel		B8,O9
16	Lichte klei met homogeen profiel		B10,O10
17	Klei met zware tussenlaag of ondergrond		B12,O13
18	Klei op veen	Begindiepte veenondergrond 40 – 120 cm-mv.	B12,O13,O17
19	Klei op zand	Begindiepte zandondergrond 25 – 80 cm-mv.	B8,O10,,O2
20	Klei op grof zand	Begindiepte grofzandige ondergrond 25 – 120cm-mv..	B8,O10,O5
21	Leem	Alle leemgronden, inclusief keileemgronden (KX en KT)	O15

(Bron: NHI, 2008a).

