

SPHY – Een hydrologisch model gericht op de berekening van bodemvocht in de wortelzone en de actuele verdamping

Augustus 2012

Auteur

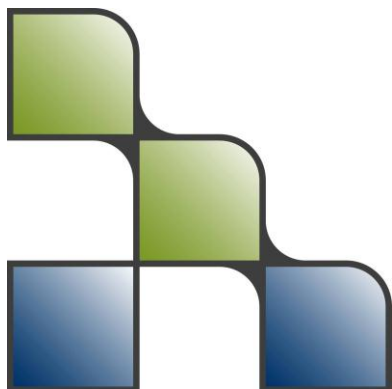
Wilco Terink

Peter Droogers

Walter Immerzeel

Gé van den Eertwegh

Report FutureWater: 115



FutureWater

Costerweg 1V
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doelstelling	5
2	Welk model voor welke toepassing?	6
2.1	Nederland en hydrologische modellen	6
2.2	Modelkeuze en SPHY	6
3	SPHY –concept en vergelijkingen	9
3.1	Model concept	9
3.2	Runoff	10
3.3	Actuele verdamping	10
3.4	Drainage	11
3.5	Percolatie	12
3.6	Capillaire opstijging	13
3.7	Kwel en wegzijging	13
3.8	Parameterisatie	14
4	Data	15
4.1	Neerslag	15
4.2	Referentie verdamping volgens Makkink	16
4.3	Landgebruik	17
4.4	Bodemkaart	18
4.5	Hoogtekaart	20
4.6	Kwel en wegzijging	21
4.7	Actuele gemeten verdamping	22
4.8	Gemeten bodemvocht gehalte	23
5	Resultaten	25
5.1	Kalibratie	25
5.2	Validatie	28
5.3	Ruimtelijke resultaten	31
6	Conclusies en aanbevelingen	34
6.1	Conclusies	34
6.2	Aanbevelingen	34
7	Referenties	36



Tabellen

Tabel 1: SPHY model parameters.....	14
Tabel 2: Meet dieptes van DACOM bodemvocht sensoren per meetlocatie.	24
Tabel 3: SPHY kalibratie parameters voor en na de kalibratie.	25
Tabel 4: Totale gemeten verdamping en gesimuleerde verdamping van het gekalibreerde SPHY model. De afwijking is de afwijking in percentage t.o.v. de gemeten verdamping. De Root-Mean-Square-Error (RMSE) geeft de error in mm per maand over die periode.	26
Tabel 5: Geselecteerde DACOM bodemvocht sensoren voor validatie bodemvocht simulatie.	29

Figuren

Figuur 1: Indeling van modellen met enkele willekeurig gekozen modelnamen (Droogers en Perry, 2008).....	7
Figuur 2: Modelconcept van SPHY (Spatial Processes in HYdrology).	10
Figuur 3: Voorbeeld van een geïnterpoleerd KNMI dag neerslagbeeld.	16
Figuur 4: Neerslagstations gebruikt voor interpolatie (Soenario en Sluiter, 2010).	16
Figuur 5: Voorbeeld van een geïnterpoleerd Makkink ET_{ref} beeld op dagbasis.	17
Figuur 6: Landgebruik in SPHY volgens LGN-grid en LGN-gewassenbestand (Hazeu, 2005; NHI, 2008).	18
Figuur 7: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).	20
Figuur 8: Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) op een resolutie van 250 m.	21
Figuur 9: Kwel en wegzijging op dagbasis volgens STONE. Positief is kwel, negatief is wegzijging.	22
Figuur 10: Overzicht geselecteerde locaties waar de actuele verdamping gemeten is.	23
Figuur 11: Overzicht DACOM bodemvocht locaties gemeten in de periode 2005-2010 op een diepte van 0-600 mm beneden maaiveld.	24
Figuur 12: Gemeten en gesimuleerde maandelijkse actuele verdamping in Cabauw voor de periode januari 2005 t/m december 2008.	27
Figuur 13: Gemeten en gesimuleerde actuele verdamping in Vredepeel voor de periode april 2006 t/m februari 2007.	28
Figuur 14: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36969 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.	29
Figuur 15: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36967 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.	30
Figuur 16: Vergelijking tussen twee bodemvochtsensoren (ID 36974 en ID 37024) die relatief dicht bij elkaar liggen (ca. 200 m). Het SPHY gesimuleerde bodemvocht van de bijbehorende pixel is ook weergegeven. Vergelijkingen zijn gedaan voor 2009 en 2010.	31
Figuur 17: Ruimtelijke verdeling van de totale verdamping in juli 2010.	32
Figuur 18: Ruimtelijke verdeling van de totale verdamping in december 2010.	32
Figuur 19: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in juli 2010.	33
Figuur 20: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in december 2010.....	33



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Vochtgehalte in de wortelzone en verdamping zijn belangrijk in tal van toepassingen variërend van landbouw tot waterbeheer tot meteorologie tot klimaatonderzoek en zelfs tot epidemiologie. Het gaat hierbij dan om het analyseren van bodemvocht en verdamping in het verleden, de huidige situatie en verwachtingen voor de toekomst (korte termijn voor operationele maatregelen, lange termijn voor impact van klimaatveranderingen).

Vandaag de dag speelt het gebruik van “remote sensing” een belangrijke rol bij (agro)hydrologische toepassingen. Een paar voorbeelden hiervan zijn i) het berekenen van de Leaf-Area-Index (LAI) op basis van satelliet beelden en deze gebruiken als invoer in een gewasgroeimodel (de Wit en van Diepen, 2007), ii) het bepalen van inundatie gebieden en rivier water hoogtes m.b.v. “remote sensing” technieken (Smith, 1997), iii) het bepalen van de massabalans van gletsjers op basis van “remote sensing” beelden (Berthier et al., 2007), en (iv) het bepalen van de actuele verdamping en biomassa gedurende het groeiseizoen (SEBAL¹, FieldLook²).

Het gebruik van remote sensing biedt dus veel perspectief bij (agro)hydrologische toepassingen. Waar echter vaak niet aan gedacht wordt, is het feit dat remote sensing geen voorspelling kan geven over de situatie in het veld over een x aantal dagen, maanden, en/of jaren. Een tweede nadeel van het gebruik van remote sensing is dat er altijd een afweging gemaakt moet worden tussen de gewenste ruimtelijke resolutie en gewenste temporele resolutie. Een satelliet met hoge resolutie beelden (<5 m, bijvoorbeeld IKONOS³) zal minder frequent overvliegen (frequentie van 1 dag tot 2 weken) dan een satelliet met lagere resolutie beelden (250 m, bijvoorbeeld MODIS) die elke 1-2 dagen overvliegt. Tot slot heeft het gebruik van remote sensing in bewolkte gebieden vaak een beperking omdat er niet door de bewolking heen gekeken kan worden. Dan biedt een actieve radar aan boord van een satelliet vaak oplossing als bijvoorbeeld de neerslag gemeten wordt (TRMM⁴, Kummarow et al., 2000).

Dus desondanks dat m.b.v. remote sensing een goed beeld kan worden verkregen van het verleden en de huidige situatie, hebben we voor een meerdaagse voorspelling altijd nog een hydrologisch model nodig. Het gebruik van hydrologische simulatie modellen stamt al uit de tijd van het befaamde Stanford Watershed Model (Linsley, 1976) en tegenwoordig is het gebruik van simulatie modellen niet meer weg te denken uit de huidige maatschappij. De kern voor het gebruik van hydrologische modellen is het beter willen begrijpen van processen en het doen van scenario-analyses (Droogers en Bastiaanssen, 2002). Het beter willen begrijpen van processen valt op te splitsen in drie deelaspecten. Ten eerste kunnen hydrologische modellen resultaten berekenen en weergeven op een ontzettend hoge ruimtelijke resolutie, die met metingen (veldwaarnemingen en/of remote sensing) niet te bereiken is. Ten tweede geldt hetzelfde voor de temporele resolutie. Tot slot worden hydrologische modellen vaak ingezet om processen te bepalen die niet, of alleen met complexe methoden, waarneembaar zijn. Een

¹ <http://www.waterwatch.nl/tools0/sebal.html>

² <http://www.mijnakker.nl/?lang=en>

³ <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos.html>

⁴ <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>



typisch voorbeeld van dit laatste is bijvoorbeeld het onderscheid tussen bodemverdamping en gewastranspiratie.

Vanuit de Nederlandse maatschappij is er een alsmaar groeiende vraag naar een product dat een inschatting kan geven van het vochtgehalte in de wortelzone alsmede de actuele verdamping. Tot op heden zijn er echter nog geen producten die deze vragen beide kunnen beantwoorden. De belangrijkste producten die momenteel operationeel aangeboden worden zijn DRYMON⁵ en mijnakker.nl⁶. Deze tools/producten maken gebruik van remote sensing, wat betekent dat ze geen voorspellende waarde hebben. De DRYMON van Neo is alleen een bodemvocht product en berekent dus niet de actuele verdamping en heeft tevens geen voorspellende waarde. Bovendien maakt DRYMON alleen gebruik van remote sensing met een radar aan boord om het bodemvocht te schatten. Dit levert een goede schatting op van het bodemvocht in de eerste 5 cm van de bodem, maar geeft geen volledige schatting van het bodemvocht in de gehele wortelzone. Bovendien wordt de penetratie diepte van het signaal minder naar gelang er meer vocht in de bodem zit. Er is dus duidelijk de behoefte aan een tool/model wat inzicht geeft in het actuele bodemvocht in de gehele wortelzone, de actuele verdamping, en tevens een voorspellende waarde heeft. Hiermee kan geanticipeerd worden op het waterbeheer van waterschappen en agrariërs.

1.2 Doelstelling

Het doel van deze studie is *“het ontwikkelen van een hydrologisch waterbalans model voor Nederland dat gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het actuele bodemvocht in de wortelzone”*. Om deze doelstelling te verwezenlijken zijn de volgende sub-doelstellingen geformuleerd:

- Het opstellen van de benodigde hydrologische vergelijkingen;
- Het verzamelen van de benodigde model invoer gegevens;
- Kalibratie van het model aan de hand van gemeten actuele verdamping;
- Validatie van het model aan de hand van gemeten bodemvocht.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de modellen die in het bijzonder in Nederland veelvuldig toegepast worden. Tevens gaat dit hoofdstuk in op welk model het beste is en waarom het beste model niet altijd het meest complexe model hoeft te zijn. Hoofdstuk 3 beschrijft het te ontwikkelen model concept met de daarbij horende vergelijkingen. Hoofdstuk 4 gaat in op de benodigde data die nodig is voor de model invoer alsmede de kalibratie/validatie. Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van de kalibratie en validatie. Tot slot bevat hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen.

⁵ <http://www.neo.nl>

⁶ mijnakker.nl



2 Welk model voor welke toepassing?

2.1 Nederland en hydrologische modellen

Hydrologische modellen worden ontwikkeld voor verschillende doeleinden. Een bepaalde groep modellen richt zich met name op de onverzadigde zone, zoals bijvoorbeeld het Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) model (van Dam, 2000; Kroes et al., 2008). Weer een andere groep modellen is vooral bedoeld voor de modellering van grondwater stromingen, zoals bijvoorbeeld ModFlow (McDonald en Harbaugh, 2003). Een derde groep houdt zich met name bezig met oppervlaktewater stromingen en hydraulica, waarbij SOBEK⁷ een veelgebruikt model is. Tot slot zijn er modellen die bepaalde onderdelen combineren in één model, bijvoorbeeld een combi van oppervlaktewater, grondwater en de onverzadigde zone in één model (SIMGRO) (van Walsum et al., 2010). Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) heeft een aparte status, omdat het NHI vooral bestaat uit de koppeling van een aantal van deze modellen en bestaande databases. Bovenstaande modellen worden gezien als de standaard binnen Nederland. Wereldwijd zijn echter duizenden hydrologische modellen beschikbaar. Omdat het aanbod zo groot is blijft de vraag welk model het beste is voor welke toepassing en vraag.

De algemene consensus binnen Nederland lijkt te zijn dat complexere modellen beter zijn. Het nadeel van complexe modellen is echter dat er vaak ook gedetailleerde invoerdata voor nodig is wat niet altijd voorhanden is. Bovendien wordt er van de gebruiker verwacht dat zijn/haar hydrologische kennis van hoog niveau is om het model te kunnen hanteren. Desondanks worden binnen Nederland vaak complexe hydrologische modellen toegepast die niet in alle gevallen tot het desgewenste eindresultaat leiden (Rientjes en Zaadnoordijk, 2000). In veel gevallen zijn complexe, meer fysisch georiënteerde modellen noodzakelijk, maar dan moet altijd vooraf een analyse worden uitgevoerd over de noodzakelijke hoeveelheid detail. Hiervoor is in de internationale literatuur veel aandacht. Een toonaangevende hydroloog pleit in een artikel voor een vraag- en hypothese gedreven hydrologie, waarin data-analyse en een top-down modelleren benadering leiden tot algemene verklaringen en begrip van trends en patronen (Sivapalan, 2009). Deze verandering heeft zijn oorsprong in het feit dat een aantal fundamentele reductieproblemen ontstaan wanneer gestreefd wordt naar het fysisch gebaseerde algemeen toepasbare supermodel. Deze reductieproblemen zijn: gebrekkige metingen van randvoorwaarden, onzekerheden in model parameters en equifinaliteit en onduidelijkheid over het generalisatieniveau van de model fysica (Kleinhans et al., 2010).

2.2 Modelkeuze en SPHY

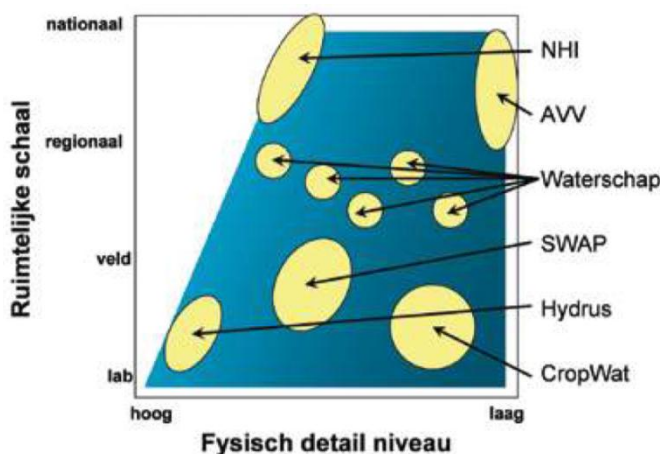
Zoals in bovenstaande paragraaf is beschreven is er een breed scala aan hydrologische modellen wereldwijd beschikbaar. Elk hydrologisch model, van complex tot minder complex, heeft zijn eigen toepassingsgebied (grondwater, onverzadigde zone, etc.). Zoals in paragraaf 1.2 is beschreven, is de doelstelling van deze studie het ontwikkelen van een hydrologisch waterbalans model voor Nederland dat gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het actuele bodemvocht in de wortelzone. Dit model is met name bedoeld voor het landelijk gebied. De vraag die daarbij opkomt is: hoe complex moet het model zijn om deze doelstelling te verwezenlijken? Een H2O artikel (Droogers en Immerzeel, 2010) gaat in op de complexiteit

⁷ <http://www.deltaresystems.com/hydro/product/108282/sobek-suite>



van modellen en de vraag: Wat is het beste model? De conclusie van dit artikel is dat het beste model niet bestaat, maar dat het afhankelijk is van de vraag die het model moet beantwoorden.

Voor elke vraag is een ander hydrologisch model 'het beste model' en voor bepaalde vragen dient een 'beste model' ontwikkeld te worden omdat het nog niet bestaat. Modellen worden vaak ingedeeld in een domein waar een bepaald probleem ligt (Figuur 1). In Figuur 1 zijn twee belangrijke probleemdomeneinen weergegeven: de ruimtelijke schaal en de hoeveelheid fysisch detail die nodig is om de vraag te beantwoorden. Bij elke vraag moet de afweging gemaakt worden tussen fysisch detail en ruimtelijke schaal. Teveel detail op een te hoog ruimtelijk schaalniveau is onmogelijk in verband met dataproblemen, rekentijden en onverwachte neveneffecten door samenhang in processen. Een veel gebruikt model op veldschaal is het SWAP model. Daarnaast wordt SWAP ook wel voor laboratoriumproeven gebruikt en gedistribueerd op regionale en nationale schaal. Verder laat Figuur 1 een aantal waterschap modellen zien. Deze bestaan vaak uit een combinatie van SIMGRO, ModFlow en SOBEK. Tot slot laat dit figuur het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI⁸) wat het belangrijkste landsdekkende hydrologische model van Nederland is met een hoog fysisch detailniveau.



Figuur 1: Indeling van modellen met enkele willekeurig gekozen modelnamen (Droogers en Perry, 2008).

Om de doelstelling van de huidige studie te verwezenlijken moet een hydrologisch waterbalans model ontwikkeld worden dat landsdekkend is en dat de actuele verdamping en het actuele bodemvocht in de wortelzone kan simuleren. Omdat het landsdekkend moet zijn, zitten we op de nationale schaal in Figuur 1. Op nationaal niveau zien we in Figuur 1 alleen het complex NHI en het zeer eenvoudige 'Aandacht Voor Veiligheid' (AVV). Het te ontwikkelen model valt precies in de lacune tussen het NHI en het AVV. Het te ontwikkelen model, hierna genoemd als SPHY (Spatial Processes in HYdrology), hoeft niet zo complex te zijn als het NHI, kan daardoor volstaan met minder invoergegevens, wijzigingen kunnen snel doorgevoerd worden, het rekent relatief snel, maar levert voldoende detail om een correcte inschatting te kunnen maken van de actuele verdamping en het actuele bodemvocht in de wortelzone op een ruimtelijke resolutie van 250 m. Droogers en Immerzeel (2010) hebben al een eerste versie van SPHY ontwikkeld, wat destijds HydroS genoemd werd. Deze versie was destijds ontwikkeld met als doel de te verwachte wateroverlast door klimaatverandering op nationale schaal als gevolg van extreme neerslag te bepalen. Voor het bepalen van de actuele verdamping en bodemvocht in de

⁸ <http://www.nhi.nu/>

wortelzone is deze versie uitgebreid met betere vergelijkingen die de drainage en de percolatie vanuit de wortelzone bepalen.



3 SPHY –concept en vergelijkingen

Het te ontwikkelen model SPHY (Spatial Processes in HYdrology) dient landsdekkend voor Nederland het actuele bodemvocht in de wortelzone en de actuele verdamping te kunnen simuleren. Het model moet flexibel zijn zodat in de toekomst mogelijke veranderingen gemakkelijk en snel in het model doorgevoerd kunnen worden. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een update van een landgebruikskaart of verbeterde neerslagdata. Het model moet uiteindelijk operationeel online draaien, wat betekent dat het model relatief snel moet kunnen rekenen.

Op grond van bovenstaande criteria is gekozen voor een op raster gebaseerd model met een ruimtelijke resolutie van 250 meter, een temporele resolutie van een dag, geparameteriseerde procesbeschrijvingen in een flexibele programmeeromgeving. Het model bouwt voort op de HydroS versie van Droogers en Immerzeel (2010).

3.1 Model concept

Het basisconcept voor SPHY (Figuur 2) bestaat uit een tweelaags gekoppeld bakjesmodel en een vegetatielaag. De mate van helling in een bepaalde cel heeft invloed op de drainage vanuit de wortelzone en tweede bodemlaag. De inkomende fluxen zijn:

- neerslag;
- kwel (seepage upward).

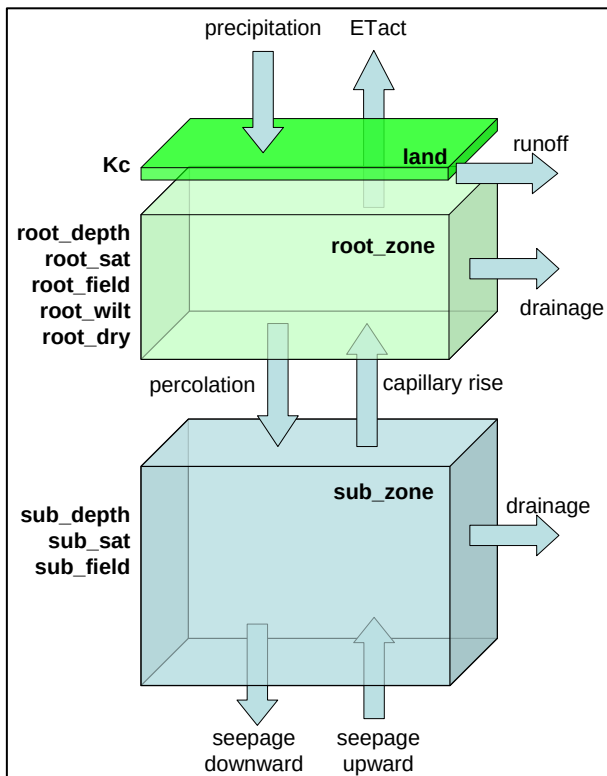
De uitgaande fluxen zijn:

- actuele verdamping (ETact);
- oppervlakkige afvoer (runoff);
- drainage uit de wortelzone (root_zone);
- drainage uit de tweede bodemlaag (sub_zone);
- wegzijging (seepage downward).

Vanuit de root_zone kan d.m.v. percolatie water naar de sub_zone stromen. Omgekeerd kan d.m.v. capillaire opstijging water vanuit de sub_zone naar de root_zone gaan. Het root_zone bakje heeft een aantal kenmerken dat is afgeleid van bodemfysische eigenschappen die de fluxen in en uit deze laag bepalen en dus de hoeveelheid water in deze laag. De sub_zone kenmerken zijn eveneens gebaseerd op bodemfysische eigenschappen. De fluxen in SPHY worden berekend aan de hand van de actuele hoeveelheid vocht in een laag en de eigenschappen daarvan. De volgende hydrologische processen in SPHY worden in de hierop volgende paragrafen beschreven:

- runoff;
- actuele verdamping;
- drainage;
- percolatie;
- capillaire opstijging;
- kwel/wegzijging;





Figuur 2: Modelconcept van SPHY (Spatial Processes in HYdrology).

3.2 Runoff

Oppervlakkige afvoer, ook wel runoff genoemd, treedt op wanneer de neerslag intensiteit hoger is dan de mate waarin water in de bodem kan infiltreren (Neitsch et al., 2005). Als de bodem aan het begin nog droog is, dan is de infiltratiesnelheid nog hoog. Deze wordt kleiner naarmate de bodem natter wordt. Omdat SPHY op een dagelijkse tijdschaal draait, is een versimpeling van bovenstaand principe noodzakelijk omdat er niet gekeken kan worden naar de intensiteit van een bepaald neerslag event, dat plaatsvindt op een bepaald moment op de dag. Daarom treedt runoff in SPHY op als het bodemvocht in de wortelzone het verzadigd water gehalte in de wortelzone overschrijdt.

3.3 Actuele verdamping

Nadat de runoff is berekend vindt er een update plaats van het vochtgehalte in de wortelzone. Vervolgens wordt de actuele verdamping in SPHY berekend. Verdamping wordt ook wel aangeduid met de verzamelnaam evapotranspiratie, wat alle processen omvat waarin het water aan het aardoppervlak omgezet wordt in waterdamp (Neitsch et al., 2005); evaporatie, transpiratie, en sublimatie.

De basis voor het berekenen van de actuele verdamping ligt bij de potentiële verdamping. Het concept van de potentiële evapotranspiratie is van oorsprong bedacht door Thornthwaite (1948). Hij definieerde de potentiële evapotranspiratie als de snelheid waarmee evapotranspiratie optreedt in een gebied dat homogeen bedekt is met vegetatie dat beschikt over een ongelimiteerde hoeveelheid water. De potentiële evapotranspiratie wordt sterk



beïnvloed door een aantal vegetatie eigenschappen. Daarom heeft Penman (1956) de potentiële evapotranspiratie geherdefinieerd naar: *“the amount of water transpired by a short green crop, completely shading the ground, of uniform height and never short of water”*. Hij gebruikte daarvoor gras als referentiegewas.

We willen echter de potentiële evapotranspiratie van alle gewassen weten, en niet alleen die van gras. Daarom wordt er veel gebruikt gemaakt van de gewas coëfficiënt (K_c). Deze coëfficiënt integreert het effect van zowel gewas transpiratie als bodem evaporatie (Allen et al., 1998). De K_c is gewas specifiek en wordt als volgt gebruikt om de potentiële evapotranspiratie te berekenen:

$$ET_{pot} = K_c * ET_{ref}$$

met ET_{pot} de potentiële evapotranspiratie, K_c de gewas coëfficiënt, en ET_{ref} de referentie verdamping. De referentie verdamping wordt berekend aan de hand van allerlei meteorologische fluxen, en wordt in Nederland door het KNMI berekend aan de hand van de Makkink vergelijking (Makkink, 1957).

Vegetatie kan op verschillende manieren stress ondervinden waardoor de actuele evapotranspiratie lager is dan de potentiële evapotranspiratie. Dit kan zijn door i) te weinig water, ii) en teveel water. De bepaling van de actuele evapotranspiratie in SPHY heeft plaats volgens de Feddes functie (Feddes et al., 1978). Daarbij wordt de reductie voor teveel water als volgt berekend:

$$ET_{red_{wet}} = if(RootWater > root_{sat}, 0, 1)$$

met $ET_{red_{wet}}$ de reductie voor teveel water, $RootWater$ het vochtgehalte in de wortelzone, en $root_{sat}$ het verzadigde vochtgehalte in de wortelzone. De reductie voor te weinig water wordt als volgt berekend:

$$ET_{red_{dry}} = \frac{(RootWater - root_{dry})}{(root_{wilt} - root_{dry})}$$

met $ET_{red_{dry}}$ de reductie voor te weinig water, $RootWater$ het vochtgehalte in de wortelzone, $root_{dry}$ het permanente verwelkingspunt, en $root_{wilt}$ het verwelkingspunt. De uiteindelijk actuele evapotranspiratie wordt dan als volgt in SPHY berekend:

$$ET_{act} = ET_{pot} * ET_{red_{wet}} * ET_{red_{dry}}$$

met ET_{act} de actuele evapotranspiratie, ET_{pot} de potentiële evapotranspiratie, $ET_{red_{wet}}$ de reductie voor teveel water, en $ET_{red_{dry}}$ de reductie voor te weinig water. Voor open water wordt aangenomen dat dit verdampt volgens de potentiële verdamping.

3.4 Drainage

Nadat de actuele verdamping berekend is vindt er een update plaats van het vochtgehalte in de wortelzone. Het volgende hydrologische proces dat berekend wordt is drainage. Drainage in SPHY is grotendeels gebaseerd op het kinematische balans model voor ondergrondse stromingen van Sloan et al. (1983), wat is samengevat door Sloan en Moore (1984). Het volume aan water dat voor drainage gebruikt kan worden is het verschil tussen het actuele bodemvocht gehalte en het bodemvocht gehalte als de bodem op veldcapaciteit is. Dit volume



dient eerst uitgedrukt te worden als fractie van het maximaal draineerbare volume. De netto drainage benedenstrooms van een cel wordt dan als volgt berekend:

$$Q_{lat} = H_0 * v_{lat}$$

met Q_{lat} het gedraineerde volume water aan het eind van de helling, H_0 de fractie van het draineerbare volume, en v_{lat} de snelheid van deze stroming. Hierin is v_{lat} gedefinieerd als (Neitsch et al., 2005):

$$v_{lat} = K_{sat} * slp$$

met K_{sat} de verzadigde hydraulische conductiviteit en slp de helling. Niet al het water hoeft altijd binnen 1 dag benedenstrooms van de helling te zijn. Als de reistijd van water groter is als 1 dag, dan zal alleen een deel van Q_{lat} de helling benedenstrooms bereiken. Daarom is er in SPHY een vertraging ingebouwd middels de volgende vergelijking:

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}) * \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{lag}}\right]\right)$$

met Q_{lat} de hoeveelheid totale drainage die op 1 dag kan afvoeren op een kanaal, Q'_{lat} de hoeveelheid drainage dat genereerd wordt binnen die dag, $Q_{latstor,i-1}$ de hoeveelheid drainage vertraagd van de vorige dag, en TT_{lag} de drainage reistijd. Deze reistijd wordt als volgt berekend:

$$TT_{lag} = \frac{(root_{sat} - root_{field})}{K_{sat}}$$

De drainage vanuit de sub_zone wordt op een vergelijkbare manier berekend. Het enige verschil is dat de TT_{lag} en K_{sat} nu over de sub_zone berekend worden i.p.v. over de wortelzone.

3.5 Percolatie

Na de drainage vanuit de wortelzone vindt er een update plaats van het vochtgehalte in de wortelzone. Vervolgens wordt er percolatie berekend. Percolatie van de wortelzone naar de sub_zone is alleen mogelijk zodra het bodemvocht gehalte in de wortelzone hoger is als de veldcapaciteit van de wortelzone en als de sub_zone niet verzadigd is (Neitsch et al., 2005). Evenals bij drainage, wordt het volume water dat beschikbaar is voor percolatie berekend als verschil tussen het actuele bodemvocht gehalte en het bodemvocht bij veldcapaciteit. Dit beschikbare volume percoleert met vertraging naar de sub_zone middels de volgende vergelijking (Neitsch et al., 2005):

$$Q_{perc} = SW_{excess} * \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{perc}}\right]\right)$$

met Q_{perc} de hoeveelheid water dat percoleert naar de sub_zone, SW_{excess} de hoeveelheid water dat beschikbaar is voor percolatie, en TT_{perc} de reistijd voor percolatie. De reistijd voor percolatie wordt op dezelfde manier berekend als de reistijd voor drainage in de wortelzone.



3.6 Capillaire opstijging

Capillaire opstijging wordt bepaald aan de hand van de relatieve vochtigheid in de wortelzone en sub_zone. Daarvoor is het dus noodzaak om deze eerst afzonderlijk van elkaar te berekenen alvorens de capillaire opstijging berekend wordt. De relatieve vochtigheid in de wortelzone wordt als volgt berekend:

$$RootRelWat = \frac{(RootWater - root_dry)}{(root_wilt - root_dry)}$$

met *RootRelWat* de relatieve vochtigheid in de wortelzone, *RootWater* het vochtgehalte in de wortelzone, *root_dry* het permanente verwelkingspunt, en *root_wilt* het verwelkingspunt. De relatieve vochtigheid in de sub_zone wordt als volgt berekend:

$$SubRelWat = \frac{(SubWater - sub_field)}{(sub_sat - sub_field)}$$

met *SubRelWat* de relatieve vochtigheid in de sub_zone, *SubWater* het actuele vochtgehalte in de sub_zone, *sub_field* het vochtgehalte bij veldcapaciteit van de sub_zone, en *sat_field* het verzadigde vochtgehalte van de sub_zone. Uiteindelijk wordt dan de capillaire opstijging als volgt berekend:

$$CapRise = CapMax * (1 - RootRelWat) * SubRelWat$$

met *CapRise* de capillaire opstijging vanuit de sub_zone naar de wortelzone.

Het bodemvocht in de sub_zone wordt dus elke tijdstap ge-update doordat er percolatie bijkomt, en er drainage en capillaire opstijging afgaat. Tot slot komt er aan de onderrand nog kwel bij of treedt er wegzijging op. Dit staat beschreven in de volgende paragraaf.

3.7 Kwel en wegzijging

Binnen Nederland treedt met name in de beekdalen kwel op en treedt in de hoger gelegen gebieden wegzijging op. Kwel en wegzijging zijn hydrologisch lastig te modelleren omdat het ook moeilijk te meten is. Kwel en wegzijging zijn sterk gekoppeld aan de grondwater stromingen gedurende het jaar. Omdat SPHY gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone zit er geen grondwater stromings-component in SPHY. Om toch een enigszins aannemelijke onderrand te krijgen, is ervoor gekozen om de kwel en wegzijging van het STONE⁹-instrumentarium te gebruiken. Dit is één kaart met een gemiddelde waarde voor kwel of wegzijging gedurende het jaar. Het is voor de toekomst aan te bevelen om deze kaart tijdsafhankelijk te maken.

⁹ STONE is een afkorting van Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel

3.8 Parameterisatie

Zoals beschreven in paragraaf 2.1 is de algemene consensus binnen Nederland dat complexe modellen met veel parameters (bijvoorbeeld het NHI¹⁰) beter zijn dan simpelere modellen met minder parameters. Complexe modellen zijn vaak over-geparameteriseerd. Het SPHY (Spatial Processes in HYdrology) model volstaat echter met een 14-tal parameters (Tabel 1), en is hierdoor overzichtelijk, eenvoudig aan te passen, en toch in staat om het doel, het simuleren van het bodemvocht in de wortelzone en de actuele verdamping, te verwezenlijken.

Tabel 1: SPHY model parameters.

<i>Parameter</i>	<i>Omschrijving</i>
Kc	Gewasfactor [-]
Seep	Kwel/wegzijging [mm/d]
Gradient	Helling [-]
CapMax	Maximale capillaire opstijging [mm/d]
Rdepth	Worteldiepte [mm]
Rsat	Fractie van wortelzone bij verzadiging [-]
Rfield	Fractie van wortelzone bij veldcapaciteit [-]
Rwilt	Fractie van wortelzone bij verwelkingspunt [-]
Rdry	Fractie van wortelzone bij permanent verwelkingspunt [-]
RKsat	Verzadigde hydraulische doorlatendheid wortelzone [mm/d]
Sfield	Fractie van sub-laag bij veldcapaciteit [-]
Ssat	Fractie van sub-laag bij verzadiging [-]
SKsat	Verzadigde hydraulische doorlatendheid sub-laag [mm/d]

¹⁰ <http://www.nhi.nu/>



Op basis van de beschreven model concepten en vergelijkingen is de volgende invoerdata nodig:

- Dagelijkse neerslag;
- Dagelijkse referentie verdamping;
- Landgebruik;
- Bodem;
- Hoogtekaart;
- Kwel/wegzijging;

Deze databronnen zijn beschreven in de volgende paragrafen. Naast de modelinvoer is er data nodig voor de kalibratie/validatie van SPHY. Voor de kalibratie is gebruik gemaakt van actuele gemeten verdamping op twaalf locaties in Nederland (Elbers et al., 2009) en voor de validatie is gebruik gemaakt van gemeten bodemvocht van DACOM¹¹ dat gemeten is voor het project WaterSense¹².

4.1 Neerslag

Voor een correcte simulatie van de actuele verdamping en het actuele bodemvocht is het van wezenlijk belang dat de meteorologische invoer correct is. Dit geldt voor zowel de neerslag als de referentie verdamping ET_{ref} . In HydroS (Droogers en Immerzeel, 2010) werd er gebruik gemaakt van 1 neerslag station voor heel Nederland. Hierdoor is er geen ruimtelijke variabiliteit in het dagelijkse neerslag patroon over Nederland.

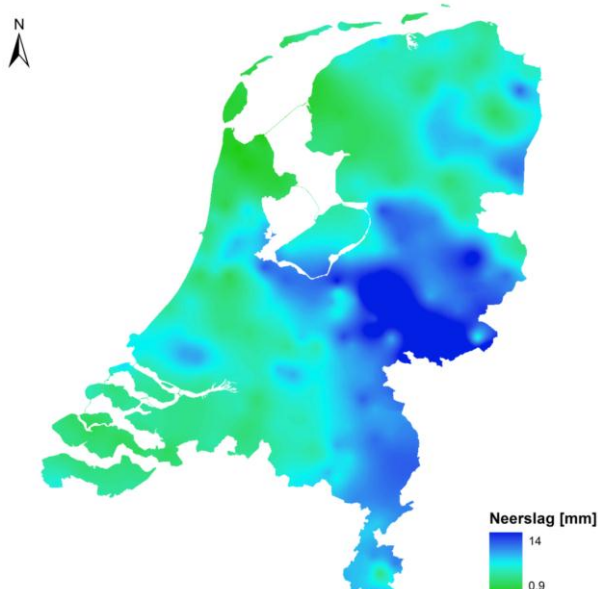
Om toch een goed dekkend ruimtelijk dagelijks neerslag patroon voor Nederland te krijgen wordt er voor SPHY gebruik gemaakt van geïnterpoleerde neerslagbeelden van het KNMI¹³ (Soenario en Sluiter, 2010). Daarbij is gebruik gemaakt van Ordinary Kriging (Burrough en McDonnell, 1998) en de neerslag stations zoals weergegeven in Figuur 4. Een voorbeeld deze geïnterpoleerde neerslag data voor een bepaalde dag is weergegeven in Figuur 3.

¹¹ <http://www.dacom.nl/index.php/nl/>

¹² <http://www.projectwatersense.nl/>

¹³ <http://knmi.nl/>





Figuur 3: Voorbeeld van een geïnterpoleerd KNMI dag neerslagbeeld.



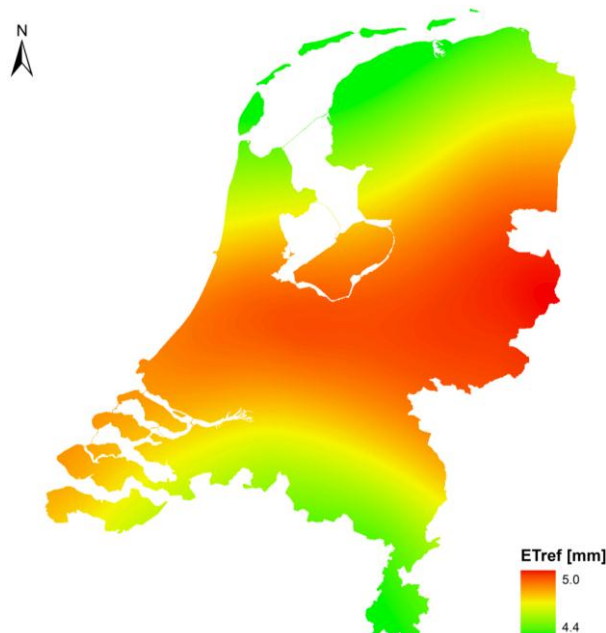
Figuur 4: Neerslagstations gebruikt voor interpolatie (Soenario en Sluiter, 2010).

4.2 Referentie verdamping volgens Makkink

Voor de referentie verdamping, wat de basis vormt voor de potentiële evapotranspiratie en uiteindelijk de actuele evapotranspiratie, wordt gebruik gemaakt van de geïnterpoleerde Makkink ET_{ref} (Hiemstra en Sluiter, 2011) van het KNMI. Het is erg belangrijk om deze input goed te krijgen, omdat ca. 70% van de neerslag dat in Nederland valt weer verdampt (Hiemstra en Sluiter, 2011). Het KNMI heeft de op basis van stations data berekende Makkink ET_{ref}



geïnterpoleerd naar dagelijkse dekkende ET_{ref} beelden voor Nederland. Uit de studie van Hiemstra en Sluiter (2011) bleek dat de beste methode hiervoor Thin Plate Splines (TPS) interpolatie (Wahba, 1990; Hutchinson en Gessler, 1994) is. Een voorbeeld van een geïnterpoleerd ET_{ref} beeld is te zien in Figuur 5.

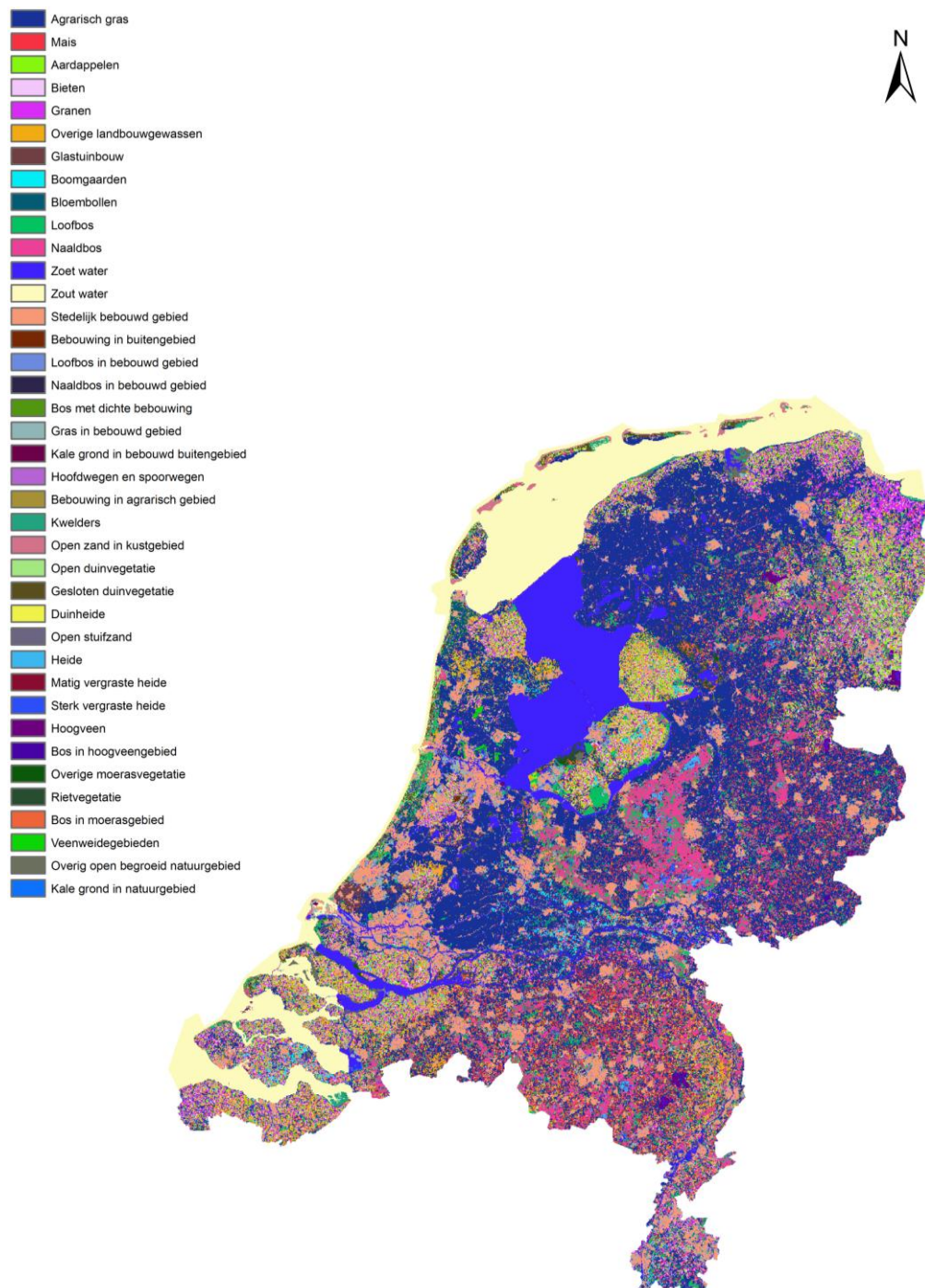


Figuur 5: Voorbeeld van een geïnterpoleerd Makink ET_{ref} beeld op dagbasis.

4.3 Landgebruik

Het landgebruik in SPHY is bepalend voor de dikte van de wortelzone en de gewasfactor. De dikte van de wortelzone bepaald in combinatie met de bodemkaart de $root_sat$, $root_field$, $root_wilt$, en de $root_dry$. Op basis van Allen et al. (1998) is per landgebruiksklasse een worteldiepte en een gewasfactor bepaald. Omdat deze in sterke mate de hydrologische fluxen in de wortelzone en van en naar de sub_zone bepalen, zijn deze parameters gebruikt als kalibratie parameters.

Voor het landgebruik in SPHY is gekozen voor het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN-5) (Hazeu, 2005; NHI, 2008). Het LGN bestand is een landsdekkend rasterbestand waarin 39 vormen van landgebruik zijn weergegeven. Sinds 1986 wordt dit bestand met een frequentie van 3-5 jaar gemaakt. Deze landgebruiksk kaart is uitgebreid met het LGN-gewassenbestand waarin 7 gewassen worden onderscheiden: gras, mais, aardappelen, bieten, granen, overige gewassen en bloembollen (Hazeu, 2005). De uiteindelijke landgebruiksk kaart zoals die in SPHY gebruikt wordt heeft dus totaal 46 klassen. Een tabel met deze klassen is weergegeven in Appendix 1.



Figuur 6: Landgebruik in SPHY volgens LGN-grid en LGN-gewassenbestand (Hazeu, 2005; NHI, 2008).

4.4 Bodemkaart

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

- Veldcapaciteit;
- Verzadigd volume;
- Verwelkingspunt;
- Permanent verwelkingspunt.



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 fysisch-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 de zogenaamde veenkartering verwerkt om inzicht te krijgen in de mate van veranderingen 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 7. De bodemkaart zoals weergegeven in Figuur 7 is gebruikt in SPHY. Een tabel met gedetailleerde informatie over de bodemopbouw is weergegeven in Appendix 2.



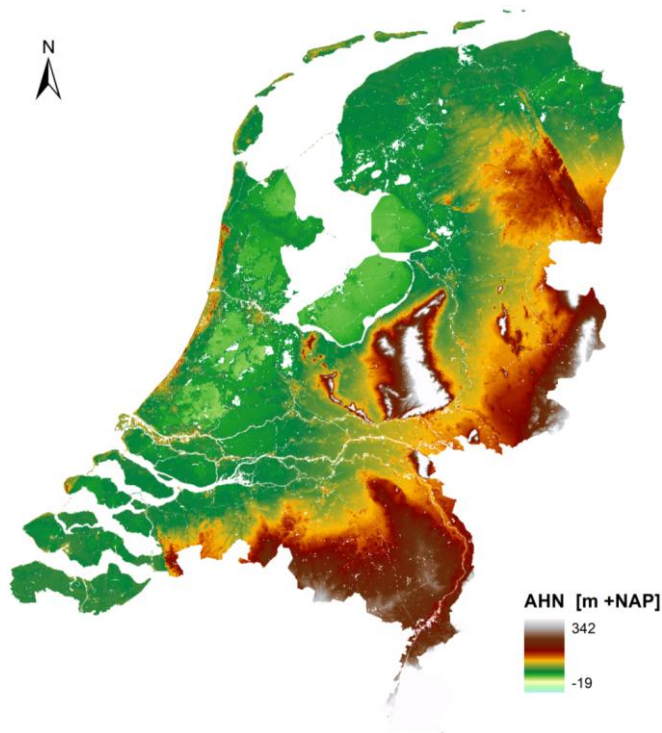
Figuur 7: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).

4.5 Hoogtekaart

Voor SPHY is een hoogtekaart noodzakelijk om de helling van een pixel te berekenen. Zoals beschreven in paragraaf 3.4, is deze helling nodig om de drainage flux te berekenen. Voor de hoogtekaart in SPHY is gebruik gemaakt van het Actueel Hoogtebestand Nederland¹⁴ (AHN). Het AHN is voor Nederland een bestand met gedetailleerde en precieze hoogtegegevens en is daarmee het meest nauwkeurige hoogteproduct voor Nederland. Figuur 8 geeft de AHN weer zoals deze in SPHY gebruikt wordt.

¹⁴ <http://www.ahn.nl/>





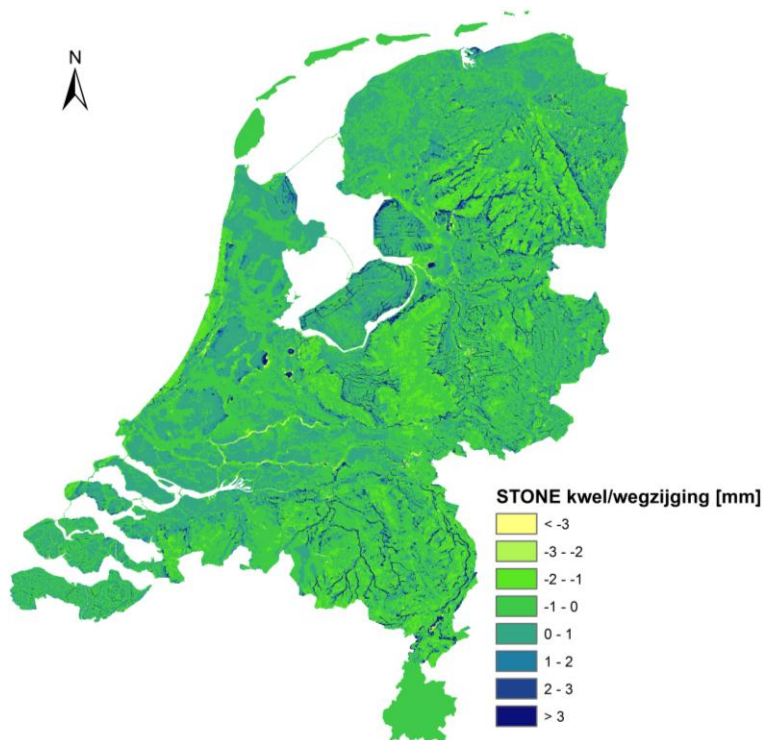
Figuur 8: Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) op een resolutie van 250 m.

4.6 Kwel en wegzijging

Omdat SPHY gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone zit er geen grondwater component in SPHY. Om toch een aannemelijke onderrand te krijgen, is ervoor gekozen om de kwel en wegzijging van het STONE¹⁵-instrumentarium (Schoumans et al., 2002; van Bakel et al., 2008) te gebruiken.

STONE is een simulatiemodel dat wordt gebruikt om een beeld te krijgen van de gevolgen van het mestbeleid voor de emissie van stikstof en fosfaat naar het grondwater en het oppervlaktewater. STONE bestaat uit een reeks van modellen. Daarnaast zijn er modellen die informatie aan STONE leveren. Een voor SPHY relevante component in STONE is de combinatie van het SWAP model voor de bovengrond en het nationale grondwatermodel (NAGROM) van het RIZA. Op basis hiervan is een kwel/wegzijgingskaart beschikbaar die gebruikt wordt voor SPHY. Dit is één kaart met een gemiddelde waarde voor kwel of wegzijging gedurende het jaar. Om SPHY in de toekomst te verbeteren is het aan te bevelen om een tijdsafhankelijke flux als onderrand te gebruiken. Mogelijk kan er eind 2012 een update gedaan worden door gebruik te maken van de onderrand die zit in de nog uit te komen NHI versie 3.0.

¹⁵ STONE is een afkorting van Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel



Figuur 9: Kwel en wegzijing op dagbasis volgens STONE. Positief is kwel, negatief is wegzijing.

4.7 Actuele gemeten verdamping

In opdracht van STOWA¹⁶ heeft Alterra jaarreeksen van de dagelijkse verdamping verzameld voor twaalf meetlocaties in Nederland (Elbers et al., 2009). Daarvoor is gebruik gemaakt van (micro)meteorologische meetgegevens. Alterra heeft de meetgegevens gecontroleerd op kwaliteit en continuïteit, en ontbrekende dag totalen zijn aangevuld met Artificial Neural Network (ANN) gesimuleerde gegevens. Het is gebleken dat de onzekerheid in de jaartotalen van de actuele gemeten verdamping ligt tussen de 10 en 15%.

Voor de SPHY simulatie is gekozen voor de periode 2005-2010, waarin 2005 gebruikt is voor de initialisatie van het model. Op basis van deze periode zijn negen meet locaties geselecteerd voor de kalibratie van SPHY. Deze negen meetlocaties zijn weergegeven in Figuur 10. Het is duidelijk dat deze een redelijke ruimtelijke dekking geven voor Nederland.

¹⁶ <http://www.stowa.nl/>





Figuur 10: Overzicht geselecteerde locaties waar de actuele verdamping gemeten is.

4.8 Gemeten bodemvocht gehalte

Nadat het model gekalibreerd is aan de hand van de gemeten actuele verdamping, is het noodzaak om te valideren of het model in staat is om het bodemvocht in de wortelzone te simuleren. Helaas is het monitoren van bodemvocht erg arbeidsintensief en daardoor erg kostbaar. Mede hierdoor wordt er in Nederland nauwelijks actueel bodemvocht in de wortelzone gemeten. Er zijn tegenwoordig wel satellietproducten die een inschatting geven van het bodemvocht (bijv. AMSR-E¹⁷), maar een nadeel hiervan is dat deze alleen de eerste paar centimeter van de wortelzone meten, en dat de ruimtelijke resolutie grof is (~25 km).

In 2008 is in het stroomgebied van de Hunze in de Drentse veenkoloniën het project WaterSense¹⁸ van start gegaan. Het doel van dit project was om een beslissingsondersteunend systeem (BOS) te ontwikkelen dat met behulp van sensortechnologie het waterbeheer kan ondersteunen. Het gaat dan om de water kwantiteit en de water kwaliteit. Belanghebbenden voor dit project waren de landbouwsector, het waterschap, een waterleidingbedrijf, kennisinstituten, de provincie Drente en MKB bedrijven. Tijdens dit project is gebruik gemaakt van bodemvocht sensoren van DACOM¹⁹. Deze sensoren meten op 6 verschillende dieptes, en op een aantal locaties op 9 verschillende dieptes, het actuele bodemvocht. Dit bodemvocht product is gebruikt voor de validatie van het SPHY model.

Voor de SPHY validatie zijn de locaties geselecteerd die bemeten zijn in de periode 2005-2010, en die liggen tussen de 0 en 60 cm beneden maaiveld. Een overzicht van de meetdieptes van

¹⁷ <http://nsidc.org/data/amsr/>

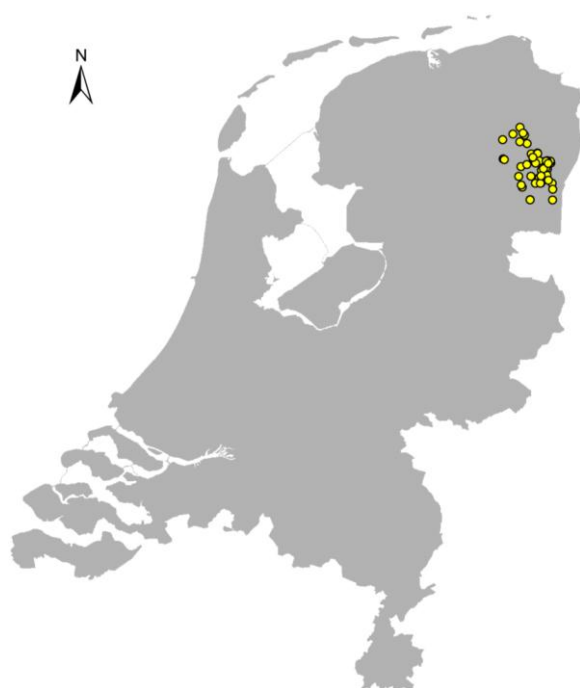
¹⁸ <http://projectwatersense.nl/>

¹⁹ <http://www.dacom.nl/index.php/nl/>

de DACOM bodemvocht sensoren per meetlocatie is weergegeven in Tabel 2. Een overzicht van de bodemvocht meetlocaties tot een diepte van 60 cm beneden maaiveld en die bemeten zijn in de periode 2005-2010 is weergegeven in Figuur 11.

Tabel 2: Meet dieptes van DACOM bodemvocht sensoren per meetlocatie.

<i>Sensor</i>	<i>Meet diepte [cm beneden maaiveld]</i>
1	0 - 10
2	10 - 20
3	20 - 30
4	30 - 40
5	40 - 50
6	50 - 60



Figuur 11: Overzicht DACOM bodemvocht locaties gemeten in de periode 2005-2010 op een diepte van 0-600 mm beneden maaiveld.

5.1 Kalibratie

Veel hydrologische modellen worden gekalibreerd op basis van de gemeten rivierafvoer. Het model wordt dan dusdanig gekalibreerd zodat de gesimuleerde rivierafvoer min of meer in overeenstemming is met de gemeten rivierafvoer. Deze traditionele manier van model kalibratie 'lumped' echter tal van hydrologische processen. Dit betekent dat bijvoorbeeld de gesimuleerde afvoer wel in overeenstemming is met de gemeten afvoer, maar dat betekent niet dat de actuele verdamping of het bodemvocht ook in overeenstemming is met de werkelijkheid. Omdat het doel van het SPHY model het simuleren van de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone is, is ervoor gekozen om te kalibreren op de gemeten actuele verdamping en bodemvocht op een aantal plaatsen binnen Nederland. Om te controleren of het gekalibreerde model vervolgens ook in staat is om het bodemvocht correct te simuleren, wordt het model in paragraaf 5.2 gevalideerd met gemeten bodemvocht.

Om het model te kalibreren aan de hand van de gemeten verdamping, is het noodzaak om kalibratieparameters te kiezen die een sterke invloed hebben op de hoeveelheid water dat beschikbaar is voor de verdamping en de verdamping die potentieel mogelijk is. Tevens is het slim om parameters te kiezen waar de meeste onzekerheid over bestaat. Aangezien de bodemkaart gebaseerd is op veldwaarnemingen, is de onzekerheid over de bodemparameters gering. Daarom is er voor de kalibratie gekozen voor de gewasfactor en de worteldiepte. Deze hebben namelijk een sterke invloed op de hoeveelheid water dat beschikbaar is voor de verdamping en de verdamping die potentieel mogelijk is, en het zijn de meest onzekere modelparameters omdat ze als constant zijn aangenomen voor de gehele model simulatie. In werkelijkheid variëren de gewasfactor en de worteldiepte gedurende het groeiseizoen. Naast deze twee parameters is ook de helling meegenomen als kalibratie parameter. Deze blijkt namelijk in sterke mate de drainage flux te beïnvloeden.

De kalibratieparameters voor en na de kalibratie zijn per locatie weergegeven in Tabel 3. Het is duidelijk dat voor een aantal locaties de parameters voor en na de kalibratie nauwelijks verschillen. Dit betekent dat SPHY ongekalibreerd al behoorlijke kalibratieresultaten oplevert. De meest significante kalibratie verandering is gedaan voor Utrecht (stedelijk gebied). Hiervoor is de worteldiepte verkleind wat resulteert in meer runoff, en een hogere Kc wat resulteert in meer potentiële verdamping.

Tabel 3: SPHY kalibratie parameters voor en na de kalibratie.

Locatie	Kc [-]		Worteldiepte [mm]		Helling [-]	
	Voor	Na	Voor	Na	Voor	Na
Utrecht	0.5	1.0	300	50	0.0131	0.0131
Cabauw	1.0	1.0	250	250	0.0014	0.0014
Loobos	1.4	1.0	1000	1000	0.0061	0.0061
Langerak	1.0	1.0	350	350	0.0005	0.0014
Molenweg	1.0	1.0	400	400	0.0003	0.0014
Dijkgraaf	1.0	0.95	400	400	0.0019	0.0019
Lutjewad	1.0	1.0	400	400	0.0005	0.0014
Oostwaard	1.0	1.0	400	400	0.0010	0.0014
Vredepeel	1.0	1.0	300	300	0.0018	0.0018

Tabel 4 geeft een overzicht van de totale gemeten en gesimuleerde actuele verdamping over een aantal maanden van het gekalibreerde SPHY model. Voor Cabauw en Loobos is een gemiddelde jaar som weergegeven omdat de meetperiode langer dan een jaar betrof. In de tabel is ook de afwijking in procent t.o.v. de gemeten verdamping weergegeven. Tot slot geeft de Root-Mean-Square-Error (RMSE) de maandelijkse afwijking weer tussen de gemeten en gesimuleerde maandelijkse verdamping gedurende die periode. De Pearson correlatie coëfficiënt geeft de mate van correlatie weer tussen de maandelijkse gemeten en gesimuleerde verdamping, waarbij een waarde dichtbij 1 een betere correlatie weergeeft dan een waarde dichtbij 0.

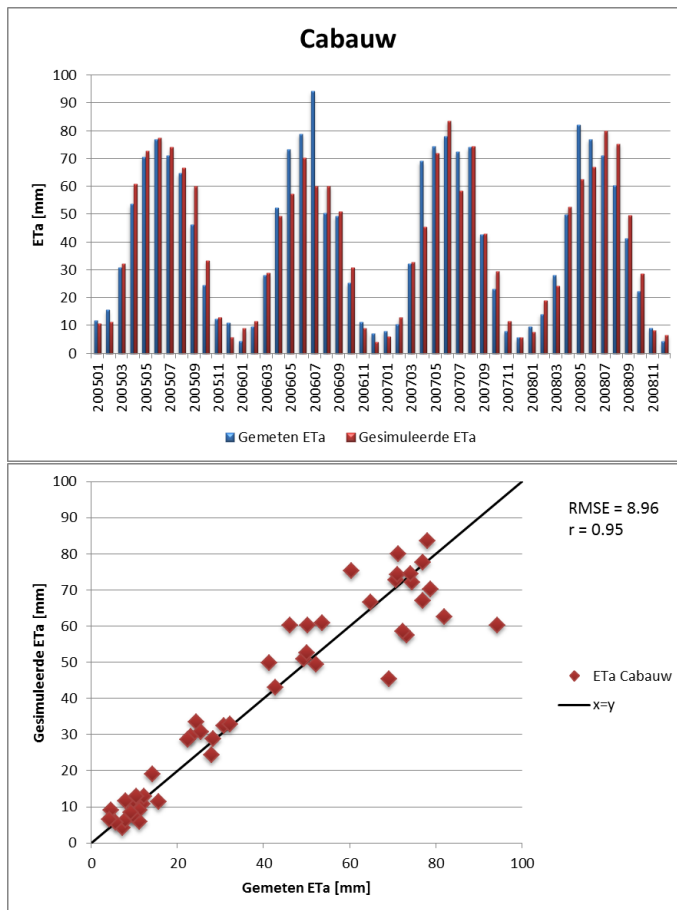
Op basis van de resultaten in Tabel 4 is het duidelijk dat het SPHY model goed gekalibreerd is voor deze 10 locaties. Met name de gesimuleerde totale (jaarlijkse) verdamping komt goed overeen met de gemeten verdamping. De maximale afwijking hierin is 14%. Het was bekend dat er een onzekerheid van 10-15% zit in de gemeten actuele verdamping van Elbers et al. (2009). Er kan dus gezegd worden dat de modelfout binnen de range van de meetfout valt. De grootste afwijking (>10%) is aanwezig bij de locaties Molenweg, Oostwaard, en Vredepeel. Uit nadere analyse bleek dat het landgebruik volgens Elbers et al. (2009) op deze locaties anders is als in de landgebruikskaart zoals in het SPHY model. Dit is een nadeel van de huidige versie van het SPHY model, waarin gebruik gemaakt is van een statische landgebruikskaart. Het is aan te bevelen om deze kaart in de toekomst tijdsafhankelijk te maken.

Tabel 4: Totale gemeten verdamping en gesimuleerde verdamping van het gekalibreerde SPHY model. De afwijking is de afwijking in percentage t.o.v. de gemeten verdamping. De Root-Mean-Square-Error (RMSE) geeft de error in mm per maand over die periode.

Locatie	Periode start	Periode eind	Gemeten verdamping [mm]	Gesimuleerde verdamping [mm]	Afwijking	RMSE [mm/maand]	Pearson r [-]
Cabauw*	Jan-2005	Dec-2008	486	480	-1.3%	9.0	0.95
Loobos*	Jan-2006	Dec-2007	506	527	4.2%	13.5	0.90
Langerak	Apr-2005	Mar-2006	526	538	2.2%	6.6	0.98
Molenweg	Jun-2005	Apr-2006	401	456	14.0%	8.1	0.98
Dijkgraaf	Jun-2005	Apr-2006	476	464	-2.5%	13.3	0.91
Lutjewad	Jun-2006	Apr-2007	443	449	1.3%	12.8	0.94
Oostwaard	Apr-2008	Dec-2008	538	464	-13.6%	15.6	0.94
Vredepeel	Apr-2006	Feb-2007	519	446	-14.2%	19.8	0.85
Utrecht	Sep-2008	Oct-2008	60	59	-0.8%	10.0	**
* Gemiddelde jaarsom							
** Niet bepaald ivm te korte tijdreeks							

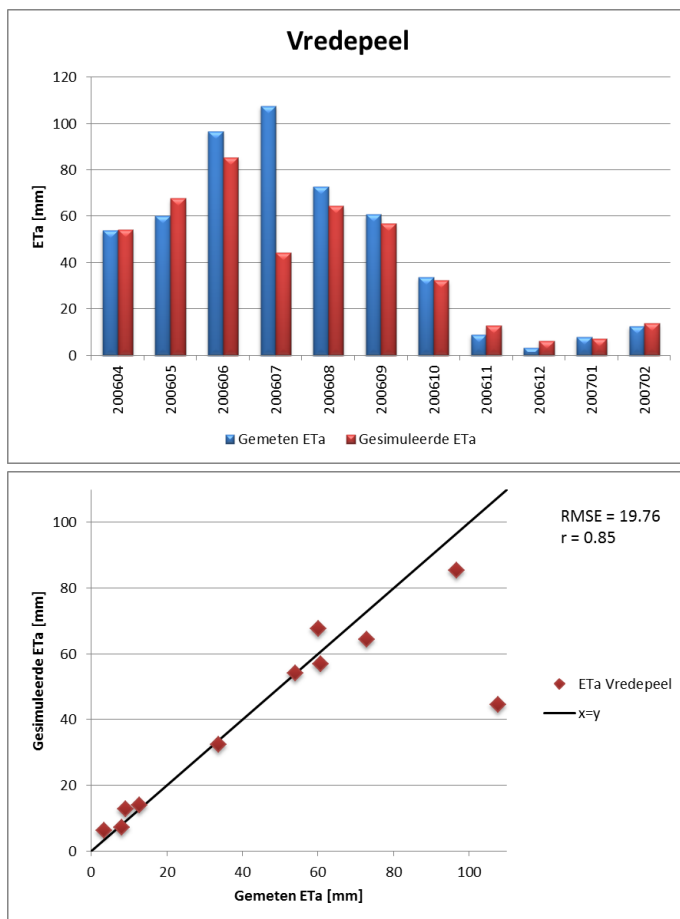
De gemiddelde afwijking tussen de gemeten en gesimuleerde actuele verdamping varieert tussen de 7 en de 16 mm per maand, met een uitzondering van 20 mm per maand. De beste resultaten (RMSE <10 mm) worden behaald bij de locaties Cabauw, Langerak, en Molenweg. Figuur 12 geeft het maandelijkse verloop weer van de gemeten en de gesimuleerde actuele verdamping in Cabauw. Het is duidelijk dat SPHY in staat is om het seizoen verloop van de actuele verdamping goed te simuleren. In 2006 en 2007 maakt SPHY vooral in de zomer een onderschatting van de actuele verdamping. Tot op heden is het nog onduidelijk waardoor deze onderschatting veroorzaakt wordt. Nader onderzoek om uitwijzen waarom deze onderschatting in andere jaren niet aanwezig is.





Figuur 12: Gemeten en gesimuleerde maandelijkse actuele verdamping in Cabauw voor de periode januari 2005 t/m december 2008.

De locatie waar SPHY de grootste afwijking laat zien ten opzicht van metingen is Vredepeel. Als we de maandelijkse resultaten van Vredepeel (Figuur 13) bekijken dan blijkt dat de hoge RMSE bepaald wordt door 1 uitschieter en een beperkt aantal gemeten maanden. In tegenstelling tot Cabauw waar de verdamping 48 maanden gemeten is, is de verdamping in Vredepeel maar 11 maanden gemeten. Hierdoor heeft deze ene uitschieter, waarbij de gemeten verdamping flink wordt onderschat, veel invloed op de RMSE. Voor de overige maanden lijkt SPHY de verdamping goed te simuleren. De onderschatting van de verdamping gebeurt in juli 2006. Deze maand werd ook onderschat in Cabauw. Zoals eerder gezegd is nog niet duidelijk waarom deze onderschatting plaatsvindt.



Figuur 13: Gemeten en gesimuleerde actuele verdamping in Vredepeel voor de periode april 2006 t/m februari 2007.

De locaties (Tabel 4) hebben allemaal unieke combinaties van bodem en landgebruik. Om de kalibratie landsdekkend te krijgen, zijn de bijbehorende kalibratie parameters van deze 10 locaties ook toegepast op dezelfde unieke combinaties op andere locaties in Nederland. Hierdoor is het SPHY model redelijk goed landsdekkend gekalibreerd. De kalibratie resultaten van de overige 7 locaties zijn weergegeven in Appendix 3.

5.2 Validatie

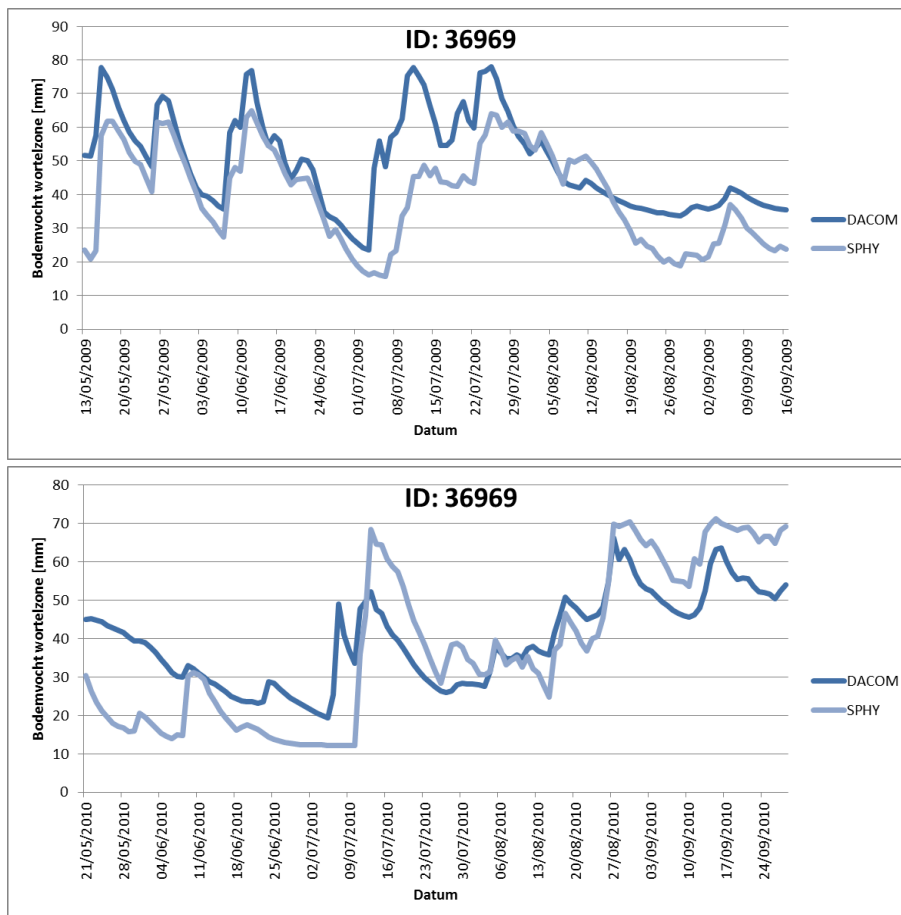
Naast het simuleren van de actuele verdamping is SPHY bedoeld om het bodemvocht in de wortelzone te simuleren. Daarom wordt SPHY in deze paragraaf gevalideerd met gemeten bodemvocht volumes. Zoals beschreven in paragraaf 4.8 wordt hiervoor gebruik gemaakt van bodemvocht sensoren van DACOM, die gebruikt zijn voor het WaterSense project. Voor de simulatie periode 2005-2010, waren bodemvocht metingen alleen beschikbaar gedurende een aantal maanden voor de jaren 2009 en 2010. DACOM heeft het bodemvocht per diepte (Tabel 2) gemeten in percentages van de dikte van de gemeten bodemlaag. De hoeveelheid gemeten bodemvocht in millimeters in de wortelzone is berekend over de totale worteldiepte.

Van een aantal meetlocaties in Figuur 11 is het gemeten bodemvocht vergeleken met het gesimuleerde bodemvocht. De validatie is gedaan op dag basis. Deze locaties zijn weergegeven in Tabel 5 met bijbehorend landgebruik en bodemtype.



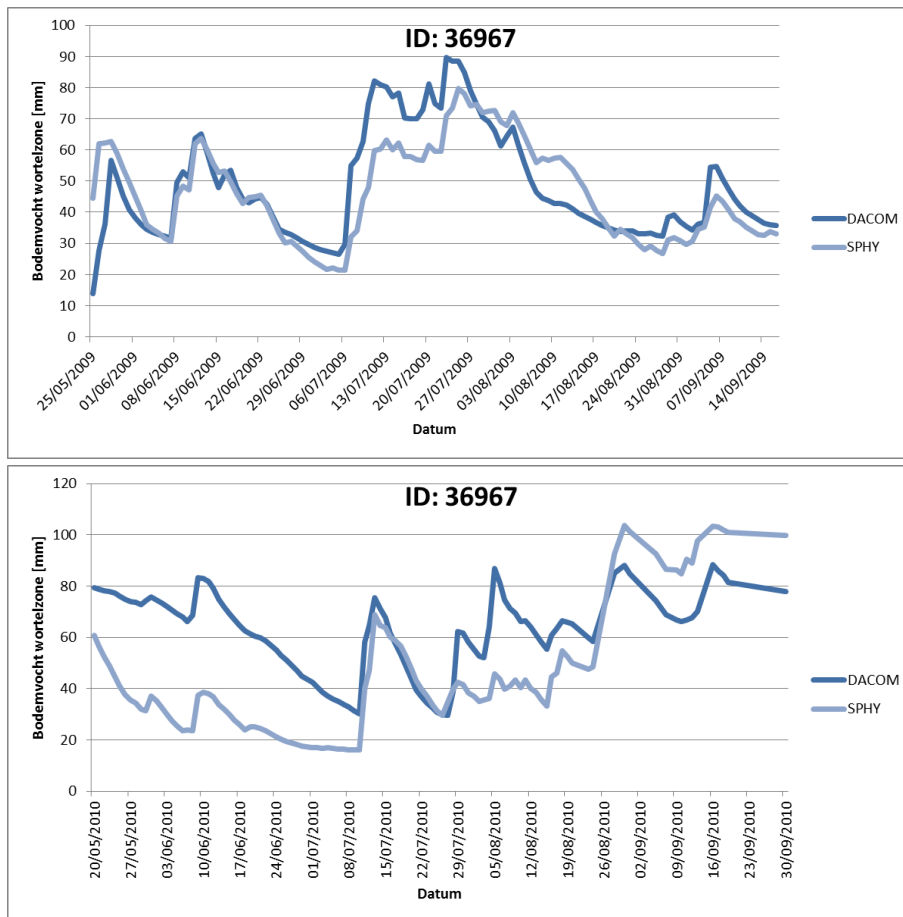
Tabel 5: Geselecteerde DACOM bodemvocht sensoren voor validatie bodemvocht simulatie.

DACOM ID	Land gebruik	Bodem
36969	Granen	Zanddek op veen op zand
36967	Aardappelen	Sterk lemig fijn zand op (kei)leem
36974	Aardappelen	Zanddek op veen op zand
37024	Bieten	Zanddek op veen op zand



Figuur 14: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36969 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.

Figuur 14 geeft de bodemvocht validatie weer van DACOM sensor 36969 voor de maanden mei t/m september voor de jaren 2009 en 2010. Hieruit blijkt dat SPHY goed in staat is om het dagelijkse bodemvocht te simuleren. De fluctuatie in het bodemvocht patroon komt goed overeen met de gemeten bodemvocht fluctuatie. In juli 2009 geeft SPHY een lichte onderschatting van het gemeten bodemvocht. In 2010 komt het gesimuleerde bodemvocht in juli weer goed overeen met het gemeten bodemvocht.

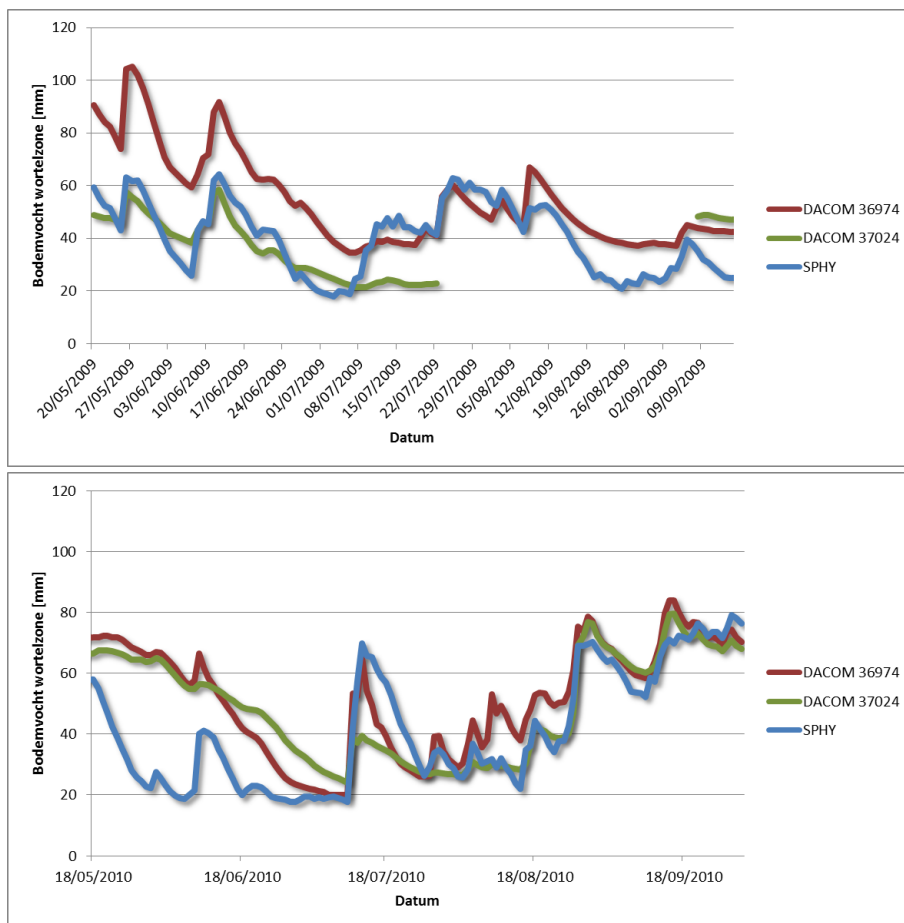


Figuur 15: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36967 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.

Figuur 15 geeft de bodemvocht validatie weer van DACOM sensor 36967 voor de maanden mei t/m september voor de jaren 2009 en 2010. Voor 2009 lijkt SPHY het bodemvocht bijna perfect te simuleren. Wederom is er tijdens juli 2009 sprake van een lichte onderschatting van het gemeten bodemvocht. Tijdens mei en juni 2010 maakt SPHY ook een onderschatting van het bodemvocht, maar vanaf juli is SPHY weer in staat om het bodemvocht redelijk goed te simuleren.

Bij de validatie dient men goed te beseffen dat bodemvocht metingen puntmetingen zijn, die lokaal op enige afstand van elkaar al behoorlijk kunnen variëren. SPHY simuleert het bodemvocht dat representatief is voor een pixel van 250 m x 250 m. In werkelijkheid kan het bodemvocht binnen een SPHY pixel dus aardig variëren. Om inzicht te krijgen in de variatie van bodemvochtmetingen tussen twee meetlocaties, zijn twee bodemvocht meetlocaties met elkaar vergeleken die dicht bij elkaar liggen (ca. 200 m). Dit is weergegeven in Figuur 16. Hierin is tevens het gesimuleerde bodemvocht van de bijbehorende SPHY pixel geplot. Hieruit blijkt dat het gemeten bodemvocht op korte afstand behoorlijk kan variëren. In mei 2009 bedraagt het verschil in gemeten bodemvocht maximaal 50 mm tussen de sensoren die op ca. 200 m afstand van elkaar liggen. Ook in mei 2010 is er een behoorlijk verschil tussen de gemeten bodemvochtsensoren. Dit geeft dus aan dat een mogelijke onder- of overschatting met het SPHY model in praktijk geen onder- of overschatting hoeft te zijn omdat er ruimtelijke variatie in bodemvocht bestaat binnen de 250 x 250 m pixel. Het door SPHY gesimuleerde bodemvocht lijkt goed binnen de range van de gemeten bodemvochtreesen te vallen.



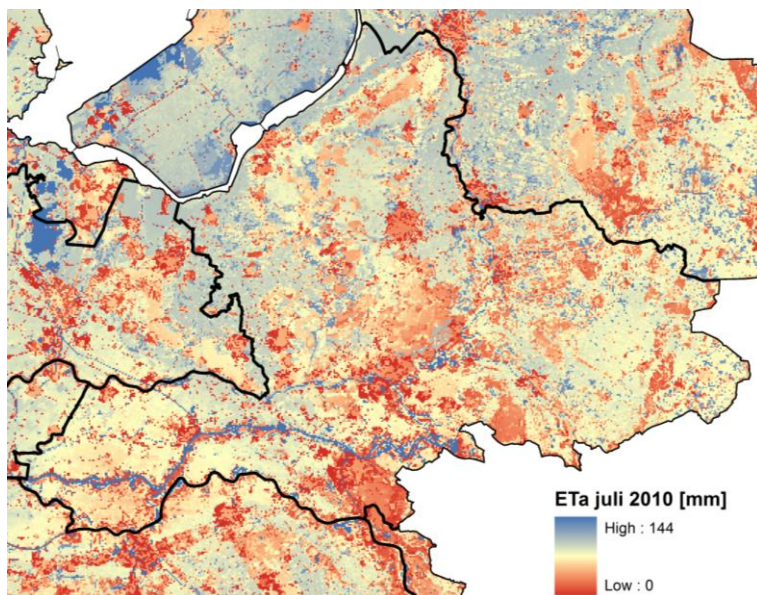


Figuur 16: Vergelijking tussen twee bodemvochtsensoren (ID 36974 en ID 37024) die relatief dicht bij elkaar liggen (ca. 200 m). Het SPHY gesimuleerde bodemvocht van de bijbehorende pixel is ook weergegeven. Vergelijkingen zijn gedaan voor 2009 en 2010.

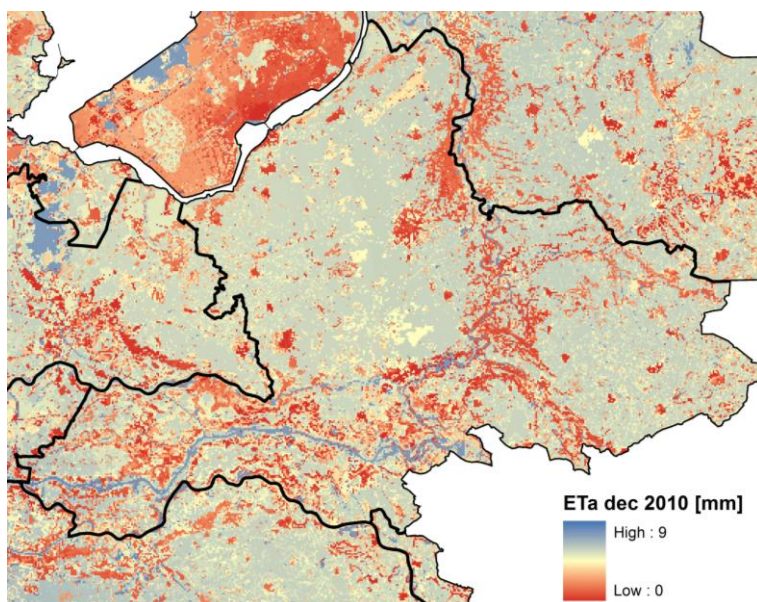
Het blijkt dus dat de validatie van het door SPHY gesimuleerde bodemvocht goed is. De validatie is momenteel gedaan voor een aantal locaties in de veenkoloniën in Drenthe. In de toekomst is het nuttig om het model ook te valideren aan het bodemvocht op andere locaties in Nederland. Vooralsnog zijn daar tot op heden nog geen metingen van.

5.3 Ruimtelijke resultaten

SPHY wordt uiteindelijk gebruikt voor de inschatting van de actuele verdamping en bodemvocht voor heel Nederland. Daarom is het interessant om te zien hoe de actuele verdamping en het bodemvocht ruimtelijk varieert. Figuur 17 en Figuur 18 geven de ruimtelijke verdeling van de actuele verdamping voor juli en december 2010. Hierin is ingezoomd in de provincie Gelderland. Figuur 19 en Figuur 20 geven een ruimtelijk beeld van het relatieve bodemvocht in de wortelzone voor juli en december 2010. Het relatieve bodemvocht is de hoeveelheid bodemvocht als fractie van het verzadigde vochtgehalte.

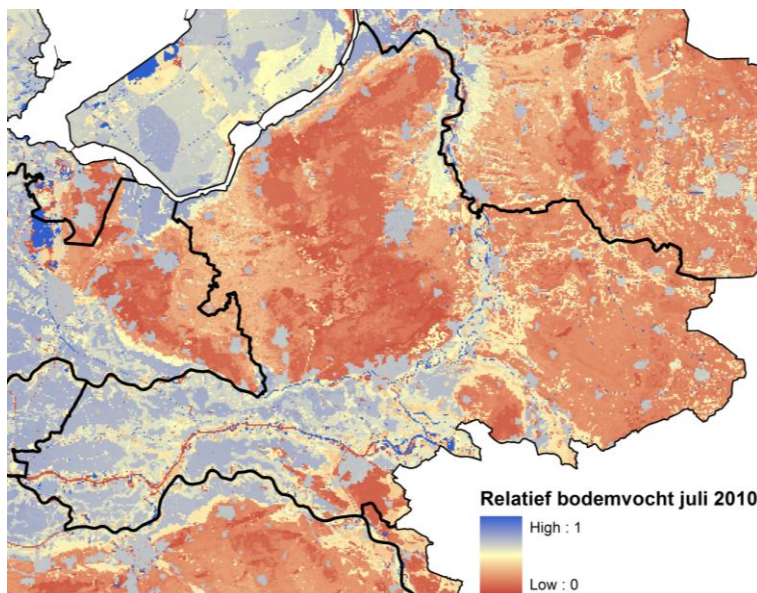


Figuur 17: Ruimtelijke verdeling van de totale verdamping in juli 2010.

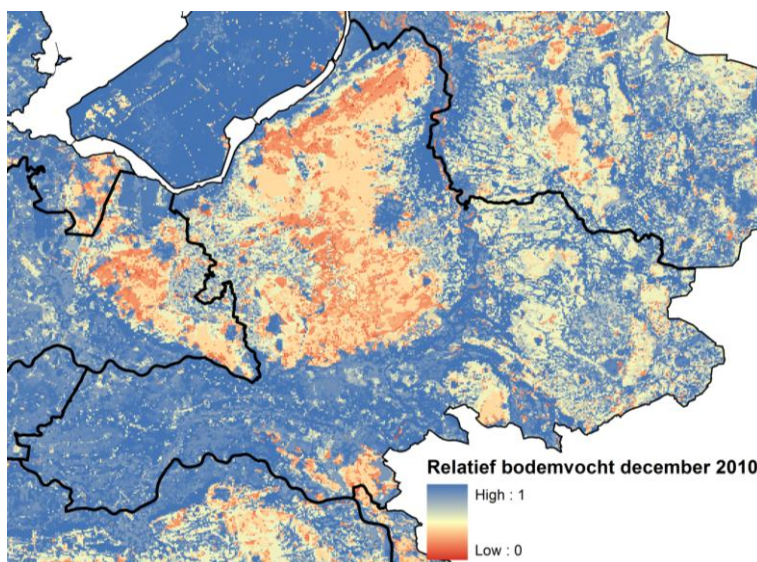


Figuur 18: Ruimtelijke verdeling van de totale verdamping in december 2010.





Figuur 19: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in juli 2010.



Figuur 20: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in december 2010.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Vanuit de Nederlandse maatschappij is er een alsmaar groeiende vraag naar een product dat een inschatting kan geven van het actuele vochtgehalte in de wortelzone alsmede de actuele verdamping. Tot op heden zijn er echter nog geen producten die deze vragen beide kunnen beantwoorden. De producten die momenteel aangeboden worden zijn alleen gebaseerd op remote sensing. Deze producten hebben echter een aantal nadelen: i) ze hebben geen voorspellende waarde, ii) ze leveren of de actuele verdamping, of een inschatting van het bodemvocht, maar niet beide, en iii) de inschatting van het bodemvocht is vaak beperkt tot de eerste paar centimeter van de bodem.

Het doel van deze studie was *“het ontwikkelen van een hydrologisch waterbalans model voor Nederland dat gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het actuele bodemvocht in de wortelzone”*.

Het resultaat van deze studie is een goed gekalibreerd en gevalideerd model met de naam SPHY (Spatial Processes in HYdrology). Het model is gekalibreerd aan de gemeten actuele verdamping op een aantal plaatsen in Nederland. Tussen de gemeten en gesimuleerde totale actuele verdamping blijkt maximaal een afwijking van 14% te zitten. Voor de meeste locaties laat SPHY een afwijking zien van <5%. Op maandbasis is SPHY in staat om het gemeten actuele verdampingspatroon goed te simuleren. De maandelijkse afwijking varieert gemiddeld tussen de 7 en 16 mm. Het blijkt dat voor sommige jaren SPHY de gemeten verdamping in de maand juli onderschat. Nader onderzoek moet uitwijzen waarom dit niet in alle jaren gebeurt.

Het model is gevalideerd aan de hand van het gemeten bodemvocht op een aantal locaties in de Drentse veenkoloniën. De validatie is gedaan op dag basis, en het kan geconcludeerd worden dat SPHY goed in staat is om het bodemvocht te simuleren. Uit analyses is gebleken dat SPHY zowel een lichte over- als onderschatting kan maken van het gemeten bodemvocht. Deze over- en onderschatting blijken echter te verwaarlozen als men zich realiseert dat de bodemvocht metingen puntmetingen zijn. Het blijkt namelijk dat het gemeten bodemvocht op twee verschillende locaties (200 m afstand van elkaar) binnen 1 SPHY pixel behoorlijk van elkaar kunnen afwijken. Uit analyse is gebleken dat het gesimuleerde SPHY bodemvocht binnen deze range van gemeten bodemvocht metingen valt.

6.2 Aanbevelingen

Deze versie van SPHY bevat een aantal model concepten en data invoer die in de toekomst mogelijk verbeterd kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is dat tijdens de kalibratie bleek dat de locatie waar de actuele verdamping gemeten werd een ander landgebruik kan hebben dan wat er in het SPHY model zit. Dit is mogelijk door de temporele variatie in vegetatie door het jaar heen. In het SPHY model is het landgebruik nog een statische kaart gedurende het jaar. Een verbetering van SPHY zou dus een tijdsafhankelijke landgebruikskaart zijn, waarin de worteldiepte en de gewasfactor gedurende het jaar varieert.

Een tweede aanbeveling betreft de kwel/wegzijging zoals die nu in SPHY zit. De



kwel/wegzijging is nu ook als constant aangenomen gedurende de gehele simulatie periode. In werkelijkheid zal deze seizoen afhankelijk zijn. Een aanbeveling voor de toekomst is dus om een verbeterde onderrand in het SPHY model te implementeren. Mogelijk kan er eind 2012 een update gedaan worden door gebruik te maken van de onderrand die zit in de nog uit te komen NHI versie 3.0.

Het SPHY model kan worden gebruikt voor het bepalen van bodemvocht en actuele verdamping op een hoge resolutie voor heel Nederland voor elke gewenst moment in het verleden. Daarnaast kan SPHY worden ingezet voor scenario analyses om bijvoorbeeld de invloed van klimaatverandering te bepalen. Verder biedt het SPHY model de mogelijkheid om ontwikkeld te worden tot een online applicatie waarmee real-time historische, actuele en toekomstige bodemvocht en actuele verdamping kan worden berekend.

7 Referenties

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper. 56.
- Berthier, E., Y. Arnaud, R. Kumar, S. Ahmad, P. Wagnon, P. Chevallier. 2007. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sensing of Environment*. 108(3): 327-338.
- Burrough, P.A., R.A. McDonnell. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press.
- De Vries, F. 1999. Karakterisering van Nederlandse gronden naar fysisch-chemische kenmerken. Staring Centrum Rapport 654. Wageningen.
- De Wit, A.J.W., C.A. van Diepen. 2007. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology*. 146: 38-56.
- Droogers, P., W. Bastiaanssen. 2002. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128: 11-18.
- Droogers, P., W.W. Immerzeel. 2010. Wat is het beste model? *H₂O*. 4: 38-41.
- Droogers, P., C. Perry. 2008. Scenario based water resources model to support policy making. FutureWater rapport 79.
- Elbers, J.A., E.J. Moors, C.M.J. Jacobs. 2009. Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. Alterra-rapport 1920. Wageningen.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik, H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs*. Pudoc. Wageningen. 189 pp.
- Hazeu, G.W. 2005. Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5). Vervaardiging, nauwkeurigheid en gebruik. Alterra-rapport 1213. Wageningen.
- Hiemstra, P., R. Sluiter. Interpolation of Makkink evaporation in the Netherlands. KNMI technical report: TR-327. De Bilt.
- Hutchinson, M., P. Gessler. 1994. Splines - more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62(1-3): 45-67.
- Kleinhans, M.G., M.F.P. Bierkens, M. van der Perk. 2010. Hydrologists, bring out shovels and garden hoses and hit the dirt. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14: 369-382.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Wageningen, Alterra, Alterra Report1649(02) - Swap32 Theory description and user manual.doc. 262 pp.
- Kummerow, C., J. Simpson, O. Thiele, W. Barnes, A. Chang, E. Stocker, R. Adler, A. Hou, R. Kakar, F. Wentz, P. Ashcroft, T. Kozu, Y. Hong, K.O.T. Iguchi, H. Kuroiwa, E. Im, Z. Haddad, G. Huffman, B. Ferrier, W. Olson, E. Zipser, E. Smith, T. Wilheit, G. North, T. Krishnamurti, and K. Nakamura. 2000. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology*. 39(12): 1965-1982.
- Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*. 11: 277-288.
- McDonald, M.G., A.W. Harbaugh. 2003. The history of MODFLOW. *Ground Water*. 41(2): 280-283.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005.
- NHI. 2008. Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI Modelrapportage. Deelrapport landgebruik.
- NHI. 2008a. Nationaal Hydrologisch Instrumentarium – NHI Modelrapportage. Deelrapport bodem.



- Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 4: 7-29.
- Linsley, R. 1976. Why simulation? *Hydrocomp Simulation Network Newsletter* 8-5.
- Rientjes, T., W. Zaadnoordijk. 2000. Hoogwatervoorspelling: fysisch gebaseerde regen-afvoermodellering. *Dilemma of Deja VU? Stromingen*. 1: 33-44.
- Schoumans, O.F., J. Roelsma, H.P. Oosterom, P. Groenendijk, J. Wolf, H. van Zeijts, G.J. van den Born, S. van Tol, A.H.W. Beusen, H.F.M. ten Berge, H.G. van der Meer, F.K. van Evert. 2002. Nutriëntenemissie vanuit landbouwgronden naar het grondwater en oppervlaktewater bij varianten van verliesnormen. Modelberekeningen met STONE 2.0. Rapportage cluster 4, deel 1, Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- Sivapalan, M. 2009. The secret to 'doing better hydrological science': change the question! *Hydrological Processes*. 23: 1391-1396.
- Sloan, P.G., I.D. Moore, G.B. Coltharp, J.D. Eigel. 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. *Water Resources Inst. Report* 142. University of Kentucky, Lexington.
- Sloan, P.G., I.D. Moore. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*. 20(12): 1815-1822.
- Soenario, I., R. Sluiter. 2010. Optimization of Rainfall Interpolation. KNMI intern rapport: IR 2010-01. De Bilt.
- Smith, L.C. 1997. Satellite Remote Sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. *Hydrological Processes*. 11: 1427-1439.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Van Bakel, P.J.T., H.Th.L. Massop, J.G. Kroes, J. Hoogewoud, M.J.H. Pastoors, T. Kroon. 2008. Actualisatie hydrologie voor STONE 2.3. Aanpassing randvoorwaarden en parameters, koppeling tussen NAGROM en SWAP, en plausibiliteitstoets. Rapport 57. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
- Van Dam, J.C. 2000. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen Universiteit, 167 pp.
- Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen, P. Groenendijk. 2010. SIMGRO 7.1.0. Theory and model implementation. Alterra-report 913.1. Alterra, Green World Research, Wageningen.
- Wahba, G. 1990. Spline models for observational data. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)*. Vol. 59. Philadelphia, PA.
- 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.
- Stiboka, Wageningen. Rapport 2055.

Appendix 1: Landgebruiksklassen in SPHY

LGN-code	LGN-beschrijving
1	Agrarisch gras
2	Maïs
3	Aardappelen
4	Bieten
5	Granen
6	Overige landbouwgewassen
8	Glastuinbouw
9	Boomgaarden
10	Bloembollen
11	Loofbos
12	Naaldbos
16	Zoet water
17	Zoutwater
18	Stedelijk bebouwd gebied
19	Bebouwing in buitengebied
20	Loofbos in bebouwd gebied
21	Naaldbos in bebouwd gebied
22	Bos met dichte bebouwing
23	Gras in bebouwd gebied
24	Kale grond in bebouwd buitengebied
25	Hoofdwegen en spoorwegen
26	Bebouwing in agrarisch gebied
30	Kwelders
31	Open zand in kustgebied
32	Open duinvegetatie
33	Gesloten duinvegetatie
34	Duinheide
35	Open stuifzand
36	Heide
37	Matig vergraste heide
38	Sterk vergraste heide
39	Hoogveen
40	Bos in hoogveengebied
41	Overige moerasvegetatie
42	Rietvegetatie
43	Bos in moerasgebied
44	Veenweidegebieden
45	Overig open begroeid natuurgebied
46	Kale grond in natuurgebied



Appendix 2: Overzicht van eenheden op basis van bodemopbouw in SPHY

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	Enkeergronden (fijn zand)	Enkeergronden, 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	Begin diepte veenondergrond 40 – 120 cm-mv.	B12,O13,O17
19	Klei op zand	Begin diepte zandondergrond 25 – 80 cm-mv.	B8,O10,O2
20	Klei op grof zand	Begin diepte grofzandige ondergrond 25 – 120cm-mv..	B8,O10,O5
21	Leem	Alle leemgronden, inclusief keileemgronden (KX en KT)	O15

(Bron: NHI, 2008a).



Appendix 3: Kalibratie resultaten SPHY

