

"Spatial Processes in Hydrology" (SPHY) – Bodemvocht bepaling ter ondersteuning van analyse Q-koorts transmissie risico

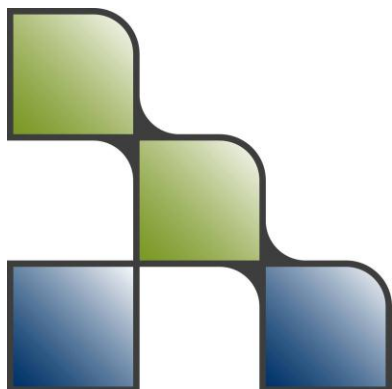
December 2012

Auteur

W. Terink
J. van Leuken
P. Droogers
A. Swart
W. van der Hoek

Report FutureWater: 122

Dit project is mogelijk gemaakt door
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM):
SOR project no. S/210206,
'Environmental risk factors for Q fever'



FutureWater

Costerweg 1V
6702 AA Wageningen
The Netherlands

+31 (0)317 460050

info@futurewater.nl

www.futurewater.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Achtergrond Q-koorts	5
1.3	Doelstelling	5
2	Modelkeuze	7
2.1	Nederland en hydrologische modellen	7
2.2	Beschikbare modellen en Spatial Processes in Hydrology (SPHY)	7
3	Beschrijving van SPHY	9
3.1	Model concept	9
3.2	Oppervlakteafvoer	10
3.3	Actuele verdamping	10
3.4	Drainage	11
3.5	Percolatie	12
3.6	Capillaire opstijging	12
3.7	Kwel en wegzijging	13
4	Invoerdata en kalibratie & validatie	14
4.1	Neerslag	14
4.2	Referentieverdamping	15
4.3	Landgebruik	16
4.4	Bodemkaart	17
4.5	Hoogtekaart	19
4.6	Kwel en wegzijging	19
4.7	Kalibratie: actuele gemeten verdamping	20
4.8	Validatie: gemeten bodemvocht	21
5	Resultaten	23
5.1	Kalibratie	23
5.2	Validatie	27
5.3	Ruimtelijke resultaten	30
6	Conclusies en aanbevelingen	32
6.1	Conclusies	32
6.2	Aanbevelingen	32
7	Referenties	34



Tabellen

Tabel 1: Meet dieptes van DACOM bodemvocht sensoren per meetlocatie.	22
Tabel 2: SPHY kalibratie parameters voor en na de kalibratie.	24
Tabel 3: Totale gemeten en gesimuleerde verdamping van het SPHY-model. Resultaten van voor en na de kalibratie zijn weergegeven.	25
Tabel 4: Unieke combinaties van bodemtype en landgebruik in SPHY op de negen meetlocaties.	27
Tabel 5: Geselecteerde bodemvochtsensoren	28

Figuren

Figuur 1: Indeling van modellen op basis van ruimtelijke schaal en fysisch detailniveau (Droogers en Perry, 2008).	8
Figuur 2: Modelconcept van SPHY (Spatial Processes in HYdrology).	9
Figuur 3: Voorbeeld van geïnterpoleerde KNMI neerslag.	15
Figuur 4: Neerslagstations gebruikt voor interpolatie (Soenario en Sluiter, 2010).	15
Figuur 5: Voorbeeld van geïnterpoleerde Makkink ET_{ref}	16
Figuur 6: Landgebruik in SPHY volgens LGN-grid en LGN-gewassenbestand (Hazeu, 2005; NHI, 2008).	17
Figuur 7: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).	18
Figuur 8: Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) op een resolutie van 250 m.	19
Figuur 9: Kwel en wegzijging volgens STONE. Positief is kwel, negatief is wegzijging.	20
Figuur 10: Overzicht geselecteerde locaties waar de actuele verdamping gemeten is.	21
Figuur 11: Overzicht DACOM bodemvochtlocaties gemeten in de periode 2005-2010 op een diepte van 0-60 cm beneden maaiveld.	22
Figuur 12: Gemeten en gesimuleerde maandelijkse actuele verdamping in Cabauw voor de periode januari 2005 t/m december 2008.	26
Figuur 13: Gemeten en gesimuleerde actuele verdamping in Vredepeel voor de periode april 2006 t/m februari 2007.	27
Figuur 14: Validatie bodemvocht voor ID 36969 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.	28
Figuur 15: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36967 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.	29
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.	30
Figuur 17: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in juli 2010.	31
Figuur 18: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in december 2010.	31

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bodemvocht speelt een belangrijke rol in tal van toepassingen variërend van landbouw tot waterbeheer tot meteorologie tot klimaatonderzoek en tot epidemiologie (Q-koorts uitbraken). Het gaat hierbij dan om het analyseren van bodemvocht in het verleden, de huidige situatie en verwachtingen voor de toekomst (korte termijn voor operationele maatregelen, lange termijn voor impact van klimaatveranderingen).

In het algemeen kan bodemvocht op drie manieren worden verkregen: (i) metingen in het veld, (ii) observaties met remote sensing, en (iii) simulaties met een hydrologisch model. Elk van deze drie methoden heeft bepaalde voor en nadelen. Metingen in het veld worden vaak gezien als de standaard en meest nauwkeurig. Hierbij moet wel bedacht worden dat het om een punt meting gaat die beperkt is tot enkele vierkante centimeters. Daarnaast wordt de bodem vaak verstoord tijdens het plaatsen van een sensor. Tenslotte zijn directe metingen in het veld vaak kostbaar en zijn vele sensoren nodig om een representatief beeld te verkrijgen.

Gebruik van remote sensing (meestal satellieten, soms vliegtuigen) is daarom een zeer geschikt alternatief. De belangrijkste producten die momenteel operationeel aangeboden worden zijn DRYMON¹ en mijnakker.nl². Deze tools/producten maken gebruik van remote sensing, wat betekent dat ze geen voorspellende waarde hebben. De DRYMON van Neo maakt 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. Remote sensing kan echter geen voorspelling 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).

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

¹ <http://www.neo.nl>

² mijnakker.nl

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

⁴ <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>



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

Naast de meer algemene toepassing van een bodemvochtmodel voor landbouw en waterbeheer, zijn er ook toepassingen denkbaar in de epidemiologie. Recentelijk (Hunink et al., 2010) is aangetoond dat transmissie van de bacterie die Q koorts veroorzaakt, gerelateerd is aan milieuomstandigheden (bijvoorbeeld droge omstandigheden). Een model dat het bodemvocht in de wortelzone simuleert biedt voor dergelijke studies dus veel perspectief, wat mede een aanleiding is om een bodemvocht model te ontwikkelen.

1.2 Achtergrond Q-koorts

Coxiella burnetii, een bacterie die bij veel diersoorten wereldwijd voorkomt, kan leiden tot humane Q-koorts, zoals heeft plaatsgevonden in de jaren 2007-2010 in Nederland (zie bijvoorbeeld Schimmer et al., 2008, 2009). Hoewel de grootste emissie optreedt tijdens en vlak na de bevalling van besmette dieren, is de bacterie in staat om gedurende lange tijd in het milieu te overleven en zo voor een langer durend infectierisico te zorgen (Yanase et al., 1998). Volgens Tigertt et al. (1961) is slechts één bacterie voldoende is om een mens te infecteren.

Infectie met *C. burnetii* kan bevorderd worden door specifieke milieuomstandigheden, zoals relatief droge omstandigheden en vegetatiedichtheid (Hunink et al., 2010). Verder spelen ook de windrichting en –snelheid een belangrijke rol (Hawker et al., 1998; Tissot-Dupont et al., 1999).

In een lopende studie van Van Leuken et al. (in progress) wordt verder onderzoek gedaan naar de relatie tussen Q-koortsinfectie en lokale milieuomstandigheden. Voor het in kaart brengen van de temporele en spatiële variatie in bodemvochtigheid, dienen gedetailleerde bodemvochtigheidskaarten gebruikt te worden. Naast de genoemde aanleidingen in paragraaf 1.1, is het Q-koortsonderzoek een andere aanleiding voor het ontwikkelen van het SPHY-model.

1.3 Doelstelling

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

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

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.



2 Modelkeuze

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 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 ModFlow (McDonald en Harbaugh, 2003). Een derde groep houdt zich met name bezig met oppervlaktewater stromingen en hydraulica, waarbij SOBEK⁵ 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 meest geschikt is.

Het nadeel van complexe modellen is echter dat er vaak ook gedetailleerde invoerdata voor nodig zijn, die niet altijd beschikbaar zijn. Bovendien wordt van de gebruiker verwacht dat zijn 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 hebben complexe, meer fysisch georiënteerde modellen de voorkeur, maar dan moet altijd vooraf een analyse worden uitgevoerd over de noodzakelijke hoeveelheid detail. Hiervoor is in de internationale literatuur veel aandacht. Sivapalan (2009) pleit voor een vraag- en hypothese gedreven hydrologie, waarin data-analyse en een top-down modelleerbenadering leiden tot algemene verklaringen en begrip van trends en patronen. 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 modelparameters en onduidelijkheid over het generalisatieniveau van de model fysica (Kleinhans et al., 2010).

2.2 Beschikbare modellen en Spatial Processes in Hydrology (SPHY)

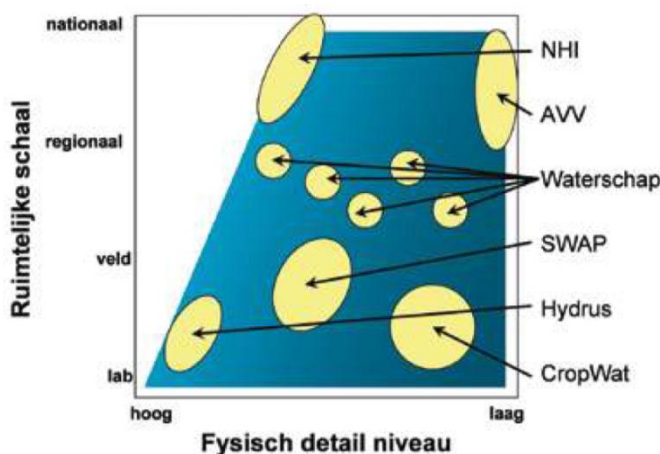
Er is een breed scala aan hydrologische modellen beschikbaar. Elk hydrologisch model heeft zijn eigen toepassingsgebied (grondwater, onverzadigde zone, etc.). Zoals in paragraaf 1.3 is beschreven, is de doelstelling van deze studie het ontwikkelen van een hydrologisch waterbalansmodel voor Nederland dat gericht is op het simuleren van de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone. De vraag die daarbij opkomt is: hoe complex dient het model te zijn om deze doelstelling te verwezenlijken? Droogers & Immerzeel (2010) gaan in op de complexiteit van modellen en de vraag: "Wat is het beste model?". Zij concluderen dat het beste model niet bestaat, maar dat het afhankelijk is van de vraag die het model moet

⁵ <http://www.deltaessystems.com/hydro/product/108282/sobek-suite>

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 aanwezig is. In Figuur 1 zijn twee belangrijke probleemdomeneinen weergegeven: de ruimtelijke schaal en de hoeveelheid fysisch detail die nodig is om een hydrologisch probleemstuk op te lossen. In alle gevallen geldt dat teveel detail op een te hoog ruimtelijk schaalniveau niet realiseerbaar is vanwege computercapaciteit en onverwachte neveneffecten door samenhang in processen. Een veel gebruikt model op veldschaal (perceel niveau) is het SWAP model. Daarnaast wordt SWAP ook wel voor laboratoriumproeven gebruikt en gedistribueerd toegepast op regionale en nationale schaal.

Verder laat Figuur 1 een aantal waterschapmodellen zien. Deze bestaan vaak uit een combinatie van SIMGRO, ModFlow en SOBEK. Tot slot laat dit figuur het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI⁶) wat het belangrijkste landsdekkende hydrologische model van Nederland is met een hoog fysisch detailniveau.



Figuur 1: Indeling van modellen op basis van ruimtelijke schaal en fysisch detailniveau (Droogers en Perry, 2008).

Ter beantwoording van de onderzoeksvraag, dient een hydrologisch waterbalansmodel ontwikkeld te worden dat landsdekkend (dus 'nationaal' in Figuur 1) de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone kan simuleren. Op nationaal niveau zien we in Figuur 1 alleen het complexe 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 voor dit onderzoek ontwikkelde model SPHY (Spatial Processes in Hydrology) hoeft niet zo complex te zijn als het NHI en kan dus volstaan met minder invoergegevens, terwijl de ruimtelijke resolutie van 250 m voldoende is voor de berekening van bodemvocht in de wortelzone en de actuele verdamping.

De voorganger van SPHY is ontwikkeld door Droogers en Immerzeel (2010), en was genaamd "HydroS". Het doel van HydroS was het modelleren van de verwachte wateroverlast door klimaatverandering op nationale schaal als gevolg van extreme neerslag. Ten opzichte van HydroS, bevat SPHY vooral meer vergelijkingen die de drainage en de percolatie vanuit de wortelzone berekenen.

⁶ <http://www.nhi.nu/>



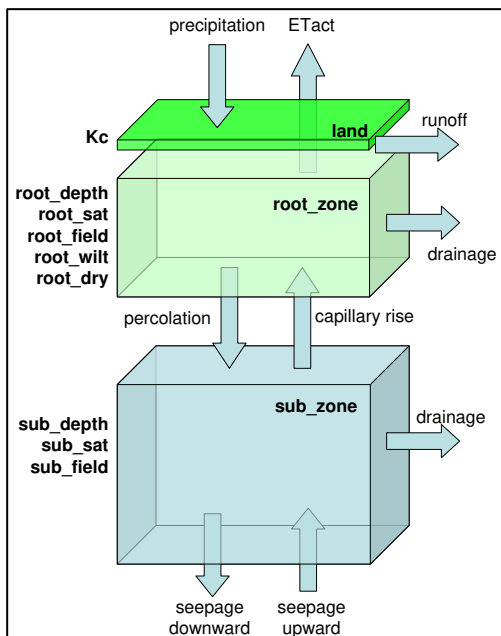
3 Beschrijving van SPHY

SPHY dient landsdekkend voor Nederland de actuele verdamping en het bodemvocht in de wortelzone 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.

3.1 Model concept

Het basisconcept voor SPHY (Figuur 2) bestaat uit een tweelaags gekoppeld bakjesmodel (wortelzone en sub-zone) en een vegetatielaag. Inkomende fluxen zijn neerslag (precipitation) en kwel (seepage upward). Uitgaande fluxen zijn oppervlakteafvoer (runoff), actuele verdamping (ETact), drainage vanuit de wortelzone, drainage vanuit de onderste bodemlaag, en wegzijging (seepage downward).

De mate van helling in een bepaalde cel heeft invloed op de drainage vanuit de wortelzone en tweede bodemlaag. 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 hierop volgende paragrafen beschrijven respectievelijk de volgende hydrologische processen in SPHY: oppervlakteafvoer, actuele verdamping, drainage, percolatie, capillaire opstijging, en kwel en wegzijging.



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

3.2 Oppervlakteafvoer

Oppervlakteafvoer (runoff) treedt op wanneer de neerslagintensiteit hoger is dan de mate waarin water in de bodem kan infiltreren (Neitsch et al., 2005). Met andere woorden: de infiltratiesnelheid, en dus de oppervlakteafvoer, is afhankelijk van de actuele bodemvochtigheid. 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 rekent, 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 oppervlakteafvoer in SPHY op wanneer de hoeveelheid bodemvocht in de wortelzone het gehalte verzadigd water in de wortelzone overschrijdt. Nadat de oppervlakteafvoer is berekend, wordt de totale bodemvochtigheid in de wortelzone berekend.

3.3 Actuele verdamping

Vervolgens wordt de actuele verdamping in SPHY berekend. “Verdamping” – ook wel evapotranspiratie genoemd – omvat alle processen waarbij vocht aan het aardoppervlak omgezet wordt in waterdamp, te weten evaporatie, transpiratie en sublimatie (Neitsch et al., 2005).

De basis voor het berekenen van de actuele verdamping ligt bij de potentiële verdamping (evapotranspiratie). Het concept van de potentiële evapotranspiratie is van oorsprong beschreven door Thornthwaite (1948), die het definieerde als de snelheid waarmee evapotranspiratie optreedt in een gebied dat homogeen bedekt is met vegetatie, die beschikt over een ongelimiteerde hoeveelheid water. De potentiële evapotranspiratie wordt sterk beïnvloed door een aantal vegetatie-eigenschappen. Daarom heeft Penman (1956) de potentiële evapotranspiratie gedefinieerd als: *“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 niet alleen de potentiële evapotranspiratie van gras gebruiken, maar die van alle gewassen. Daartoe gebruiken we de gewascoëfficiënt (K_c), die het effect van zowel gewastranspiratie als bodemevaporatie integreert (Allen et al., 1998). De gewascoëfficiënt 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 en ET_{ref} de referentieverdamping. De referentieverdamping wordt berekend aan de hand van diverse meteorologische fluxen (in Nederland door het KNMI met behulp van de vergelijking van Makkink (Makkink, 1957).

Vegetatie kan op verschillende manieren stress (bijvoorbeeld door teveel of te weinig water) ondervinden waardoor de actuele evapotranspiratie lager is dan de potentiële evapotranspiratie. Met behulp van de Feddes-functie berekent SPHY de actuele evapotranspiratie (Feddes et al., 1978):

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



met $ETred_{wet}$ de reductie voor teveel water, $RootWater$ het vochtgehalte in de wortelzone, en $root_{sat}$ het verzadigde vochtgehalte in de wortelzone. De verdampingsreductie als gevolg van watertekort wordt als volgt berekend:

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

met $ETred_{dry}$ 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:

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

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

Vervolgens wordt wederom het vochtgehalte in de wortelzone berekend.

3.4 Drainage

Drainage in SPHY is grotendeels gebaseerd op het kinematische balansmodel voor ondergrondse stromingen van Sloan et al. (1983), samengevat door Sloan en Moore (1984). Het volume aan water dat voor drainage gebruikt kan worden is het verschil tussen het actuele bodemvochtgehalte en het bodemvochtgehalte 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 één 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 houdt SPHY rekening met 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 in plaats van over de wortelzone.

Vervolgens wordt wederom het vochtgehalte in de wortelzone berekend.

3.5 Percolatie

Percolatie van de wortelzone naar de sub-zone is alleen mogelijk zodra het bodemvochtgehalte in de wortelzone hoger is dan de veldcapaciteit van de wortelzone en indien 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 bodemvochtgehalte en het bodemvochtgehalte 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 nodig deze eerst afzonderlijk van elkaar te berekenen alvorens de capillaire opstijging berekend kan worden. 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 bodemvochtgehalte in de sub-zone wordt dus elke tijdstap opnieuw berekend doordat er percolatie bijkomt, en er drainage en capillaire opstijging afgaat.

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 deze fluxen moeilijk te meten zijn. Kwel en wegzijging zijn sterk gekoppeld aan de grondwaterstromingen gedurende het jaar. Omdat SPHY gericht is op het simuleren van het bodemvochtgehalte in de wortelzone zit er geen grondwatercomponent in SPHY. Om toch een enigszins aannemelijke onderrand te verkrijgen, is gekozen om de kwel en wegzijging van het STONE⁷-instrumentarium te gebruiken. Dit is een kaart (250 x 250 m resolutie) met een jaargemiddelde waarde voor kwel of wegzijging. Het is voor de toekomst aan te bevelen om deze kaart tijdsafhankelijk te maken.

⁷ STONE is een afkorting van Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel



4 Invoerdata en kalibratie & validatie

Voor de hydrologische berekeningen, zoals beschreven in de vorige paragraaf, zijn invoerdata nodig van neerslag, verdamping, landgebruik, bodem, hoogte, en kwel en wegzijging. Dit hoofdstuk beschrijft deze invoerparameters. Verder beschrijft dit hoofdstuk de kalibratie en validatie van SPHY. Binnen het vakgebied van de hydrologie is model kalibratie een algemeen begrip; het dusdanig aanpassen van modelparameters zodat het gesimuleerde proces (bijvoorbeeld afvoer) het geobserveerde proces zo goed mogelijk evenaart. Nadat het model goed gekalibreerd is wordt het model vaak gevalideerd met een andere meting (bijvoorbeeld een verschillende tijdsperiode en/of andere observatie). Het doel hiervan is om te verifiëren of het model werkelijk in staat is om, zonder verdere aanpassing van modelparameters, de werkelijkheid ook voor een andere tijdsperiode of locatie zo goed mogelijk te simuleren.

Voor de kalibratie van SPHY is gekozen voor de actuele verdamping die gemeten is op twaalf locaties in Nederland (Elbers et al., 2009). Er is gekozen om te kalibreren op de actuele verdamping omdat dit één van de simulatiedoelinden van SPHY is. De verdamping is tevens een belangrijke balanstern in hydrologische modellen. Als men erin slaagt deze goed te simuleren, dan is de basis voor de overige processen ook goed. Omdat SPHY ook als doel heeft om het bodemvocht in de wortelzone te simuleren, is ervoor gekozen om SPHY te valideren aan gemeten bodemvocht. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van DACOM⁸ sensoren die gebruikt zijn tijdens het project WaterSense⁹.

4.1 Neerslag

Waar de voorganger van SPHY (HydroS) nog gebruik maakte van één neerslagstation van Nederland, maakt SPHY gebruik van dagelijks geïnterpoleerde neerslagkaarten van het KNMI¹⁰ (Soenario en Sluiter, 2010), berekend met behulp van de interpolatietechniek Ordinary Kriging (Burrough en McDonnell, 1998). Figuur 3 toont een voorbeeld van een dagelijks geïnterpoleerde neerslagkaart. De hiervoor gebruikte neerslagstations zijn weergegeven in Figuur 4.

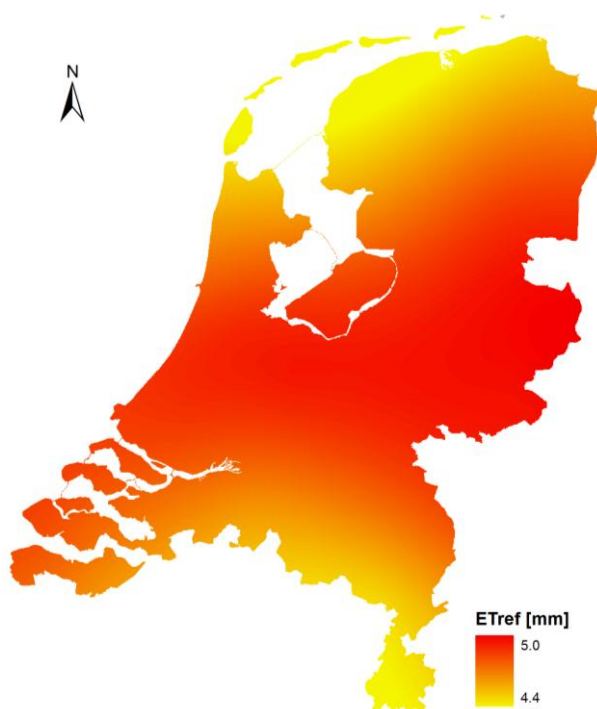
⁸ <http://www.dacom.nl/index.php/nl/>

⁹ <http://www.projectwatersense.nl/>

¹⁰ <http://knmi.nl/>



verdampingskaarten (Makkink ET_{ref}) (Hiemstra en Sluiter, 2011) van het KNMI. Evapotranspiratie is een zeer belangrijke post in het SPHY-model, aangezien ca. 70% van de neerslag in Nederland 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} kaarten voor Nederland. De door Hiemstra en Sluiter (2011) gebruikte interpolatietechniek is Thin Plate Splines (TPS) (Wahba, 1990; Hutchinson en Gessler, 1994). Een voorbeeld van een geïnterpoleerd ET_{ref} beeld is te zien in Figuur 5.



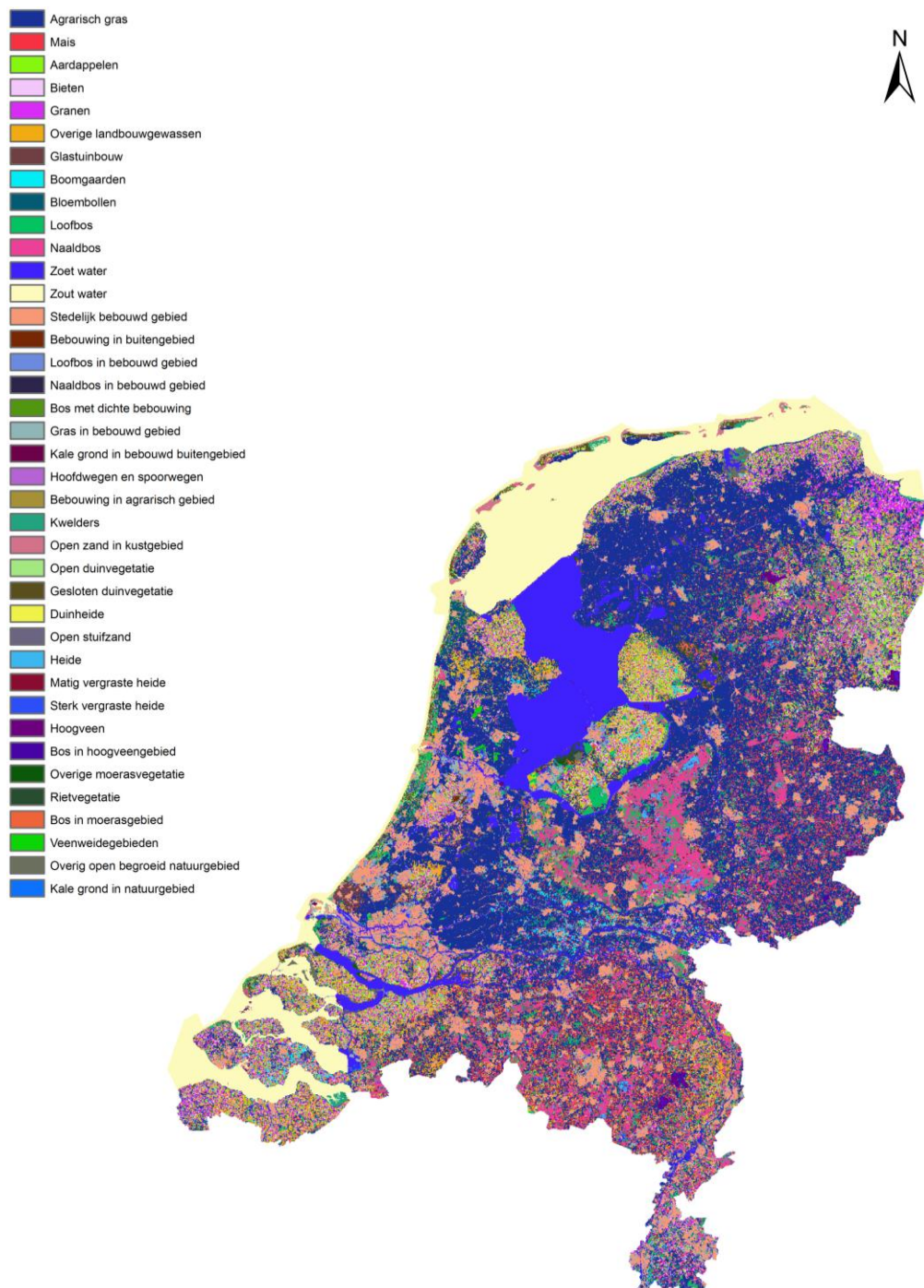
Figuur 5: Voorbeeld van geïnterpoleerde Makkink ET_{ref} .

4.3 Landgebruik

Het landgebruik in SPHY is bepalend voor de dikte van de wortelzone en de gewasfactor. De dikte van de wortelzone bepaalt in combinatie met de bodemkaart het verzadigd bodemvochtgehalte, vochtgehalte bij veldcapaciteit, verwilkingspunt, en permanent verwilkingspunt. 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 van en naar de sub-zone bepalen, zijn deze parameters gebruikt als kalibratieparameters.

Voor het landgebruik in SPHY is gekozen voor het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN-5) (Hazeu, 2005; NHI, 2008). LGN-6 is een verbeterde versie van LGN-5 en is niet gebruikt in verband met de hoge prijs die hiervoor betaald moet worden. Het LGN bestand is een landsdekkend rasterbestand waarin 39 vormen van landgebruik zijn opgenomen. Sinds 1986 wordt dit bestand met een frequentie van 3-5 jaar opnieuw uitgegeven. De LGN is uitgebreid met een 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.





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

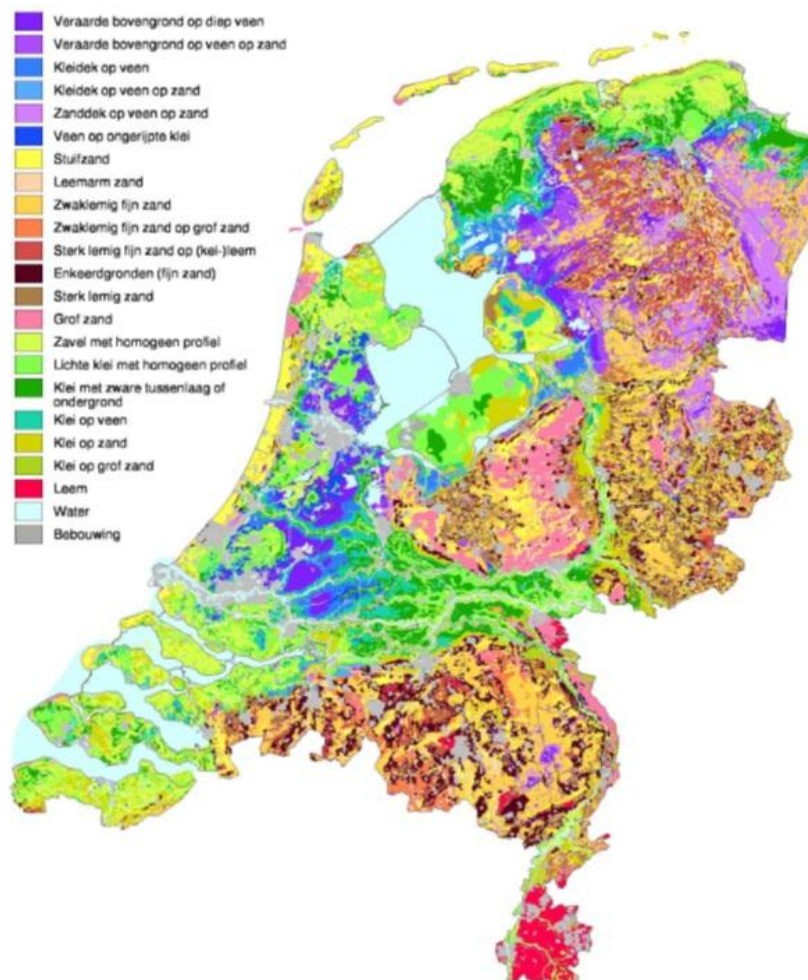
4.4 Bodemkaart

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

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

SPHY maakt gebruik van de Bodemkaart van Nederland versie 6 (schaal 1:50.000) zoals deze ook gebruikt wordt in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI, 2008a). De Bodemkaart van Nederland is in opdracht van het Ministerie van EL&I de zogenaamde veenkartering verwerkt om inzicht te verkrijgen in de mate van veranderingen van veengronden. Een nadeel echter is dat de kaart een zeer groot aantal bodemtypen bevat, waarbij bepaalde onderscheidingen niet relevant zijn voor een hydrologisch model. Daarom is deze kaart met behulp van de PAWN-indeling (Wösten et al., 1988) geclusterd tot een beperkt aantal functionele eenheden. De PAWN-indeling maakt onderscheid in 21 verschillende bodemeenheden. Daarnaast maakt SPHY gebruik van een 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.

De combinatie van de Bodemkaart van Nederland, de PAWN-indeling, en de fysisch-chemische karakterisering hebben uiteindelijk geleid tot de bodemkaart zoals weergegeven in Figuur 7. Een tabel met gedetailleerde informatie over de bodemopbouw is weergegeven in Appendix 2.

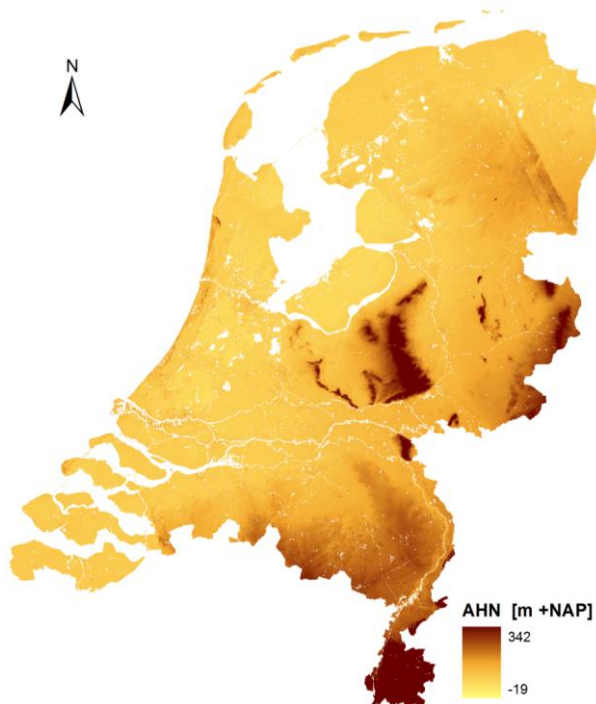


Figuur 7: Indeling naar bodemopbouw (NHI, 2008a).



4.5 Hoogtekaart

Voor SPHY is een hoogtekaart noodzakelijk om de helling van een gridcel te berekenen. Zoals beschreven in paragraaf 3.4, is deze helling nodig om de drainageflux te berekenen. Voor de hoogtekaart in SPHY is gebruik gemaakt van het Actueel Hoogtebestand Nederland¹¹ (AHN). Het AHN is 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.



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

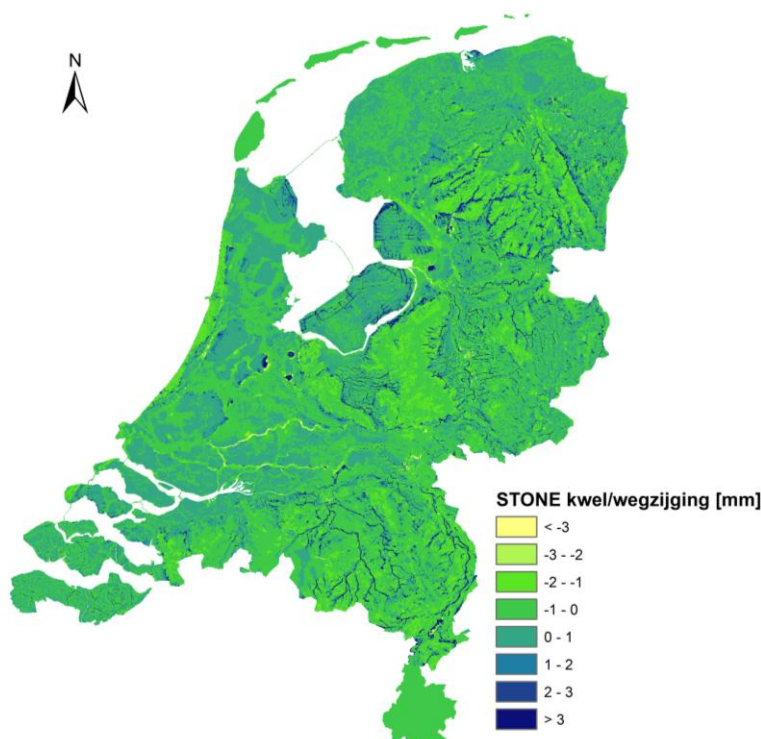
4.6 Kwel en wegzijging

Omdat SPHY gericht is op het simuleren van het bodemvocht in de wortelzone, ontbreekt de grondwatercomponent in SPHY. Om toch een redelijk realistische flux met de bodem onder de sub-zone te modelleren, is gekozen voor de kwel en wegzijging van het STONE¹²-instrumentarium (Schoumans et al., 2002; van Bakel et al., 2008).

STONE is een reeks van simulatiemodellen 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 verkrijgt zijn input uit andere modellen. 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 jaargemiddelde waarde voor kwel of wegzijging (Figuur 9).

¹¹ <http://www.ahn.nl/>

¹² STONE is een afkorting van Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel



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

4.7 Kalibratie: actuele gemeten verdamping

In opdracht van STOWA¹³ heeft Alterra jaarreeksen van de dagelijkse verdamping gecreëerd voor twaalf meetlocaties in Nederland (Elbers et al., 2009). Daarvoor is gebruik gemaakt van meteorologische meetgegevens. Eventueel ontbrekende dagsommen zijn aangevuld met Artificial Neural Network (ANN) (Hsu et al., 1995; Coulibaly et al., 2001) gesimuleerde gegevens. Volgens Alterra is de onzekerheid in de jaarsommen van de actuele gemeten verdamping ongeveer 10 tot 15%.

De “testjaren” voor de SPHY-simulatie omvatten de periode 2005-2010, waarin 2005 gebruikt is voor de initialisatie van het model. Op basis van deze periode zijn negen van de twaalf meetlocaties (Elbers et al., 2009) geselecteerd voor de kalibratie van SPHY. Deze locaties zijn geselecteerd omdat ze binnen de “testjaren” van SPHY vallen. Deze negen meetlocaties – verspreid over Nederland – zijn weergegeven in Figuur 10.

¹³ <http://www.stowa.nl/>





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

4.8 Validatie: gemeten bodemvocht

Nadat kalibratie van het model aan de hand van de gemeten actuele verdamping, dient SPHY gevalideerd te worden met gemeten bodemvocht in de wortelzone. Echter, de beschikbaarheid van bodemvochtmetingen is beperkt, omdat deze erg arbeidsintensief en dus kostbaar zijn. Weliswaar zijn er satellietproducten beschikbaar die een inschatting geven van het bodemvocht (bijv. AMSR-E¹⁴), maar het nadeel is echter dat deze alleen het bodemvocht in de bovenste centimeters van de wortelzone meten. Bovendien is de ruimtelijke resolutie vrij grof (± 25 km).

Beschikbare gegevens zijn verkregen tijdens metingen in het stroomgebied van de Hunze in de Drentse veenkoloniën in 2008, als onderdeel van het project WaterSense¹⁵. Het doel hiervan was om een zogenaamd beslissingsondersteunend systeem (BOS) te ontwikkelen dat met behulp van sensortechnologie het waterbeheer kan ondersteunen, zowel in de zin van waterkwantiteit als -kwaliteit. Voor de metingen is gebruik gemaakt van bodemvochtsensoren van DACOM¹⁶. Deze sensoren meten op 6 verschillende dieptes, en op een aantal locaties op 9 verschillende dieptes.

Voor de SPHY-validatie zijn die locaties geselecteerd die bemeten zijn in de periode 2005-2010, en waar gemeten is op een diepte tussen de 0 en 60 cm beneden maaiveld. Een overzicht van de meetdieptes van de bodemvochtsensoren per meetlocatie is weergegeven in Tabel 1. Een overzicht van de meetlocaties tot een diepte van 60 cm beneden maaiveld en die bemeten zijn in de periode 2005-2010 is weergegeven in Figuur 11.

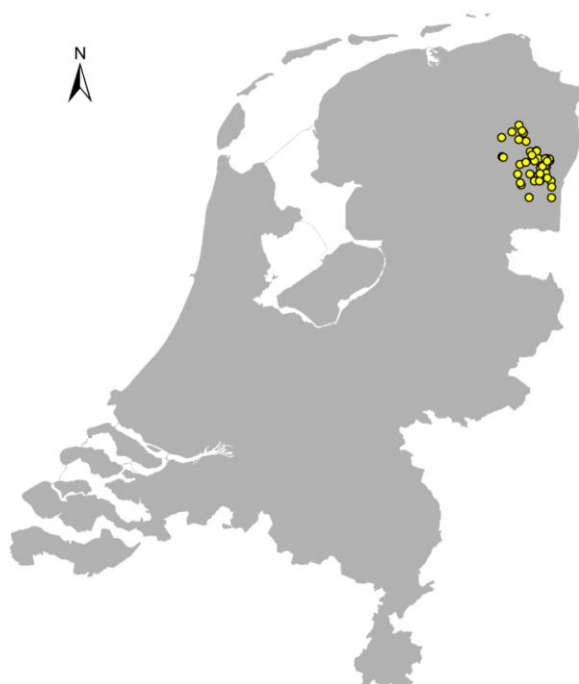
¹⁴ <http://nsidc.org/data/amsre/>

¹⁵ <http://projectwatersense.nl/>

¹⁶ <http://www.dacom.nl/index.php/nl/>

Tabel 1: 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 bodemvochtlocaties gemeten in de periode 2005-2010 op een diepte van 0-60 cm 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 hoeft te zijn met de "werkelijkheid".

Het doel van de kalibratie van SPHY is om de door SPHY gesimuleerde verdamping zo goed mogelijk overeen te laten komen met de gemeten verdamping op negen locaties in Nederland. Hiermee wordt voldaan aan één van de doelstellingen van SPHY; simulatie van de actuele verdamping. Het gekalibreerde SPHY model wordt vervolgens ingezet om het bodemvocht in de wortelzone op een aantal locaties binnen Nederland te simuleren. Op deze wijze wordt het model, zonder verdere aanpassing van de modelparameters, als het ware gevalideerd op de tweede doelstelling van deze studie; simulatie van het bodemvocht in de wortelzone.

Om het model te kalibreren aan de hand van de gemeten verdamping, is het noodzaak om kalibratieparameters te kiezen die ofwel een sterke invloed hebben op de hoeveelheid water dat beschikbaar is voor de (potentiële) verdamping, ofwel waar de meeste onzekerheid over bestaat. Een gevoeligheidsanalyse is gebruikt om de onzekerheid van de modelparameters te onderzoeken. Tevens zijn parameters die niet direct uit voortkomen uit (veld)metingen onzekerder dan parameters die gebaseerd zijn op (veld)metingen. Parameters die de bodemeigenschappen beschrijven zijn vrij zeker, aangezien de Bodemkaart van Nederland in het geheel is gebaseerd op veldwaarnemingen. Natuurlijk hebben deze metingen ook een zekere mate van onzekerheid, maar in mindere mate dan de "gewasfactor" en de "worteldiepte". Deze parameters hebben een grotere mate van onzekerheid omdat ze in SPHY als constant in de tijd zijn aangenomen. In werkelijkheid variëren de gewasfactor en de worteldiepte gedurende het groeiseizoen. Mogelijk groeit er gedurende het jaar een ander gewas dan de LGN suggereert. Hierdoor zal een andere "gewasfactor" en "worteldiepte" nodig zijn die corresponderen met het werkelijke type landgebruik gedurende een bepaalde periode. Verder bleek uit de gevoeligheidsanalyse dat deze parameters een sterke invloed hebben op de hoeveelheid water dat beschikbaar is voor de (potentiële) verdamping. Tot slot is ook de helling opgenomen als kalibratieparameter. Deze bleek in sterke mate de drainageflux te beïnvloeden, en hiermee dus de hoeveelheid water die achterblijft in de wortelzone en beschikbaar is voor de verdamping. Aangezien de helling een gemeten waarde is, zou men verwachten dat deze vrij nauwkeurig is en daardoor niet meegenomen hoeft te worden in de kalibratieprocedure. Deze parameter is toch als kalibratieparameter gekozen, omdat er mogelijk binnen de gridcel resolutie van 250 m variatie in maaiveld hoogte aanwezig is wat in sterke mate de drainage flux beïnvloedt. Deze variatie zit (nog) niet in de helling zoals hij berekend is aan de hand van de AHN; de hoogte van de gridcel ten opzichte van een aangrenzende gridcel.

Tabel 2 toont de kalibratieparameters voor en na de kalibratie per meetlocatie. De kalibratie is uitgevoerd door handmatig parameters aan te passen; er is dus geen gebruik gemaakt van geautomatiseerde parameter optimalisatie software. Tabel 2 toont aan dat de kalibratieparameters voor en na de kalibratie voor de meeste locaties nauwelijks verschillen. Dit

betekent dat de initiële parameterwaarden goede verdampingsresultaten opleveren met SPHY. De meest significante aanpassing in kalibratieparameters is gedaan voor Utrecht (stedelijk gebied). Aangezien Utrecht geclassificeerd is als stedelijk gebied, zal hier de neerslag relatief snel resulteren in afvoer. Om voor stedelijk gebied een snellere afvoerrespons te krijgen is daarom de worteldiepte verkleind van 300 naar 50 mm. Hierdoor kan er minder water worden geborgen in deze eerste bodemlaag, waardoor eerder oppervlaktewater afvoer op zal treden. Verder bleek dat de verdamping voor stedelijk gebied voor de kalibratie aan de lage kant was. In stedelijk gebied verdampt het water potentieel. Om de verdamping in stedelijk gebied te verhogen is daarom de K_c verhoogd van 0.5 naar 1.0.

Tot slot valt op dat de helling op alle locaties is aangepast tot een minimale waarde van 0.0014 (waarde in Cabauw). De helling op een aantal locaties bleek namelijk dusdanig laag, dat er nauwelijks drainage optrad. Hierdoor klopt SPHY op deze locaties balansmatig niet meer; er gaat te weinig water uit waardoor de “bakjes” snel vol zitten waardoor oppervlaktewater afvoer optreedt op locaties waar je dit normaliter niet zal verwachten. Dit heeft te maken met het feit dat de helling in deze studie gerelateerd is aan de hoogteverschillen tussen de onderlinge gridcellen, en niet aan de hoogteverschillen die aanwezig zijn binnen een gridcel van 250 x 250 m. Om toch een minimale drainageflux te krijgen, is de “helling” van Cabauw aangenomen als representatief indien de helling kleiner is als 0.0014.

Tabel 2: SPHY kalibratie parameters voor en na de kalibratie.

Locatie	K_c [-]		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 3 geeft een overzicht van de totale gemeten en gesimuleerde actuele verdamping over een aantal maanden van het SPHY model. Resultaten van voor en na de kalibratie zijn weergegeven. Voor Cabauw en Loobos is een gemiddelde jaar som weergegeven, omdat de meetperiode langer dan een jaar betrof. Verder toont de tabel de procentuele afwijking ten opzichte van de gemeten verdamping. De Root-Mean-Square-Error (RMSE) geeft de maandelijkse afwijking weer tussen de gemeten en gesimuleerde maandelijkse verdamping gedurende die periode. Tot slot geeft de Pearson correlatiecoëfficiënt de mate van correlatie weer tussen de maandelijkse gemeten en gesimuleerde verdamping. Deze is voor de locatie Utrecht niet weergegeven omdat hiervoor maar 2 metingen waren.

Het is duidelijk dat voor de kalibratie de locaties Loobos en Utrecht een significant verschil laten zien tussen de geobserveerde en gesimuleerde verdampingssom. Voor Loobos werd de verdamping met 33% overschat, terwijl in Utrecht de verdamping met 59% wordt onderschat. Aanpassing van de worteldiepte en K_c (zie Tabel 2) heeft geleid tot verbeterde simulatieresultaten op deze locaties. Verder blijkt uit Tabel 3 dat voor alle locaties de gesimuleerde totale (jaarlijkse) verdamping goed overeenkomt met de gemeten verdamping, met een afwijking van ten hoogste 14%. Dit valt in de onzekerheidsrange van 10-15% in de



gemeten actuele verdamping van Elbers et al. (2009). De grootste afwijkingen ($> \pm 10\%$) doen zich voor op de locaties Molenweg, Oostwaard, en Vredepeel. Uit nadere analyse blijkt dat het landgebruik volgens Elbers et al. (2009) op deze locaties anders is dan in de landgebruikskaart van het SPHY-model (zie Tabel 4). 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 3: Totale gemeten en gesimuleerde verdamping van het SPHY-model. Resultaten van voor en na de kalibratie zijn weergegeven.

Locatie	Periode start	Periode eind	Maanden	ET _{obs}		ET _{sim} voor	Afwijking	ET _{sim} na		Afwijking	RMSE voor	RMSE na	Pearson r	
				[mm]	[mm]			[mm]	[mm]		[mm/maand]	[mm/maand]	voor [-]	na [-]
Cabauw*	Jan-2005	Dec-2008	✓	48	486	480	-1%	480	480	-1%	9	9	0.95	0.95
Loobos*	Jan-2006	Dec-2007	✓	24	506	673	33%	527	527	4%	21	13	0.93	0.90
Langerak	Apr-2005	Mar-2006	✓	12	526	509	-3%	538	538	2%	8	7	0.96	0.98
Molenweg	Jun-2005	Apr-2006	✓	11	401	456	14%	456	456	14%	8	8	0.98	0.98
Dijkgraaf	Jun-2005	Apr-2006	✓	11	476	483	2%	464	464	-3%	13	13	0.91	0.91
Lutjewad	Jun-2006	Apr-2007	✓	11	443	449	1%	449	449	1%	13	13	0.94	0.94
Oostwaard	Apr-2008	Dec-2008	✓	9	538	464	-14%	464	464	-14%	16	16	0.94	0.94
Vredepeel	Apr-2006	Feb-2007	✓	11	519	446	-14%	446	446	-14%	20	20	0.85	0.85
Utrecht	Sep-2008	Oct-2008	✓	2	60	25	-59%	59	59	-1%	19	10	**	**
* Gemiddelde jaarsom														
** Niet bepaald ivm te korte tijdreeks														

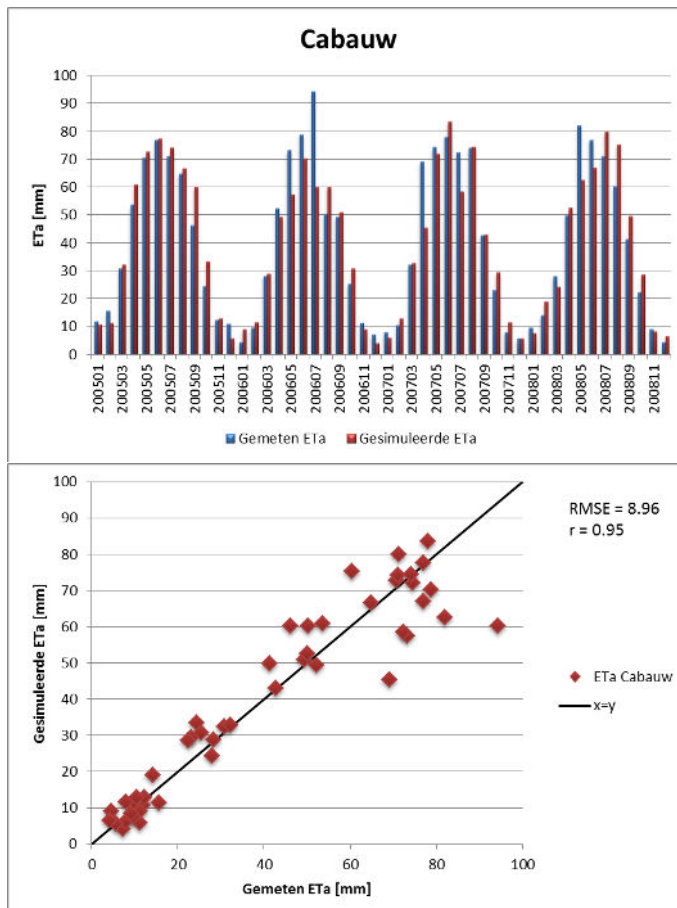
De gemiddelde afwijking tussen de gemeten en gesimuleerde actuele verdamping varieert tussen de 7 en de 20 mm per maand. De beste resultaten (RMSE < 10 mm) worden behaald bij de locaties Cabauw, Langerak, en Molenweg. Minder goede resultaten (RMSE > 15 mm) worden behaald bij Oostwaard en Vredepeel. De kalibratie levert hier mogelijk minder goede resultaten omdat het landgebruik ten tijde van de meting afweek van het landgebruik in SPHY.

Figuur 12 en Figuur 13 tonen voor Cabauw en Vredepeel het maandelijkse verloop van de gemeten en de gesimuleerde actuele verdamping. De kalibratieresultaten van de overige locaties zijn weergegeven in Appendix 3. In deze appendix zijn tevens per locatie de maandelijkse verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde verdamping weergegeven. Het is duidelijk dat SPHY goed in staat is om het seizoen verloop van de actuele verdamping goed te simuleren. SPHY maakt met vooral in juli 2006 een flinke onderschatting van de gemeten verdamping in Cabauw en Vredepeel. Volgens het KNMI¹⁷ was juli 2006 uitzonderlijk zonnig en droog, en was het de warmste maand in drie eeuwen. Gemiddeld viel er in deze maand 29 mm neerslag tegen normaal 70 mm. In de Bilt viel slechts 15 mm tegen normaal 70 mm. SPHY maakt mogelijk een onderschatting van de verdamping in deze maand omdat door de extreme droogte in deze maand het vochtgehalte in de wortelzone nagenoeg gelijk zal zijn aan het permanente verwiltingspunt. Hierdoor reduceert SPHY de potentiële verdamping enorm. In werkelijkheid is de wortelzone mogelijk dikker, waardoor er meer capillaire nalevering kan plaatsvinden en dus het bodemvocht in de wortelzone van onderen aangevuld wordt. Dit proces dient in een vervolgstudie nader onderzocht te worden. De hoge RMSE in Vredepeel is te wijten aan de onderschatting van de verdamping in juli 2006 in combinatie met het lage aantal metingen; 11 maanden tegen 48 maanden in Cabauw. Hierdoor heeft deze onderschatting veel invloed op de RMSE. Voor de overige maanden lijkt SPHY de verdamping goed te simuleren.

De meeste locaties laten een gemiddelde afwijking zien van +/- 1 mm per maand. Dit betekent dat SPHY voor de meeste locaties de metingen gemiddeld gezien goed nabootst. Voor de locatie Molenweg laat SPHY echter een gemiddelde overschatting zien van 5,1 mm per maand. Voor Oostwaard en Vredepeel laat SPHY een onderschatting zien van respectievelijk 8,1 en 6,7

¹⁷ http://www.knmi.nl/klimatologie/maand_en_seizoenoverzichten/maand/jul06.html

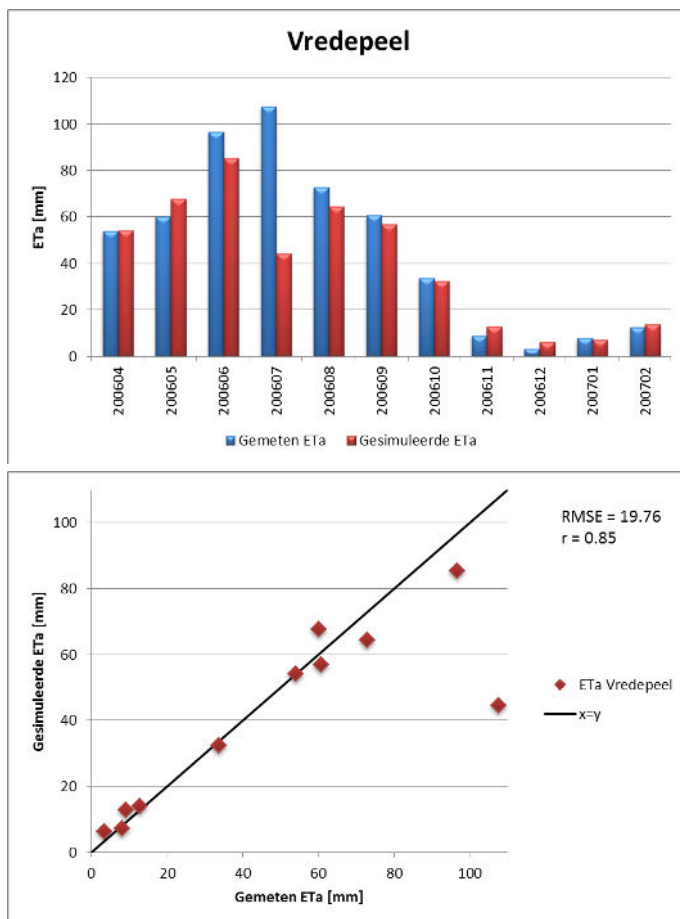
mm per maand. Deze systematische over- en onderschattingen duiden op systematische fouten in SPHY voor deze locaties. Dit is grotendeels gerelateerd aan het feit dat het landgebruik ten tijde van de meting anders was als in SPHY. Een andere mogelijke verklaring kan een ontbrekende of te kleine term zijn. Een term die in SPHY verbeterd moet worden is de onderrand (kwel/wegzijging uit STONE). Deze is nu als constant in de tijd aangenomen, maar in praktijk vertoont deze meestal een sinus-curve door het jaar heen. Een verbeterslag kan zijn door SPHY te kalibreren op de onderrand; door SPHY te draaien voor een langjarige periode zonder kwel/wegzijgingscomponent, kan de kwel/wegzijgingscomponent gezien worden als de rest-term die de balans sluitend moet maken.



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

SPHY is alleen gekalibreerd voor de negen locaties (Tabel 3) waar de verdamping is gemeten. Al deze locaties hebben een bepaalde combinatie van één bodemtype en één type landgebruik (Tabel 4). Om een zo goed mogelijk landsdekkend SPHY model te krijgen, is ervan uitgegaan dat deze negen locaties representatief zijn voor andere plekken in Nederland waar eenzelfde combinatie van bodemtype en landgebruikstype aanwezig is. Daarom zijn de gekalibreerde parameters, behorende bij de unieke combinatie van bodemtype en landgebruik zoals in Tabel 4, ook toegepast op andere plekken binnen Nederland waar deze combinatie van bodemtype en landgebruik voorkomt.





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

Tabel 4: Unieke combinaties van bodemtype en landgebruik in SPHY op de negen meetlocaties.

Locatie	Bodemtype	Landgebruik
Utrecht	Bebouwing	Bebouwing
Cabauw	Klei op veen	Gras
Loobos	Stuifzand	Naaldbos
Langerak	Klei op veen	Gras
Molenweg	Zavel met homogeen profiel	Overige landbouwgewassen ^a
Dijkgraaf	Sterk lemig zand	Granen
Lutjewad	Zavel met homogeen profiel	Aardappelen
Oostwaard	Lichte klei met homogeen profiel	Overige landbouwgewassen ^b
Vredepeel	Zwak lemig fijn zand	Aardappelen ^c

Ten tijde van de meting was het landgebruik op a) aardappelen, b) wilg, en c) bieten.

5.2 Validatie

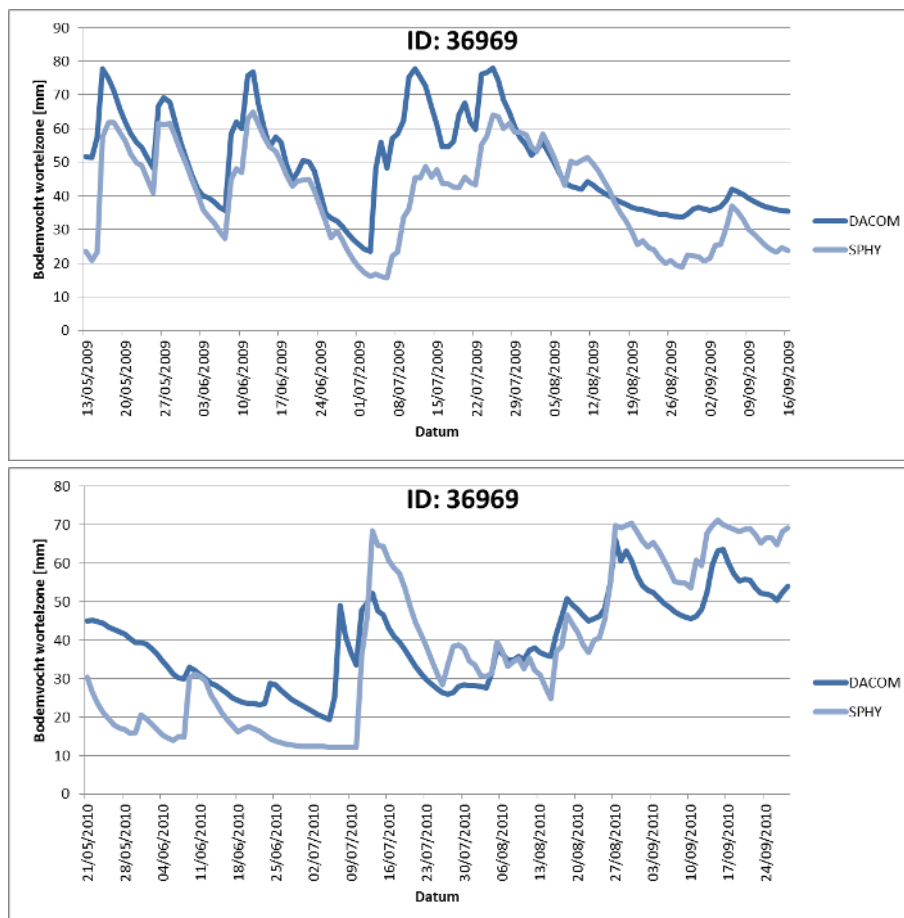
Validatie van SPHY vindt plaats aan de hand van gemeten bodemvocht, zoals beschreven in paragraaf 4.8, beschikbaar voor delen van de jaren 2009 en 2010. DACOM heeft het bodemvocht per diepte (Tabel 1) gemeten in percentages van de dikte van de gemeten bodemlaag. De hoeveelheid gemeten bodemvocht in millimeters 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 dagelijkse tijdschaal. Deze locaties zijn weergegeven in Tabel 5 met bijbehorend landgebruik en bodemtype. Deze locaties zijn gekozen vanwege de ruimtelijke spreiding en de unieke combinatie van landgebruik en bodemtype.

Tabel 5: Geselecteerde bodemvochtsensoren

ID	Landgebruik	Bodemtype
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

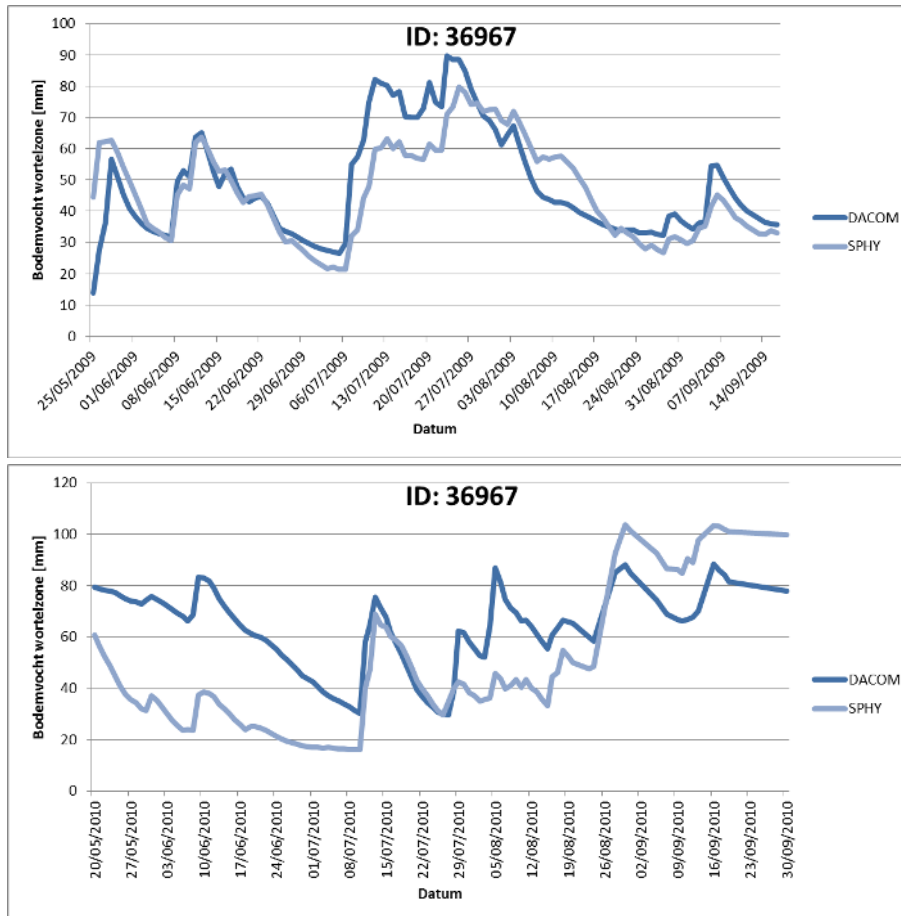


Figuur 14: Validatie bodemvocht voor ID 36969 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.

Figuur 14 geeft het gemeten en gesimuleerde bodemvocht weer voor de meetlocatie met ID 36969 voor de maanden mei t/m september voor de jaren 2009 en 2010. De dagelijkse verschillen tussen de meting en de simulatie voor deze locatie zijn weergegeven in Appendix 4. Het blijkt dat SPHY redelijk goed in staat is om het dagelijkse patroon van het gemeten bodemvocht te simuleren. Vooral tijdens de zomermaanden treden verdampingstekorten op als gevolg van een te laag bodemvochtgehalte. Dit vochttekort is belangrijke informatie voor een agrariër met betrekking tot irrigatie giften. Daarom is het vooral tijdens de zomermaanden relevant dat bodemvochtsimulaties betrouwbaar zijn. In juli 2009 geeft SPHY een



onderschatting van het gemeten bodemvocht. In 2010 komt het gesimuleerde bodemvocht in juli weer goed overeen met het gemeten bodemvocht. Gemiddeld gezien onderschat SPHY het bodemvocht met 5,6 mm over de periode 2009-2010 voor ID 36969. Deze systematische onderschatting is acceptabel als men beseft dat bodemvochtmetingen puntmetingen zijn, waarbij bodemvochtmetingen op relatief korte afstand van elkaar (ca. 200 m) al behoorlijk van elkaar kunnen verschillen. Dit wordt nader beschreven bij Figuur 16.

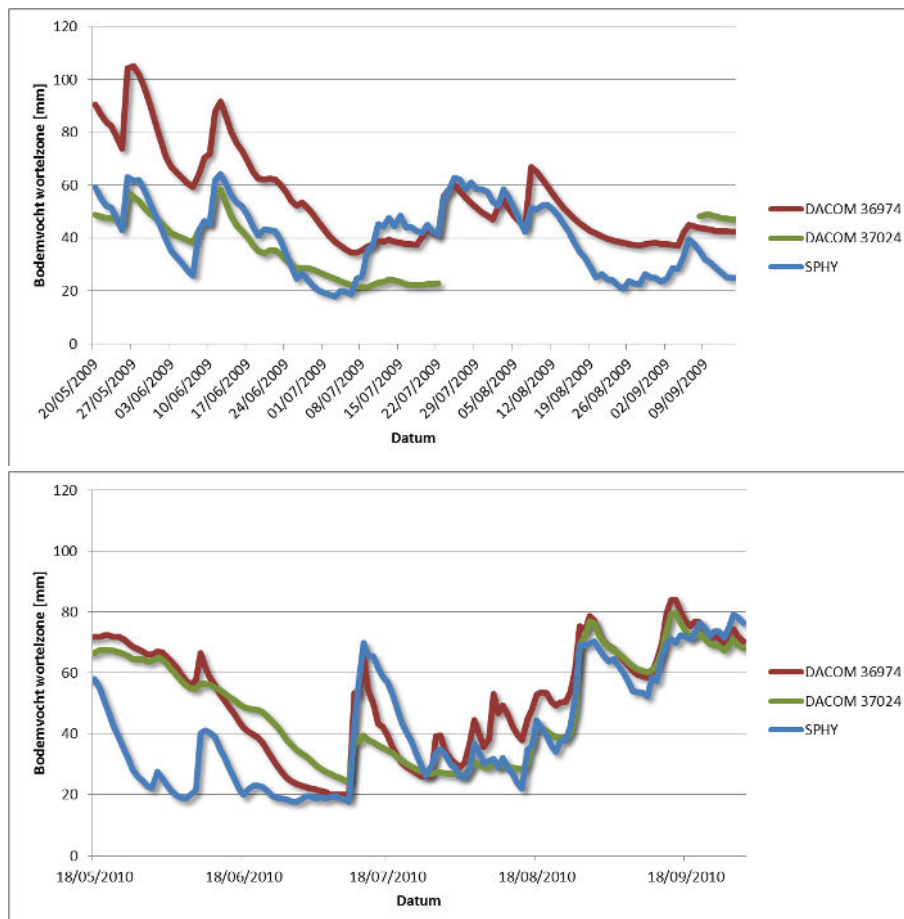


Figuur 15: Validatie bodemvocht simulatie voor DACOM ID 36967 voor de jaren 2009 en 2010. Validatie is gedaan op dagelijkse waarden.

Figuur 15 geeft het gemeten en gesimuleerde bodemvocht weer voor de meetlocatie met ID 36967 voor de maanden mei t/m september voor de jaren 2009 en 2010. De dagelijkse verschillen tussen de meting en de simulatie voor deze locatie zijn weergegeven in Appendix 4. Voor 2009 lijkt SPHY het bodemvocht erg goed te simuleren. Voor 2009 is er sprake van een gemiddelde onderschatting van 2 mm. Wederom is er tijdens juli 2009 sprake van een lichte onderschatting van het gemeten bodemvocht. Tijdens mei en juni 2010 maakt SPHY een grotere onderschatting van het bodemvocht (maximaal 40 mm). Ook hier geldt dat bodemvochtmetingen op relatief korte afstand al behoorlijk van elkaar kunnen verschillen (ca. 50 mm, zie Figuur 16). Hierdoor valt de onderschatting van SPHY binnen de range van bodemvochtmetingen.

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 gridcel van 250 x 250 m. In werkelijkheid kan het bodemvocht binnen een SPHY gridcel behoorlijk 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 bodemvocht reeksen 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.

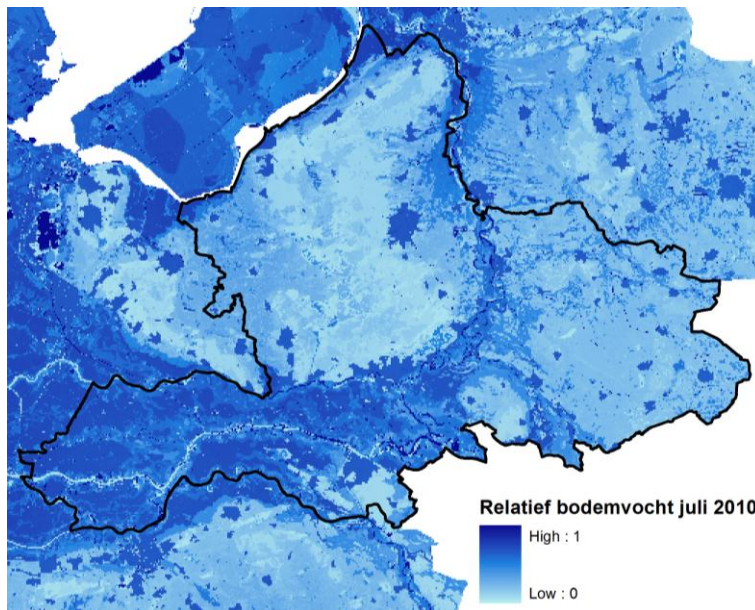
Het blijkt dus dat de validatie van het door SPHY gesimuleerde bodemvocht erg goed is. De validatie is nu alleen gedaan voor een aantal locaties in de veenkoloniën in Drenthe. In de toekomst is het interessant om het model ook te valideren aan het bodemvocht op andere locaties in Nederland. Vooralsnog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

5.3 Ruimtelijke resultaten

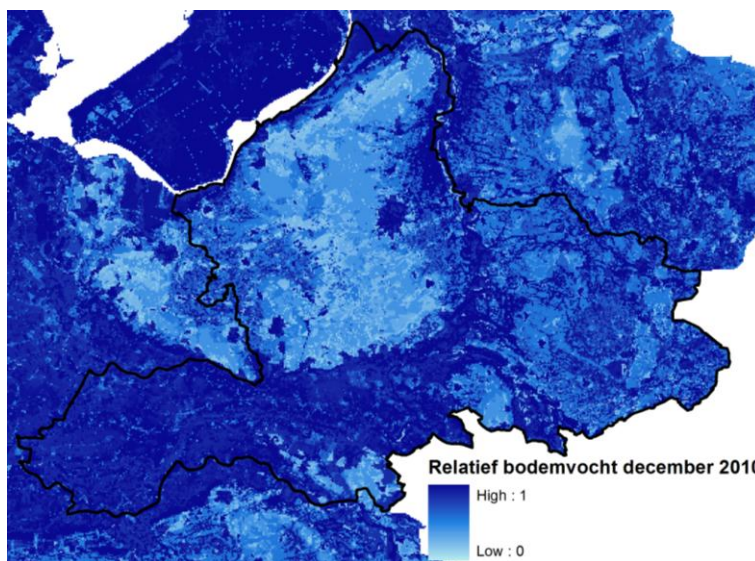
SPHY wordt gebruikt voor de inschatting van het bodemvocht voor heel Nederland. Daarom is het interessant om te zien hoe het bodemvocht ruimtelijk varieert. Figuur 17 en Figuur 18 geven



een ruimtelijk beeld van het relatieve bodemvocht in de wortelzone voor juli en december 2010. Hiervoor is ingezoomd in de provincie Gelderland. Het relatieve bodemvocht is de hoeveelheid bodemvocht als fractie van het verzadigde vochtgehalte.



Figuur 17: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in juli 2010.



Figuur 18: Ruimtelijke verdeling van het relatieve bodemvocht in december 2010.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Voor verschillende toepassingen is er een alsmaar groeiende vraag naar een product dat een inschatting kan geven van het actuele vochtgehalte in de wortelzone. Van de drie mogelijkheden hiertoe (veldmetingen, remote sensing en modellen) is er echter nog geen product beschikbaar dat bodemvocht levert ter ondersteuning van Qkoorts transmissie analyses. Bestaande producten hebben een aantal nadelen, die kunnen worden samengevat tot: i) ze hebben geen voorspellende waarde, ii) een meting van het bodemvocht is beperkt tot een puntwaarneming, 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 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 20 mm. Het blijkt dat voor sommige jaren SPHY de gemeten verdamping in de maand juli onderschat. Dit is vooral het geval op de locaties Cabauw en Vredepeel tijdens juli 2006, dat volgens het KNMI een extreem warme en droge maand was. Deze droogte heeft als gevolg dat SPHY de verdamping reduceert als gevolg van een vochttekort in de bodem. Mogelijk is in werkelijkheid de wortelzone op deze locaties dikker; hierdoor kan er meer water geborgen worden in deze laag waardoor er minder snel vocht stress optreedt en de verdamping minder gereduceerd wordt. Tevens kan er dan door meer capillaire opstijging meer aanvulling plaatsvinden van onderaf. Dit proces dient in een vervolgstudie nader onderzocht te worden.

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 landgebruikskaat 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. Het model is tevens geschikt om te onderzoeken in welke mate er sprake is van correlatie tussen bodemvocht en via lucht en bodem overdraagbare micro-organismen, zoals de bacterie *Coxiella burnetii*. 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.
- Coulibaly, P., F. Ancil, R. Aravena, B. Bobée. 2001. Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research*. 37(4): 885–896. doi:10.1029/2000WR900368.
- 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.
- Hawker J.I., J.G. Ayres, I. Blair. 1998. A large outbreak of Q fever in the West Midlands: windborne spread into a metropolitan area? *Commun Dis Public Health*. 1: 180–87.
- 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.
- Hsu, K., H.V. Gupta, S. Sorooshian. 1995. Artificial Neural Network Modeling of the Rainfall-Runoff Process. *Water Resources Research*., 31(10): 2517–2530. doi:10.1029/95WR01955.
- Huinink, J.E., T. Veenstra, W. van der Hoek, P. Droogers. 2010. Q fever transmission to humans and local environmental conditions. FutureWater report 90.
- 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-afvoermmodellering. *Dilemma of Deja VU? Stromingen*. 1: 33-44.
- Schimmer B., G. Morroy, F. Dijkstra, P.M. Schneeberger, G. Weers-Pothoff, A. Timen, C. Wijkman, W. van der Hoek. 2008. Large ongoing Q fever outbreak in the south of The Netherlands. *Euro Surveillance*. 13(31):pii=18939.
- Schimmer B, R. ter Schegget, M. Wegdam, L. Zuchner, A. de Bruin, P.M. Schneeberger, T. Veenstra, P. Vellema, W. van der Hoek. 2010. The use of a geographic information system to identify a dairy goat farm as the most likely source of an urban Q fever outbreak. *BMC Infect Dis*. 10-69.
- 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.
- Terink, W., P. Droogers, G. van den Eertwegh. 2012. SPHY – Een hydrologisch model gericht op de berekening van actueel bodemvocht en de actuele verdamping. *FutureWater rapport 115*.
- Thorntwaite, C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Tigertt, W.D., A.S. Benenson, W.S. Gochenour. 1961. Airborne Q fever. *Bacteriol Rev*. 25: 285–293.
- Tissot-Dupont, H., M. Amadei, M. Nezri, D. Raoult. 2004. Wind in November, Q fever in December. *Emerging infectious diseases*. 10(7): 1264-9.
- 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 der Hoek, W., J. Hunink, P. Vellema, P. Droogers. 2011. Q fever in The Netherlands: the role of local environmental conditions. *International Journal of Environmental Health Research*. 1–11.
- 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.
- Yanase T., Y. Muramatsu, I. Inouye, T. Okabayashi, H. Ueno, C. Morita. 1998. Detection of *Coxiella burnetii* from dust in a barn housing dairy cattle. *Microbiol. Immunol.* 42: 51–53.



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

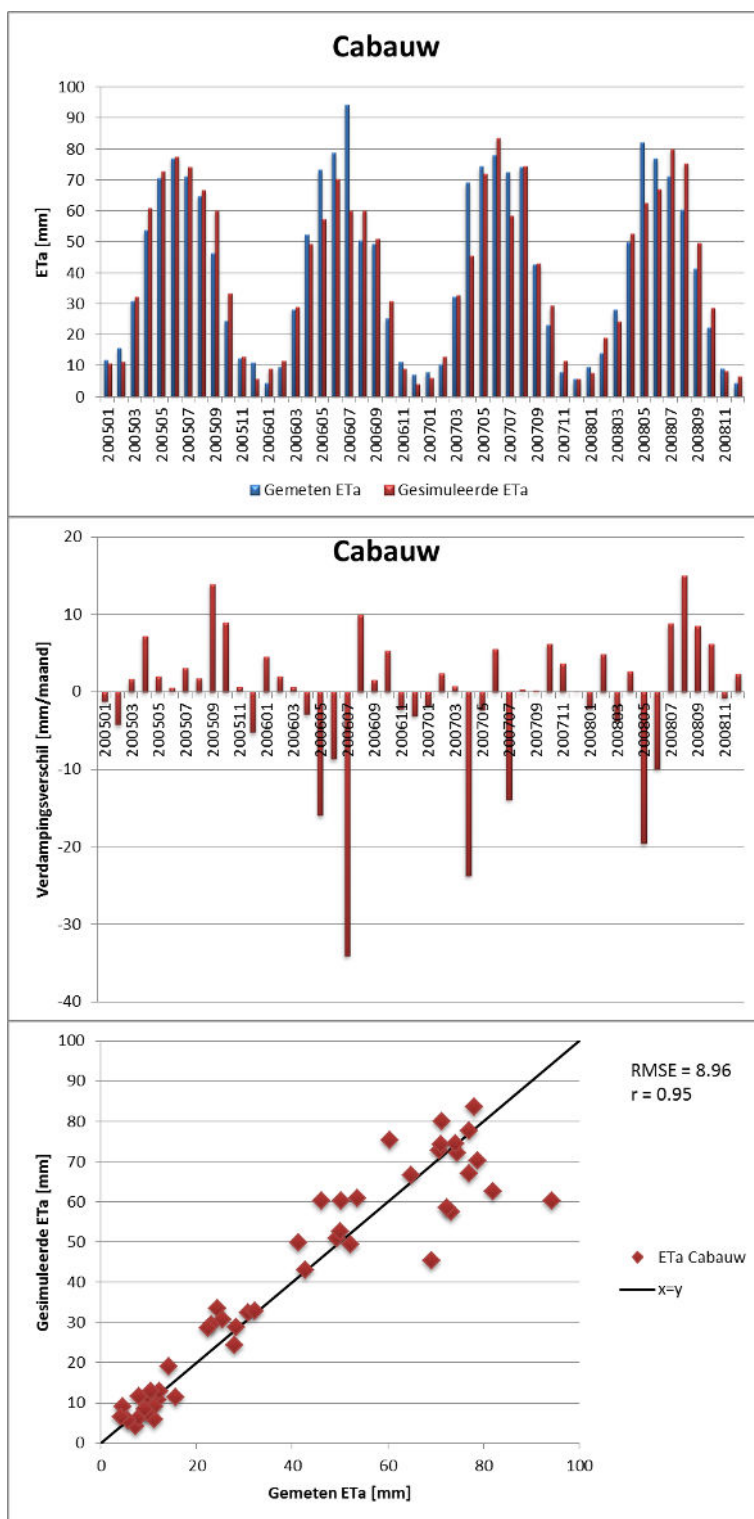
Appendix 2: Overzicht van eenheden op basis van bodemopbouw in SPHY

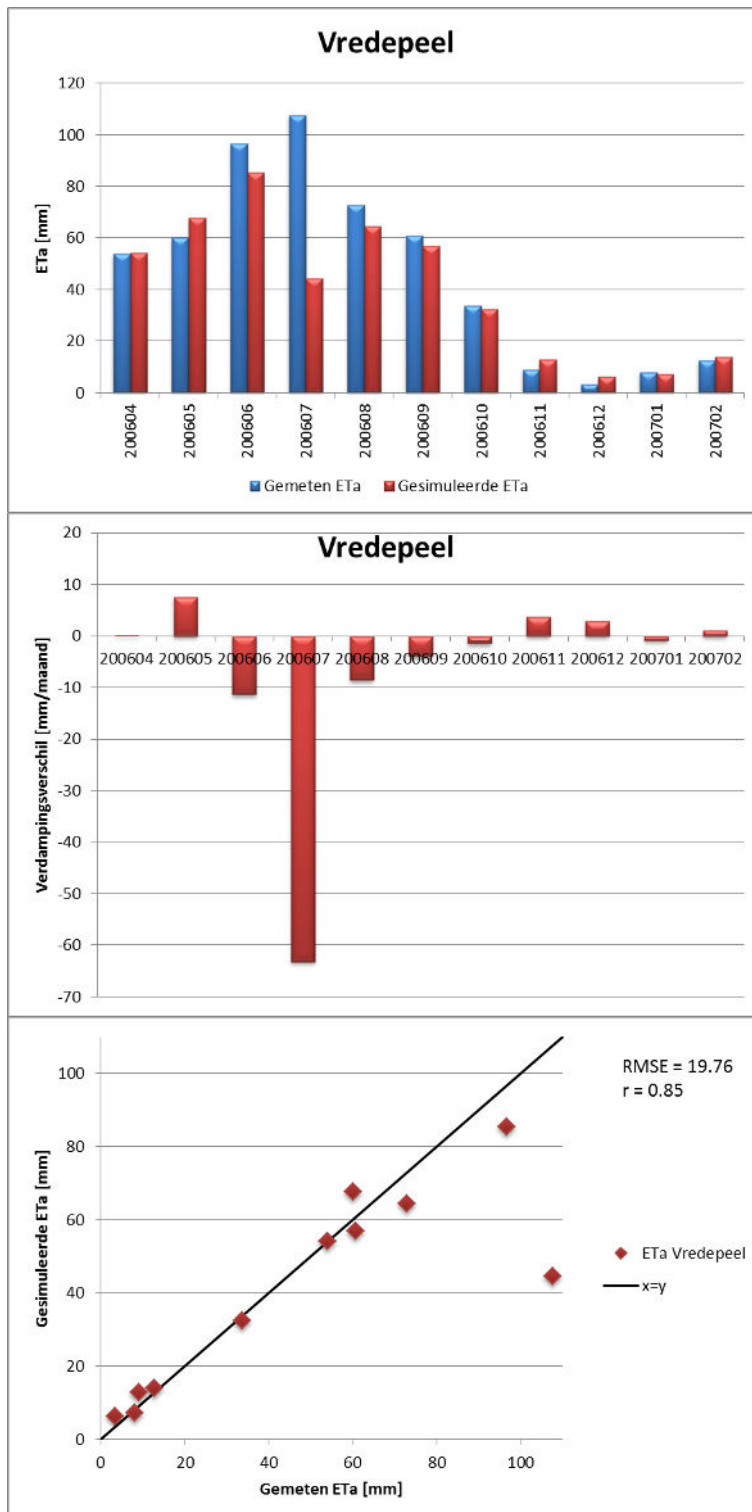
Code bodem-opbouw	Omschrijving	Opmerkingen	Opeenvolgende bouwstenen Staringreeks
1	Veraarde bovengrond op diep veen		B18,O17
2	Veraarde bovengrond op veen op zand	Combinatie van veengronden en moerige gronden met zandondergrond. Associaties van moerige gronden en zandgronden vertaald naar zandgronden	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

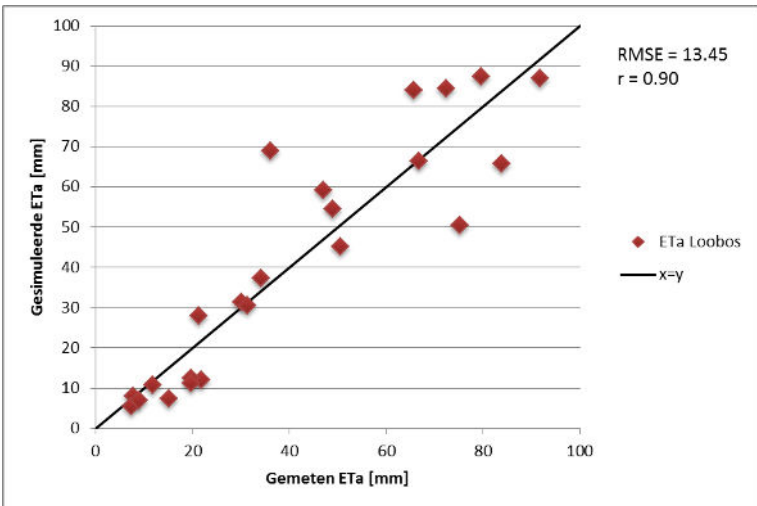
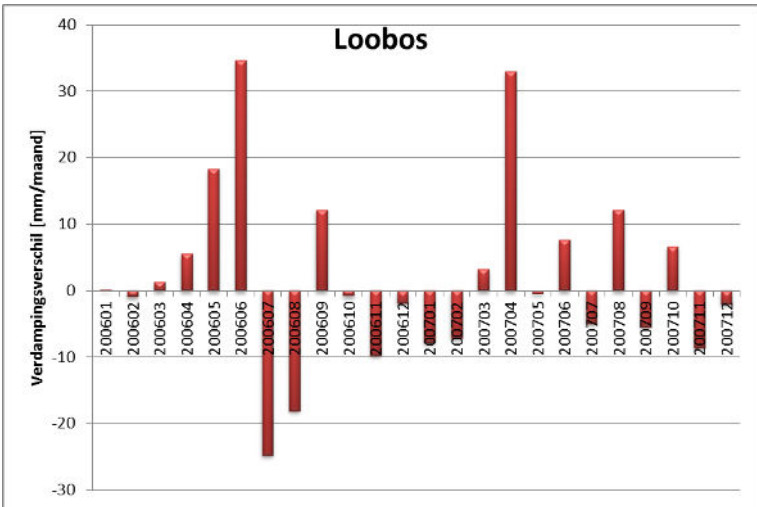
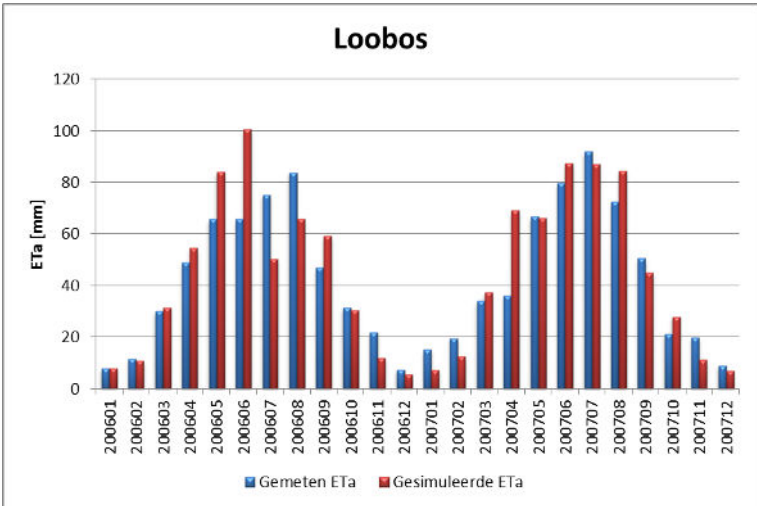
(Bron: NHI, 2008a).

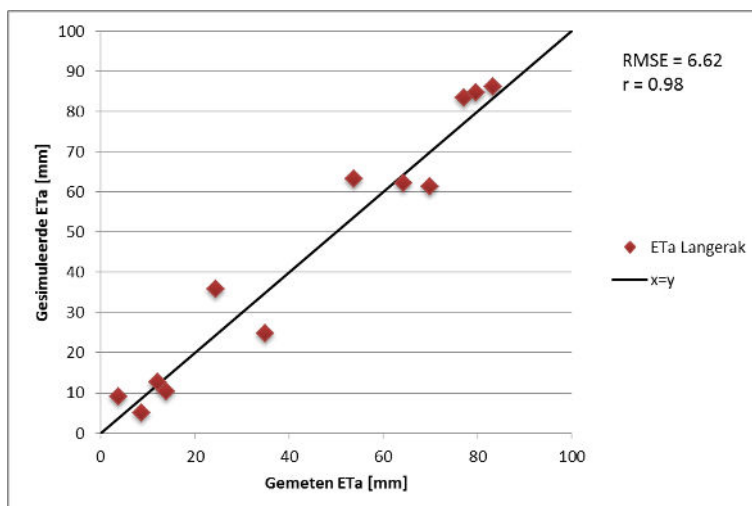
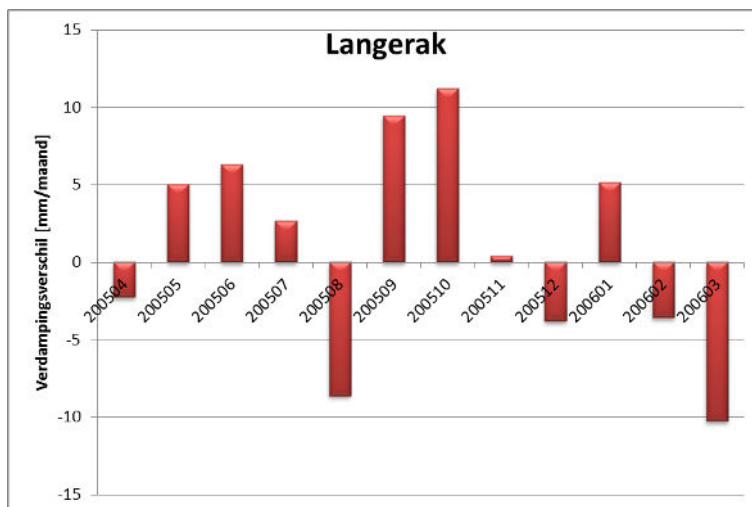
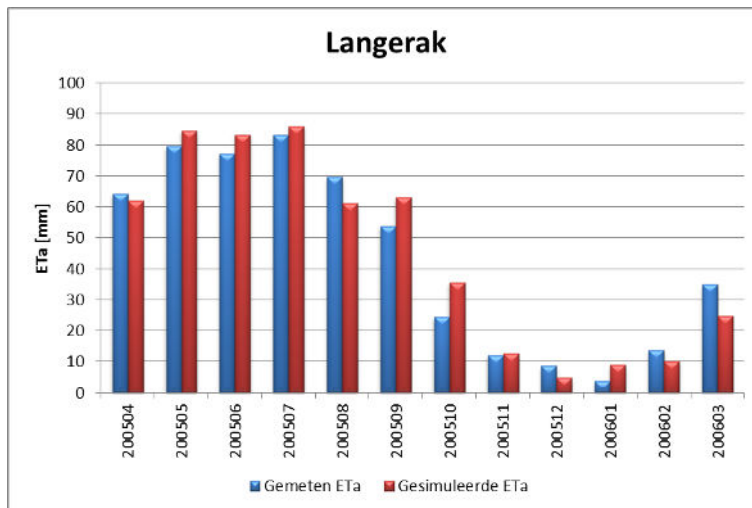


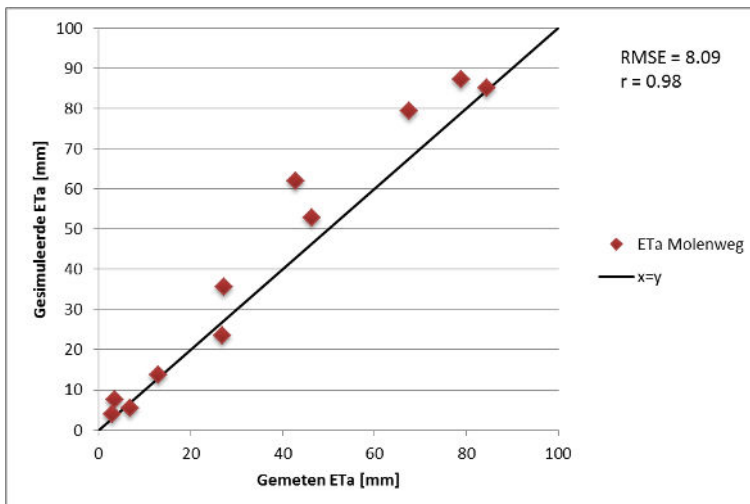
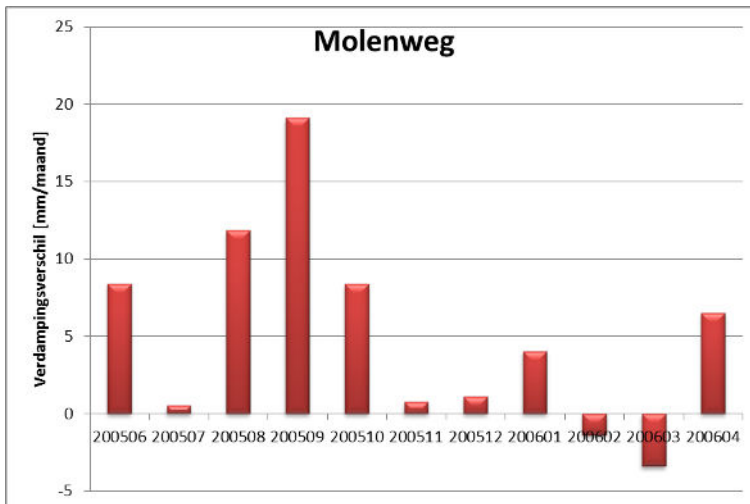
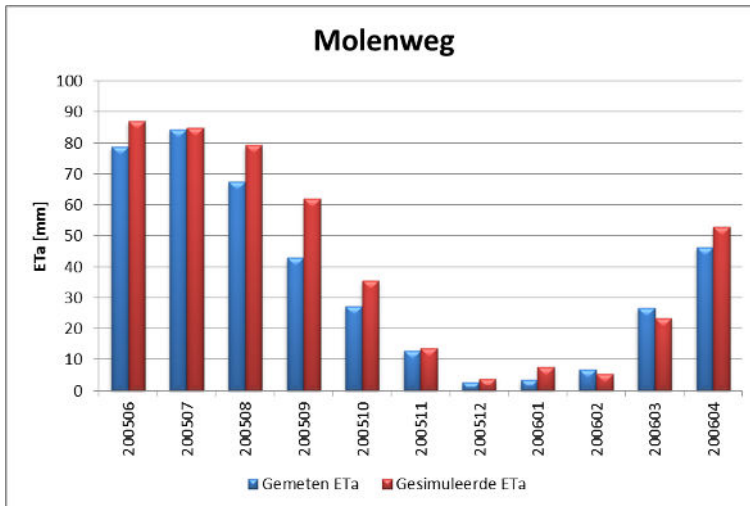
Appendix 3: Kalibratie resultaten SPHY

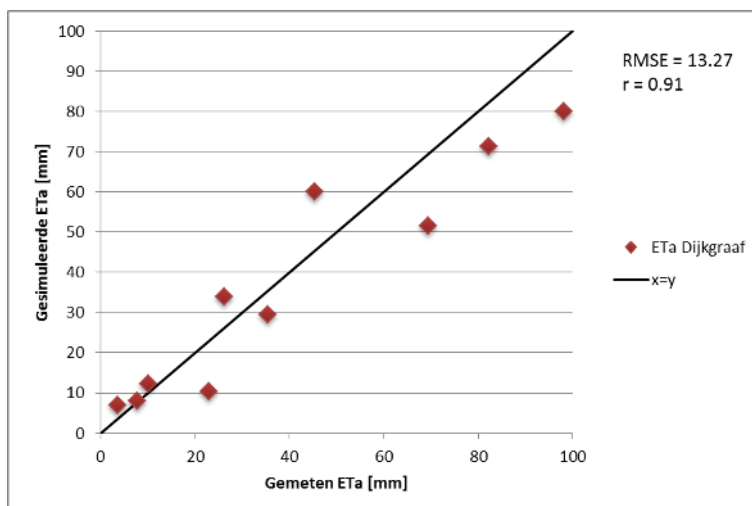
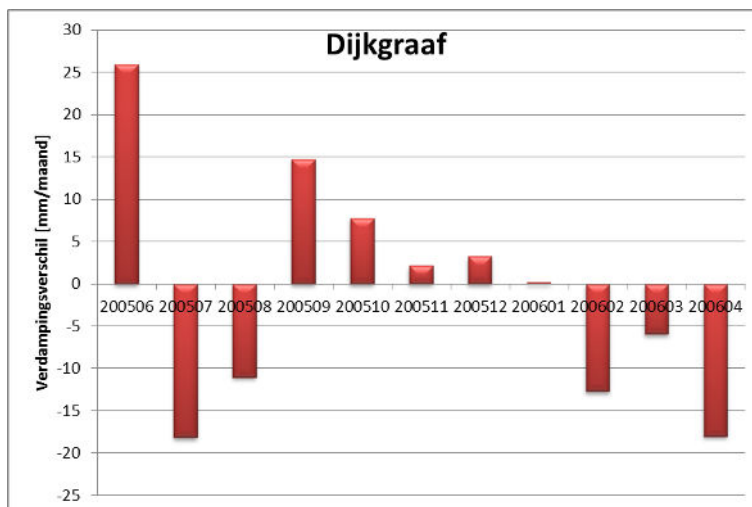
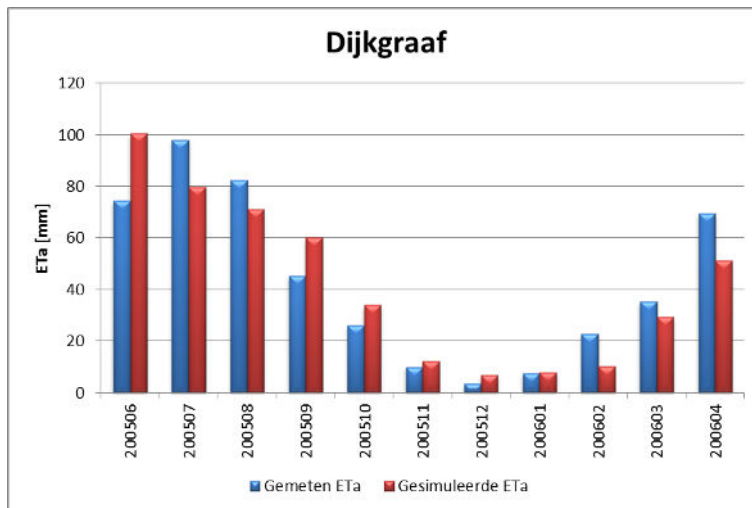


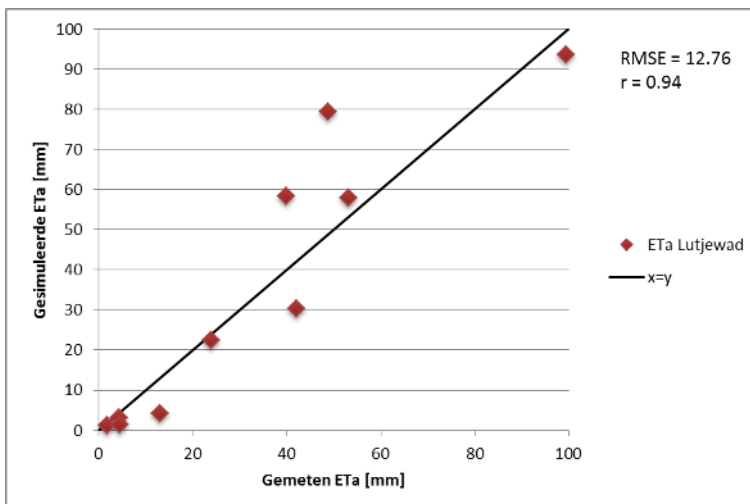
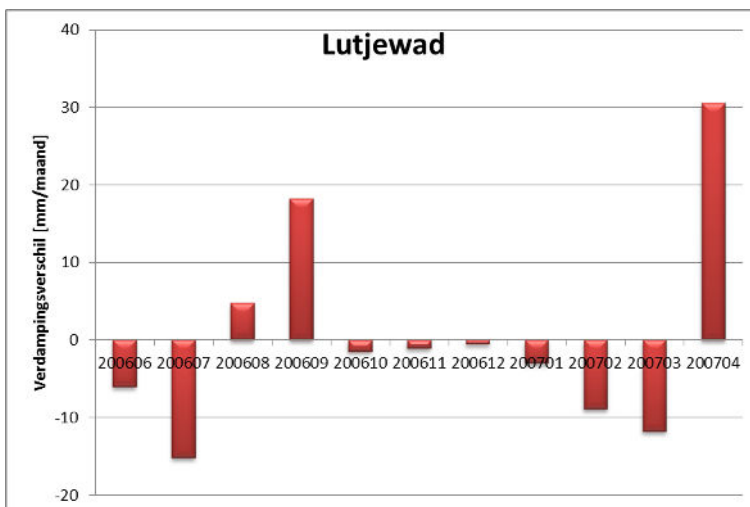
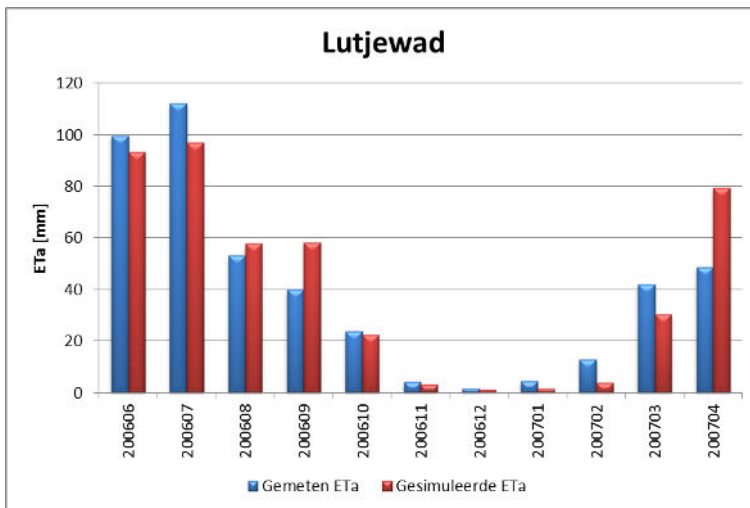


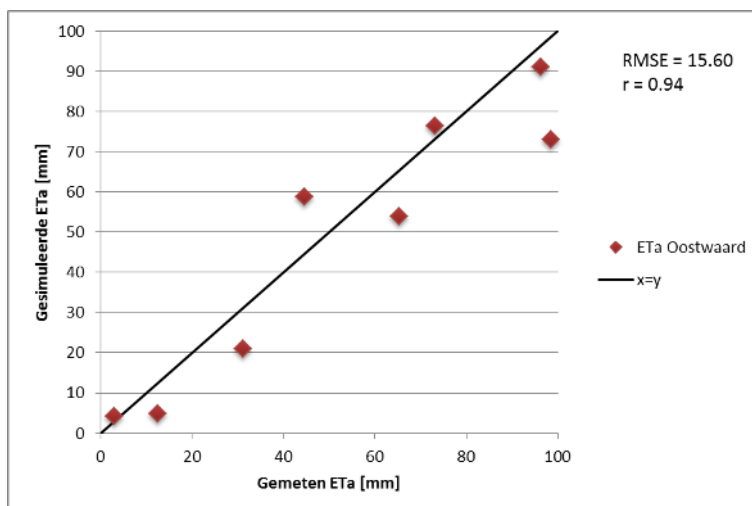
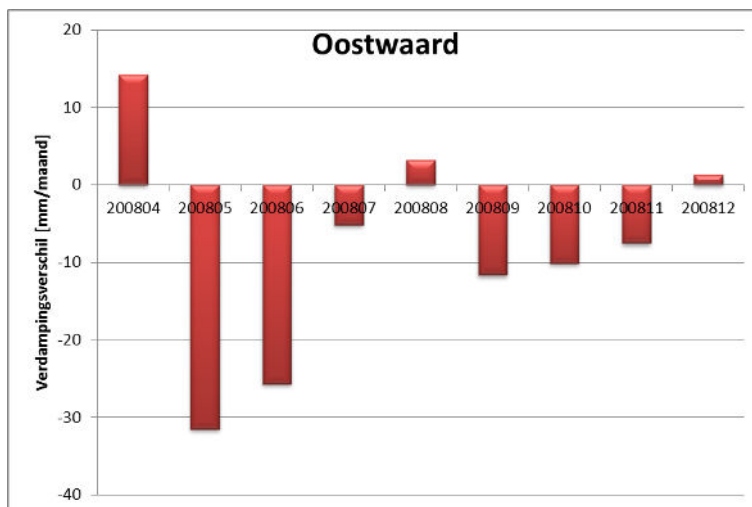
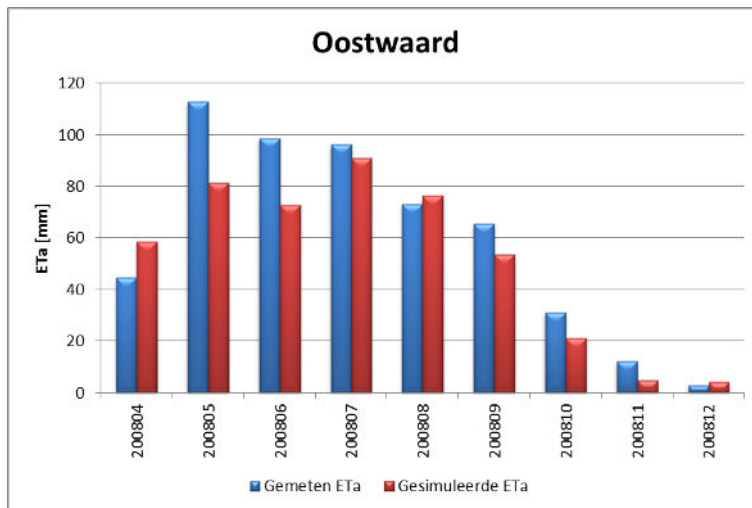


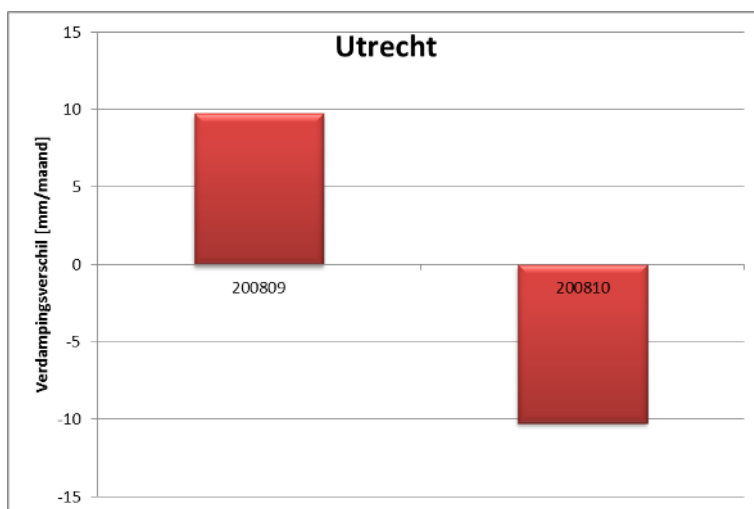
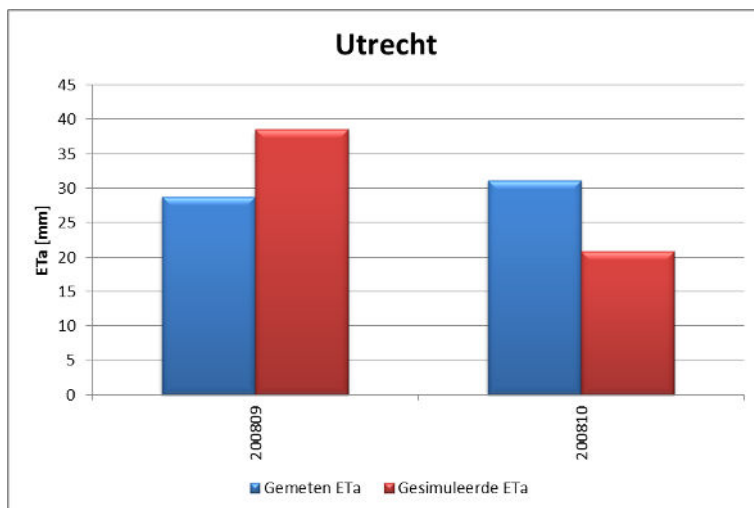












Appendix 4: validatie resultaten SPHY

