

SWAP 50 jaar – terugblik en verslag symposium 22 november 2024

MARIUS HEINEN, MARTIN MULDER, MIRJAM HACK-TEN BROEKE,
RUUD BARTHOLOMEUS EN JOS VAN DAM

De oorsprong van het model SWAP, Soil – Water – Atmosphere – Plant, voert terug naar een wetenschappelijke publicatie van Feddes, Bresler en Neuman uit 1974. Dat betekent dat het model SWAP in 2024 50 jaar is geworden. Om dit te vieren, is op 22-11-2024 een hybride symposium georganiseerd bij Wageningen Environmental Research getiteld De 50e verjaardag van SWAP. De dag bestond uit een meer wetenschappelijk getinte ochtendssessie, terwijl in de middagsessie vooral voorbeelden van projecten werden behandeld waarin SWAP een prominente rol heeft vervuld.

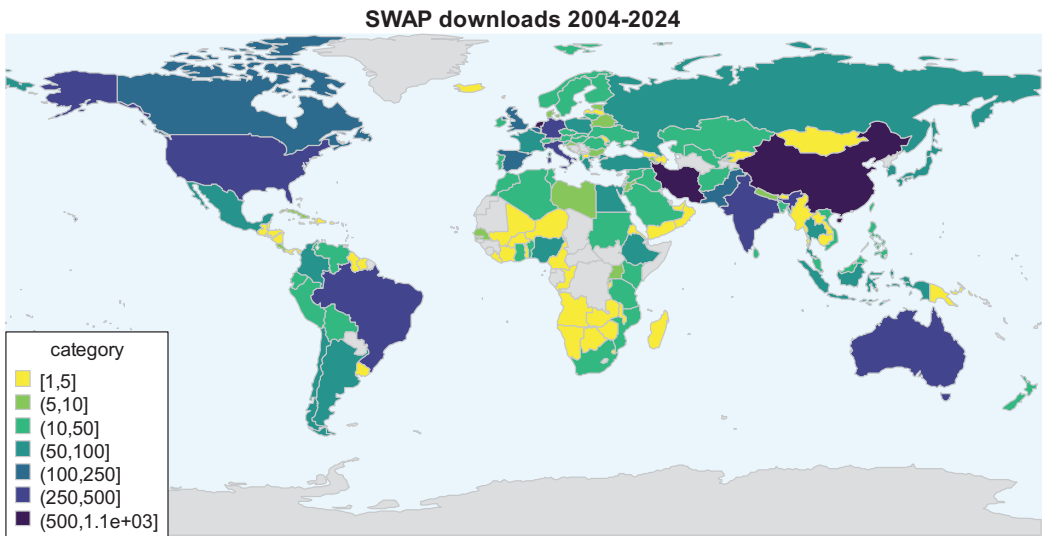
Artikel

Inleiding

In 1974 publiceerde Reinder A. Feddes, samen met Eshel Bresler en Shlomo P. Neuman, een artikel in *Water Resources Research* getiteld *Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems* (Feddes e.a., 1974). Hierin wordt een numeriek simulatiemodel beschreven voor de oplossing van de waterbalans in de onverzadigde bodem met specifieke aandacht voor wateropname door plantenwortels. Feddes heeft dit werk voortgezet, en velen na hem hebben er sindsdien mee gewerkt. In het begin had het model nog geen specifieke naam, en later is het model bekend geworden onder de namen SWATR, SWATRE en SWACROP. Sinds 1997 staat dit model bekend onder de naam SWAP: een acroniem voor Soil – Water – Atmosphere – Plant. Zoals de naam al aanduidt, betreft het een simulatiemodel voor de waterbalans in het continuüm bodem – gewas – atmosfeer. In 2024 bestond dit model dus 50 jaar. Om dit te vieren zijn in 2024 enkele activiteiten uitgevoerd. Zo is er een open-access wetenschappelijk artikel verschenen in het tijdschrift *Agricultural Water Management* met als titel *SWAP 50 years: advances in modelling soil-water-atmosphere-plant interactions* (Heinen e.a., 2024). Hiervan is een samenvatting gepresenteerd op de EGU 2024. Daarnaast is op 22-11-2024 een symposium georganiseerd bij Wageningen Environmental Research (WENR). Op deze dag zijn in de ochtend een aantal wetenschappelijke presentaties gegeven over SWAP en in de middagsessie waren er presentaties over het gebruik van SWAP in diverse meer toepassingsgerichte projecten.

De eerste beschrijving van SWAP dateert dus uit 1974. De variant SWATR werd beschreven in Feddes e.a. (1978) en de variant SWATRE (E van extended) was hiervan een opvolger (Belmans e.a., 1981, 1983). Later werd dit model SWACROP genoemd (Feddes e.a., 1988). De naam SWAP wordt gebruikt sinds 1997 (Van Dam e.a., 1997). In 2008 hebben Jos van Dam, Piet Groenendijk, Rob

Hendriks en Joop Kroes een uitgebreide wetenschappelijke beschrijving gegeven van SWAP (van Dam e.a., 2008). Hierin beschreven ze gedetailleerd hoe de algemene waterbalans, ofwel de Richards-vergelijking, numeriek wordt opgelost met speciale aandacht voor het sluitend zijn van deze balans. Daarnaast hebben zij aandacht besteed aan de volgende onderwerpen: evapotranspiratie, de interacties met grond- en oppervlaktewater en de interactie met macroporiën. Zij beschreven toepassingen met SWAP uit de literatuur en gaven aan het eind een visie op de toekomst van SWAP. Sinds 2017 is SWAP versie 4 beschikbaar en kan deze gedownload worden via <https://swap.wur.nl/>. De theorie en de gebruikershandleiding zijn beschreven in WENR-rapport 2780 (Kroes e.a., 2017). Hierin is ook beschreven hoe het gewasgroei-model WOFOST is geïntegreerd in SWAP. In het recente artikel van Heinen e.a. (2024) zijn de meest recente (sinds de publicaties uit 2008 en 2017) vernieuwingen beschreven. Hierin wordt dieper ingegaan op de interactie tussen bodemwater en gewasgroei, en met name het belang van het wortelstelsel daarbij. Verder wordt beschreven hoe in SWAP wordt omgegaan met de hydrofysische eigenschappen (waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken), en droogte- en zuurstofstress. Ten slotte werden kort enkele toepassingen beschreven en werd een visie gegeven op de toekomst en mogelijke toekomstige ontwikkelingen. Belangrijk hierbij is het uitgangspunt dat SWAP gebruikt kan worden in studies over landevaluatie, waarbij aandacht is voor de impact van hydrologische ingrepen al dan niet in combinatie met de impact van het huidige en toekomstige klimaat.

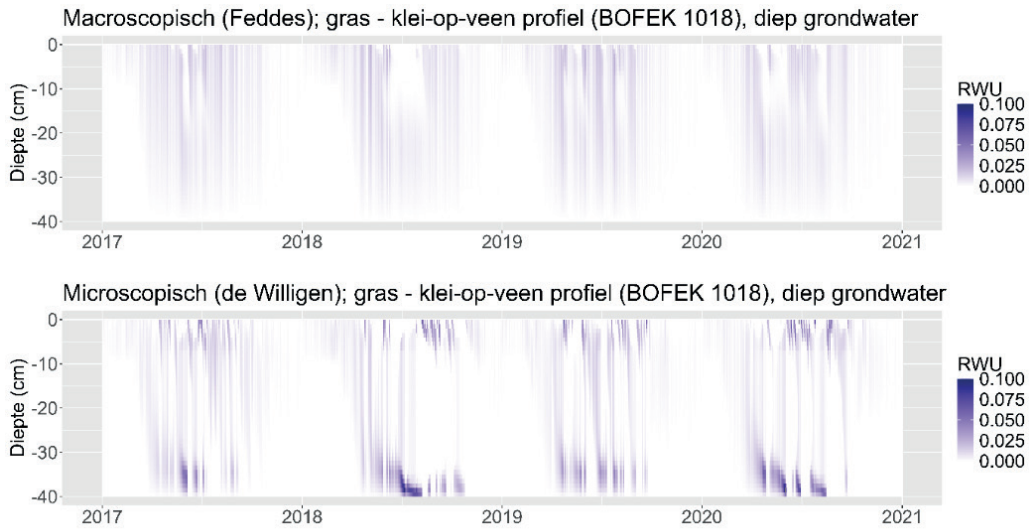


Afbeelding 1 Aantal downloads van SWAP vanaf de website in de afgelopen 20 jaar.

Het SWAP-50 symposium werd geopend met een welkomstwoord door Mirjam Hack – ten Broeke (WENR), gevolgd door een inleiding door Marius Heinen (WENR). Hij gaf een korte samenvatting van de historie en van de inhoud van het recente SWAP-50 jaar artikel, zoals hierboven reeds beschreven. Ook werd een kaart gepresenteerd met het aantal downloads van SWAP in de afgelopen 20 jaar (zie Afbeelding 1). De middagessie werd geopend door Bram de Vos, algemeen directeur van Wageningen Environmental Research. Hij vertelde onder meer dat hij ook een verleden heeft met SWAP. SWAP was namelijk onderdeel van het Waterpasinstrumentarium dat hij destijds heeft opgezet. In de ochtendsessie zijn acht Engelstalige, wetenschappelijk inhoudelijke presentaties gegeven en in de middagessie zijn zes Nederlandstalige, meer toepassingsgerichte presentaties gegeven. De samenvattingen van de presentaties zijn hier gegroepeerd in zeven hoofdonderwerpen die een goed beeld geven van het belang van SWAP, de modelontwikkelingen die hebben plaatsgevonden en verbeteringen waaraan gewerkt wordt.

De interactie tussen bodemwater en gewasgroei, en het belang van het wortelstelsel

Al sinds het begin van SWAP staat de interactie met wateropname door het gewas centraal, omdat (evapo)transpiratie een grote post is in de waterbalans en een grote invloed heeft op gewasgroei. Daarom is er ook voor gekozen om SWAP nauw te laten samenwerken met gewasgroei: er is een dagelijkse uitwisseling van gegevens. Speciaal hiervoor is het dynamische gewasgroeimodel WOFOST toegevoegd aan de SWAP-code. Voor niet-WOFOST gewassen is een apart, eenvoudig gewasmodel beschikbaar. Al heel lang wordt reductie van wateropname in SWAP beschreven aan de hand van het empirische model van Feddes e.a. (1978). Reductie van wateropname vindt daarbij plaats onder droge omstandigheden, waarbij de drukhoogte in de bodem lager is dan een bepaalde grenswaarde. Op vergelijkbare wijze kan ook zuurstofstress beschouwd worden indien de drukhoogte groter is dan een bepaalde grenswaarde. Marius Heinen vertelde dat afgelopen jaren alternatieve, procesgebaseerde wateropname- en zuurstofopnamefuncties zijn toegevoegd (Heinen en Mulder, 2024; Bartholomeus e.a., 2008). Beide opnamemodellen zijn analoog. Hij gaf een voorbeeld waarbij volgens het Feddes-concept in een Nederlands kleiprofiel met ondiepe grondwaterstanden toch een aanzienlijke mate van droogtestress werd verkregen. Deze was heel veel minder wanneer een procesgebaseerd wateropnameconcept werd beschouwd. Aan de hand van tijd-diepteplots van wateropnamesnelheid werd duidelijk dat volgens het procesgebaseerde wateropnameconcept het water vooral daar wordt opgenomen waar het makkelijk beschikbaar is (zie Afbeelding 2). Dit is het gevolg van de impliciete compensatie die in het procesgebaseerde model aanwezig is.



Afbeelding 2 Tijd-diepteverloop van wateropname door wortels (RWU = Root Water Uptake flux, cm d⁻¹) als functie van de diepte voor de jaren 2017-2020 voor BOFEK-profiel 1018 volgens de traditionele Feddes-aanpak (bovenste grafiek) en de microscopische aanpak (onderste grafiek).

De empirische relatie van Feddes wordt door gekalibreerde gewasparameters geparametriseerd en is alleen afhankelijk van de relatieve wortelverdeling. Ofwel, er is geen afhankelijkheid van de bodem. De procesgebaseerde modellen worden geparametriseerd door zowel gewas- als bodemparameters, en deze zijn meestal meetbaar en terug te vinden in de literatuur.

Voor de procesgebaseerde modellen is de absolute wortelverdeling nodig. Martin Mulder (WENR) beschreef hoe in SWAP tegenwoordig de wortelgroei en wortelverdeling (in diepte en tijd) dynamisch wordt beschouwd, waarbij de ontwikkeling gestuurd wordt door de omstandigheden in de wortelzone. Zo zullen nieuwe wortels vooral daar gevormd worden waar de omstandigheden gunstig zijn (voldoende water en zuurstof) en eventuele afsterving van wortels zal vooral plaatsvinden daar waar de omstandigheden ongunstig (te droog, te nat) zijn. Deze meer adaptieve wortelontwikkeling, die goed overeenkomt met recent gepubliceerde metingen, werkt daarmee door in de droogte- en zuurstofstress die een plant ondervindt en beïnvloedt zodoende de gesimuleerde gewasgroei.

Hydraulische eigenschappen van de bodem

Het is algemeen bekend dat de dynamiek van water in met name de onverzadigde zone sterk wordt bepaald door de hydrofysische eigenschappen van de bodem. Dat betreft de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Omdat deze relaties sterk niet-lineair zijn, is de impact hiervan groot op de genoemde dynamiek. In SWAP wordt uitgegaan van statische eigenschappen die worden beschreven door de bekende relaties van Van Genuchten en Mualem. In twee presentaties werd aandacht besteed aan de vraag wat er gebeurt indien deze relaties veranderen in de tijd. Csilla Farkas (Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), Noorwegen) presenteerde data over gemeten relaties in verschillende grondbewerkingssystemen en simuleerde met SWAP de waterbalans

en watergehaltes in verschillende dieptes en vergeleek deze met metingen. De hydrofysische eigenschappen werden (in de code) aangepast op momenten van grondbewerking. Deze aanpassingen leidde tot betere overeenkomsten met metingen. Aansluitend ging Pavan Cornelissen (WENR) in op het effect van de uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen met het model PEARL indien de hydrofysische eigenschappen in SWAP veranderen bij veranderingen van de droge bulkdichtheid, bijvoorbeeld na het ploegen en de daaropvolgende periode van consolidatie. Hiervoor is een speciale versie van SWAP gebruikt waarin de parameters van het model van Van Genuchten – Mualem dagelijks worden aangepast op basis van de dagelijkse veranderingen in droge bulkdichtheid. Na ploegen neemt de bulkdichtheid sterk af en zal vervolgens, onder invloed van neerslag, langzaam weer toenemen (consolidatie). Voor een willekeurig jaar werd waargenomen dat de dichtheid weer relatief snel was toegenomen tot aan de uitgangssituatie en vanaf dat moment was er nauwelijks of geen verschil zichtbaar in gesimuleerde watergehaltes ten opzichte van een simulatie waarbij de dichtheid constant werd verondersteld. De SWAP-uitkomsten werden gebruikt als input voor het gewasbeschermingsmiddelenmodel PEARL (zie ook later). Volgens langetermijnsimulaties (20 jaar) was het effect op de uitspoeling (of beter, de 80-percentielwaarde van de 20 concentraties) op 1 m diepte minder dan 1% onder Nederlandse omstandigheden. Onder Mediterrane omstandigheden (Sevilla, Spanje), met een droger klimaat en een dus minder snel optredend consolidatieproces, was dit effect iets groter, maar minder dan 5%. Omdat het nog een beperkt onderzoek betreft, (1 bodemsoort, twee klimaatreeksen) is verder onderzoek gewenst.

Quirijn de Jong van Lier (Universiteit São Paulo, Brazilië) bestudeerde de effecten van de onzekerheid in de hydrofysische eigenschappen. De parameters in het model van Van Genuchten – Mualem worden meestal gefit aan de hand van laboratoriummetingen. Hieruit volgen dan de schattingen van deze parameters, maar meestal is er ook informatie bekend over de standaardfout van deze schattingen en is er informatie bekend over de onderlinge correlaties tussen de parameters. Deze informatie is bijvoorbeeld beschikbaar wanneer het fitprogramma RETC wordt gebruikt. Aan de hand van een groot aantal stochastische realisaties van deze parameters onderzocht hij in welke mate dit de resultaten van SWAP-simulaties beïnvloedt. Voor een semi-aride locatie in Noordoost-Brazilië vond hij een effect op de transpiratie gedurende een groeiseizoen: de mediaan van alle stochastische realisaties was een stuk lager dan de waarde die zou zijn verkregen op basis van de oorspronkelijke gefitte inputwaarden. Ook langetermijneffecten zijn bestudeerd met aandacht voor effect op transpiratie en uitspoeling. De gepresenteerde werkwijze voor het stochastisch gebruik van bodemfysische eigenschappen in modellen laat het belang zien van nauwkeurige metingen van de hydrofysische relaties.

De interactie met grond- en oppervlaktewater, met name via gecontroleerde drainage

SWAP is in essentie een 1-dimensionaal model waarbij de waterbeweging alleen in de verticale richting wordt beschouwd. Hierbij kan wel rechtstreeks interactie met het grondwater worden beschouwd (alleen verticaal), maar ontbreekt de rechtstreekse uitwisseling met drainage- en oppervlaktewatersystemen. Dat

laatste is in SWAP mogelijk gemaakt via het toevoegen van put- en brontermen in de waterbalansvergelijking. Zo kunnen maximaal vijf drainagesystemen, elk met hun eigen drainagegeweerstand, ontwateringsdiepte en eventueel fluctuerend peil beschouwd worden; denk aan grote oppervlaktewateren, kanalen, sloten, drainagebuizen, greppels. In zowel de bijdrage van Janine de Wit (KWR, NL), als in de bijdrage van Erika Lucía Rodríques (Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek, ILVO, België) werd gekeken naar de mogelijkheid deze module te gebruiken voor onderzoek naar gecontroleerde drainage, al dan niet gecombineerd met subirrigatie. Janine gaf een iets andere invulling aan de drainagesystemen door deze te koppelen aan de dynamische modellering van het waterniveau in de regelput en ontwateringsdiepte van de sloot. In geval van subirrigatie blijkt het mogelijk de grondwaterstand te verhogen tot een niveau dat de waterbeschikbaarheid voor het gewas verhoogt. De hoeveelheid water die daarvoor moet worden aangevoerd, is afhankelijk van de klimatologische omstandigheden, maar ook van de geohydrologische randvoorwaarden. In droge jaren moet vanzelfsprekend meer water aangevoerd dan in nattere jaren. Echter, in een extreem droog jaar als 2018 kan daar veelal niet het volledige watertekort in de wortelzone mee worden gecompenseerd en zal er nog steeds sprake zijn van reductie in de gewasopbrengst. Ook is gebleken dat een aanzienlijk deel van het aangevoerde water naar de ondergrond of het oppervlaktewater wordt afgevoerd. Met een sturingsalgoritme gekoppeld aan SWAP, kan aan de hand van de huidige condities in het veld en de weersverwachting voor de komende 10 dagen, de aansturing van de pomp en het niveau in de regelput automatisch plaatsvinden en kan de benodigde wateraanvoer sterk verminderen. Erika Lucía Rodríques gebruikte SWAP in scenariostudies naar de effecten van gecontroleerde drainage. Zij concludeerde dat deze methode leidt tot verminderde drainafvoer via drainagebuizen en tot meer voeding van het grondwater. Agronomische voordelen (transpiratie) worden alleen verkregen in lemige zandgronden waarbij vroeg in het jaar al wordt gestart met gecontroleerde drainage. In de discussie werd benoemd dat gecontroleerde drainage niet altijd veel bijdraagt aan de waterbeschikbaarheid op het perceel zelf, maar wel van belang is voor de regionale zoetwaterbeschikbaarheid.

Verzouting en zoutstress

In SWAP is een module aanwezig waarmee stoffentransport kan worden gesimuleerd volgens de klassieke convectie- en dispersie-diffusie vergelijking. Zo'n stof kan als een tracer opgevat worden voor zout of elektrische geleidbaarheid (EC). Tom de Swaef (ILVO, België) vertelde over het onderzoek dat ILVO heeft uitgevoerd naar de invloed van verzouting op de parameterisatie van zoutstress voor het gewas quinoa. Op basis van veldmetingen in de Westelijke Sahara met drie behandelingen met zout irrigatiewater werden de twee parameters gekalibreerd die zoutstress beschrijven in het Maas-Hofman-model voor zoutstress. Met SWAP zijn enkele scenario-analyses uitgevoerd waaruit werd geconcludeerd dat irrigeren met zout water met lage frequenties (1x per week met grote hoeveelheid) gecombineerd met mulchen leidt tot een significante afname van bodemverdamping en een verbeterde opbrengst. Mulchen is het bedekken van de bodem, meestal met organisch materiaal (gewasresten, stro, houtsnippers e.d.) of heel soms met plastic, met als doel bodemverdamping tegen te gaan, de bodemvruchtbaarheid te verbeteren en de onkruiddruk te verminderen.

Het belang van SWAP in combinatie met andere simulatiemodellen

De kern van SWAP is het beschrijven van de waterbalans in de bodem. Zoals hierboven al gemeld is de interactie met het gewas hierbij van cruciaal belang, vandaar ook dat SWAP rechtstreeks is gekoppeld met WOFOST. Maar er zijn ook andere processen en modellen die dankbaar gebruikmaken van de waterbalansstermen en waterfluxen zoals berekend met SWAP. Aaldrik Tiktak (Planbureau voor de Leefomgeving, PBL) beschreef het, in zijn woorden, gelukkige (bijna) 25-jarige huwelijk tussen SWAP en PEARL. Het PEARL-model beschrijft de dynamiek van gewasbeschermingsmiddelen in de bodem en maakt daarbij gebruik van de waterfluxen en watergehalten van een SWAP-simulatie. Omdat er geen noodzaak is dat simulatieresultaten teruggekoppeld worden naar SWAP, kan hierbij worden volstaan met vooraf gegenereerde SWAP-uitvoer. Deze kan dan in diverse scenario's door PEARL worden gebruikt als bekende invoer. PEARL wordt in Europa gebruikt voor onderzoek in het kader van de toelating van gewasbeschermingsmiddelen. Voor ruimtelijke studies is het model GeoPEARL ontwikkeld.

Piet Groenendijk (WENR) beschreef de link tussen SWAP en het nutriënten- en uitspoelingsmodel ANIMO; met name stikstof (N) en fosfor (P). Dat huwelijk bestaat al bijna 40 jaar. Ook hier wordt uitvoer van SWAP gebruikt als invoer voor ANIMO, op een vergelijkbare wijze als bij PEARL. Voor nutriënten is wel regelmatige terugkoppeling naar SWAP-WOFOST nodig om rekening te kunnen houden met reductie in gewasgroei bij verminderde beschikbaarheid van nutriënten. Om dit grotendeels te ondervangen is zeven jaar geleden een N-module toegevoegd, zodat de SWAP-WOFOST simulaties deels rekening kunnen houden met eventuele stikstofproblemen (Groenendijk e.a., 2017). Piet liet resultaten zien van een vergelijkingsstudie van verschillende modellen, waaronder SWAP-ANIMO, op basis van nitraatuitspoelingsmetingen in een lysimeter. De meeste modellen c.q. modelleurs waren redelijk in staat de nitraatuitspoeling en de N-opname te simuleren gedurende de kalibratieperiode. Grotere afwijkingen werden echter verkregen tijdens de validatieperiode. Dat werd vooral toegeschreven aan het feit dat in de validatieperiode veel meer neerslag was gevallen dan in de kalibratieperiode. ANIMO wordt in Nederland onder meer gebruikt voor de evaluatie mestwetgeving en recent wordt gewerkt aan de koppeling met het landelijke waterkwaliteitsmodel (LWKM).

Gebruikersgemak SWAP

Jos van Dam (Wageningen Universiteit, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer) ging in op het gebruik van SWAP in het onderwijs. Om de eerste kennisgeving en het gebruik te vergemakkelijken is er speciaal hiervoor een grafische userinterface (GUI) ontwikkeld waarin de studenten makkelijk invoer kunnen genereren, en eenvoudig de uitkomsten van meerdere simulaties onderling grafisch kunnen vergelijken. De ervaringen zijn positief en de verwachting is dat de GUI volgend jaar voor een breder publiek beschikbaar is. In de lunchpauze was er nog een demonstratie door Mateusz Zawadzki (Vrije Universiteit Brussel, België) van een Python-wrapper vooraansturing van SWAP.

Overige praktijkvoorbeelden van SWAP-gebruik

Martin Mulder (WENR) beschreef de rol van SWAP-WOFOST in het project Waterwijzer Landbouw, dat tot doel heeft een systeem te ontwikkelen voor het bepalen van relaties tussen hydrologische condities en landbouwkundige gewasopbrengsten. De laatste jaren wordt vooral ingezet op het verbeteren van het modelinstrumentarium en het toetsen van de modelprestaties. Daarnaast wordt gewerkt aan een nieuwe methodiek voor het uitsplitsen van de totale opbrengstderiving in afzonderlijke stressoren.

Sarah Garré (ILVO, België) gaf een overzicht van diverse onderzoeksprojecten in Vlaanderen waarin SWAP een rol speelt. Het betreft de projecten PEILIMPACT, OP-PEIL, SKAD, SALAD en SOILSTRUCT. Het project PEILIMPACT betreft een toepassing van Waterwijzer Landbouw in Vlaanderen. Het project SALAD gaat over zilte landbouw en SOILSTRUCT gaat over water sparen en gewasopbrengsten boosten met mulch (zie presentatie Tom de Swaef hierboven). De projecten OP-PEIL en SKAD gaan over het potentieel en beheer van regelbare drainage in Vlaamse context (zie presentatie Erika Lucía Rodríques hierboven).

Ardy Saarloos (Wageningen Plant Research, WPR) beschreef de rol die SWAP kan vervullen in het project Economische Effecten Berekening (EEB). Tijdens het groeiseizoen komt het steeds vaker voor dat er een tekort aan zoetwater optreedt. In de Verdringingsreeks komt landbouw als een van de eerste sectoren in beeld om minder water te gebruiken. Dat geldt met name voor de minder kapitaalintensieve gewassen en in een tweede stadium ook voor de kapitaalintensieve gewassen. In het project EEB wordt daarom aandacht besteed aan de vragen 'Hoe optimaal om te gaan met water dat beschikbaar is?' en 'Welk moment van berekening is cruciaal?' In 2024 is een veldproef met verschillende irrigatiebehandelingen aangelegd. Vanwege het natte groeiseizoen was er echter geen noodzaak om te irrigeren, zodat effecten van verschillende irrigatiestrategieën niet tot uiting zijn gekomen. In 2025 volgt een nieuwe kans.

Ten slotte

De terugblik op 50 jaar SWAP, de doorgaande ontwikkelingen en toepassingen laten zien dat SWAP nog steeds springlevend is. Het vervult een belangrijke rol in het modelleren van de wisselwerking tussen bodem-water-plant en atmosfeer, ofwel dat deel van de bodem waarin de relatie tussen klimaat, waterbeheer en gebruiksfuncties plaatsvinden: de onverzadigde zone. Het is cruciaal de kritische processen in dit topsysteem goed te begrijpen en in een model te kunnen vatten. SWAP kan vervolgens gebruikt worden om op perceelschaal de interacties te modelleren, of een basis te vormen voor meer vereenvoudigde benaderingen, die bijvoorbeeld in ruimtelijke analyses kunnen worden toegepast. SWAP vervult nu en in de toekomst een zeer centrale rol bij het hydrologisch modelleren van de dynamiek van water in het bovenste deel van de bodem.

Alle veertien presentaties van het symposium zijn als pdf beschikbaar op de website van SWAP (<https://swap.wur.nl/>, ga naar de pagina 'SWAP 50 years'). Een link naar het Engelstalige artikel is daar ook te vinden.

Literatuur

Bartholomeus, R.P., J.Ph.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam en R. Aerts (2008) Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model; in: *Journal of Hydrology*, vol 360, pag 147-165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.02>

Belmans, C., J.G. Wesseling en R.A. Feddes (1981) Simulation model of the water balance of a cropped soil providing different types of boundary conditions (SWATRE); Nota 1257, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/212734>

Belmans, C., J.G. Wesseling en R.A. Feddes (1983) Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE; in: *Journal of Hydrology*, vol 63, pag 271-286. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90045-8)

Feddes, R.A., E. Bresler en S.P. Neuman (1974) Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems; in: *Water Resources Research*, vol 10(6), pag 1199-1206. <https://doi.org/10.1029/WR010i006p01199>

Feddes, R.A., P. Kabat, P.J.T. van Bakel, J.J.B. Bronswijk en J. Halbertsma (1988) Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone – state of the art; in: *Journal of Hydrology*, vol 100, pag 69-111. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90182-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90182-5)

Feddes, R.A., P.J. Kowalik en H. Zaradny (1978). Simulation of field water use and crop yield; Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen.

Groenendijk, P., H. Boogaard, M. Heinen, J. Kroes, I. Supit en A. de Wit (2017) Simulation nitrogen-limited crop growth with SWAP/WOFOST: Process description and user manual; Report 2721, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/400458>

Heinen, M. en M. Mulder (2024) Simulatie van wateropname in SWAP-WOFOST: van een empirische naar een mechanistische beschrijving; in: *Stromingen*, vol 2024-1, pag 5-126. https://www.nhv.nu/wp-content/uploads/2024/06/370089_NHV_02_Stromingen-1-2024-ARTIKEL-Marius-Heinen-DEF-HR.pdf

Heinen, M., M. Mulder, J. van Dam, R. Bartholomeus, Q. de Jong van Lier, J. de Wit, A. de Wit en M. Hack – ten Broeke (2024) SWAP 50 years: advances in modelling soil-water-atmosphere-plant interactions; in: *Agricultural Water Management*, vol 298, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108883>

Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit en P.E.V. van Walsum (2017) SWAP version 4: Theory and description; Report 2870, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/416321>

Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk en C.A. van Diepen (1997). Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Air-Plant environment. Technisch document 45, DLO Winand Staring Centrum, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/222782>

Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en J.G. Kroes (2008) Advances of modeling water flow in variable saturated soils with SWAP; in: *Vadose Zone Journal*, vol 7(2), pag 640-653. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0060>

Auteurs

MARIUS HEINEN

Wageningen Environmental Research, team Bodem Water en Landgebruik
marius.heinen@wur.nl

MARTIN MULDER

Wageningen Environmental Research, team Bodem Water en Landgebruik
martin2.mulder@wur.nl

MIRJAM HACK-TEN BROEKE

Wageningen Environmental Research, team Bodem Water en Landgebruik
mirjam.hack@wur.nl

RUUD BARTHOLOMEUS

KWR Water Research Institute & Wageningen Universiteit, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer
ruud.bartholomeus@kwrwater.nl

JOS VAN DAM

Wageningen Universiteit, leerstoelgroep Bodemfysica en Landbeheer
jos.vandam@wur.nl