

---

# Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage

Ruud Bartholomeus<sup>1</sup>, Gé van den Eertwegh<sup>2</sup>, Gijs Simons<sup>3</sup>

---

*Met de toename van langdurig droge perioden in Nederland, afgewisseld met hevige neerslag, wordt het voor de landbouw en de waterbeheerder steeds belangrijker om te anticiperen op extremen in bodemvochtcondities. Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) maakt adaptief waterbeheer mogelijk, waarin de vochtcondities voor gewasgroei ge-optimaliseerd worden. Binnen TKI-Watertechnologie ([www.tkiwatertechnologie.nl](http://www.tkiwatertechnologie.nl)) is een online management-algoritme voor KAD ontwikkeld dat op basis van continue metingen van grondwaterstand en bodemvochtgehalte in de wortelzone, op dagbasis een optimaal drainageniveau bepaalt. Via de online aansturing van KAD kan dit niveau eenvoudig automatisch ingesteld worden. Tijdig anticiperen op het weer en vochttoestand van de bodem maakt een dynamisch beheer van het drainageniveau mogelijk: water vasthouden wanneer mogelijk en water afvoeren wanneer nodig.*

## Inleiding

Landbouwopbrengsten zijn afhankelijk van de vochtcondities in de wortelzone; droogte, maar vooral ook een overschot aan water in de wortelzone beperken de gewasopbrengst. In het veranderende klimaat neemt de dynamiek in bodemvochtcondities toe. Als het waterbeheer daar niet op wordt aangepast, zullen gewassen last krijgen van zowel meer droge, als natte extremen (Knapp e.a., 2008). Daarom moeten agrariërs en waterbeheerders de mogelijkheid krijgen om risico's van verminderde gewasopbrengsten te beperken, door anticiperend waterbeheer op perceelniveau en regionaal niveau.

Juist om het risico op natschade te beperken, hebben agrariërs hun land gedraineerd om zo snel mogelijk van het overtollige water af te komen (o.a. Ritzema e.a., 2006). Terwijl natschade zo wordt beperkt, neemt de kans op droogteschade toe. Om zowel water af te kunnen voeren als vast te kunnen houden zijn samengestelde peilgestuurde drainagesystemen ontwikkeld (o.a. Stuyt, 2013). Behalve dat zulke systemen piekafvoeren en de afstroming van nutriënten naar het oppervlaktewater beperken, hebben ze als bijkomend voordeel dat het mogelijk wordt om de grondwaterstand en de bodemvochtcondities in een perceel actief te beheren (Ayars e.a., 2006).

---

1 KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein ([ruud.bartholomeus@kwrwater.nl](mailto:ruud.bartholomeus@kwrwater.nl))

2 KnowH<sub>2</sub>O, Berg en Dal ([eertwegh@knowh2o.nl](mailto:eertwegh@knowh2o.nl))

3 FutureWater, Wageningen ([g.simons@futurewater.nl](mailto:g.simons@futurewater.nl))

Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) is een bijzondere vorm van peilgestuurde drainage, die het mogelijk maakt om de drainagebasis via internet op afstand te besturen (Afbeelding 1). De technische kenmerken van KAD maken het mogelijk om continu en online de bodemvochtcondities in een landbouwperceel te beheren en tijdig te anticiperen op te droge of te natte groeicondities. Om deze mogelijkheid optimaal te benutten hebben we een management-algoritme opgezet, dat veldwaarnemingen ('observeren'), op processen gebaseerde modelsimulaties ('voorspellen') en KAD ('bijsturen') combineert om de bodemvochtcondities voor gewasgroei te optimaliseren.

## **Klimaat Adaptieve Drainage (KAD)**

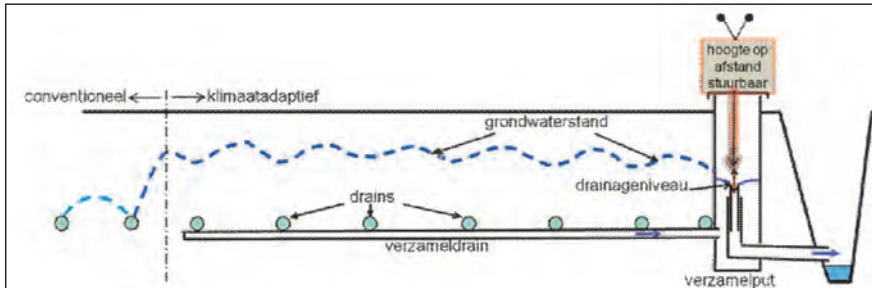
KAD is in twee fasen ontwikkeld als innovatie in waterbeheer. Allereerst is er een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (Droogers e.a., 2010). Daarna is KAD verder onderzocht en ontwikkeld (Van den Eertwegh e.a., 2013).

Reductie van piekafvoeren en een grotere mate van zelfvoorziening zijn de voornaamste doelen van KAD voor het waterbeheer. KAD is in 2010-2012 getest in het veld op drie locaties in Nederland. Op deze locaties is nauw samengewerkt met eindgebruikers van het systeem, te weten waterbeheerders en agrariërs. Het KAD-systeem is erop gericht water vast te kunnen houden in de bodem van landbouwpercelen. De bodem krijgt zo een actieve rol in het operationele waterbeheer. De bediening van het systeem is online mogelijk via internet, aangesloten op een TMX-telemetriesysteem en de drainagebasis kan traploos versteld worden. Het KAD-systeem kan zowel op zonne-energie als op netspanning werken. Het telemetriesysteem biedt transparantie in bediening en de effecten daarvan voor alle belanghebbenden. Het systeem kan namelijk na autorisatie door meerdere partijen bediend en ingezien worden. Een waterbeheerder kan bijvoorbeeld KAD gebruiken en aansturen om piekafvoeren te reduceren, een agrariër om optimale vochtcondities te realiseren voor zijn gewassen en water te conserveren. Met behulp van computermodellen zijn de adaptieve effecten van KAD doorgerekend onder klimaatveranderingen. Daarnaast is bepaald waar in Nederland het systeem kan worden toegepast, hoe juridisch het beheer en gebruik geregeld kan worden en hoe kosten en baten zich verhouden (Van den Eertwegh e.a., 2013). Daarnaast is het via de telemetrie mogelijk om een gebiedsregeling in te zetten, waarmee KAD op regionale schaal gecoördineerd gestuurd kan worden.

Er zijn bij drie agrariërs binnen de waterschappen Brabantse Delta, Hunze en Aa's en Vechtstromen (Afbeelding 2) prototypen van KAD aangelegd. Deze prototypen zijn in wezen één volledige unit van een geheel KAD systeem. Elk KAD-systeem bestaat uit een samengesteld peilgestuurd drainagesysteem, een op afstand online en traploos regelbare drainageput, en de volledige infrastructuur voor telemetrie en dataopslag. De prototypen zijn uitgerust met een monitoringsysteem om in detail het functioneren van KAD te onderzoeken, maar ook om potentiële eindgebruikers inzicht te geven in de processen die aan KAD en de effecten van de toepassing ten grondslag liggen. Het resultaat van deze demonstratie-prototypen was in 2012:

- i. KAD werkt in de praktijk goed;
- ii. enkele technische verbeteringen zijn doorgevoerd en het systeem is robuust;

- iii. een extra "tussenschakel" is ontwikkeld, de zogenaamde vlotterput, waardoor KAD ook in licht glooiende gebieden kan worden toegepast; ook kunnen drainafvoeren worden gemeten binnen het systeem;
- iv. deelnemende agrariërs zijn als potentiële eindgebruiker tevreden over het systeem.



**Afbeelding 1:** Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) systeem: drains, verbonden met een gesloten verzamel drain, die uitkomt in een verzamelput met automatisch gestuurd drainageniveau, en een afvoerleiding naar het oppervlaktewater.



**Afbeelding 2:** KAD-perceel in Haaksbergen (5,5 ha). Linksonder: opzet van het KAD en monitoringsysteem; ligging peilbuizen in groen, verzamelput in oranje, vlotterputten in geel. Rechtsboven: foto van het snijmaais-perceel in juni 2013. Linksonder: mechanische installatie voor controle drainagebasis die geïnstalleerd wordt in de verzamelput. Rechtsonder: op afstand bestuurbare controle-eenheid met daarachter de verzamelput.

## Management-algoritme voor KAD

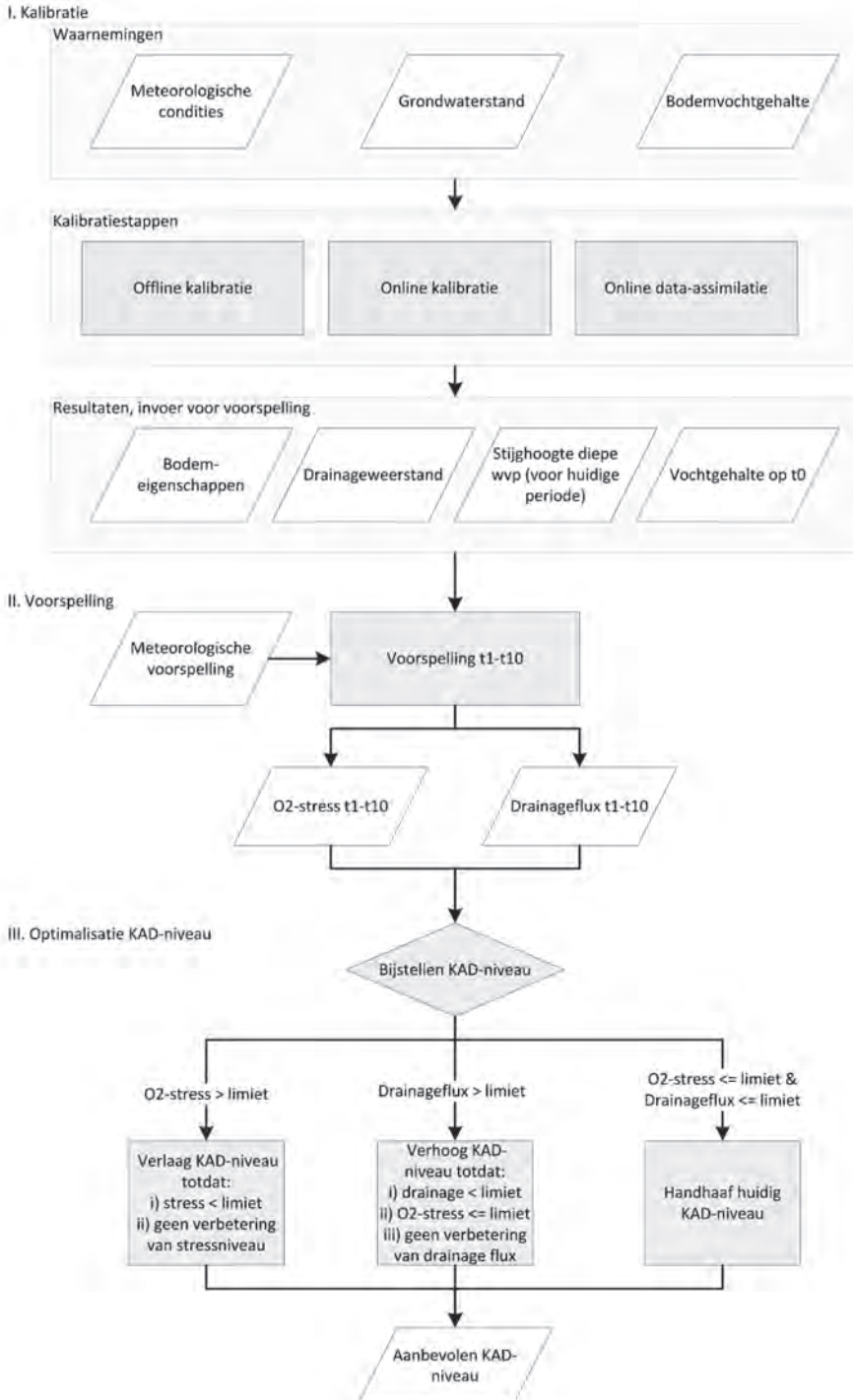
Traditioneel richt peilgestuurde drainage zich op het instellen van bepaalde grondwaterstanden. Een grondwaterstand heeft echter een indirect effect op de bodemvochtcondities in de wortelzone en hiermee de water- en zuurstofbeschikbaarheid voor plantenwortels. Andere factoren die droogte- en zuurstofstress (directe natschade) bepalen, zoals neerslag, verdamping, temperatuur en planteigenschappen, worden niet 'ondervangen' door grondwaterstanden. Daarom richten we ons hier niet op het instellen van een optimale grondwaterstand, maar op het minimaliseren van droogteschade én natschade door plantstress. Deze stress integreert de processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem en is een meer direct (causaal) en relevant managementdoel voor optimale gewasgroei en -opbrengst.

Om optimale bodemvochtcondities voor gewasgroei vast te stellen dienen de samenhangende processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem expliciet beschouwd te worden. Het dynamische 1-D Soil-Water-Atmosphere-Plant model SWAP (Kroes e.a., 2009; Van Dam e.a., 2008), uitgebreid met de zuurstofmodule van Bartholomeus e.a. (2008) (Bartholomeus e.a., 2013) beschrijft deze processen in detail. SWAP gebruikt als invoer meteorologische condities, bodemfysische parameters, een hydrologische onderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gewaseigenschappen. Uitvoer op dagbasis is onder meer grondwaterstand, bodemvochtgehalte, de bodemtemperatuur en transpiratiereductie. Deze laatste is het verschil tussen potentiële en werkelijke transpiratie, veroorzaakt door te natte of te droge omstandigheden in de wortelzone. Transpiratiereductie wordt vertaald naar relatieve gewasopbrengst volgens de 1:1 lineaire relatie van De Wit (1958).

In het algoritme voor sturing van het KAD-systeem combineren we veldmetingen, weersvoorspellingen, op processen gebaseerde modelsimulaties en KAD, om via het tijdig vasthouden van water bij een dreigend watertekort naast tijdige drainage bij een dreigend te natte bodem, de bodemvochtcondities in de wortelzone te optimaliseren en plantstress te minimaliseren. Het KAD-management algoritme gebruikt SWAP, gecombineerd met PEST (Doherty, 2010) voor kalibratie en data-assimilatie, en bepaalt het aanbevolen drainage-niveau in het KAD-systeem (KAD-niveau). Het aanbevolen KAD-niveau voorkomt i) zuurstofstress, en ii) onnodige drainage.

Het management-algoritme is mede gebaseerd op Visser e.a. (2006) en geprogrammeerd in de open source statistische software R (R Core Team, 2013). Binnen het opgezette raamwerk worden invoerbestanden voor SWAP en PEST automatisch gegenereerd en worden modelruns automatisch aangeroepen.

Voor elke dag worden drie opeenvolgende stappen onderscheiden: 1) kalibratie en data-assimilatie van SWAP met PEST (Afbeelding 3-I), gevolgd door 2) voorspelling van de toekomstige hydrologische condities en plantstress met SWAP (Afbeelding 3-II) en ten slotte 3) bepaling van het aanbevolen KAD-niveau (Afbeelding 3-III).



**Afbeelding 3:** Bepaling van het aanbevolen drainage-niveau van het KAD-systeem, gebaseerd op gemeten grondwaterstanden en bodemvochtcondities, op processen gebaseerde modelsimulaties en 10-daagse weervoorspellingen.

### **Kalibratieprocedure van SWAP (Afbeelding 3-I)**

SWAP wordt gebruikt om de grondwaterstand, het bodemvochtgehalte, de drainageflux en plantstress voor de komende  $n$  dagen te voorspellen. Voor betrouwbare voorspellingen volgen we de methode van Visser e.a. (2006) waarin offline kalibratie, online kalibratie en online data-assimilatie worden gecombineerd om i) optimale modelparameters voor SWAP te genereren en ii) begincondities voor de voorspelling te genereren, die fysisch consistent zijn en die overeenkomen met de gemeten grondwaterstand en het vochtprofiel op de laatste dag voor de voorspelling. Gemeten drainageniveau, continu gemeten en via telemetrie en internet ontsloten via het KAD-systeem, zijn daarnaast modelinvoer.

De kalibratieprocedure volgt drie opeenvolgende stappen. Stap 1: offline kalibratie gebaseerd op alle beschikbare gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehalten, die resulteert in een optimale schatting van de bodemfysische eigenschappen en de drainageweerstand. Stap 2: online kalibratie, gebaseerd op alleen metingen van de laatste 31 dagen voorafgaand aan de voorspelling, naar Visser e.a. (2006), die resulteert in een optimale schatting van de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket als onderrandvoorwaarde voor SWAP voor deze periode. Deze kalibratiestap is nodig om de seizoenfluctuatie in de stijghoogte mee te nemen. Stap 3: online data-assimilatie, gebaseerd op alleen metingen van de laatste dag. Hiermee worden de vochtcondities van de laatste dag voor de voorspelling zo goed mogelijk gereproduceerd. Alle details over deze procedure zijn beschreven in Visser e.a. (2006). Tabel 1 geeft de gekalibreerde modelparameters voor elke stap.

Parameter	Omschrijving	1. Offline kalibratie	2. Online kalibratie	3. Online data-assimilatie	4. Voorspelling en optimalisatie
AQAVE	Gemiddelde stijghoogte in diepe wvp [cm]	X	X	X	2.
Ksat	Verzadigde verticale doorlatendheid [cm/d]	X	1.	1.	1.
Alfa	Van Genuchten bodemfysische parameter alfa [1/cm]	X	1.	1.	1.
Npar	Van Genuchten bodemfysische parameter n [-]				
DRARES	Drainageweerstand [d]	X	1.	1.	1.
Gesimuleerd initieel bodemvochtprofiel					3.

**Tabel 1:** Geoptimaliseerde parameters in elke kalibratiestap en parameters die gebruikt worden voor de voorspelling en optimalisatie van het KAD-niveau. 'X' betekent dat een parameter geoptimaliseerd wordt in de specifieke kalibratiestap; nummers verwijzen naar de kalibratie/assimilatiestap, waaruit de parameterwaarde is overgenomen.

### **Voorspelling en optimalisatie (Afbeelding 3-II en III)**

In de voorspelling wordt het drainageniveau gesimuleerd op basis van een gegeven ingesteld niveau in de KAD-put (KAD-niveau). Gebruikmakend van de gekalibreerde parameters, de huidige gesimuleerde vochtconditie als beginconditie en dagwaarden van weervoorspellingen als modelinvoer, worden drainageniveau, grondwaterstand, bodemvochtgehalte, drainageflux en zuurstofstress voor de toekomstige  $n$  dagen voorspeld. Op basis van de gesimuleerde zuurstofstress en de drainageflux voor de voorspelling, wordt de optimalisatieroutine aangeroepen en wordt het aanbevolen en

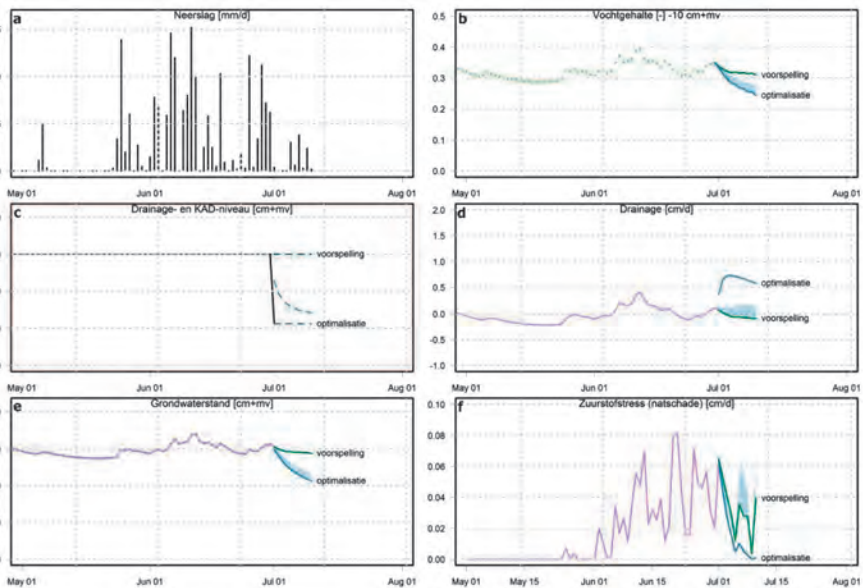
in te stellen KAD-niveau bepaald. Dit aanbevolen KAD-niveau hangt af van de eenvoudige beslisregels:

1. Indien zuurstofstress: verlaag het KAD-niveau om water af te voeren via drainage;
2. Anders, indien drainage: verhoog het KAD-niveau om meer water vast te houden;
3. Anders: doe niets.

De mate waarin het KAD-niveau moet worden bijgesteld, wordt, vanwege de niet-lineariteit van het systeem, bepaald via een iteratieve procedure en hangt af van de 'winst' (beperking zuurstofstress of onnodige drainage) die met het bijstellen van het niveau kan worden gehaald. Uitgangspunt is dat het KAD-niveau zo lang zo hoog mogelijk blijft om zoveel mogelijk water in het systeem vast te houden, zonder zuurstofstress en daarmee natschade voor de plant te veroorzaken.

In de huidige versie van het management-algoritme wordt de onzekerheid in de weersverwachting meegenomen via meerdere realisaties van de neerslag. Voor elk scenario van het toekomstige weer, worden de voorspellings- en optimalisatieroutines aangeroepen, waarmee een bandbreedte van toekomstige grondwaterstand, bodemvocht, drainage, stress én optimaal KAD-niveau wordt verkregen.

Afbeelding 4 toont een voorbeeldtoepassing van een voorspelling en de optimalisatie van het KAD-niveau voor een situatie met initieel natte bodemvochtcondities.



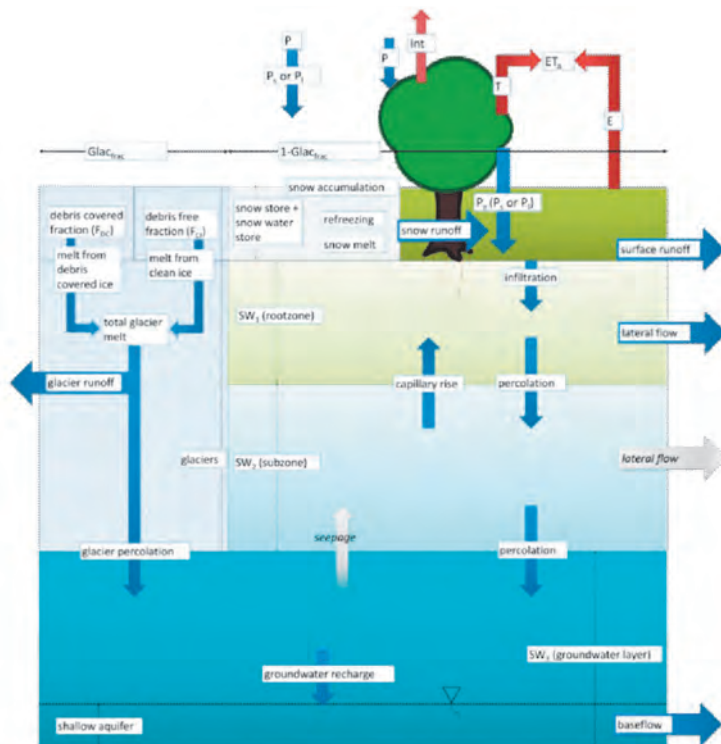
**Afbeelding 4:** Voorbeeld van een voorspelling en optimalisatie van het KAD-niveau onder natte omstandigheden. Om zuurstofstress (f) te beperken moet het KAD-niveau (c) naar beneden worden bijgesteld. Dit verhoogt de drainageflux (d), verlaagt de grondwaterstand (e) en het vochtgehalte (b) en beperkt de zuurstofstress (f).

### **SPHY: opschalen naar veldschaal**

Het ruimtelijk opschalen van de gekalibreerde SWAP-resultaten, door middel van een

ruimtelijk hydrologisch model, maakt het mogelijk om de bodemvochtcondities te kwantificeren en te voorspellen op bijvoorbeeld boerderijniveau. Daarmee wordt een ruimtelijke analyse van het effect van een aanpassing van het KAD-niveau verkregen. Hiervoor hebben we het Spatial Processes in Hydrology of kortweg SPHY-model (ontwikkeld door FutureWater: [www.sphy.nl](http://www.sphy.nl)), gekoppeld aan het gekalibreerde SWAP model. SPHY is een ruimtelijk expliciet model (Terink e.a., 2014; Terink e.a., 2015) en is daarom complementair aan de 1-D SWAP kolom. SPHY i) integreert de belangrijkste hydrologische processen, ii) is modulair opgezet zodat niet-relevante processen eenvoudig kunnen worden uitgeschakeld waardoor de rekentijd afneemt, iii) is geschikt voor toepassing in een operationeel beslissingsondersteunend systeem, iv) kan eenvoudig gekoppeld worden aan remote sensing gegevens, en v) is open-source. Agrohydrologisch gezien is SPHY minder gedetailleerd dan SWAP.

SPHY heeft de optie om een dynamische vegetatiemodule te gebruiken, gebaseerd op remote sensing gegevens (Rafn e.a., 2008), waarmee de invloed van de ontwikkeling van het gewas (met name bedekking) op bijvoorbeeld de interceptie van neerslag kan worden beschouwd. Afbeelding 5 geeft een overzicht van alle hydrologische processen die meegenomen kunnen worden in SPHY, afhankelijk van de benodigde toepassing. Bij de in dit artikel beschreven toepassing ligt de focus voornamelijk op de processen in de wortelzone (bodemvochtgehalte, evaporatie, transpiratie, interceptie) en is de grondwatermodule uitgeschakeld. Voor een uitvoerige modelbeschrijving verwijzen we naar Terink e.a. (2015).



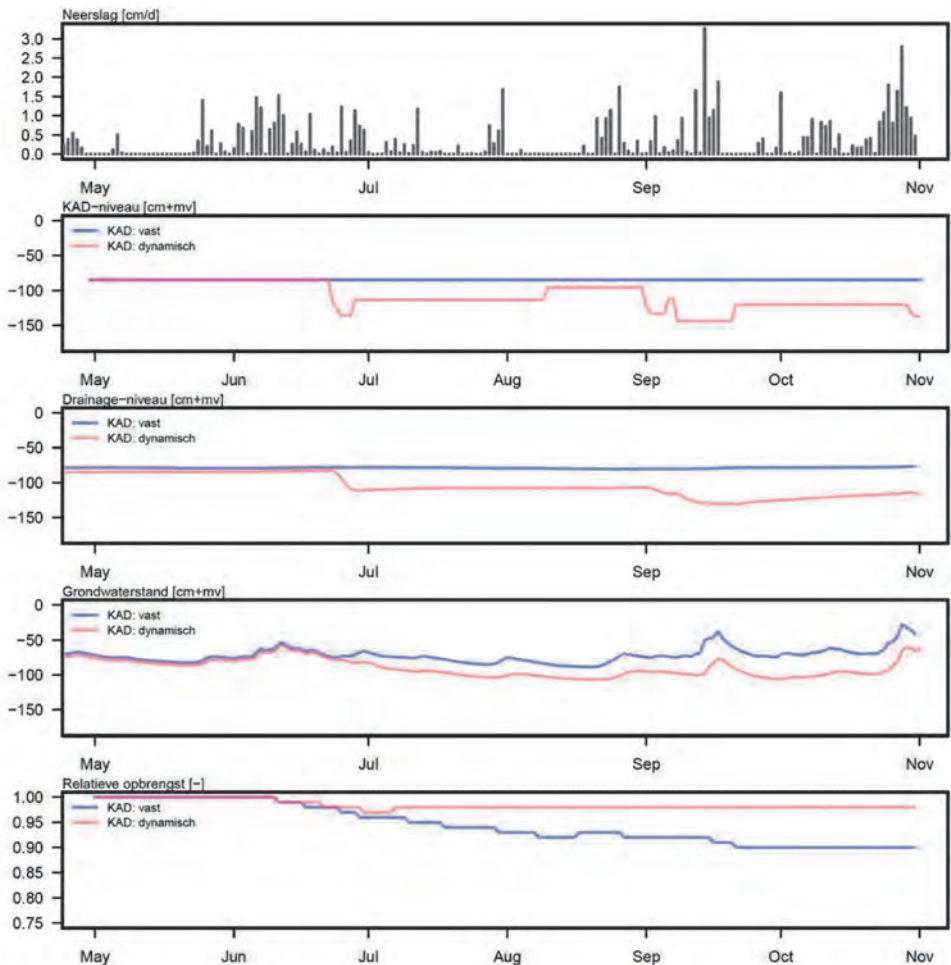
**Afbeelding 5:** SPHY modelconcept. Verschillende van de bouwstenen, zoals de glaciaal-hydrologische module van het model, zijn optioneel en zijn uitgeschakeld in de hier beschreven toepassing.



## Voorbeelden van toepassing

### Vast versus dynamisch beheer

Als eerste demonstreren we de toepassing van de optimalisatieroutine voor een relatief nat jaar (1998) voor snijmais op een zandige bodem (drainageweerstand 60d, bodemfysica van bodems B1 en O2 uit Wösten e.a. (2001), vaste stijghoogte onderrand = 75cm-mv) en vergelijken de situatie met dynamisch beheer van het KAD-niveau met een typisch vast drainageniveau van 85cm-mv (Cultuurtechnische Vereniging, 1988). Het betreft hier een fictieve modeloefening, waarvoor eerst met SWAP de huidige hydrologische condities zijn gegenereerd, gegeven het KAD-niveau. Vervolgens zijn toekomstige condities voorspeld en is het optimale KAD-niveau bepaald. Gesimuleerde vochtcondities en het optimale KAD-niveau zijn weer invoer voor de SWAP-simulaties van de volgende dag. Deze procedure, die dus alleen de optimalisatieroutine demonstreert en niet de kalibratie en data-assimilatie, is herhaald voor alle dagen in het groeiseizoen.



**Afbeelding 6:** Voorbeeldberekening voor dynamisch beheer van het KAD-niveau (rood) vs. een vast KAD-niveau (blauw) voor het relatief natte jaar 1998.

Afbeelding 6 geeft de gesimuleerde relatieve gewasopbrengst voor een vast en een dynamisch KAD-niveau. De simulaties met een dynamisch KAD-niveau tonen typische beheermomenten. Eind juni wordt het KAD-niveau verlaagd om natschade door zuurstofstress te voorkomen. In augustus wordt het KAD-niveau verhoogd om water vast te houden in de bodem. Voor dit voorbeeld beperkt dynamisch beheer van het KAD-niveau de afname van de relatieve gewasopbrengst met ongeveer 10%. Voor een relatief droog jaar (2003, resultaten niet getoond) is het verschil in opbrengst kleiner. Dit is logisch, omdat er geen overvloed van water is dat óf zuurstofstress óf afvoer via drainage veroorzaakt.

### ***Van punt naar perceel en regio***

Als tweede demonstreren we de toepassing van de kalibratieprocedure voor het KAD-perceel in Haaksbergen. Continue metingen van de grondwaterstand en het drainageniveau, i.c. de waterstand in de KAD-put, zijn beschikbaar vanaf 2012. Continue metingen van bodemvochtgehalten in het groeiseizoen zijn beschikbaar vanaf medio juni 2013. De bodemvochtmetingen an sich zijn echter verstoord door het relatief hoge ijzergehalte in de bodem, waardoor de gemeten waarden afwijken van de werkelijke situatie in het veld. Daarnaast trad tijdens de meetperiode geen natte of droge periode op, waardoor plantstress niet voorkwam. Ondanks deze belemmeringen zijn de beschikbare waarnemingen waardevol om de technische koppeling tussen de veldwaarnemingen en SWAP en SPHY te demonstreren.

De veldwaarnemingen van 1 januari 2012 tot 31 juli 2014 hebben we achtereenvolgens gebruikt voor offline kalibratie, online kalibratie en data-assimilatie. In deze procedure wordt meer waarde toegekend aan het goed reproduceren van de bodemvochtmetingen dan van de grondwaterstand, omdat bodemvochtcondities directer invloed uitoefenen op de gewasgroei. Uit deze simulaties zijn de hydrologische rand-



**Afbeelding 7:** Locatie van het KAD-perceel in Haaksbergen. De grijze rechthoek geeft het ruimtelijk domein van het SPHY-model aan.

voorwaarden voor SPHY bepaald. Deze gelden uitsluitend voor de gedraineerde percelen in de regio rondom het KAD-perceel. Voor de niet-gedraineerde percelen zijn SPHY-simulaties gebaseerd op fluxen uit SWAP-simulaties voor een niet-gedraineerde situatie. Ten slotte is SPHY gebruikt om het effect van de wijziging van het KAD-niveau op de bodemvochtcondities in de omgeving te schatten. Hierbij gaan we ervan uit, dat de benodigde wijziging van het KAD-niveau, zoals bepaald op een specifiek perceel, ook doorgevoerd wordt op alle gedraineerde percelen in de nabije omgeving met eenzelfde bodemtype en gewas. Benadrukt moet worden dat dit een eerste voorbeeldexercitie is; de optimale configuratie van de ruimtelijke sturing moet verder worden uitgewerkt.

SPHY berekeningen zijn uitgevoerd voor een ruimtelijke resolutie van 25m voor het domein gegeven in Afbeelding 7. Aanvullend op de modelinvoer zoals die volgt uit de gekalibreerde SWAP-kolom, is SPHY gevoed met dynamische NDVI-gegevens uit de Groenmonitor ([www.groenmonitor.nl](http://www.groenmonitor.nl); Wageningen UR – Alterra), meerjarig gemiddelde grondwaterstanden (Waterschap Vechtstromen) en de 1:50.000 bodemkaart (Wageningen UR – Alterra). Deze invoer beïnvloedt de ruimtelijk gesimuleerde bodemvochtcondities.

Afbeelding 8 toont de resultaten van de kalibratie en data-assimilatie. De resultaten tussen offline en online kalibratie verschillen nauwelijks. Dit betekent dat de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket voor de afgelopen 31 dagen (online kalibratieperiode) nagenoeg gelijk is aan de langjarig gemiddelde stijghoogte (123 en 127 cm-mv voor respectievelijk offline en online kalibratie). Geconcludeerd mag worden dat het SWAP-model de gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehalten goed reproduceert. Het model bootst het gedrag van het fysische systeem na. Dit is een vereiste voor betrouwbare modelvoorspellingen.

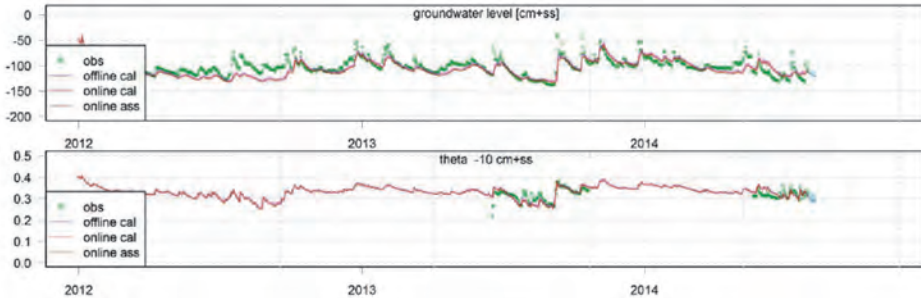
Voor de opschaling van perceel naar boerderij en regio worden de flux naar de wortelzone en de drainageflux vanuit SWAP overgebracht naar SPHY.

Tabel 2 geeft het gesimuleerde vochtgehalte en de werkelijke verdamping (evaporatie + transpiratie + interceptieverdamping) voor SWAP en SPHY voor één 25m gridcel. De waarden geven aan dat, ondanks de verschillen tussen beide modellen, vochtgehalte in de wortelzone en werkelijke verdamping door SPHY goed gereproduceerd worden.

Afbeelding 9 toont de met SPHY berekende werkelijke verdamping voor het groei-seizoen van 2013. Perceelgrenzen zijn vaak duidelijk zichtbaar, veroorzaakt door verschillen in landgebruik. De afbeelding laat zien dat een ruimtelijke resolutie van 25m voldoende is om verschillen in werkelijke verdamping *binnen* een perceel te onderscheiden.

Gedurende de periode 7 tot en met 20 juli 2013 was er geen neerslag. Daardoor berekent het model een afname van het vochtgehalte in de wortelzone in deze periode. Eén van de doelen van KAD is om water langer in een perceel vast te houden. Het effect van waterretentie door het KAD-systeem wordt aangetoond door het verschil in vochtgehalte in de wortelzone van het KAD-veld te vergelijken met een nabijgelegen niet-gedraineerd maïspaneel. Afbeelding 10 laat zien hoe het vochtgehalte in de

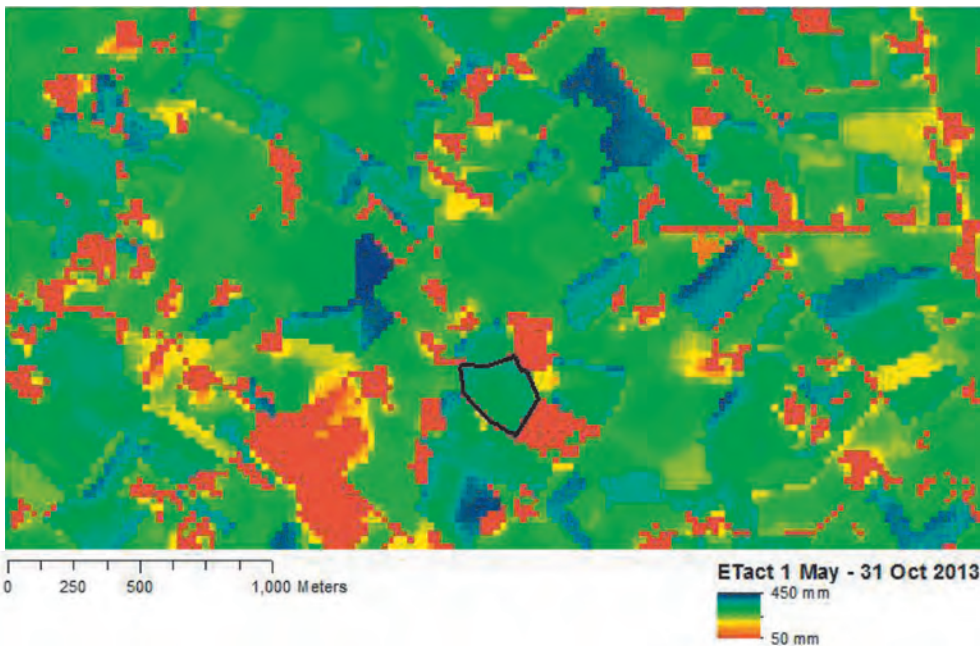
wortelzone in toenemende mate afwijkt gedurende de 14-daagse periode voor een gridcel in het midden van de percelen. Ook is een kaart met gesimuleerde bodemvochtgehalten gegeven voor 20 juli 2013. De scherpe scheiding in vochtgehalte in het KAD-perceel wordt veroorzaakt door verschillende bodemtypes.



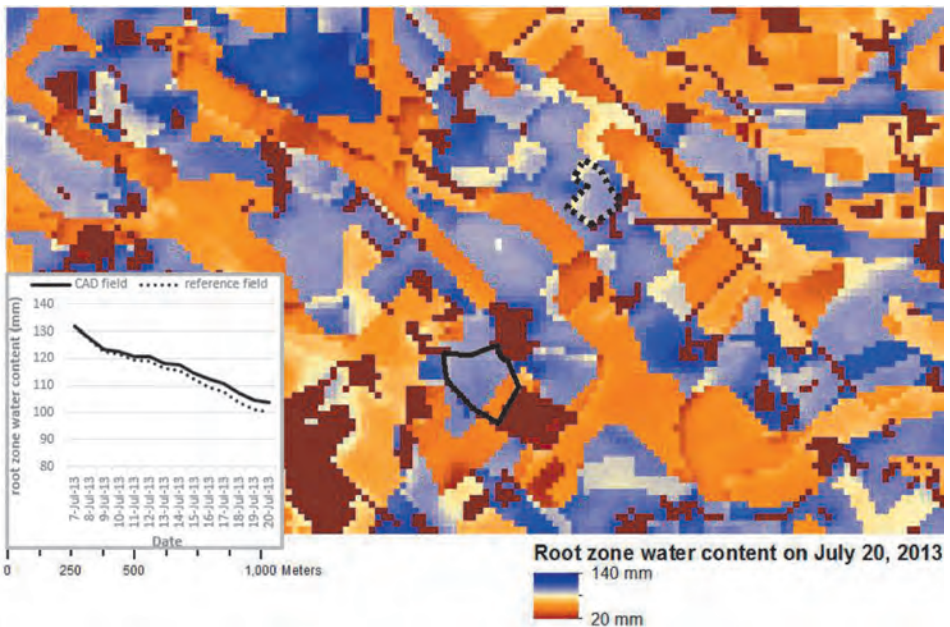
**Afbeelding 8:** Voorbeeld van gemeten en gesimuleerde (na kalibratie en assimilatie) grondwaterstanden (boven) en bodemvochtgehalten (onder), voor het KAD-perceel in Haaksbergen.

	SWAP			SPHY		
	2012	2013	jan - aug 2014	2012	2013	jan - aug 2014
gemiddeld vochtgehalte in wortelzone [-]	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29
E [mm]	432	423	269	427	424	279

**Tabel 2:** Vergelijking van SWAP en SPHY voor het gesimuleerde bodemvochtgehalte in de wortelzone en de werkelijke verdamping E.



**Afbeelding 9:** Cumulatieve werkelijke verdamping van snijmaïs voor het groeiseizoen (1 mei - 31 oktober). Het KAD-perceel in Haaksbergen is zwart omrand.



**Afbeelding 10:** Ruimtelijke en temporele verschillen in vochtgehalte in de wortelzone voor het KAD-perceel in Haaksbergen ('CAD field', zwart omrand, doorgetrokken lijn) en een niet-gedraineerd maisperceel ('reference field', zwart omrand, stippellijn).

## Conclusie

KAD voegt een krachtig beheerinstrument toe om extremen in het weer op te vangen, voor zowel waterbeheerders als agrariërs. Doordat het systeem is opgebouwd uit geschakelde componenten, is de faalkans relatief klein en de flexibiliteit groot. Automatisch beheer van het KAD-systeem is een belangrijke stap naar een meer adaptief waterbeheer. We kunnen met het getoonde algoritme snel reageren en ook optimaal anticiperen op condities buiten in het veld. KAD kan zo gebruikt worden om de bodemvochtcondities in de wortelzone van het perceel continu zo optimaal mogelijk te houden voor gewasgroei. Integratie van de sturing met ruimtelijke hydrologische informatie maakt toepassingen op andere percelen in de buurt van het KAD-perceel mogelijk, hetgeen een efficiëntieslag betekent. Als vervolgstap moet het management-algoritme in de praktijk gebracht worden, met daadwerkelijk online beheer en monitoring van bodemvocht en gewas. Dit kan in eerste instantie op perceelniveau plaatsvinden. De toepassing maakt een doorkijk naar de regio mogelijk, zodat een gebiedsregeling binnen handbereik ligt. Via de telemetrie tenslotte zal altijd transparant en helder zijn hoe KAD bestuurd is en wat de effecten van sturing zijn geweest.

## Contactgegevens:

Ruud Bartholomeus, KWR Watercycle Research Institute, Postbus 1072, 3430 BB Nieuwegein, ruud.bartholomeus@kwrwater.nl, 030-6069530

Gé van den Eertwegh, KnowH<sub>2</sub>O, Watertorenweg 12, 6571 CB Berg en Dal,  
eertwegh@knowh2o.nl, 06-23224968

Gijs Simons, FutureWater, Costerweg 1V, 6702 AA Wageningen, g.simons@futurewater.nl,  
0317-460050

## Literatuur

**Ayars, J.E., Christen, E.W. en Hornbuckle, J.W.** (2006) Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture; in: *Agricultural Water Management*, vol 86(1-2), pag 128-139.

**Bartholomeus, R.P., Kroes, J., Van Bakel, J., Hack-tenBroeke, M. en Witte, J.P.M.** (2013) Actualisatie schadefuncties landbouw; fase 1. Op weg naar een geactualiseerd en klimaatbestendig systeem van effect van waterbeheer op gewasopbrengst. STOWA 2013-22, Amersfoort.

**Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M., Van Bodegom, P.M., Van Dam, J.C. en Aerts, R.** (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.

**Cultuurtechnische Vereniging** (1988) Cultuur technisch vademecum; in: *Cultuurtechnische Vereniging, Rijkskantorengedebouw Westraven, Utrecht, The Netherlands*.

**De Wit, C.T.** (1958) Transpiration and crop yields; *Agricultural Research Reports*, 64.4. Pudoc, Wageningen, 88 pp.

**Doherty, J.** (2010) PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer; in: *Comput., Brisbane, Queensland, Australia*.

**Droogers, P., Kuipers, L., Van Bakel, P.J.T. en Van Iersel, A.** (2010) Klimaat Adaptieve Drainage: een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen. September 2010. Eindrapportage Haalbaarheidsonderzoek. Opdrachtgever: Ministerie van Verkeer en Waterstaat – SBIR programma. FutureWater Rapport nr. 96.

**Knapp, A.K., Beier, C., Briske, D.D., Classen, A.e.T., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M.D., Smith, S.D., Bell, J.E., Fay, P.A., Heisler, J.L., Leavitt, S.W., Sherry, R., Smith, B. en Weng, E.** (2008) Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems; in: *Bioscience*, vol 58(9), pag 811-821.

**Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. en Jacobs, C.M.J.** (2009) SWAP version 3.2, Theory description and user manual; Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen.

**R Core Team** (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

**Rafn, E.B., Contor, B. en Ames, D.P.** (2008) Evaluation of a method for estimating irrigated crop-evapotranspiration coefficients from remotely sensed data in Idaho; in: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol 134(6), pag 722-729.

**Ritzema, H.P., Nijland, H.J. en Croon, F.W.** (2006) Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation; in: *Agricultural Water Management*, vol 86(1-2), pag 60-71.

**Stuyt, L.C.P.M.** (2013) Regelbare drainage als schakel in toekomstig waterbeheer, Alterra, Alterra-rapport 2370, 488 blz, 269 fig.; 40 tab., Wageningen.

**Terink, W., Lutz, A.F. en Immerzeel, W.W.** (2014) SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology; Model theory and SPHY interface (v1.0) manual; Report FutureWater: [131], Wageningen.

**Terink, W., Lutz, A.F., Simons, G.W.H., Immerzeel, W.W. en Droogers, P.** (2015) SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology; in: *Geosci. Model Dev.*, vol 8(7), pag 2009-2034.

**Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. en Kroes, J.G.** (2008) Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP; in: *Vadose Zone Journal*, vol 7(2), pag 640-653.

**Van den Eertwegh, G.A.P.H., Kuipers, L., Klerk, W., Van Bakel, J., Stuyt, L., Van Iersel, A. en Talsma, M.** (2013) KlimaatAdaptieve Drainage: een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen. Eindrapportage Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling'. Referentienummer SBIR113008. , FutureWater rapport nr. 121.

**Visser, A., Stuurman, R. en Bierkens, M.F.P.** (2006) Real-time forecasting of water table depth and soil moisture profiles; in: *Advances in Water Resources*, vol 29(5), pag 692-706.

**Wösten, J.H.M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M. en Stolte, J.** (2001) Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001 [Water retention and permeability characteristics of top and sub soils in the Netherlands: the Staring series. Renewed edition 2001]. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 86 pp.

