



Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst

Alterra-rapport 2346
ISSN 1566-7197

P.C. Stolk en J.G. Kroes

Water en nutriënten gelimiteerde
gewasopbrengst

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het project 'KB II gewasgroei; feedbacks tussen klimaat, vegetatie, bodem en grondwater'.
Projectcode 5239613-01

Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst

Koppeling van de modellen SWAP-ANIMO-WOFOST

P.C. Stolk en J.G. Kroes

Alterra-rapport 2346

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2012

Referaat

Stolk, P.C. en J.G. Kroes, 2012. *Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst; Koppeling van de modellen SWAP-ANIMO-WOFOST*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2346. 47 blz.; 19 fig.; 6 tab.; 29 ref.

Dit rapport beschrijft een verkennende studie voor een methodiek waarin de bodem-nutriëntenhuishouding op dynamische wijze is gekoppeld aan gewasgroei. Voor deze studie is gewasgroei gesimuleerd met het model WOFOST, gekoppeld aan het hydrologisch model SWAP. Dit is uitgebreid met een dynamische koppeling met het biogeochemisch model ANIMO waardoor het mogelijk is terugkoppelingen tussen nutriënten, water en vegetatie te bestuderen. In een casestudie en verschillende modelexperimenten is nagegaan wat het effect is van een beperking in bodem-nutriëntenaanbod op gewasgroei en verdamping. De modelresultaten laten zien dat het veronderstelde effect van stikstoftekort op gewasgroei en verdamping aantoonbaar is en gekwantificeerd kan worden met het huidige modelinstrumentarium. Hierbij is het aanbod van water en nutriënten in detail gemodelleerd. De vraagkant vanuit het gewas is relatief eenvoudig gemodelleerd en vereist nadere studie om operationele toepassingen (bijvoorbeeld schade-berekeningen) mogelijk te maken.

Trefwoorden: gewasgroei, N, stikstoftekort, verdamping, transpiratie, ANIMO, WOFOST, SWAP

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2012 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2346

Wageningen, augustus 2012

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 Werkwijze modellering	11
2.1 Koppeling op dag basis	11
2.2 Berekening stikstoftekort in ANIMO	11
2.3 Effect op gewasgroei in WOFOST	14
3 Casestudie - aardappelteelt op Vredepeel	15
3.1 Locatie en data	15
3.2 Parameterisatie en kalibratie	19
3.3 Effecten stikstoftekort	24
4 Discussie en aanbevelingen	27
4.1 Discussie	27
4.2 Conclusies en aanbevelingen	27
Literatuur	29
Bijlage 1 Model-technische aspecten voor de koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST	31
Bijlage 2 Model-technische aspecten voor de berekening van de effecten op gewasgroei door stikstoftekort	37
Bijlage 3 Overzicht relevante subroutines en parameters in ANIMO	39
Bijlage 4 Modelconcepten voor stikstoftekort	42

Samenvatting

Dit rapport beschrijft een verkennende studie voor een methodiek waarin de bodem-nutriëntenhuishouding op dynamische wijze is gekoppeld aan gewasgroei. Voor deze studie is gewasgroei gesimuleerd met het model WOFOST, gekoppeld aan het hydrologisch model SWAP waardoor de terugkoppelingen tussen water en vegetatie wordt bestudeerd. Dit is uitgebreid met een dynamische koppeling met het biogeochemisch model ANIMO waardoor het mogelijk is terugkoppelingen tussen nutriënten, water en vegetatie te bestuderen.

In een casestudie is nagegaan wat de meerwaarde is van de uitgebreide koppeling SWAP-WOFOST-ANIMO ten opzichte van de koppeling SWAP-WOFOST. Daartoe is nagegaan wat het effect is van een beperking in bodem-nutriëntenaanbod op de totale gewasopbrengsten, en op de temporele variatie van gewasgroei en verdamping. Als casestudie is gekozen voor aardappelteelt in het jaar 2002 op de proefboerderij Vredepeel. Voor deze site zijn voldoende gegevens beschikbaar over de hydrologie, stikstoftoestand en het gewas om de modellen op te zetten en te kalibreren. De modellen zijn afzonderlijk geparameteriseerd en gekalibreerd en vervolgens gekoppeld. Met het gekoppelde model zijn verschillende modelexperimenten gedaan. De resultaten van de modelexperimenten met en zonder stikstoftekort zijn vergeleken om na te gaan wat de effecten zijn op gewasgroei en welke terugkoppelingen dit heeft naar de hydrologie.

De modelresultaten laten zien dat het veronderstelde effect van stikstoftekort op gewasgroei en verdamping aantoonbaar is en gekwantificeerd kan worden met het huidige modelinstrumentarium, waarbij een gedetailleerd aanbod van water en nutriënten in beschouwing is genomen.

Het aanbod van water en nutriënten is in detail gemodelleerd. De vraagkant vanuit het gewas is relatief eenvoudig gemodelleerd en vereist nadere studie om operationele toepassingen (bijvoorbeeld schadeberekeningen) mogelijk te maken.

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft resultaten van het KB¹-project 'Modelinfrastructuur gewasgroei; feedbacks tussen klimaat, vegetatie, bodem en grondwater'².

Om de effecten van klimaat en leefomgeving op de plantaardige productie te analyseren is er wellicht behoefte aan een instrumentarium waarin de invloed van dynamiek in de bodem-nutriëntenhuishouding gekoppeld is aan gewasgroei. Een beperking in bodem-nutriëntenaanbod reduceert de totale gewasopbrengsten, maar heeft ook invloed op de temporele variatie van gewasgroei, CO₂-uitstoot en verdamping. Om deze gecombineerde effecten te analyseren wordt deze studie uitgevoerd. Daarbij gaat het enerzijds om te laten zien dat het mogelijk is om volledig dynamisch zo'n koppeling te realiseren (demo-aspect) en anderzijds te onderzoeken of deze veronderstelde effecten inderdaad optreden (analyse-aspect).

Deze studie richt zich op de modellering van gewasgroei met het model WOFOST. Door de bestaande koppeling met het hydrologisch model SWAP kunnen de terugkoppelingen tussen water en vegetatie worden bestudeerd. Door een dynamische koppeling met het biogeochemisch model ANIMO kunnen de terugkoppelingen tussen nutriënten, water en vegetatie worden bestudeerd. In een casestudie is nagegaan wat de meerwaarde is van deze uitgebreide koppeling ten opzichte van de koppeling SWAP-WOFOST.

Leeswijzer

Deze studie begint met het beschrijven van de methodiek die is gebruikt om de koppeling en feedback tussen de modellen te realiseren (hoofdstuk 2). Daarop volgt een bespreking van de casestudie 'aardappelteelt in Vredepeel' (hoofdstuk 3). Tot slot volgen discussie, conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 4). In de bijlagen zijn technische aspecten over de modelkoppeling (bijlage 1) en de rekenwijze (bijlage 2) opgenomen. Aanpassingen in de broncode zijn vermeld in bijlage 3 en de resultaten van een beperkt literatuurstudie zijn opgenomen in bijlage 4.

¹ KB = KennisBasis; met Kennisbasisonderzoek wordt de basis gelegd voor kennis die over drie tot vijf jaar relevant is voor de beleidsterreinen van het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.

² Dit is een project binnen thema KB-12.004.03-001: Klimaatneutrale en efficiënte plantaardige productie, dat onderdeel is van KB-programma 12 - Duurzame Agroketens.

2 Werkwijze modellering

Voor het berekenen van stikstoftekort voor het gewas op dagbasis en de effecten daarvan op gewasgroei, was het nodig de modellen SWAP, ANIMO en WOFOST te koppelen op dagbasis. WOFOST is al geïntegreerd met SWAP, de koppeling met ANIMO is nieuw. Daarnaast is in ANIMO een berekening opgenomen voor de reductiefactor voor gewasgroei door stikstoftekort en wordt in SWAP-WOFOST het effect daarvan op gewasgroei berekend.

De modellen SWAP en WOFOST zijn dynamisch gekoppeld aan het eind van de jaren 90 (Van Dam et al., 1997) en toegepast in een aantal, vnl. buitenlandse, studies (bijv. Bessembinder et al., 2005; Singh et al., 2006). De koppeling van de modellen SWAP-WOFOST-ANIMO is voor het eerst ontwikkeld door Westein en Hack ten Broeke (Westein, 1995; Westein en Hack-ten Broeke, 1995), maar door een beperkte vraag rond de eeuwwisseling stopgezet. De modelkoppeling die in dit rapport wordt beschreven bouwt voort op hetgeen zij hebben gedaan.

In dit project is gebruik gemaakt van de meest recente (d.d. november 2011) modelversies:

- SWAP 3.2.36 (Kroes et al., 2009)
- ANIMO 4.0 (Groenendijk et al., 2005)
- WOFOST 6.0 (Supit et al., 1994; Van Diepen et al., 1989)

2.1 Koppeling op dag basis

Voor de koppeling van SWAP-ANIMO-WOFOST is gekozen voor een methode die eerder is toegepast voor de koppeling van SWAP met SWIMWATS en die deels al beschikbaar was in SWAP 3.2.26. Dit is een programmeer-technisch relatief eenvoudige methode, waardoor ook beheer en onderhoud goed realiseerbaar zijn.

Per dag worden eerst het beschikbare bodemvocht en de potentiële gewasgroei berekend in SWAP-WOFOST. Vervolgens worden de potentiële en actuele stikstofopname van het gewas berekend in ANIMO en wordt de reductiefactor voor stikstoftekort berekend. Tenslotte wordt in SWAP-WOFOST de actuele gewasgroei berekend, eventueel gereduceerd onder invloed van vochttekort of stikstoftekort.

Het gebruik en de structuur van de koppeling, maar ook de aanpassingen in de broncodes zijn uitgebreid beschreven in bijlage 1.

2.2 Berekening stikstoftekort in ANIMO

In ANIMO wordt in drie stappen bepaald of er een stikstoftekort is voor gewasgroei:

- bepalen van de stikstofvraag van het gewas,
- bepalen van de werkelijke stikstofopname van het gewas,
- bepalen van een stikstoftekort voor het gewas.

Voor de berekening van de potentiële en actuele stikstofopname voor gewasgroei is in eerste instantie gebruik gemaakt van de bestaande concepten in ANIMO 4.0 voor éénjarige gewassen (Groenendijk et al., 2005). Het berekenen van de reductiefactor voor stikstoftekort is nieuw geïmplementeerd in ANIMO.

In bijlage 2 zijn de aanpassingen van de broncode van ANIMO beschreven. Daarnaast is in bijlage 3 een overzicht gegeven van de relevante subroutines en parameters in ANIMO.

De drie stappen voor het bepalen van het stikstoftekort worden hierna beschreven.

Stikstofvraag van het gewas

Voor de stikstofvraag door het gewas is voorlopig de bestaande parameterisatie in ANIMO voor éénjarige gewassen aangehouden. In ANIMO wordt de dagelijkse stikstofvraag van het gewas berekend uit de optimale cumulatieve bruto stikstofopname, $U_{opt,cum}$ (kg N m^{-2}). Dit is de optimale cumulatieve stikstofopname van het gewas aan het eind van het groeiseizoen, plus de N die via de wortel-exudaten terug gaat naar de bodem. De optimale cumulatieve bruto stikstofopname wordt ingevoerd door de gebruiker, opgedeeld voor een eerste en een tweede groeiperiode. Daarnaast wordt de cumulatieve transpiratie gedurende het groeiseizoen, $q_{tr,cum}$ (m), ingevoerd door de gebruiker, ook opgedeeld voor een eerste en een tweede groeiperiode. Aangenomen wordt dat de hoeveelheid transpiratievocht gelijk is aan de hoeveelheid vocht die door het gewas aan de bodem wordt onttrokken. Op basis van deze gegevens wordt de referentie N-concentratie voor het vocht dat door het gewas wordt opgenomen, $c_{ref,tr}$ (kg N m^{-3}) berekend voor de eerste en de tweede periode:

$$c_{ref,tr} = \frac{U_{opt,cum}}{q_{tr,cum}}$$

Per dag wordt op basis van de actuele transpiratie op dagbasis, q_{tr} , en $c_{ref,tr}$, de referentie gewasopname van het gewas, U_{ref} berekend:

$$U_{ref}(t) = U_{ref}(t_0) + c_{ref,tr} \cdot q_{tr}$$

Als de actuele transpiratie gelijk is aan de door de gebruiker opgegeven transpiratie, is de potentiële gewasopname van het gewas gelijk aan de optimale gewasopname.

De stikstofvraag van de plant per dag bestaat uit drie delen. $U_{ref,dag}$ is de referentie stikstofopname voor die dag. U_{def} is het stikstoftekort aan het begin van de dag, dat wordt berekend uit het verschil tussen de cumulatieve bruto referentie N-opname en de werkelijke opname, U_{pot} en U_{act} . Daarnaast bestaat er de mogelijkheid voor luxe-opname van stikstof, U_{lux}

$$U_{ref,dag} = c_{ref,tr} \cdot q_{tr}$$

$$U_{def}(t) = U_{ref}(t_0) - U_{act}(t_0)$$

$$U_{lux} = U_{pot} \cdot f_{lux}$$

De luxe-opname factor f_{lux} (-) is gedefinieerd op basis van de verhouding tussen de actuele minerale N-concentratie in het bodemvocht $c_{act,soil}$ en de maximale N-concentratie in het plantenvocht bij een overvloed aan N, $c_{lux,plant}$:

$$f_{lux} = \frac{c_{act,soil}}{c_{lux,plant}}$$

Als de werkelijke stikstofopname kleiner is dan een vooraf bepaalde fractie, f_{def} (-) van de referentie stikstofopname, wordt de referentie stikstofopname verlaagd naar U_{ref}^* :

$$\text{Als } \frac{U_{act}(t)}{U_{ref}(t)} < f_{def} \quad \text{dan} \quad U_{ref}^*(t) = U_{act}(t) + (1 - f_{def}) \cdot U_{ref}(t)$$

Deze verlaging werkt door op de cumulatieve bruto referentie gewasopname gedurende de rest van het seizoen. Het vermindert U_{def} , de stikstofvraag om het bestaande tekort op te heffen, maar heeft geen effect op $U_{basis,dag}$, de 'basis' stikstofvraag per dag. Dit concept staat los van de berekening van de reductiefactor voor gewasgroei door stikstofftekort. Als op een later moment de werkelijke stikstofopname weer te laag wordt ten opzichte van de aangepaste cumulatieve bruto referentie opname, U_{ref}^* , wordt deze verder verlaagd.

Stikstofopname door het gewas

Voor de berekening van de werkelijke stikstofopname door het gewas is de bestaande parameterisatie voor éénjarige gewassen aangehouden. Opname van stikstof door de plant in ANIMO gebeurt bij éénjarige gewassen alleen via de opname van bodemvocht uit de wortelzone door transpiratie. De hoeveelheid ammonium (NH_4) en nitraat (NO_3) die beschikbaar is voor gewasopname, respectievelijk A_{NH_4} en A_{NO_3} ($kg\ N\ m^{-2}$), wordt berekend op basis van de NH_4^- en NO_3^- concentraties, c_{NH_4} en c_{NO_3} ($kg\ N\ m^{-3}$). In principe is alle nitraat in het bodemvocht beschikbaar voor gewasopname, terwijl slechts een deel van het ammonium beschikbaar is, f_{NH_4} (-):

$$A_{NH_4} = f_{NH_4} \cdot c_{NH_4}(t_0) \cdot q_{tr}$$

$$A_{NO_3} = c_{NO_3}(t_0) \cdot q_{tr}$$

Aangenomen is dat ook stikstof beneden de wortelzone beschikbaar is voor gewasopname. De maximale hoeveelheid die in totaal beschikbaar is voor gewasopname bedraagt σ_{max} (-) maal de hoeveelheid N in de wortelzone. Hierbij is σ_{max} de door de gebruiker gedefinieerde maximale 'transpiratie concentratie stroom factor', met een default waarde van 5.0.

NO_3 wordt geprefereerd boven NH_4 voor stikstofopname door het gewas. Indien er voldoende NO_3 in de wortelzone en diepere lagen aanwezig is om aan de basisbehoefte ($U_{def} + U_{basis,dag}$) te voldoen, wordt alleen NO_3 onttrokken. Als er niet voldoende NO_3 aanwezig is om in de basisbehoefte te voorzien, wordt ook NH_4 aan de bodem onttrokken. Luxe opname van stikstof kan alleen als er voldoende NO_3 in de wortelzone aanwezig is om aan de basisbehoefte plus de gehele luxe vraag te voldoen. De dagelijkse stikstofopname, $U_{act,dag}$, is dus:

$$\text{Als } A_{NO_3} > U_{def} + U_{ref,dag} + U_{lux} \quad \rightarrow \quad U_{act,dag} = U_{def} + U_{basis,dag} + U_{lux}$$

$$\text{Als } \sigma_{max} \cdot (A_{NO_3} + A_{NH_4}) > U_{def} + U_{ref,dag} \quad \rightarrow \quad U_{act,dag} = U_{def} + U_{ref,dag}$$

$$\text{Als } \sigma_{max} \cdot (A_{NO_3} + A_{NH_4}) < U_{def} + U_{ref,dag} \quad \rightarrow \quad U_{act,dag} = \sigma \cdot (A_{NO_3} + A_{NH_4})$$

Voor een verdere beschrijving van de concepten en de numerieke uitwerking in ANIMO wordt verwezen naar Groenendijk et al. (2005).

Stikstoftekort voor het gewas

De berekening van een reductiefactor voor gewasgroei door stikstoftekort is nieuw geïmplementeerd in ANIMO. Deze reductiefactor wordt vanuit ANIMO naar WOFOST geëxporteerd om daar de gewasgroei te kunnen reduceren. Deze reductiefactor wordt berekend als de ratio tussen de cumulatieve actuele en de referentie-opname:

$$R_n = \frac{U_{act}}{U_{ref}}$$

2.3 Effect op gewasgroei in WOFOST

Voor de berekening van de effecten van stikstoftekort op gewasgroei is gebruik gemaakt van de bestaande parameterisatie in SWAP-WOFOST. Hier zijn reductiefactoren opgenomen voor stikstoftekort, watertekort R_w (-) en lage temperaturen, R_{temp} (-). Deze drie stressfactoren leiden tot een reductie van de bruto assimilatie snelheid, A_{gross} (kg OM ha⁻¹ d⁻¹):

$$A_{gross} = A_{gross,pot} \cdot R_{temp} \cdot R_w \cdot R_n$$

In bijlage 3 is de broncode van WOFOST voor de berekening van de effecten op gewasgroei door stikstoftekort weergegeven.

3 Casestudie - aardappelteelt op Vredepeel

Een casestudie is uitgevoerd om na te gaan wat het effect is van een beperking in bodem-nutriëntenaanbod op de totale gewasopbrengsten, en op de temporele variatie van gewasgroei en verdamping.

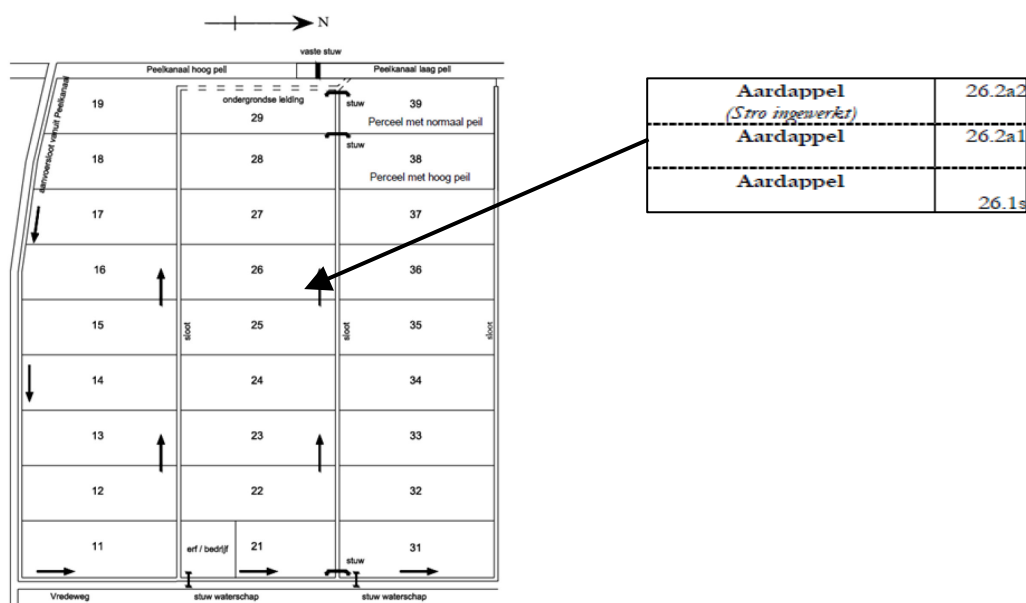
Als casestudie is gekozen voor aardappelteelt in het jaar 2002 op de proefboerderij Vredepeel. Voor deze site zijn voldoende gegevens beschikbaar over de hydrologie, stikstof toestand en het gewas om de modellen op te zetten en te kalibreren. De modellen zijn afzonderlijk geparаметeriseerd en gekalibreerd en vervolgens gekoppeld. Met het gekoppelde model zijn verschillende modelexperimenten gedaan om de reductiefactor voor stikstof (R_n) te bepalen:

- Een reductiefactor op basis van de werkelijke situatie.
- Een reductiefactor op basis van een gehalveerde mestgift, als voornaamste bron van stikstof.
- Een vaste reductiefactor van 0.5, als voorbeeld van een extreem stikstoftekort.

De resultaten van de modelexperimenten zijn vergeleken met de modelresultaten zonder stikstoftekort om na te gaan wat de effecten zijn op gewasgroei en welke terugkoppelingen dit heeft naar de hydrologie.

3.1 Locatie en data

Vredepeel is een proefboerderij van Wageningen UR, gelegen in het zuidoostelijk zandgebied. Het ligt dicht bij de plaats Vredepeel in Limburg, grenzend aan het Peelkanaal. De modelstudie is gebaseerd op aardappelteelt op perceel 26.2 A2 in 2002. Op dit perceel zijn in 2002 experimenten gedaan voor het project 'Telen met Toekomst' en voor onderzoek naar lachgas (N_2O) door Jan Willem van Groenigen (Van Groenigen et al., 2005a; Van Groenigen et al., 2005b). In figuur 7 is de ligging van de proefvelden en perceel 26.2 A2 weergegeven.



Figuur 7

Overzicht proefvelden Vredepeel en indeling en gewassen voor perceel 26 in 2002 (De Vos en Assinck, 2004; De Vos et al., 2006).

Gewas

In tabel 1 is een overzicht gegeven van de gewasgroei in 2002 op perceel 26.2 A2. Het gewas bestond uit aardappelen van het ras Asterix. Er is circa 2150 kg ha⁻¹ pootgoed gepoot na voorkieming in kuubskisten. De aardappel-opbrengst bedroeg 54.6 ± 3.9 ton ha⁻¹ (gemiddelde ± standaard deviatie) met een onderwater gewicht van 370 g per 5 kg aardappelen. De opbrengst van loof bedroeg 23.7 ± 4.8 ton ha⁻¹ met een droge stofgehalten van gemiddeld 10.7%. Het voorgewas bestond uit Tagetes (laag tuinafrikaantje), dat was geplant in juli 2001 voor de bestrijding van aaltjes.

Tabel 1

Ontwikkeling gewas perceel 26.2 A2 in 2002

Datum	Dagnummer	Ontwikkeling gewas
16 april	106	Poten aardappelen
24 mei	144	Opkomst aardappelen
12 juni	163	Knolzetting
18 juni	169	Begin bloei
1 juli	182	Gewassluiting en bloei
24 juli	205	Min of meer uitgebloeid
6 augustus	218	Loof zakt in
20 augustus	232	Loof is ingezakt en sterft af
3 september	246	Loof geoogst experimentele velden N ₂ O-onderzoek
13 september	256	Loofkappen
25 september	268	Aardappeloogst experimentele velden N ₂ O-onderzoek
3 oktober	276	Aardappeloogst

Management

In tabel 2 is een overzicht gegeven van het management in 2002 tot aan de oogst. In het najaar van 2002 is na de oogst stro ingewerkt. Dit is niet meegenomen in de modellering.

Tabel 2

Management perceel 26.2 A2 in 2002

Datum	Dagnummer	Bewerking	Hoeveelheid
25 maart	84	Onderwerken Tagetes	
8 april	98	Ploegen + woelen + voren trekken	
1 mei	121	CAN bemesting	100 kg N ha ⁻¹
7 mei	127	Eggen met neteg	
10 mei	130	Eggen met neteg	
24 mei	144	Visgraatschoffel	
31 mei	151	CAN bemesting	55 kg N ha ⁻¹
4 juni	155	Aanaarden en visgraatschoffel	
24 juni	175	Urean bemesting	20 kg N ha ⁻¹
25 juni	176	Beregenen	25 mm
18 juli	199	Beregenen	25 mm
15 augustus	227	Beregenen	30 mm

Hydrologie

Perceel 26.2 A2 grenst aan twee zijden aan sloten, die in verbinding staan met het Peelkanaal op circa 250 m afstand (zie figuur 7). Ter hoogte van de proefvelden ligt een stuw in het Peelkanaal, met een streefpeil van 1 m –mv aan de zuidzijde en een streefpeil van 2 m –mv aan de noordzijde. Het peil in de sloten is gelijk aan het hoge peil. Het perceel is verder niet gedraineerd. Onder het westelijk deel van de proefvelden van Vredepeel komt op circa 2 m –mv een kleilaag voor met een weerstand van 0 - 500 dagen. Naar verwachting is deze onder perceel 26.2 A2 niet meer aanwezig. De dieper gelegen lagen bestaan voornamelijk uit zand en grind waarin vrijwel geen verticale stroming optreedt (TNO, 2009).

De grondwaterstanden zijn in 2002 dagelijks gemeten in twee peilbuizen op perceel 26.2. A2 aan de kopse kanten van het perceel, op circa 40 m afstand van de sloten. Daarnaast zijn tussen juni en december 2002 regelmatig het vochtgehalte van de bodem en de bodemtemperatuur bepaald op 18, 48 en 90 cm.

Bodem

De bodem is gekarakteriseerd als een veldpodzol (De Vos et al., 2002) met leem arm fijn zand, met een humusrijke ploeglaag. In tabel 3 is een overzicht gegeven van de bodemeigenschappen en de indeling in modellagen. Deze indeling is gebaseerd op profielbeschrijvingen van percelen in de buurt.

Tabel 3

Bodemkarakteristieken en indeling in modellagen perceel 26.2 A2 (De Vos en Assinck, 2004; De Vos et al., 2006; Van Groenigen et al., 2005b).

Diepte cm - mv.	Horizont	Model-laag	Bulk-dichtheid kg m ⁻³	Poriën-gehalte -	pH- KCl -	N-gehalte mg g ⁻¹	C-gehalte mg g ⁻¹	C/N ratio -
0-10	Ap1	1	1325	0.49	5.2 ¹	1.17	22.14	18.9
10-20	Ap1	1	1369	0.47	5.2	1.07	19.87	18.6
20-35	Ap2	2	1516	0.42	5.0 ¹	1.1	21.21	19.3
35-50	BC	3	1630	0.39	4.8	0.83	19.88	24.0
50-65	BC	3	1657	0.37	4.8 ¹	0.38	12.79	33.7
65-200	C	4	1682	0.37	4.7	0.05	1.3	26.0

¹ Geschatte waarde op basis van metingen op andere diepten.

In het laboratorium zijn de waterretentiekarakteristieken en de doorlatendheidskarakteristieken voor de verschillende bodemlagen bepaald. De toplaag vertoont sterke hysteresis, de onderlaag minder. De pF-curve vertoont rond verzadiging niet-lineair gedrag, dit kan er op wijzen dat het verzadigde watergehalte lager is dan de porositeit (De Vos et al., 2002).

Stikstof

In de tabellen 4 en 5 zijn respectievelijk het NO₃-gehalte in het bodemwater en de NO₃- en NH₄-gehalten van de bodem voor twee dagen weergegeven. Daarnaast is in figuur 8 het minerale N-gehalte van de toplaag (0-30 cm – mv) en de diepere bodem (30-60 cm – mv) weergegeven.

Tabel 4

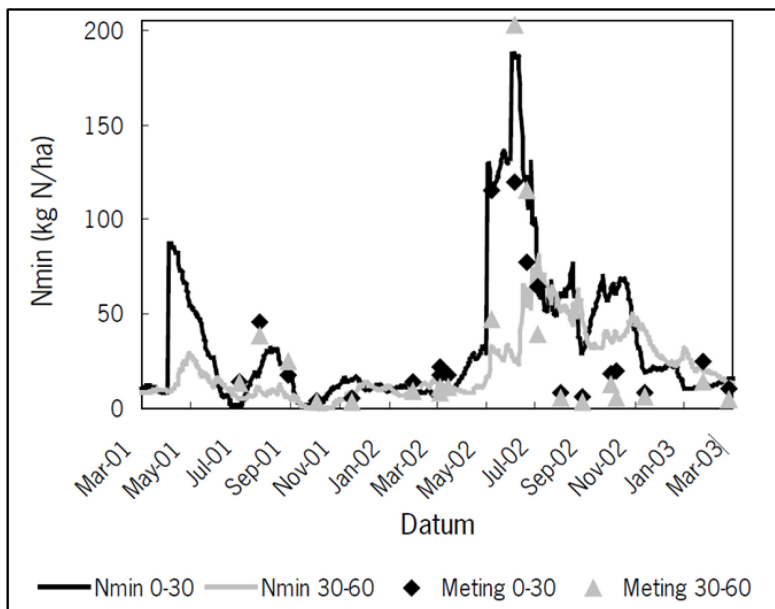
Gemiddeld nitraatgehalte in bodemvocht (50 cm) en grondwater in $\text{mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ voor perceel 26.2 A2 in 2002. Tussen haakjes de standaard deviaties (Berg en Pulleman, 2003; De Vos en Assinck, 2004).

Diepte cm – mv.	10 jan	30 jan	19 feb	27 feb	5 apr	6 aug	29 aug	10 nov
50	31.9 (1.2)	21.1 (3.8)	16.1 (3.0)	38.9 (5.4)	-	-	-	-
50-100	-	33.9 (28.6)	-	40.3 (18.2)	-	-	-	-
100-150	104.2 (38.6)	43.2 (24.0)	45.1 (4.8)	20.9 (2.1)	-	-	-	101
150-200	64.5 (7.7)	94.1 (4.6)	121.9 (26.8)	121.6 (14.8)	23.0 (17.0)	58	31	34

Tabel 5

Gemiddelde nitraat- en ammonium-gehalten van de bodem voor perceel 26.2 A2 in 2002. Tussen haakjes de standaard deviaties (Van Groenigen et al., 2005a).

Diepte cm – mv.	NO_3 (kg N ha^{-1})		NH_4 (kg N ha^{-1})	
	6 juni	26 sept	6 juni	26 sept
0-10	27.7 (4.6)	18.4 (3.4)	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)
10-20	44.2 (8.4)	27.3 (7.3)	0.4 (0.3)	0.6 (0.6)
20-35	40.4 (4.8)	13.9 (2.3)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
35-50	21.3 (0.9)	4.6 (1.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
50-65	9.0 (1.2)	0.6 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
65-90	8.7 (0.4)	0.4 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)

**Figuur 8**

Metingen en FUSSIM-modelbenadering van mineraal N-gehalte van de bodem in perceel 26.2. A2 in 2001 en 2002 (Assinck en De Willigen, 2004).

De NO_3 -concentratie in het Peelkanaal is in 2003 gemeten en varieerde tussen de 7 mg l^{-1} in de zomer en 20 mg l^{-1} in het najaar (De Vos et al., 2006). Door het RIVM wordt op Vredepeel de kwaliteit van de neerslag gemeten, waaronder de concentratie ammonium en nitraat in de neerslag. Deze bedroeg in 2002 gemiddeld 1.263 mg l^{-1} voor $\text{NH}_4\text{-N}$ en 0.46 mg l^{-1} voor $\text{NO}_3\text{-N}$ (RIVM, 2011).

3.2 Parameterisatie en kalibratie

In eerste instantie zijn de modellen SWAP – ANIMO – WOFOST afzonderlijk gedraaid en gekalibreerd. Deze paragraaf beschrijft deze eerste stap.

SWAP

Voor de input waarden van de parameters in SWAP is voornamelijk gebruik gemaakt van observaties en default waarden. De bodemtemperatuur aan het begin van het jaar 2002 was niet gemeten, in plaats daarvan is de temperatuur begin januari 2003 aangehouden als initiële temperatuur. Van de werkelijke oppervlaktewaterpeilen waren geen data beschikbaar over 2002. In plaats daarvan is het streefpeil voor sloten en het Peelkanaal aangehouden. Mogelijk is in de zomer het werkelijke peil tijdelijk lager geweest dan het streefpeil, terwijl na neerslag het peil tijdelijk hoger kan zijn geweest. De diepte van de watergangen is geschat op 50 cm (sloot) en 100 cm (Peelkanaal). Voor de meteorologie zijn gegevens gebruikt van station Eindhoven van het KNMI. Als onder-randvoorwaarde is een nul-flux opgelegd, waarmee is aangenomen dat de interactie van het perceel met de omgeving via het oppervlaktewater over de (model-)zijrand plaatsvindt.

De in- en uittreeweerstanden van het Peelkanaal en de sloten zijn gekalibreerd op basis van de grondwaterstanden. Het verzadigde vochtgehalte van de bodem is gekalibreerd op basis van bodemvochtmetingen in het natte seizoen, begin winter 2002/2003. De gekalibreerde waarde is aanzienlijk lager dan de gemeten porositeit, zoals verwacht (De Vos et al., 2002). De parameter α voor het bepalen van de waterretentiekarakteristieken volgens de Van Genuchten-Mualem functie (Van Genuchten, 1980) is gekalibreerd op basis van het bodemvocht. De parameter α is apart gekalibreerd voor de verdrogingscurve en de vernattingscurve, op basis van de bodemvocht-metingen in respectievelijk het voorjaar en de herfst. De range waarbinnen α is gekalibreerd is begrensd binnen de extreme waarden van de Staringreeks (Wösten et al., 1994). De uiteindelijke model parameters voor de waterretentie en doorlatendheid functies zijn weergegeven in tabel 6.

Tabel 6

Model parameters voor de Van Genuchten-Mualem functies voor de waterretentiekarakteristieken en doorlatendheidskarakteristieken voor perceel 26.2 A2.

Model-laag	Diepte cm – mv.	θ_{res} -	θ_{sat} -	α_{dry} cm^{-1}	α_{wet} cm^{-1}	N -	K_{sat} cm d^{-1}	λ -
1	0-20	0.03	0.45	0.0434	0.0434	1.811	18.0	-2.20
2	20-35	0.01	0.31	0.0434	0.0334	1.811	18.0	-2.20
3	35-65	0.01	0.29	0.0195	0.0390	2.589	5.0	-1.35
4	65-200	0.01	0.27	0.0195	0.0294	2.364	5.0	-0.50

WOFOST

Voor de input-waarden van de parameters in WOFOST is voornamelijk gebruik gemaakt van de default waarden die worden meegeleverd met het SWAP-model. De initiële biomassa is gelijk gesteld aan het droog-gewicht van het pootgoed. In verband met de koppeling met ANIMO is de dag van oogst één dag vervroegd ten opzichte

van de werkelijkheid. Omdat SWAP op de dag van de oogst wel transpiratie berekent, maar ANIMO geen gewasopname moet één van de twee worden aangepast.

De benodigde temperatuursom voor het bereiken van de verschillende ontwikkelingsstadia is gekalibreerd op basis van de gegevens van de fenologische ontwikkeling (bloei en oogst).

ANIMO

Voor de input-waarden van de parameters in ANIMO is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van default waarden en de waarden voor de betreffende locatie in STONE (Wolf et al., 2003). De initiële NO_3 -concentraties zijn gebaseerd op de metingen van de NO_3 -concentratie begin 2002 op meerdere diepten. Voor de karakterisatie van de meststof Urean is gebruik gemaakt van de gegevens van Nutrinorm (www.nutrinorm.nl). De diepte waarop de mest is ingebracht is niet bekend. Aangenomen is dat de mest tot 15 cm beneden het gemiddelde maaiveld-niveau is ingebracht.

Voor Tagetes is op basis van gegevens over de effectieve droge stof van Tagetes (NMI, 2011) en de verhouding tussen initiële droge stof en effectieve droge stof (Wanten et al., 2003) de initiële hoeveelheid droge stof geschat op $11.000 \text{ kg ha}^{-1}$. Conform de algemene ANIMO-werkwijze is de organische stof van Tagetes gedefinieerd als een langzaam afbreekbare fractie (50%) en een snel afbreekbare fractie (50%). Voor de afbraaksnelheid van de snelle fractie is de default waarde van ANIMO aangehouden (2.0 yr^{-1}). De afbraaksnelheid van de langzame fractie is gekalibreerd op basis van de verhouding tussen effectieve droge stof en initiële droge stof (0.5 yr^{-1}). Het stikstofgehalte van Tagetes is geschat op $0.005 \text{ kg N kg}^{-1}$ droge stof op basis van gegevens over de N-afgifte over het (NMI, 2011). Dit komt redelijk goed overeen met de ANIMO default waarde van 0.008 N kg^{-1} voor wortelmateriaal van planten.

Gegevens over de fenologie waren bekend van observaties. De pootdatum in het model is gelijk gesteld aan de kiemdatum, omdat voor het kiemen geen transpiratie of gewasopname plaats kan vinden. Loofgroei en knolgroei overlappen elkaar bij aardappels. De overgang tussen periode 1 (loofgroei) en periode 2 (knolgroei) is gezet op dagnr (dagnummer) 172. Dit valt middenin de observaties van knolzetting (dagnr 163) en gewassluiting (dagnr 182).

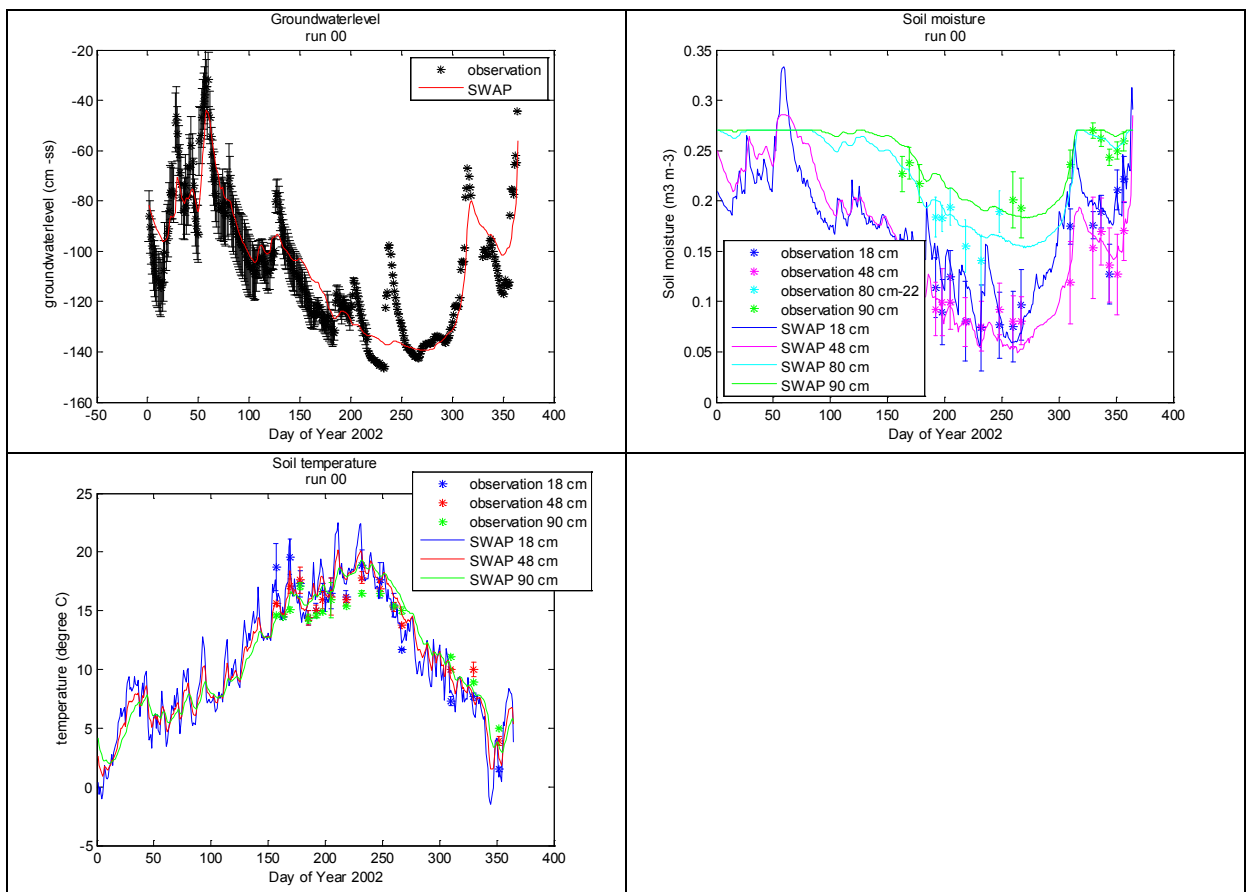
De toename van de wortelmasse in ANIMO betreft in dit geval de massa droge stof (ds) van wortels en knollen. Hierbij is voor de knollen en wortels een droge stof-gehalte van 20.8% aangehouden, het droge stof-gehalte van de aardappels van perceel 38/39 in 2003. Deze waarde valt binnen de normale range (20-25%; Veerman, 2003). Het initiële gewicht van het pootgoed was 2150 kg ha^{-1} en dat komt overeen met $430 \text{ kg ds ha}^{-1}$. Op basis van metingen van Gonçalves et al. (2009) is het verse gewicht van de wortelmasse bij knolzetting gelijk gesteld aan 86% van het verse gewicht van het loof. Aangenomen is dat het verse gewicht van het loof na knolzetting niet meer verandert en gelijk is aan het gemeten gewicht een maand voor de oogst (23.7 ton ha^{-1}). Op basis daarvan is de wortelmasse bij knolzetting geschat op $4250 \text{ kg ds ha}^{-1}$ (20.4 ton ha^{-1} ; 20.8% ds). Aangenomen is dat de wortelmasse gedurende de eerste groeiperiode lineair toeneemt. De totale ondergrondse biomassa aan het eind van de teeltperiode is gelijk gesteld aan de wortelmasse bij knolzetting plus het gewicht van de aardappelknollen ($11359 \text{ kg ds ha}^{-1}$) op een totaal van $15609 \text{ kg ds ha}^{-1}$. De waarden voor de biomassa zijn hoog vergeleken met de waarden van Kroes en Roelsma (1998).

De verwachte netto N-opname door het gewas bedraagt circa 220 kg N ha^{-1} (Dekker et al., 2005; Greenwood en Draycott, 1995). Een aardappel kan wel meer opnemen maar een overvloed aan stikstof komt niet tot uiting in een grotere oogst. De bruto-opname omvat ook de weer uitgescheiden stikstof van exudaten ($15\text{-}60 \text{ kg N jr}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) (Neumann, 2007) en is op basis van de modelresultaten voor de N-afscheiding door wortel-exudaten geschat op 280 kg N/ha . Voor de verdeling van de opname over periode 1 en 2 hebben we een verhouding 1:1.8 aangehouden, gelijk aan de verhouding die wordt gebruikt voor aardappels in ANIMO 3.5 (Kroes en Roelsma, 1998).

De initiële hoeveelheid organisch materiaal is gelijk gesteld aan de hoeveelheid die gemeten is op dag 269. Dit is verdeeld over humus en de langzaam afbreekbare wortelfractie. De verdeling over de twee fracties is gekalibreerd op de gemeten N-inhoud van de bodem op dag 269. De uiteindelijke verdeling van organisch stof over beide fracties is 50% humus en 50% langzaam afbreekbare wortels tot 35 cm beneden maaiveld en daaronder 100% humus. De belangrijkste onzekerheden na kalibratie zijn de afbraaksnelheden en het N-gehalte van de verschillende organische fracties, de NH_4 sorptie-coëfficiënten en de nitrificatie snelheid. De hoeveelheid biomassa die door de wortels wordt afgescheiden (wortel-exudaten) is gelijk aan de ANIMO default waarde van 41% van de toename van de biomassa van de ondergrondse delen, voor de gehele groeiperiode.

Resultaten kalibratie

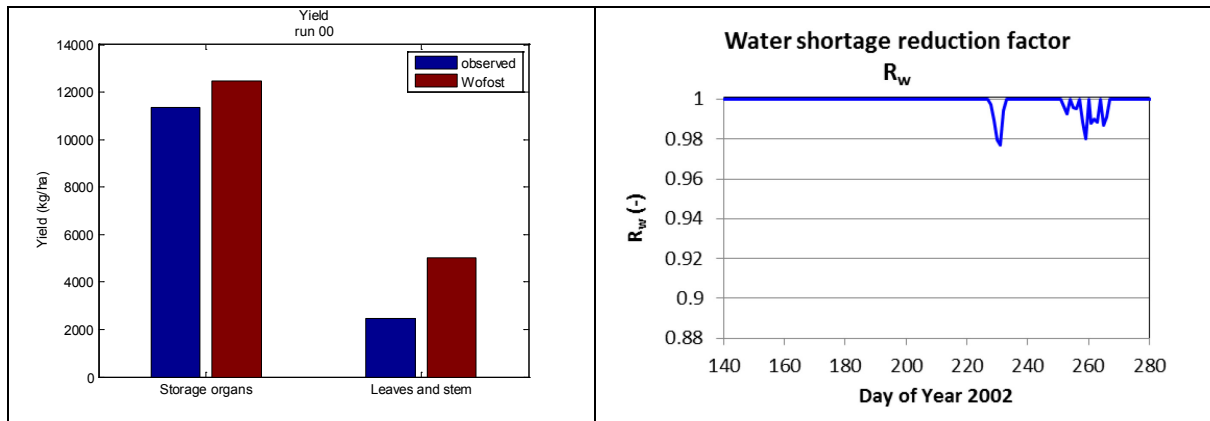
In figuur 9 worden de resultaten van de hydrologische modellering met SWAP vergeleken met de waarnemingen van grondwaterstanden, bodemvocht en bodemtemperatuur. De simulatie-resultaten zijn goed, met $r^2 = 0.82$, $\text{rmse} = 10.8 \text{ cm}$ en model efficiency r^2_{eff} (Nash en Sutcliffe, 1970) = 0.82 voor de grondwaterstand, $r^2 = 0.88$, $\text{rmse} = 0.025$ en $r^2_{\text{eff}} = 0.84$ voor bodemvocht en $r^2 = 0.93$, $\text{rmse} = 1.4^\circ\text{C}$ en $r^2_{\text{eff}} = 0.86$ voor de bodemtemperatuur. Aan het begin van de zomer, rond dagnr 150, zijn zowel het bodemvocht als het grondwaterpeil te hoog gesimuleerd. Mogelijk is het oppervlaktewaterpeil in SWAP, die gelijk is aan het streefpeil, in deze periode te hoog.



Figuur 9

Vergelijking metingen en modelresultaten van SWAP voor grondwaterstand in cm – mv. (linksboven), volumefractie bodemvocht (rechtsboven) en bodemtemperatuur in °C (linksonder).

In figuur 10 worden in de linker figuur de resultaten van de gewasgroei modellering met WOFOST vergeleken met de waarnemingen. De gesimuleerde aardappelopbrengst is goed in verhouding met de werkelijke aardappelopbrengst. De gesimuleerde biomassa van loof en stelen is meer dan tweemaal hoger dan waargenomen. Dit verschil hangt mogelijk samen met het afsterven van het loof, dat niet door het model wordt gesimuleerd. In de rechter figuur is de reductiefactor als gevolg van watertekort weergegeven. Er zijn korte perioden waarin de gewasgroei wordt gereduceerd door watertekort.



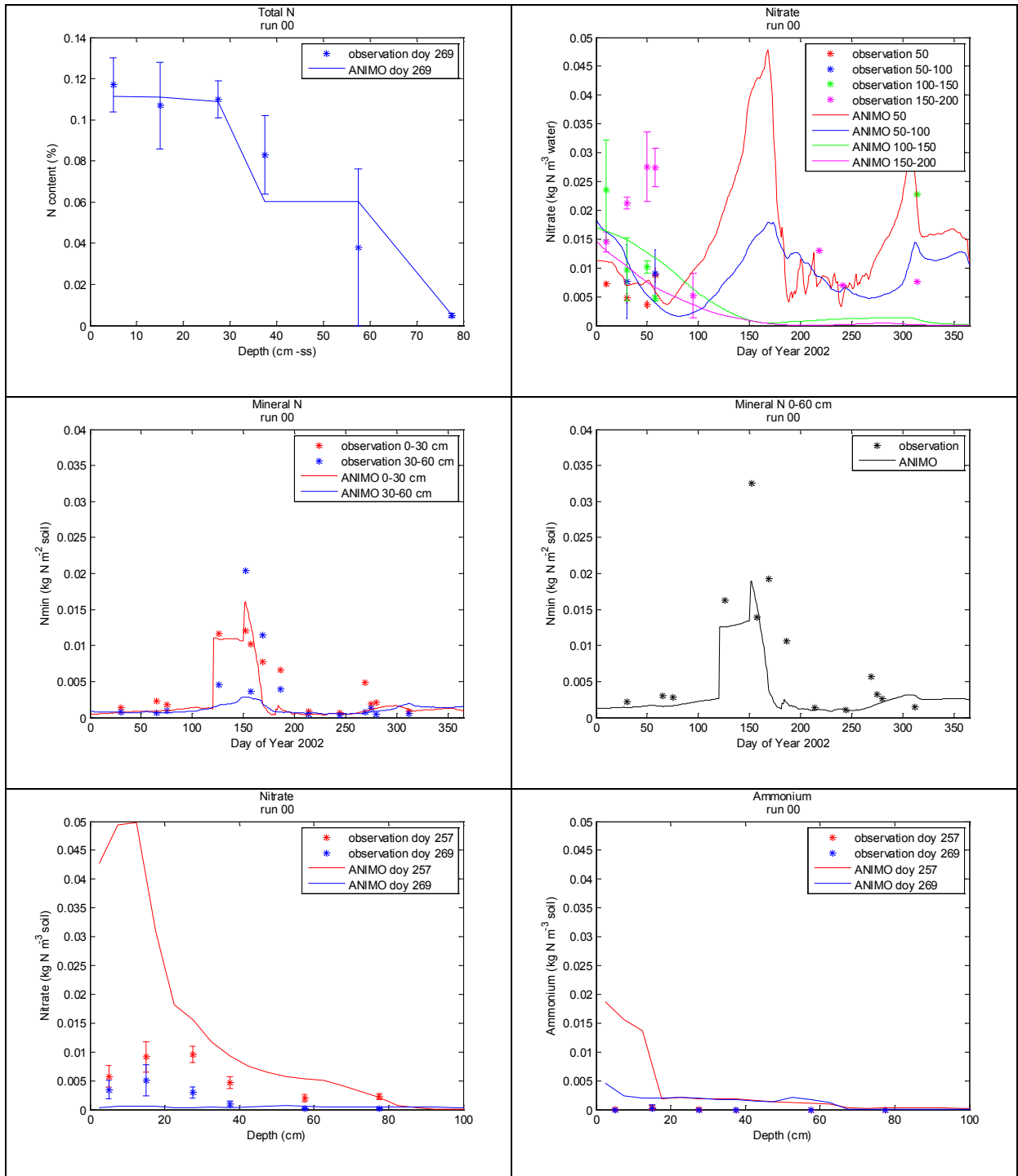
Figuur 10

Vergelijking metingen en modelresultaten in WOFOST voor aardappelopbrengst en loofopbrengst (links) en reductiefactor voor watertekort (rechts).

In figuur 11 worden de resultaten van de stikstof-modellering met ANIMO vergeleken met de waarnemingen. De resultaten laten een wisselend beeld zien. De totale stikstof-inhoud, die voornamelijk bestaat uit organisch N, is goed gesimuleerd. De gesimuleerde nitraatconcentraties voorafgaand aan het groeiseizoen zijn goed in overeenstemming met de waargenomen nitraatconcentraties, met uitzondering van enkele hoge NO_3^- concentraties op 150-200 cm –mv. Dit is beneden de grondwaterstand, mogelijk heeft dit betrekking op laterale afvoer van andere bemeste percelen richting het oppervlaktewater.

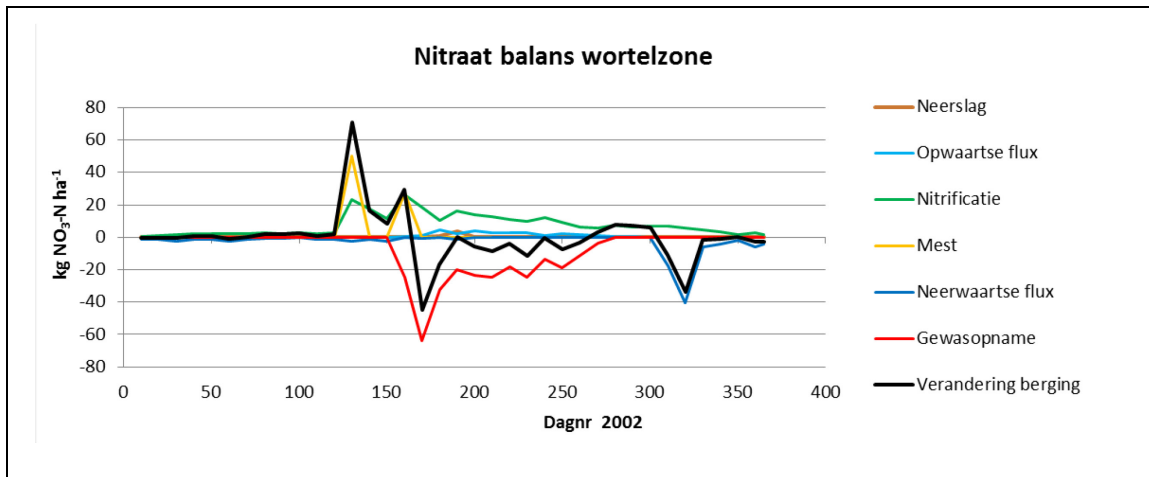
De gesimuleerde minerale N-inhoud van de bovenste bodemlaag komt goed overeen met de waargenomen minerale N-inhoud, hoewel in de laag daaronder (30-60 cm) de gesimuleerde minerale N-inhoud lager is dan de waarnemingen. Een eerdere modelstudie met FUSSIM liet hetzelfde beeld zien (zie figuur 4). Kanttekening hierbij is dat de variatie in de metingen niet bekend is. Mede door het variërende maaiveldniveau met ruggen en lagere stukken tussen de ruggen, kan de variatie in minerale stikstof op een bepaalde diepte groot zijn. Op dagnr 257 en 269, vlak vóór en vlak na de oogst, zijn profielen gemeten van minerale stikstof in de bodem. Op dagnr 257 zijn zowel de gemodelleerde NO_3^- als NH_4^+ inhoud in de bovenste laag hoger dan waargenomen. Mogelijk is de afscheiding van wortel-exudaten in deze groeiperiode te hoog.

In figuur 12 is de nitraat-balans voor de wortelzone gegeven, voor tijdstappen van steeds tien dagen. Aanvoer van nitraat vindt plaats via neerslag, een opwaartse flux door capillaire opstijging, transformatie van NH_4^+ tot NO_3^- tijdens nitrificatie en bemesting. Bemesting en nitrificatie zijn de grootste bronnen voor nitraat. Afvoer van nitraat vindt plaats via gewasopname en een neerwaartse flux door uitspoeling vanuit de wortelzone. Gedurende het groeiseizoen is gewasopname vrijwel de enige bron voor afvoer van nitraat.



Figuur 11

Vergelijking metingen en modelresultaten voor stikstof in de bodem en in het bodemwater: N-gehalte op dagnr 269 in % (linksboven), NO_3 -concentraties op meerdere diepten in kg N m^{-3} water (rechtsboven), minerale N-inhoud op twee diepten in kg N m^{-2} bodem (midden links), totale minerale N-inhoud 0-60 cm – mv. in kg N m^{-2} (midden rechts), NO_3 -concentratie (linksonder) en NH_4 -concentratie (rechtsonder) in de bodem op dagnr 257 en 269 in kg N m^{-3} bodem.



Figuur 12

Nitraat-balans in de wortelzone (0-50 cm).

3.3 Effecten stikstoftekort

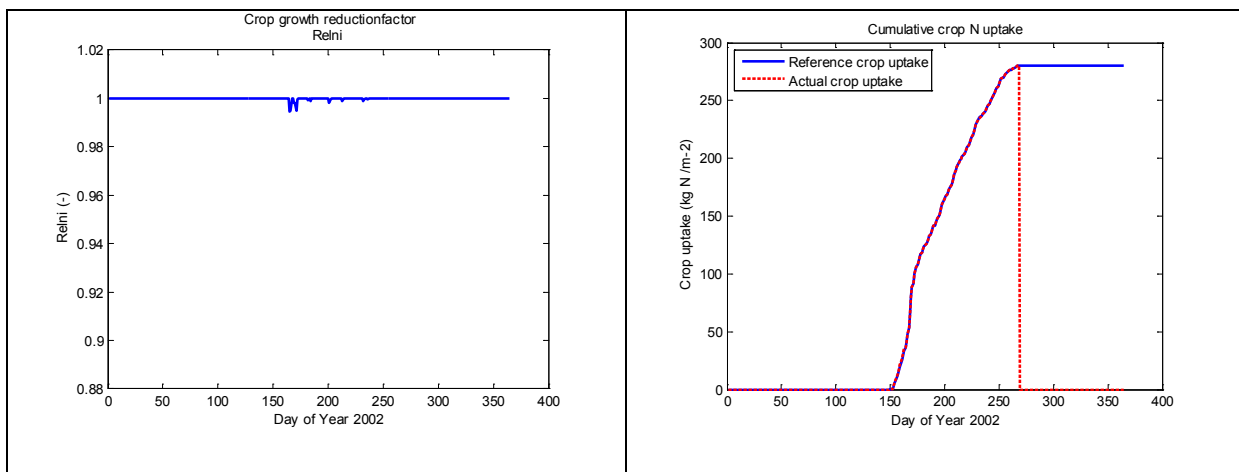
Met het gekoppelde model zijn drie modelexperimenten gedaan:

- Een reductiefactor op basis van de werkelijke situatie.
- Een reductiefactor op basis van een halvering van de mestgift, als voornaamste bron van stikstof.
- Een vaste reductiefactor van 0.5, als voorbeeld van een extreem stikstoftekort.

De resultaten van de modelexperimenten zijn vergeleken met de modelresultaten zonder stikstoftekort om na te gaan wat de effecten zijn op gewasgroei en welke terugkoppelingen dit heeft naar de hydrologie.

Gewasgroei met een reductiefactor op basis van de werkelijke situatie

In figuur 13 zijn de modelresultaten vergeleken voor gewasgroei zonder stikstoftekort en met stikstoftekort, waarbij de reductiefactor is berekend op basis van de werkelijke mestgift. De reductiefactor laat zien dat er nagenoeg geen stikstoftekort is. De actuele gewasopname is vrijwel gelijk aan de potentiële gewasopname. Let op dat potentiële gewasopname in figuur 13 de bruto gewasopname is, inclusief N-inhoud van wortel-exudaten.

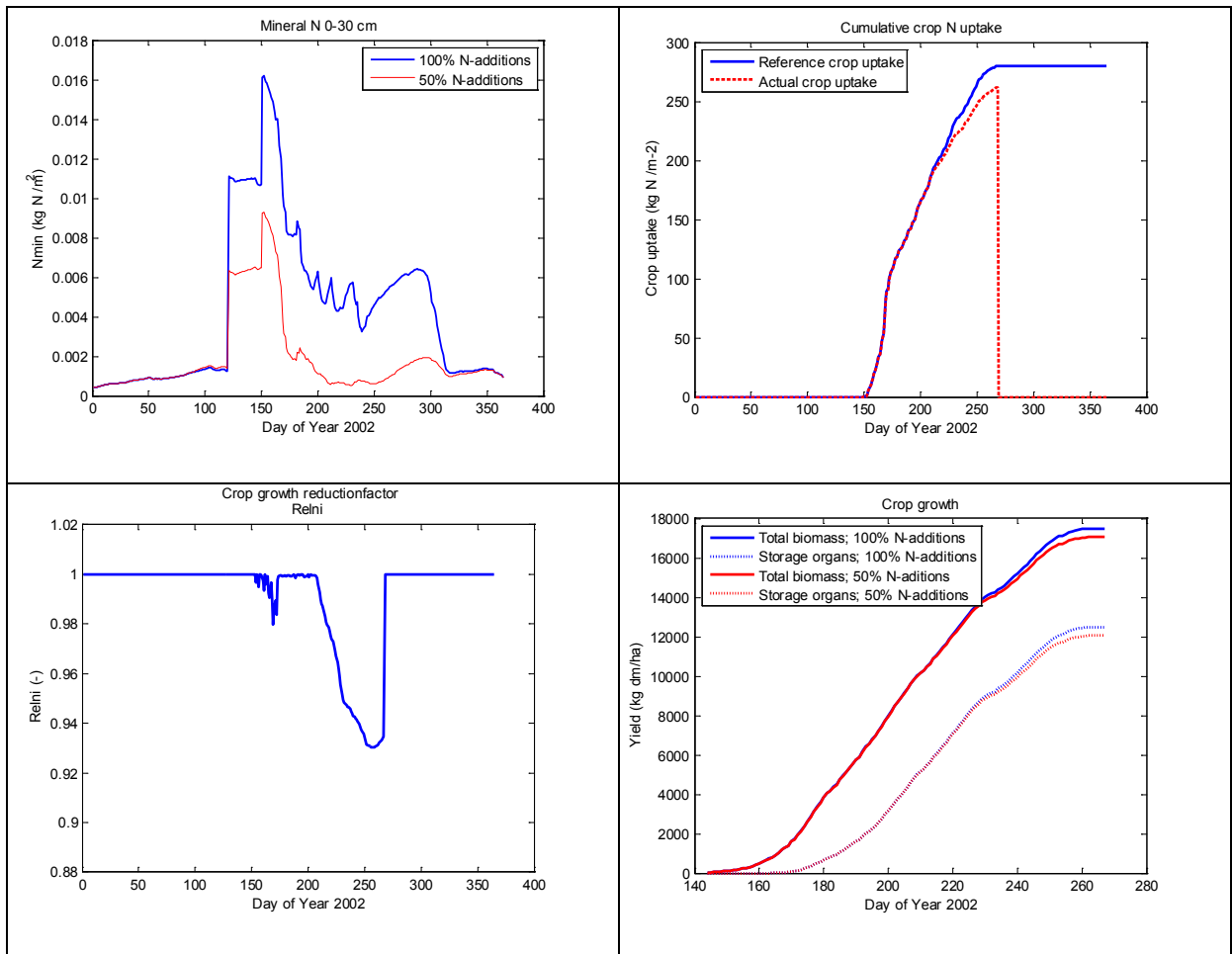


Figuur 13

Modelresultaten met een reductiefactor op basis van de werkelijke mestgift: reductiefactor voor stikstof R_n (-) (links), cumulatieve gewas N-opname (kg N ha^{-1}) (rechts).

Gewasgroei met een reductiefactor op basis van een gehalveerde mestgift

In figuur 14 zijn de modelresultaten vergeleken voor gewasgroei berekend op basis van de werkelijke situatie en een gehalveerde mestgift. De vergelijking van het minerale N-gehalte van de bodem laat, zoals verwacht, een halvering zien van de abrupte toenames op dagen met bemesting (dagnr 121, 151, 175). In dit geval is er onvoldoende nitraat aanwezig in de bodem voor het gewas, en wordt er ook ammonium opgenomen. De totale hoeveelheid minerale stikstof is echter onvoldoende om te voldoen aan de vraag van het gewas, waardoor de actuele gewasopname lager is dan de potentiële gewasopname. Dit zorgt ervoor dat aan het einde van de groeiperiode de reductiefactor kleiner is dan 1. De verschillen in gewasopbrengst zijn echter minimaal.



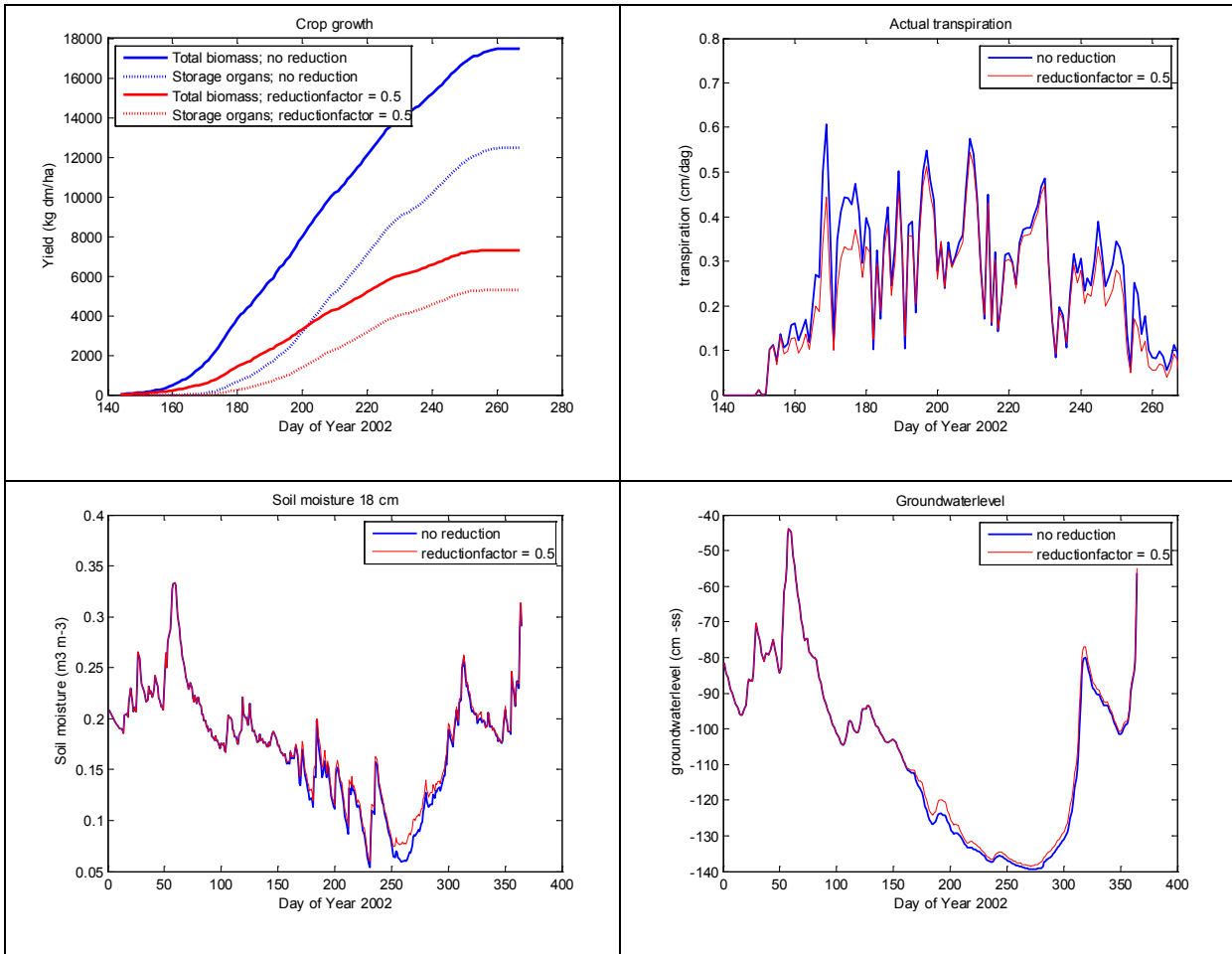
Figuur 14

Vergelijking van de modelresultaten op basis van de werkelijke situatie en een gehalveerde mestgift: voorraad minerale stikstof (kg N m^{-2}) in de bodemlaag 0-30cm (linksboven), cumulatieve gewas N-opname (kg N ha^{-1}) (rechtsboven), reductiefactor voor gewasgroei door stikstoftekort R_n (-) (linksonder), opbrengst in kg ds ha^{-1} (rechtsonder).

Gewasgroei met een reductiefactor van 0.5

In figuur 15 zijn de modelresultaten vergeleken voor gewasgroei zonder reductiefactor voor stikstoftekort en met een hypothetische reductiefactor van 0.5. De vergelijking van de gewasgroei laat zien dat de gewasopbrengst is verminderd, zowel voor de knollen als voor de rest van de plant. De gewasopbrengst is met meer dan 50% gereduceerd. Dit wijst op een positieve terugkoppeling, waarbij de toename van de biomassa niet alleen wordt geremd door het stikstoftekort, maar ook als gevolg van een lagere LAI.

De vergelijking van de hydrologische parameters laat zien dat de transpiratie lager is voor de gereduceerde groei. Dit werkt door in een hoger bodemvochtgehalte en een iets hogere grondwaterstand. De verminderde transpiratie werkt in de huidige modellering echter nog niet door in de stikstofopname door de plant.



Figuur 15

Vergelijking van de modelresultaten zonder reductie en met een vaste reductiefactor van 0.5: opbrengst in kg ha⁻¹ droge stof productie (linksboven), transpiratie in cm d⁻¹ (rechtsboven), vochtgehalte in cm³ cm⁻³ op 18 cm – mv. (linksonder) en grondwaterstand in cm – mv. (rechtsonder).

4 Discussie en aanbevelingen

4.1 Discussie

Uit de casestudie is gebleken dat reductie van gewasgroei een zichzelf versterkend effect is, als gevolg van een kleinere toename van de LAI. Een tekort van het stikstofaanbod aan het begin van het groeiseizoen heeft een effect op LAI en daarmee op de verdere gewasgroei omdat deze gekoppeld is aan LAI. De uiteindelijke gewasproductie is kleiner dan verwacht wordt op basis van het stikstoftekort alleen. Het heeft ook een afname van de transpiratie tot gevolg. In principe werkt dit door in een verminderde gewasopname, maar deze terugkoppeling is nog niet opgenomen in de huidige modellering. Uiteindelijk zal dit resulteren in een nog sterkere afname van de gewasgroei.

De huidige modelopzet maakt gebruik van een gedetailleerd aanbod van water en nutriënten. Als voorbeeld, het model SWAP kan wateraanbod berekenen in een situatie met nalevering vanuit ondergrond en oppervlaktewater (capillaire nalevering en infiltratie vanuit oppervlaktewater). Zo kan het model ANIMO het nutriëntenaanbod berekenen op basis van de volledige nutriëntenkringlopen in de bodem, gecombineerd met gedetailleerde transportprocessen in samenhang met SWAP. Het aanbod van water en nutriënten is daarmee in detail gemodelleerd. De vraagkant vanuit het gewas is relatief eenvoudig gemodelleerd waarbij gebruik is gemaakt van het bestaande modelconcept in ANIMO.

In de huidige studie is de stikstofvraag van het gewas op een eenvoudige manier berekend, waarbij gebruik is gemaakt van het bestaande concept in ANIMO. Het gebruikte concept is eenvoudig vergeleken met andere modellen. In de huidige koppeling wordt de stikstofvraag in ANIMO bepaald op basis van een inschatting van de totale stikstofvraag over het gehele groeiseizoen. Deze is niet gekoppeld aan de dagelijkse toename van de biomassa, zoals die door WOFOST wordt gemodelleerd. Deze detaillering zou een grote meerwaarde voor SWAP-ANIMO-WOFOST betekenen en een verbetering opleveren voor het inschatten van de dagelijkse stikstofvraag van het gewas. In bijlage 4 zijn de resultaten van een beperkte literatuurstudie naar andere modelconcepten voor de stikstofvraag gegeven.

4.2 Conclusies en aanbevelingen

De modelresultaten laten zien dat het veronderstelde effect van stikstoftekort op gewasgroei en verdamping aantoonbaar is en gekwantificeerd kan worden met het huidige modelinstrumentarium, waarbij een gedetailleerd aanbod van water en nutriënten in beschouwing is genomen.

Het aanbod van water en nutriënten is in detail gemodelleerd. De vraagkant vanuit het gewas is relatief eenvoudig gemodelleerd en vereist nadere studie om operationele toepassingen (bijvoorbeeld schadeberekeningen) mogelijk te maken. Dit kan verbeterd worden door gebruik te maken van suggesties zoals die in bijlage 4 zijn gegeven.

Om inzicht te krijgen van de verschillen tussen de verschillende modelconcepten en een indruk te krijgen welke concepten het beste de waarheid benaderen, verdient het aanbeveling om de modelresultaten te vergelijken met gewasgroei-data van bemestingsexperimenten.

In de huidige koppeling wordt alleen de reductiefactor voor stikstoftekort doorgegeven van ANIMO naar SWAP-WOFOST. Het is mogelijk ook andere variabelen door te geven, zowel van ANIMO naar SWAP-WOFOST als van SWAP-WOFOST naar ANIMO, zoals bijvoorbeeld hydrologische parameters of de potentiële gewasgroei. De terugkoppeling van verminderde transpiratie op gewasopname is nog niet opgenomen in de huidige modellering. Dit zou als eerste kunnen worden opgepakt; de voorbereidingen zijn al in de modelcodes aangebracht.

Deze studie heeft zich beperkt tot de effecten op gewasgroei en verdamping. Het verdient aanbeveling om ook de effecten op CO₂-emissies te analyseren, maar ook mogelijke effecten op N₂O-emissies door de competitie tussen gewasopname en denitrificatie voor de consumptie van nitraat. Beide zijn broeikasgassen en kwantificering van de impact is relevant voor klimaat-adaptatie-studies

Algemene aanbevelingen:

- De geïntegreerde dynamische berekening van water- en nutriëntengelimiteerde gewasgroei kan worden ingezet ter ondersteuning van analyses van de voedselproblematiek. In eerste instantie valt te denken aan studies in het kader van klimaatverandering (CO₂, temperatuur, verzilting, verdroging, vernatting) waarbij mogelijkheden voor CO₂-vastlegging in bodem en gewas simultaan kunnen worden uitgerekend. Daarnaast kan de opzet ondersteuning bieden en inzicht vergroten bij de afweging van verschillende schadefuncties die de opbrengst beïnvloeden om daarmee een betere onderbouwing van maatregelen te bepalen.
- De koppeling beperkt zich tot de nutriënt stikstof, maar uitbreiding met fosfaat en andere macro-nutriënten is mogelijk met hetzelfde modelinstrumentarium. Dat biedt mogelijkheden om het effect van fosfortekort op gewasgroei te berekenen.
- Daarnaast verdient het aanbeveling om na te gaan of de koppeling op dagbasis softwarematig robuuster kan worden uitgevoerd, bijvoorbeeld in Python.

Literatuur

Assinck, F.B.T. en P. de Willigen, 2004. Stikstofstromen op het kernbedrijf Vredepeel. Modelberekeningen met FUSSIM2 en MOTOR. Plant Research International, OV0402, Wageningen.

Berg, M.v.d. en M.M. Pulleman, 2003. Kwaliteit van grond- en oppervlaktewater in het project Telen met toekomst 2002. Plant Research International B.V.Wageningen.

Besseminder, J., P.A. Leffelaar, A. Dhindwal en T. Ponsioen, 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management* 73:113-130.

De Vos, J.A. en F.B.T. Assinck, 2004. Nitraatuitspoeling Vredepeel 2002-2003. Plant Research International, OV 0204, Wageningen.

De Vos, J.A., E.W.J. Hummelink en T.S. van Steenberg, 2002. Waterretentie en waterdoorlatendheidskarakteristieken van Telen met toekomst - proefvelden Meterik en Vredepeel. Plant Research International, Wageningen.

De Vos, J.A., F.P. Sival, O.A. Clevering en J. van Kleef, 2006. Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden. Veldexperimenten Vredepeel 2003-2005. Alterra, Wageningen & PPO-Akkerbouw, Groene Ruimte en vollegrondsgroente, Alterra-rapport 1392, Lelystad en Wageningen.

Dekker, P., W. van den Berg, L. Bommele en D. Reheul, 2005. Landbouwkundige en milieutechnische aspecten bij teelt van aardappelen op gescheurd grasland. N levering bij voorhistorie akkerbouw, tijdelijk grasland en ex-blijvend grasland en de N-benutting door aardappelen in een veldproef van de Universiteit van Gent (B) te Melle in 2002 en 2003. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.Wageningen.

Gonçalves, J.F., J. Maldaner, L.V. Rossato, L.A. Tabaldi, E.C. Skrebsky, T.G. Farias, D.A. Bisognin en F.T. Nicoloso 2009. In vitro growth of potato plantlets in different doses of cadmium (in Portuguese). *Ciência Rural* 39:2625-2628.

Greenwood, D.J. en A. Draycott 1995. Modelling uptake of nitrogen, phosphate and potassium in relation to crop growth, in: P. Kabat et al. (eds.), *Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system*, Wageningen Pers, Wageningen.

Groenendijk, P., L.V. Renaud en J. Roelsma 2005. Prediction of nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface waters; Process descriptions of the ANIMO 4.0 model. Alterra, Wageningen.

Groot, J.J.R., 1987. Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. Centre for agrobiological research and Department of theoretical production ecology, Simulation Reports CABO-TT, Wageningen.

Kroes, J.G. en J. Roelsma, 1998. User's guide for the ANIMO version 3.5 nutrient leaching model. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, Technical Document 46.

Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs 2009. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Update 02, August 2009. Alterra, Report 1649(02), Wageningen, online: www.swap.alterra.nl.

- Nash, J.E. en J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Neumann, G., 2007. Root exudates and nutrient cycling, in: P. Marschner en Z. Rengel (Eds.), *Soil Biology*, Volume 10. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- NMI, 2011. Stikstofinhoud van groenbemesters, <http://www.blgg.nl/sites/nmi/nl/nmi.nsf/dx/25-01-2010165114ADILLN.htm>, last acces: 28 November 2011.
- RIVM, 2011. Landelijk meetnet Luchtkwaliteit, <http://www.lml.rivm.nl/>, last acces: 19-December 2011, Bilthoven.
- Singh, R., J.G. Kroes, J.C. van Dam en R.A. Feddes, 2006. Distributed ecohydrological modelling to evaluate irrigation system performance in Sirsa district India. I. Current water management and its productivity? *Journal of Hydrology* 329:692-713.
- Supit, I., A.A. Hooijer en C.A.E. van Diepen, 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS, vol. 1: Theory and algorithms. Office for Official Publications of the European communities, EUR 15956, Luxembourg, 146 pp. (catno: CL-NA-15956-EN-C).
- TNO, 2009. Dinoloket, <http://www.dinoloket.nl/en/DINOLoket.html>, last acces: 16 november 2011, Delft.
- 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-atmosphere-plant environment. DLO-Staring Centrum / Dept. Water Resources Wageningen University, Technical Document 45 / Report 71, Wageningen.
- Van Diepen, C.A., J. Wolf en H. van Keulen 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5:16-24.
- Van Groenigen, J.W., K.B. Zwart, D. Harris en C. van Kessel, 2005a. Vertical gradients of delta ¹⁵N and delta ¹⁸O in soil atmospheric N₂O-temporal dynamics in a sandy soil. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19:1289-1295.
- Van Groenigen, J.W., P.J. Georgius, C. van Kessel, E.W.J. Hummelink, G.L. Velthof en K.B. Zwart, 2005b. Subsoil ¹⁵N-N₂O concentrations in a sandy soil profile after application of ¹⁵N-fertilizer. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72:13-25.
- Veerman, A., 2003. Teelt van consumptieaardappelen. Praktijkonderzoek plant en omgeving, Wageningen.
- Wanten, P.J., P.A.C. Koot en B. Kroonen-Backbier, 2003. Biologische aaltjesbestrijding met Tagetes, een kostprijsvergelijking van verschillende teeltsystemen. *Ekoland* 23:24-25.
- Westein, E., 1995. Gegevensmodellering voor SIGWAN, een koppeling van SWAP, ANIMO en WOFOST. Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO), Technisch Document 29, Wageningen.
- Westein, E. en M.J.D. Hack-ten Broeke, 1995. Modelmatige beschrijvingen van de gewasreacties op waterstress en/of nutriëntentekort: een literatuurstudie. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 391.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte 1994. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994. DLO-Staring Centrum, Technical Document 18, Wageningen.

Bijlage 1 Model-technische aspecten voor de koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST

Doel van de koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST is om communicatie op dagbasis tussen de modellen te realiseren. Op deze manier kunnen de terugkoppelingen tussen nutriënten, water en vegetatie worden bestudeerd en kan gewasgroei meer realistisch worden gesimuleerd. In deze bijlage wordt dieper ingegaan op de structuur van de koppeling, het gebruik van de gekoppelde modellen en de aanpassingen in de broncodes van beide modellen.

Bij deze methode worden SWAP-WOFOST en ANIMO tegelijkertijd gedraaid. Een apart stuurprogramma zorgt ervoor dat beide modellen om de beurt rekenen. Voor de communicatie tussen beide programma's worden tijdens de gekoppelde modelrun drie nieuwe bestanden aangemaakt, die na het beëindigen van de run weer worden verwijderd. Er zijn verder geen extra bestanden nodig om de gekoppelde modellen te runnen. In beide modellen is één extra invoer-parameter toegevoegd, die aangeeft of er gekoppeld gerekend wordt. Als deze niet aanwezig is in de invoerbestanden, worden de modellen afzonderlijk, dus niet gekoppeld, gedraaid. Bij het niet-gekoppeld draaien van de modellen hebben de aanpassingen in de broncode geen invloed op de modellering. Om een run met de gekoppelde modellen te starten, worden beiden aangeropen met een aantal extra argumenten.

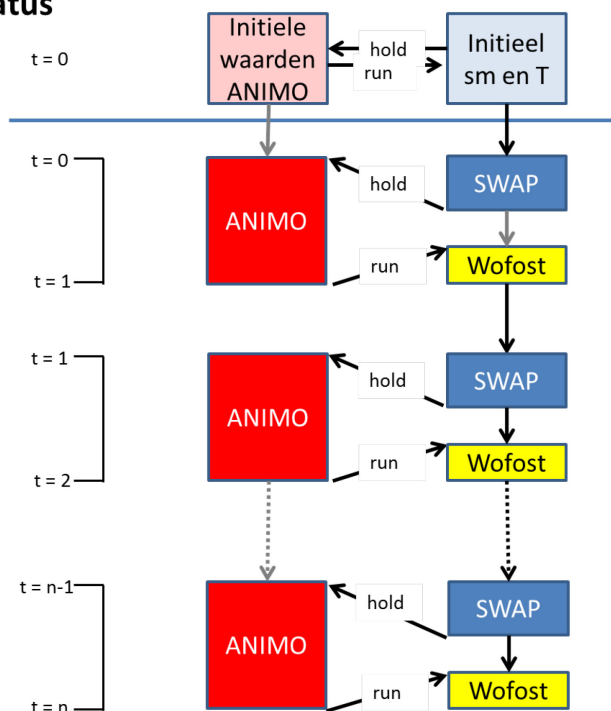
De koppeling is gebaseerd op SWAP versie 3.2.36x en ANIMO versie 4.0_MPGHG, dus met macro-poriën en broeikasgasemissies. Als compiler is Microsoft Visual Studio 2008 versie 9.0.307291 SP gebruikt.

Structuur koppeling

De structuur van de koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST is gebaseerd op de bestaande koppeling van SWAP met SIMWATS, die in december 2010 door Luc van Erven is opgezet. De koppeling tussen SWAP en SIMWATS is behouden in de nieuwe broncode, maar niet getest.

In deze structuur worden SWAP en ANIMO tegelijkertijd gedraaid. Per dag wordt eerst het beschikbare bodemvocht berekend in SWAP, daarna de gewasopname en een eventueel stikstoftekort met ANIMO en tenslotte de gewasgroei met WOFOST, eventueel gereduceerd onder invloed van vochttekort of stikstoftekort.

Status



Figuur 16

Algemene rekenvolgorde voor de koppeling van SWAP met ANIMO.

Voor het handhaven van de juiste rekenvolgorde is er een aparte status-file 'status_SWAP.txt'. De tekst in dit bestand is 'run' of 'hold'. Deze tekst heeft betrekking op SWAP: het model wacht om verder te gaan tot de tekst in de status-file 'run' is. Voor ANIMO is dit andersom, dit model gaat pas verder als de tekst in de status-file 'hold' is. De status-file wordt aangemaakt tijdens de initialisatie in SWAP. ANIMO wacht na het opstarten totdat dit bestand beschikbaar is.

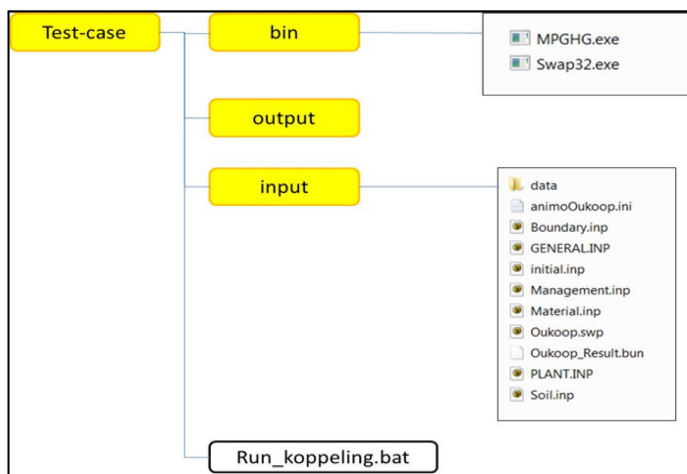
Voor data-overdracht tussen SWAP en ANIMO worden tijdens de initialisatie de files van 'Data_from_SWAP.csv' en 'Data_to_SWAP.csv' aangemaakt. Deze files worden automatisch aangemaakt en weer verwijderd, de gebruiker hoeft alleen de locatie waar het bestand tijdelijk wordt opgeslagen aan te geven.

Gebruik van de gekoppelde modellen

Om de modellen gekoppeld op te starten, moeten beiden worden aangeroepen met een aantal extra argumenten. Met uitzondering van het eerste argument zijn deze gelijk voor SWAP en ANIMO:

- argument 1: locatie en naam van .ini file (ANIMO) of .swp file (SWAP)
- argument 2: locatie en naam van 'Data_from_SWAP.csv'
- argument 3: locatie en naam van 'Data_to_SWAP.csv'
- argument 4: locatie en naam van 'status_SWAP.txt'

In box 1 is een voorbeeld gegeven hoe beide modellen kunnen worden aangeroepen in een .bat file. In figuur 4 is de bijbehorende directory structuur weergegeven.



Figuur 17

Voorbeeld voor een directory structuur voor de gekoppelde modellen.

```
cd output

start ..\bin\MPGHG ..\input\animoOukoop.ini ..\Data_from_SWAP.csv ..\Data_to_SWAP.csv
..\status_SWAP.txt

start ..\bin\Swap32 ..\input\Oukoop.swp ..\Data_from_SWAP.csv ..\Data_to_SWAP.csv
..\status_SWAP.txt

pause
```

Box 1

Voorbeeld aanroep ANIMO en SWAP gekoppeld in een *.bat bestand.

Opbouw Fortran modules ‘SharedSimulation.for’ en ‘SharedExchange.for’

In beide modellen zijn twee Fortran-modules opgenomen voor de koppeling en de overdracht van gegevens: ‘SharedSimulation.for’ en ‘Sharedexchange.for’. De structuur van deze modules is in beide modellen gelijk.

De module ‘SharedSimulation.for’ bestaat uit zes delen, waarin wordt aangegeven wat moet gebeuren op verschillende momenten tijdens de modellering. De module wordt gedurende de simulatie meerdere malen aangeroepen. In de aanroep van de module wordt als argument meegegeven welk onderdeel aan de beurt is:

- 1000 initialiseren: inlezen extra argumenten en aanmaken extra bestanden
- 2000 initialiseren: initiële data wegschrijven en binnenhalen
- 3000 begin tijdstap: data inlezen
- 4000 tijdens tijdstap: data wegschrijven en/of inlezen
- 5000 einde tijdstap: data wegschrijven
- 6000 einde simulatie: verwijderen extra bestanden

In de module ‘Sharedexchange.for’ wordt beschreven welke data wordt weggeschreven of wordt ingelezen. De module bestaat uit twee subroutines: ‘From[Modell].for’ en ‘To[Modell].for’. De naamgeving is aangepast aan het model, bijvoorbeeld ‘ToAnimo.for’ in ANIMO en ‘ToSwap.for’ in SWAP.

Aanpassingen in SWAP

In SWAP zijn drie bestaande modules aangepast voor de koppeling en zijn twee nieuwe modules toegevoegd:

- Variables.for (D-line)
- Readswap.for
- Swap.for (D-line)
- Sharedsimulation.for
- Sharedexchange.for

Voor aanpassingen in de code van SWAP is waar nodig gebruik gemaakt van 'D-lines'. Met de D-line-functie kan tijdens de compilatie worden gekozen om deze regels al dan niet mee te compileren. Als extra input is de switch *swshared* toegevoegd in de .swp file, waarbij 0 = niet gekoppeld rekenen; 1 = koppelen met SIMWATS en 2 = koppelen met ANIMO. In Box 2 is deze aanpassing van de .swp file weergegeven.

De Fortran modules zijn niet in zijn geheel opgenomen in dit rapport. Aandachtspunten bij de diverse modules zijn:

Variables.for

- De model parameter *fSwapShared* (logical) is vervangen door *swshared*(integer), om een keuze te kunnen maken tussen de koppeling met SIMWATS en ANIMO.

Readswap.for

- De 'extra input' gelezen met de functie 'rdinqr' uit de Ttutil bibliotheek, die hem alleen leest als hij er is.

Swap.for

- Taak 3000 in 'SharedSimulation.for' wordt alleen aangeroepen bij de eerste tijdstap van de dag.
- Taken 4000 en 5000 in 'SharedSimulation.for' worden alleen aangeroepen bij de laatste tijdstap van de dag.
- Taak 4000 in 'SharedSimulation.for' wordt aangeroepen tussen de berekening van de potentiële gewasgroei en de berekening van de actuele gewasgroei.

SharedSimulation.for

- Tijdens de initialisatie maakt SWAP de status-file aan; als deze al bestaat stopt de simulatie. Dit is gedaan om te voorkomen dat per ongeluk ANIMO al aan het rekenen gaat.
- Als SWAP moet lezen of schrijven naar de status-file wordt deze direct ervoor aangeroepen en hij wordt direct erna afgesloten. Als dit niet gebeurt wordt steeds een nieuw uitvoerbestand aangemaakt.
- Voor de aanroep van 'SharedExchange.for' is bij koppeling met SIMWATS een kolomnummer nodig. Voor de koppeling met ANIMO is hiervoor de dummy *IDdummy* aangemaakt.

SharedExchange.for

- Voor de aanroep van deze files is bij koppeling met SIMWATS een kolomnummer nodig. Bij koppeling met ANIMO is dit een dummy.

```

*** GENERAL SECTION ***
*****
* Part 1: Environment

PROJECT = 'Oukoop 2006'      ! Project description, [A80]
PATHWORK = ' '              ! Path to work directory, [A80]
PATHATM = '..\input\Data\'   ! Path to directory with weather files, [A80]
PATHCROP = '..\input\Data\'  ! Path to directory with crop files, [A80]
PATHDRAIN = '..\input\Data\' ! Path to directory with drainage files, [A80]
SWSCRE = 2                  ! Switch, display progression of simulation run:
                            ! SWSCRE = 0: no display to screen
                            ! SWSCRE = 1: display waterbalance to screen
                            ! SWSCRE = 2: display daynumber to screen
SWERROR = 1 ! Switch for printing errors to screen [Y=1, N=0]

SWSHARED = 2 ! Switch, output file with formatted hydrological data
              ! SWSWAPSHARED = 0: no simultaneous simulation
              ! SWSWAPSHARED = 1: simultaneous simulation with SIMWATS
              ! SWSWAPSHARED = 2: simulataneous simulation with ANIMO
*****

```

Box 2

*Nieuwe invoer voor de switch voor gekoppelde simulatie in *.swp bestand.*

Aanpassingen in ANIMO

In ANIMO zijn drie bestaande modules aangepast voor de koppeling en zijn twee nieuwe modules toegevoegd:

- Animo.inc
- Input1.for (D-line)
- Animo.for (D-line)
- Sharedsimulation.for
- Sharedexchange.for

Ook voor aanpassingen in de code van ANIMO is gekozen om gebruik te maken van 'D-lines' waar nodig, zodat tijdens de compilatie middels de D-line functie gekozen kan worden gekozen om deze regels al dan niet mee te compileren. Als extra invoer is de switch *loptSwSh* toegevoegd in general.inp. In Box 3 is deze aanpassing van het bestand 'general.inp' weergegeven.

De koppeling wordt geïnitieerd in SWAP. Hierbij worden de status-file aangemaakt en de initiële status weggeschreven. ANIMO wacht tot SWAP deze file heeft aangemaakt en de status op 'hold' staat.

Let erop dat ANIMO vooralsnog de SWAP-uitvoer nodig heeft als invoer (bijvoorbeeld 'result.bun'). Het is dus noodzakelijk om eerst een simulatie met alleen SWAP uit te voeren, voordat SWAP en ANIMO gekoppeld gedraaid kunnen worden.

De aangepaste Fortran modules zijn niet opgenomen in dit rapport. Aandachtspunten bij de diverse modules zijn:

ANIMO.inc

- Aanpassingen in de code zijn aangegeven met '! SwapShared ' aan het eind van de regel
- Naamgeving van de nieuwe variabelen is niet conform de ANIMO-conventie, maar is gelijk aan de naamgeving in SWAP. Uitzondering hierop is de switch *loptSwSh*.

Input1.for

- Er wordt nog geen check uitgevoerd op de nieuwe switch *loptSwSh* zoals wel gebeurt op de andere switches.

SharedSimulation.for

- De functie 'Sleepqq' werkte in eerste instantie niet. Om deze functie werkend te krijgen is een eigenschap in de compiler aangepast: Properties – Fortran – External processes – calling convention. Deze staat nu op *default* in plaats van *CVF(1 face: cvf)*.
- Als file-unit is standaard voor 96 gekozen. Om te voorkomen dat een uitvoerbestand wordt aangemaakt, wordt het bestand direct voor de aanroep geopend en direct daarna weer gesloten.
- In ANIMO zijn geen acties opgenomen voor de taken 4000 en 6000.

SharedExchange.for

- De variabele *relni* wordt lokaal berekend voor export naar SWAP en niet doorgevoerd naar het hoofdprogramma.

```
Filename: General.inp
Content:  Input for Animo-version 4.0 (case Oukoop)
-----
>simopt: ----- simulation options -----
2 0 0 0 0 1 1

- Hydrological parameters were simulated with the model SWAP.
- Only carbon and nitrogen cycle are simulated.
- Aeration calculation according to SONICG
- Crop uptake simulated by ANIMO
- imulation without macro pores
- simulation with greenhouse gases, no subsidence
-> shared simulation with SWAP

>simtim: ----- simulation time -----
2006  1.0 2006 365.0
```

Box 3

Invoer switch voor gekoppelde simulatie in general.inp.

Bijlage 2 Model-technische aspecten voor de berekening van de effecten op gewasgroei door stikstoftekort

In ANIMO is de berekening opgenomen voor de reductiefactor voor gewasgroei door stikstoftekort. In SWAP is de berekening voor het effect van stikstoftekort op de gewasgroei opgenomen.

Berekening reductiefactor stikstoftekort

De berekening van *relni*, de reductiefactor voor stikstoftekort, is opgenomen in de subroutine 'SharedExchange.for' in ANIMO (zie box 4). Om de benodigde variabelen door te geven naar een volgende tijdstap zijn ook de benodigde variabelen ook gedefinieerd in de subroutines 'Animo.for' (D-line) en 'SharedSimulation.for'.

```
!      initialize for days without crop growth
      relni = 1.0

      If (Tiyr .Ge. Tiso .And. Tiyr .Lt. Tiha ) Crop = .true.

      If (Crop .And. Nuroup .Ge. 1) Then
! ... calculate crop growth reduction factor relni (-)
!      simple method: actual total uptake / potential total uptake

          if (Rsamplni_act .Lt. Rsamplni_pot) then
              relni = Rsamplni_act / Rsamplni_pot
          endif
      endif
```

Box 4

Code voor reductiefactor voor stikstoftekort in ANIMO.

Effect op gewasgroei

De berekening van het effect van stikstoftekort op gewasgroei is opgenomen in de subroutine 'cropgrowth.for' in SWAP via *relni*, de reductiefactor voor stikstoftekort. Er zijn geen wijzigingen uitgevoerd ten opzichte van SWAP3.2.36 (zie box 5).

```

! --- gross assimilation

      call totass (daynr, dayl, amax, eff, lai, kdif, rad, sinld, cosld, dtga)
! --- correction for low minimum temperature
      dtga = dtga * afgn (tmnftb, 30, tmnr)
! --- potential assimilation in kg ch2o per ha
      pgass = dtga * 30.0d0/44.0

! --- water stress reduction of pgass to gass
      if(abs(ptra).lt.nihil) then
          reltr = 1.0d0
      else
          reltr = max(0.0d0, min(1.0d0, tra/ptra))
      endif
      gass = pgass * reltr
! --- management factor
!   (nitrogen and other forms of stress, not accounted for)
      gass = gass * relni

```

Box 5

Code voor berekening effect stikstoftekort op gewasgroei in SWAP.

Bijlage 3 Overzicht relevante subroutines en parameters in ANIMO

In deze appendix is een overzicht gegeven van relevante subroutines en parameters voor gewasgroei en gewasopname in ANIMO. Dit overzicht is beperkt tot éénjarige gewassen, voor gras zijn niet alle subroutines en parameters van toepassing. De subroutines zijn opgenomen in de volgorde waarin ze worden aangeroepen.

Relevante sub-routines

Input.for

- Read input data from 'plant.inp'
- Read NH_4 -sorption coefficient per horizon from 'soil.inp'

Inicalc.for

- Calculate of 'base' concentration transpiration first and second period
- Initialize of values voor actual and potential N-uptake (0)
- Calculate NH_4 fraction in solution

init_yr.for

- Determine actual cumulative transpiration during crop growth period
- Initialization values for actual and potential N-uptake (0)

Init.for

- Make end-of-timestep-values to start-of-timestep-values
- At the day after harvest: remove all root material

root_plant.for

- Determine the number of layers with roots ('Nuroom')
- Determine the number of layers with transpiration ('Nuroup')
- Determine increase in root biomass, with reduction due to water-stress and nutrient-stress
- Determine distribution of roots over the layers
- Determine amount of exudate production

uptpar_plant.for

- Correct the 'base' concentration in transpiration for differences between actual and user defined transpiration amount ('Comani')
- Determine the average concentration for NH_4 and NO_3 in the root zone ('Avconhro', 'Avconiro')
- Determine the total transpiration over the root zone ('Fev')
- Determine the plant N-demand ('Demnigr', 'Demnide', 'Demnilux')
- Determine the amount of NO_3 and NH_4 available for plant-uptake ('Amni', 'Amnh')
- Determine transpiration concentration stream factor (= selectivity-factor) ('Sefaupni', 'Sefaupnh')

uptintg_plant.for

- Determine total crop uptake ('Upni') and actual cumulative crop uptake ('Rsamplni_act')
- Determine if there is a unrecoverable deficit ('Reduro')
- Determine the potential cumulative crop uptake, taking 'Reduro' into account ('Rsamplni_pot')

out....for

- Various files to create balances and output-files

Relevante variabelen

$1.E^{-4}$ = omrekening van kg ha^{-1} naar kg m^{-2}

$1.E^4$ = omrekening van kg m^{-2} naar kg ha^{-1}

Amnh = total nutrient availability for transpiration - $\text{NH}_4\text{-N}$ (kg N m^{-2})

Amni = total nutrient availability for transpiration - $\text{NO}_3\text{-N}$ (kg N m^{-2})

Amormt = total amount of root OM that is added to the soil (kg m^{-2}).

Amplni_pot = potential cumulative nitrogen uptake at start of timestep

Amplni_act = actual cumulative nitrogen uptake at start of timestep

Amplro = amount of roots present at the beginning of a timestep (kg OM m^{-2})

Amroti = array with root mass data (kg OM ha^{-1})

Avconhro = average concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in root zone (kg m^{-3} water)

Avconhtop = average concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ in top reservoir

Avconiro = average concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ in root zone (kg m^{-3} water)

Avconitop = average concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ in top reservoir

Bo = depth of bottom of compartment (m)

Coma1 = expected optimal N concentration in plant evaporation flow in first period

Coma2 = expected optimal N concentration in plant evaporation flow in second period

Comani = optimal N concentration in plant evaporation flow at current timestep

Coni = $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration per layer (kg N m^{-3} water)

Conh = $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration per layer (kg N m^{-3} water)

Demnigr = growth nitrogen demand (kg N m^{-2})

Demnide = deficit nitrogen demand (kg N m^{-2})

Demnilu = luxurious nitrogen demand (kg N m^{-2})

Expd = exudate production per layer (41% of root mass increase; $\text{kg OM m}^{-3} \text{d}^{-1}$)

Faactrup = factor to express the dependence of assumed potential uptakes rates either on the defined cumulative transpiration or on the actual transpiration

Fanhcocx = reduction factor for crop uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$ from soils per layer

Fev = actual transpiration flux over root zone

Flab = flux incoming from above (m d^{-1})

Flev = actual transpiration flux per compartment (m d^{-1})

Fr = solid organic mass fraction per class
 $Frca$ = dissolved fraction of solid organic mass per class
 $Fror$ = fraction of organic matter content in material (–)
 $Icro$ = increase in roots-amount per compartment during time step (kg OM m^{-2})
 $Icrot$ = increase in total roots-amount during time step (kg m^{-2})

$Lnadtu$ = deepest compartment for addition of roots of tuber crop
 $Lnro$ = addition depth of died roots for current time step (m)
 $Lnroti$ = array of addition depths of died roots

$Luconi$ = ratio between the 'luxurious' N concentration in the plant and the mineral N concentration in the soil
 ($\text{m}^3 \text{ water kg}^{-1} \text{ N}$)
 $Miup$ = minimum fraction of potential N uptake that no damage occurs (–)

$Nuamro$ = number of data on root mass development
 $Nulnro$ = number of dates on depth of addition to soil of died roots
 $Nuroha$ = number of layers with roots at harvest time
 $Nuroom$ = number of compartments with roots
 $Nuroup$ = number of compartments with roots with nutrient uptake

Os = amount of fresh organic matter per layer (kg m^{-2})

$Reduro$ = reduction factor of total cumulative N uptake in both periods (kg N m^{-2})

Rm = number of root material (–)
 Ro = mass of roots per compartment (kg m^{-2}).
 $Rsampro$ = amount of roots present at the End of a timestep (kg OM m^{-2})

$Sefani$ = selectivity factor $\text{NO}_3\text{-N}$, total soil
 $Sefanh$ = selectivity factor $\text{NH}_4\text{-N}$, total soil
 $Sefaupnh$ = selectivity factor per layer for the uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$
 $Sefaupni$ = selectivity factor per layer for the uptake of $\text{NO}_3\text{-N}$
 $Sefama$ = maximum selectivity factor N

$Suevma1$ = cumulative transpiration in first period (m)
 $Suevma2$ = cumulative transpiration in second period (m)
 $Suflevyn$ = cumulative transpiration during crop growth period in current year (m)
 $Sunhro$ = sum $\text{NH}_4\text{-N}$ in solution in zone with transpiration
 $Suniro$ = sum $\text{NO}_3\text{-N}$ in solution in zone with transpiration
 $Sumoro$ = sum moisture fraction in zone with transpiration

$Tiamro$ = array with Julian day numbers with root mass data
 $Tilnro$ = array of Julian day number for addition of died roots
 $Tiup1$ = transition date between first and second uptake period

$Trcor$ = correction factor if actual cumulative transpiration differs from expected cumulative transpiration

$Upni$ = root uptake of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ ($\text{kg N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$)
 $Upnima1$ = expected cumulative N uptake in first period (kg N ha^{-1})
 $Upnima2$ = expected cumulative N uptake in second period (kg N ha^{-1})

Bijlage 4 Modelconcepten voor stikstoftekort

Deze bijlage geeft resultaten van een beperkte literatuurstudie naar modelconcepten voor stikstoftekort.

Voor het modelleren van het effect van stikstoftekort op gewasgroei zijn vier onderdelen van belang:

- De potentiële stikstofopname van het gewas, op basis van de behoefte van de plant.
- De werkelijke opname van stikstof, op basis van de transportmechanismen van de plant en de beschikbaarheid in de bodem.
- Het bepalen van een reductiefactor voor gewasgroei op basis van de potentiële en de werkelijke opname.
- De effecten van een stikstoftekort op de gewasgroei.

In deze literatuurstudie wordt bekeken hoe deze processen in andere modellen zijn gemodelleerd. Het tweede onderdeel, de werkelijke gewasopname van stikstof, is hierbij buiten beschouwing gelaten, omdat dit proces al gedetailleerd op dagbasis is gemodelleerd in ANIMO. Op dit onderdeel zijn geen aanpassingen nodig om de koppeling tussen de modellen te bewerkstelligen.

Deze literatuurstudie beperkt zicht tot gewasgroei-modellen waarin gewasgroei op dag basis wordt berekend. Ze is grotendeels gebaseerd op een eerdere literatuurstudie, waarin de modellen DAISY, CERES-N, NWHEAT, PAPRAN, Spring Wheat en WAVE beschreven zijn (Westein en Hack-ten Broeke, 1995). Aanvullend hierop is het model LINTUL 3 (Shibu et al., 2010) beschreven.

De gewenste stikstofopname van het gewas

In alle bestudeerde modellen wordt per dag de groei van de biomassa berekend en verdeeld over bladeren, wortels, steel en opslag-organen. In DAISY wordt alleen onderscheid gemaakt in bovengrondse plantendelen, wortels en opslagorganen. Vervolgens wordt voor de individuele onderdelen de totale biomassa, P_{act} (kg OM m⁻²), bepaald. Het maximale stikstofgehalte, N_{max} (kg N kg⁻¹ OM), verschilt voor de verschillende plant-onderdelen en per ontwikkelingsstadium van de plant (Groot, 1987; figuur 3). De gewenste maximale stikstofinhoud van de plant aan het eind van de dag, U_{max} (kg N m⁻²), is gelijk aan de som van de maximale stikstofinhoud van de individuele onderdelen i :

$$U_{max}(t) = \sum_{i=0}^t P_{act,i}(t) \cdot N_{max,i}$$

De stikstofvraag van de plant op dagbasis, U_{dem} (kg N m⁻²), is gedefinieerd als het verschil tussen de maximale stikstofinhoud aan het eind van de dag U_{max} en de actuele stikstofinhoud van de plant aan het begin van de dag, U_{act} (kg N m⁻²):

$$U_{dem}(t) = U_{max}(t) - U_{act}(t_0)$$

In LINTUL 3 is de stikstofvraag van knollen buitengesloten, omdat deze worden voorzien van stikstof door translocatie binnen de plant (Groot, 1987; Shibu et al., 2010). In feite wordt deze stikstofvraag dus overgenomen door andere delen van de plant. De opgenomen stikstof wordt naar ratio van de stikstofvraag verdeeld over de individuele plant onderdelen.

Berekening stikstoftekort

Alle bestudeerde modellen werken met een reductiefactor om de effecten van stikstoftekort op gewasgroei te kwantificeren. Deze reductiefactor wordt berekend aan de hand van de stikstofinhoud van de plant.

Stikstofinhoud

Behalve de maximale stikstofinhoud (U_{max}), worden de kritische stikstofinhoud en de residuele stikstofinhoud, U_{krit} en U_{res} (kg N m^{-2}) onderscheiden. Hierbij is residueel stikstof de stikstof die deel uitmaakt van de celstructuur van de plant en verplaatst kan worden van het ene deel naar het andere deel van de plant. De kritische stikstofinhoud is het niveau waaronder verminderde gewasgroei optreedt. U_{krit} en U_{res} worden op dezelfde manier berekend als U_{max} op basis van respectievelijk het kritische en het residuele stikstofgehalte, N_{krit} en N_{res} (kg N kg^{-1} OM) van de individuele plantonderdelen:

$$U_{krit}(t) = \sum_{t=0}^t P_{act,i}(t) \cdot N_{krit,i}$$

$$U_{res}(t) = \sum_{t=0}^t P_{act,i}(t) \cdot N_{res,i}$$

Niet alle modellen gebruiken de drie referentieniveaus en ze worden ook niet op dezelfde manier bepaald. In alle modellen wordt het maximale stikstofgehalte voor de verschillende plant-onderdelen door de gebruiker opgegeven. In LINTUL 3 wordt het residuele stikstofgehalte van de steel en bladeren ook door de gebruiker opgegeven. Het kritische stikstofgehalte is de helft van het maximale stikstofgehalte (Shibu et al., 2010). In Spring Wheat en NWHEAT is het kritische stikstofgehalte voor de verschillende plantonderdelen gelijk aan het maximale stikstofgehalte. In NWHEAT wordt voor het residuele stikstofgehalte een vaste fractie aangenomen (Groot, 1987). Voor de andere modellen meldt de geraadpleegde literatuur niet hoe het minimale en residuele stikstofgehalte worden bepaald.

Reductiefactor

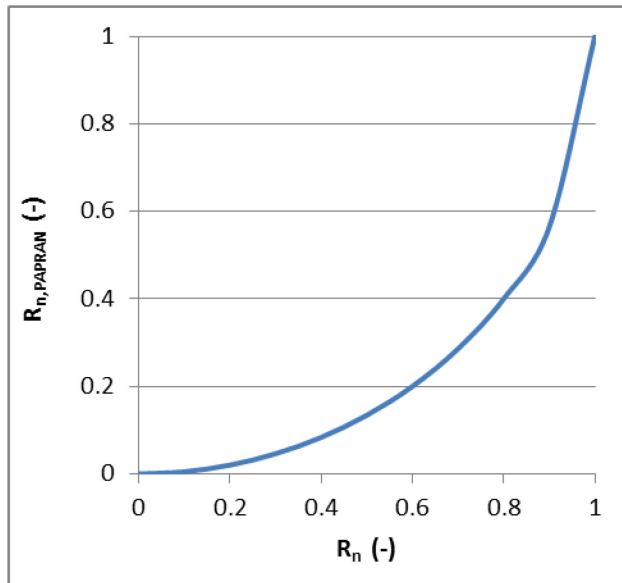
In het algemeen wordt de reductie factor R_n (-) gedefinieerd op basis van het tekort aan 'niet-residuele' stikstof:

$$R_n = \frac{(U_{act} - U_{res})}{(U_{krit} - U_{res})}$$

In DAISY is de reductiefactor gebaseerd op het stikstofgehalte van de gehele plant. In CERES-N en LINTUL 3 wordt de reductiefactor gebaseerd op het stikstofgehalte van alleen de bovengrondse delen. In WAVE wordt de reductiefactor berekend op basis van alleen de bladeren. In NWHEAT (Groot, 1987) wordt de reductiefactor apart berekend voor wortels, bladeren en de steel. In dit model wordt deze reductiefactor echter niet gebruikt voor het effect op biomassa groei, maar voor het effect op onderhoudsrespiratie (zie verder). Ook in PAPRAN is de reductiefactor gebaseerd op de stikstofconcentratie van alleen de bladeren. In dit model wordt hij echter nog aangepast:

$$R_{n,Papran} = 1 - \sqrt{1 - R_n^2}$$

In figuur 1 is het verschil tussen de algemene reductiefactor R_n en de reductiefactor in PAPRAN, $R_{n,PAPRAN}$ (-) weergegeven.



Figuur 18

Algemene reductiefactor R_n versus reductiefactor $R_{n,PAPRAN}$ in PAPRAN.

Effecten op gewasgroei

Bij stikstoftekort kunnen meerdere effecten optreden ten aanzien van gewasgroei. In de meest eenvoudige benadering wordt het effect van stikstoftekort alleen verrekend in de totale groei van de biomassa. In andere modellen is het effect van stikstoftekort apart beschreven voor specifieke onderdelen van de gewasgroei. Volgens Shibu et al. (2010) verschilt de reactie op stikstoftekort per gewas. Sommige gewassen reageren op stikstoftekort met een verminderde groei van LAI, zoals bijvoorbeeld aardappels, terwijl andere gewassen de maximale assimilatiesnelheid verminderen, bijvoorbeeld mais. In andere gewassen, zoals bijvoorbeeld rijst, treden beide effecten op.

In het vervolg worden per model de effecten van stikstoftekort op de gewasgroei beschreven.

DAISY

In DAISY wordt het effect van stikstoftekort doorberekend op de totale groei van de biomassa ΔP_{act} (kg OM $m^{-2} d^{-1}$). De potentiële biomassa groei, ΔP_{pot} (kg OM $m^{-2} d^{-1}$) wordt verminderd door zowel stikstof- als watertekort. Hierbij is R_w (-) de reductiefactor voor watertekort:

$$\Delta P_{act} = \Delta P_{pot} \cdot R_w \cdot R_n$$

WAVE

In WAVE wordt het effect van stikstoftekort ook alleen doorberekend op de totale groei van de biomassa. Hier wordt een keuze gemaakt tussen de reductiefactor voor watertekort of stikstoftekort:

$$\Delta P_{act} = \Delta P_{pot} \cdot \min(R_w, R_n)$$

CERES-N

Ook in CERES-N wordt een keuze gemaakt tussen reductie door watertekort of stikstoftekort. In CERES-N wordt het effect van stikstoftekort op vier manieren doorberekend in de gewasgroei: (1) verminderde fotosynthese; (2) verminderde bladgroei en specifiek voor tarwe (3) toegenomen legering en (4) stikstofophoping in de korrels

PAPRAN

In PAPRAN wordt het effect van een stikstoftekort verrekend in de toename van de biomassa, gelijk aan DAISY. Daarnaast heeft in PAPRAN een stikstoftekort effect op de verdeling van droge stof tussen de bladeren en de stengels. Deze verdeling wordt beschreven door een factor $F_{p,lv}$ (-), de fractie van de droge stof die naar de bladeren gaat in plaats van naar de stengels. Factor $F_{p,lv}$ neemt af van 1 tot 0.5 als de stikstofinhoud in de bladeren afneemt van de kritische stikstofinhoud tot de residuele stikstofinhoud.

SpringWheat en NWHEAT

In SpringWheat en NWHEAT wordt het effect van stikstoftekort doorberekend in de fotosynthese snelheid via de maximale CO₂-assimilatie bij lichtverzadiging, Ass_{max} (kg ha⁻¹ uur⁻¹). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de stikstofinhoud van de bladeren, $U_{act,lv}$ (kg N m⁻²):

$$Ass_{max} = \max(0, 725 * U_{act,lv} - 2,75)$$

Daarnaast wordt in NWHEAT het effect van stikstof op de onderhoudsrespiratie, $Resp$ (kg OM m⁻² d⁻¹), verrekend. De onderhoudsrespiratie levert energie voor het herbouwen van gedegradeerde proteïnen. De potentiële onderhoudsrespiratie, $Resp_{pot}$, is gebaseerd op het maximale stikstofgehalte. Als het stikstofgehalte lager is, vindt minder herbouw van gedegradeerde proteïnen plaats en is de onderhoudsrespiratie lager. De reductie van de onderhoudsrespiratie wordt berekend op basis van het stikstoftekort voor elk deel van de plant afzonderlijk (Groot, 1987):

$$Resp_{act,i} = Resp_{pot,i} \cdot R_{n,i}$$

LINTUL 3

In LINTUL 3 wordt stikstoftekort op vier manieren doorberekend in de gewasgroei. Ten eerste wordt, net als in PAPRAN, de fractie van de biomassa die wordt toegewezen aan de bladeren verminderd:

$$F_{p,lv,act} = F_{p,lv,pot} \cdot R_n$$

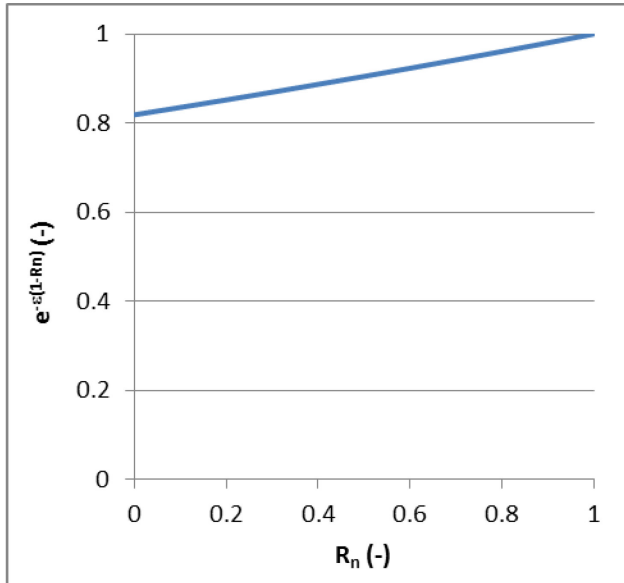
Daarnaast wordt in LINTUL 3 de LAI groei $\frac{dGLAI}{dt}$ (m² blad m⁻² d⁻¹) verminderd, zowel in de exponentiele als in de lineaire groei-fase:

$$\frac{dGLAI}{dt}_{act} = \frac{dGLAI}{dt}_{pot} \cdot R_n$$

De toename van de totale biomassa wordt bepaald door de 'canopy N profiel verdelings-coëfficiënt', ε (-):

$$\Delta P_{act} = \Delta P_{pot} \cdot e^{-\varepsilon \cdot (1-R_n)}$$

De uiteindelijke reductie van de biomassa groei is hierdoor veel kleiner, dan in bijvoorbeeld formule (1). In figuur 2 is het verschil tussen de R_n en $e^{-\varepsilon \cdot (1-R_n)}$ weergegeven.

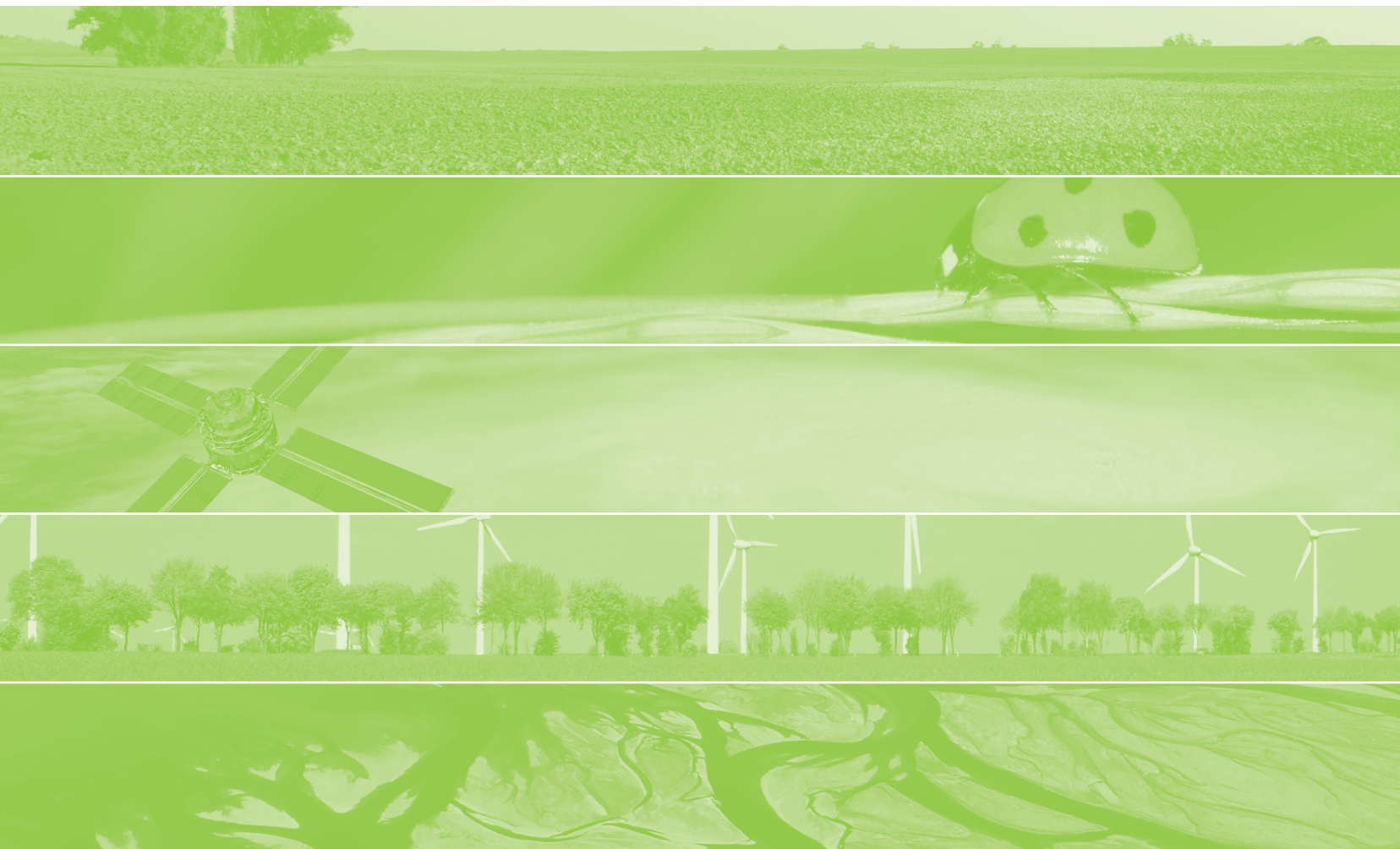


Figuur 19

Reductiefactor R_n versus en de biomassa-groei reductiefactor $e^{-\epsilon(1-R_n)}$ in LINTUL 3.

Tenslotte zorgt stikstoftekort ook voor afsterven van het blad, $\Delta P_{lv,dead,N}$ (kg OM d⁻¹), naast het normale afsterven door veroudering. Hierbij is RDR (d⁻¹) de relatieve afsterfsnelheid van groene bladeren door stikstoftekort:

$$\Delta P_{lv,dead,N} = P_{lv} \cdot RDR \cdot (1 - R_n)$$



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl