



GrasMaïs-Signaal; adviessysteem precisielandbouw melkveehouderij

Haalbaarheidsstudie naar het genereren van opbrengst- en voederwaardekengetallen met
sensoren en modellen voor gras en snijmaïs

I.E. Hoving, C. Kempenaar, S. Heijting, T.H. Been, A.P. Philipsen,
H.C.A. Vlemminx, G.J. Roerink, G.J.F.M. Hermans



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN **UR**

GrasMaïs-Signaal; adviessysteem precisielandbouw melkveehouderij

Haalbaarheidsstudie naar het genereren van opbrengst- en voederwaardekengetallen met sensoren en modellen voor gras en snijmaïs

I.E. Hoving ¹⁾
C. Kempenaar ²⁾
S. Heijting ²⁾
T.H. Been ²⁾
A.P. Philipsen ¹⁾
H.C.A. Vlemminx ⁴⁾
G.J. Roerink ³⁾
G.J.F.M. Hermans ⁴⁾

¹⁾ Wageningen UR Livestock Research

²⁾ Wageningen UR Plant Research International

³⁾ Wageningen UR Alterra

⁴⁾ ZLTO

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen UR Livestock Research, in opdracht van en gefinancierd door de provincie Overijssel, het (voormalige) Productschap Zuivel en de Zuidelijke Land- en Tuinbouw Organisatie (ZLTO).

Wageningen UR Livestock Research
Wageningen, februari 2015

Livestock Research Rapport 842

Hoving I.E., C. Kempenaar, S. Heijting, T. Been, B. Philipsen, R. Vlemminx, G. Roerink en G. Hermans, 2015. *GrasMaïs-Signaal; adviessysteem precisielandbouw melkveehouderij. Haalbaarheidsstudie naar het genereren van opbrengst- en voederwaardekengetallen met sensoren en modellen voor gras en maïs*. Wageningen, Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, Livestock Research Rapport 842.

Samenvatting NL

In dit rapport is een haalbaarheidsonderzoek uitgewerkt naar een integraal adviessysteem voor precisielandbouw betreffende de productie van ruwvoer (gras en maïs) voor de melkveehouderij in Nederland. Technologie is niet beperkend meer om precisielandbouw op belangrijke teeltmaatregelen toe te passen. Het gaat nu om het bewerkstelligen van een effectieve integratie van sensordata, modellen, kengetallen en machines in een integraal adviessysteem en in belangrijke precisielandbouwtoepassingen. Geadviseerd wordt hoe een praktisch adviessysteem voor operationele beslissingen op het melkveebedrijf gerealiseerd kan worden binnen afzienbare tijd (<3 jaar) door integratie van bestaande componenten (data, sensoren en modellen), en hoe dit systeem verbeterd kan worden op de langere termijn door gerichte R&D.

Summary UK

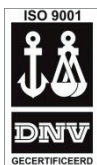
A feasibility study has been worked out for an integrated advisory system for precision agriculture on the production of forage (grass and maize) for dairy farming in the Netherlands. Technology is not restrictive anymore to apply precision agriculture on important cultivation measures. It is now about achieving an effective integration of sensor data, models, metrics and equipment in a comprehensive advice system. It has been advised how a practical advice system for operational decisions can be realized on the dairy farm in the foreseeable future (<3 years) through the integration of existing components (data, sensors and models), and how this system can be improved in the long term through focused R&D.

© 2014 Wageningen UR Livestock Research, Postbus 338, 6700 AH Wageningen, T 0317 48 39 53, E info.livestockresearch@wur.nl, www.wageningenUR.nl/livestockresearch. Livestock Research is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

Afbeelding voorpagina: weergave satellietopname volgens Groenmonitor Alterra (www.groenmonitor.nl).

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

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever of auteur.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op als onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
	Executive summary	12
1	Inleiding	17
2	Visie, eisen en wensen	18
3	Sensoren	20
	3.1 Wat zijn bruikbare sensoren?	20
	3.2 Bodemsensoren	22
	3.2.1 Geleidbaarheid en straling als maat voor bodemeigenschappen	23
	3.2.2 Veris systeem	23
	3.2.3 Dualem systeem	24
	3.2.4 Gamma straling als maat voor textuur en organisch stof	25
	3.2.5 Sensoren voor bepaling van bodemvocht	26
	3.2.6 Bodemverdichting	27
	3.3 Gewassensensoren	27
	3.3.1 Biomassa sensing vanuit satellieten en drones	28
	3.3.2 Biomassa sensing met proximal sensoren	32
	3.3.3 Grashoogte meten	34
	3.3.4 Ontwikkelingen geavanceerde camera's	35
	3.3.5 Sensing van kwaliteitsparameters	36
	3.4 Klimaatsensoren	37
	3.4.1 Sensoren op het bedrijf	37
	3.5 Meteo-data van het KNMI/meteoconsult	38
	3.6 Beweiding	38
	3.6.1 Accelerometer of versnellingsopnemer	38
	3.6.2 Halster met drukopnemer	39
	3.6.3 Halsband met microfoon	39
4	Modellen	41
	4.1 Wat zijn bruikbare modellen?	41
	4.2 Hydrologie	43
	4.2.1 SWAP	43
	4.2.2 MetaSWAP	45
	4.2.3 SEBAL	45
	4.2.4 BeregeningsWijzer	47
	4.3 Gewasgroei	48
	4.3.1 WOFOST	48
	4.3.2 GRAMIN	50
	4.3.3 GRAS2007	50
	4.3.4 CNGRAS	51
	4.3.5 LINTUL	51
	4.4 Nutriënten	52
	4.4.1 Animo	52
	4.4.2 Modellen organische stof en mineralisatie	54
	4.5 Meervoudige modellen	57
	4.5.1 BBPR	57

4.5.2	SWAP-WOFOST	58
4.5.3	Waterpas	59
4.5.4	SIMGRO	60
4.5.5	GraslandgebruiksWijzer	62
4.5.6	BeregeningsSignaal	63
4.5.7	Adviesbasis bemesting en voedergewassen	64
5	Analyse	66
5.1	Algemeen	66
5.2	Gewenste toepassing – droombeeld	66
5.3	Behoeft managementinformatie ondernemer	67
5.4	Koppelingen datastromen tot modules	68
5.5	Realisatie modules en adviessysteem	71
6	Haalbaarheid en advies	75
6.1	Haalbaarheid	75
6.2	Advies	81
7	Conclusies	83
	Literatuur	85
	Bijlage 1 Visie, eisen en wensen	90
	Bijlage 2 Teeltkalenders blijvend grasland en snijmaïs	95
	Bijlage 3 Bodemfactoren	97
	Bijlage 4 Overzicht informatiebehoefte, tools en sensoren	100

Woord vooraf

Het voorliggende rapport is het resultaat van een haalbaarheidsstudie die is uitgevoerd in het kader van het project 'Satellietbeelden van het gras- en maïslandmanagement' en dat als werktitel 'GrasMaïs-Signaal' heeft meegekregen. Remote sensing met satellietsensoren gaat een steeds belangrijkere rol spelen in de informatievoorziening en is een belangrijke aanleiding geweest voor het initiëren van het betreffende project. Daarnaast gaat near sensing met specifieke sensoren op het bedrijf ook bijdragen aan de informatievoorziening. De technische innovatie die dit project voorstaat, moet een impuls geven aan de melkveehouderijsector. De innovatie betreft het combineren van diverse datastromen waaronder sensorsystemen en modellen om teelt- en voedingstechnische kengetallen voor gras en snijmaïs te genereren. Dit moet leiden tot een praktisch adviessysteem die melkveehouders van de gewenste informatie voorziet, zodat zij beter zicht hebben op de actuele productie en kwaliteit van hun ruwvoer. Dit helpt om de productiviteit te verhogen en om de verliezen te verkleinen. Dit komt ten goede aan het economisch bedrijfsresultaat en draagt bij aan het verduurzamen van de bedrijfsvoering.

De opdrachtgevers van deze haalbaarheidsstudie zijn de provincie Overijssel, het (voormalige) Productschap Zuivel en de Zuidelijke Land- en Tuinbouw Organisatie (ZLTO). Het beoogde vervolg van dit project betreft, bij een positieve beoordeling van de haalbaarheid, het opstellen van een plan van aanpak voor de ontwikkeling en de implementatie van het gewenste adviessysteem. Voor het inventariseren van de eisen en wensen waar het gebruik van sensoren en modellen toe moet leiden, is gebruik gemaakt van een klankbordgroep van melkveehouders en loonwerkers uit Noord-Brabant, Overijssel en de Noordoostpolder. Tevens is met hen het eindbeeld van het adviessysteem getoetst. Hun bijdrage is erg zinvol geweest, waarvoor veel dank.

Dit rapport geeft enerzijds een actueel overzicht van alle beschikbare sensoren en modellen en anderzijds een analyse van hoe de verschillende datastromen gecombineerd kunnen worden tot een adviessysteem. Hierbij is het integreren van verschillende kennisvelden, zoals klimaat, bodem, hydrologie, gewasgroei en graslandgebruik, een belangrijk aspect. Elke stap die hierin wordt gemaakt is vernieuwend en draagt bij aan de beoogde impuls aan de melkveehouderijsector!

Dr. ir. B.G. Meerburg
Afdelingshoofd Veehouderij en omgeving, Wageningen UR Livestock Research

Samenvatting

Doel

Het doel van dit rapport is de haalbaarheid te onderzoeken voor de korte en (middel)lange termijn van een integraal adviessysteem voor precisielandbouw aangaande de productie van ruwvoer (gras en maïs) op melkveehouderijbedrijven in Nederland. Op basis van deze haalbaarheidsstudie wordt een advies gegeven hoe een praktisch adviessysteem voor operationele beslissingen gerealiseerd kan worden binnen afzienbare tijd (<3 jaar) door integratie van bestaande componenten (data, sensoren en modellen), en hoe dit systeem verbeterd kan worden op de langere termijn door aanvullende R&D. De kern van het advies staat in Tabel 1.1 van deze managementsamenvatting.

Achtergrond

Precisielandbouw is een vorm van landbouw waar gewasplanten een zo nauwkeurig mogelijke behandeling krijgen die ze nodig hebben, op het juiste moment en op een zo klein mogelijke schaal, om binnen bedrijfseconomische, milieu- en maatschappelijke randvoorwaarden de gewasopbrengst te maximaliseren. De interesse voor precisielandbouw vanuit de landbouwpraktijk is de afgelopen jaren sterk toegenomen, vooral in de grootschalige akkerbouw. Dankzij de beschikbaarheid en/of het gebruik van nieuwe technologieën als plaatsbepalingssystemen (GPS), bodem-, gewas- en opbrengstsensoren, nieuwe ICT (internet-platforms, smart phones, Apps), en autonome voertuigen, komt integrale toepassing van de precisielandbouw als managementvorm dichtbij. Op dit moment is de technologie niet beperkend om precisielandbouw op belangrijke teeltmaatregelen toe te passen, althans precisielandbouw op een schaalniveau van 10 bij 10 m. Het gaat nu om het bewerkstelligen van een effectieve integratie van sensordata, modellen, kengetallen en machines in een operationeel en integraal adviessysteem voor precisielandbouw in gras en maïs op melkveebedrijven. De voordelen van precisielandbouw zijn lagere input van meststoffen, water, middelen en arbeid, hogere gewasopbrengsten en minder belasting van mens en milieu. Tot op heden worden deze voordelen in de ruwvoerproductie nog zeer beperkt gerealiseerd, zeker in vergelijking met ontwikkelingen in de akkerbouw. Loonwerkers die de teelt- en oogst van gras en maïs verzorgen, hebben vaak wel GPS en soms ook oogstsensoren, maar benutten niet of nauwelijks de mogelijkheden hiervan voor precisielandbouw. De aanleiding voor dit rapport is dat de auteurs en opdrachtgevers kansen zien om met precisielandbouw de gras- en maïsproductie in Nederland ecologisch en economisch verder te verduurzamen.

Wensen, eisen en visie van eindgebruikers

De resultaten in dit rapport zijn gebaseerd op het in kaart brengen van visies, eisen en wensen van de eindgebruikers (inventarisatie binnen klankbordgroep loonwerkers en melkveehouders uit Noord-Brabant, Overijssel en Noordoostpolder) van het integrale adviessysteem voor precisielandbouw in ruwvoerproductie en een literatuuronderzoek van (bruikbare) sensortechnologie en modellen. Op basis van de analyse van deze gegevens wordt een beschrijving gegeven van hoe een modulair opgezet adviessysteem er uit kan zien, dat als basis kan dienen voor implementatie van precisielandbouw in de ruwvoerproductie in Nederland. Vervolgens wordt aangegeven hoe de benodigde modules gerealiseerd kunnen worden, en met welke aanvullende inspanningen binnen 10 jaar aan alle wensen van de eindgebruikers voldaan kan worden.

Het droombeeld van de klankbordgroep is:

'Een operationeel adviessysteem dat melkveehouders helpt om binnen gestelde bedrijfseconomische, milieu en maatschappelijke randvoorwaarden de ruwvoeropbrengst te maximaliseren en om de ruwvoerwaliteit op minimaal perceelniveau te optimaliseren'.

Volgens de klankbordgroep zijn de volgende stappen daarbij essentieel: (1) van advies op bedrijfsniveau naar perceelniveau en pleksgewijs, (2) van advies op jaarbasis naar dagbasis,

en (3) van metingen achteraf naar actuele en voorspellende metingen. De klankbörgroep benoemde een zevental sleutelinnovaties:

1. Bepaling (meten) van de actuele grasopbrengst en voederwaarde;
2. Voorspelling van de grasopbrengst en voederwaarde voor de weersverwachtingstermijn (3-15 dagen);
3. Voorspelling van de maïsoopbrengst en voederwaarde voor de lange termijn (1-3 maanden);
4. Meten van factoren die de actuele groeiomstandigheden weergeven, zoals bodemtemperatuur, bodemvocht, nutriënten
5. Modelmatige koppeling van factoren die gewasgroei bepalen, zoals bodem, waterhuishouding, nutriënten en weer;
6. Gecombineerd adviessysteem waarbij op één overzicht teelt- attenties worden gegeven met een hoge betrouwbaarheid;
7. Advies tenminste per perceel en zo mogelijk per grid.

De technologie- en informatiebehoefte is daarbij in kaart gebracht en weergegeven in hoofdstuk 2 in teeltkalenders (Figuur 2.1) en een stroomschema (Figuur 2.2). Deze behoeftes zijn de basis zijn voor het integraal adviessysteem voor operationele beslissingen bij ruwvoerproductie in Nederland.

Sensoren en data

Precisielandbouw kan niet zonder actuele, met sensoren verkregen data van bodem, gewas, dier en klimaat. Een breed overzicht van praktijkrijpe of in ontwikkeling zijnde sensortechnologie staat samengevat in hoofdstuk 3 Tabel 3.1. De sensoren zijn beoordeeld op technologische rijpheid, gebruik in de praktijk, betrouwbaarheid en kosten-baten informatie. De beschikbaarheid van sensoren die data over toestand van bodem (zoals organische stof, pH, lutum, bodemvocht), gewas (bovengrondse biomassa, stikstof in het gewas, fysieke opbrengst), dier en klimaat kunnen leveren, is niet beperkend voor het optuigen van het gewenste basis adviessysteem. Sensortechnologie waarmee belangrijke gewasstadia, biologische stress (ziekten, plagen, onkruiden), voedingswaarde van geoogst product, en nutriëntengehalten in vloeibare mest gemeten kan worden, is nu nog niet ver genoeg ontwikkeld voor gebruik in een adviessysteem. Dit is echter niet beperkend om nu al te starten met implementatie van een basis adviessysteem.

Modellen

Modellen zijn nodig voor interpretatie van de sensordata en voor het maken van de operationele precisielandbouwadviezen. Een overzicht van relevante landbouwkundige modellen op de onderwerpen hydrologie, gewasgroei, nutriënten, beweiding en bedrijfseconomie modellen, en specifieke adviesmodules, staat samengevat in hoofdstuk 4 in Tabel 4.1. De modellen en modules zijn beoordeeld op toepasbaarheid voor operationele adviezen, beschikbaarheid, gebruik in de praktijk, informatiebehoefte en betrouwbaarheid. Het aanbod aan modellen en modules is breed genoeg om te starten met een basis adviesmodule. Het gaat hier vooral om hydrologische, gewasgroei, nutriënten en bedrijfseconomische modellen.

Analyse

De analyse (hoofdstuk 5) in het onderzoek was gericht op het kunnen inschatten of het droombeeld van de klankbörgroep (het operationele adviessysteem met minstens zeven sleutelinnovaties) gerealiseerd kan worden met thans beschikbare sensoren en modellen. Een basis adviessysteem voor precisielandbouw bestaande uit vijf modules volstaat om het droombeeld van de klankbörgroep te realiseren, en kan voor gerealiseerd worden door een integrale koppeling van bestaande componenten. Deze modules (met toelichting), zijn:

-
1. Bodemvocht (geeft actuele vochttoestand en voorspelling beschikbaar vocht);
 2. Bemesting (geeft bemestingstoestand van de bodem en beschikbaarheid van meststoffen);
 3. Graslandgebruik (geeft actuele opbrengst en optimalisatie van het oogstmoment);
 4. Groei en voederwaarde (geeft actuele productie en voorspelling groei en voederwaarde);
 5. Nutriëntenbalans (houdt bij hoeveel mest is er gegeven en hoeveel product is er geoogst).

De behoefte aan een onderdeel voederwaarde en gewaskwaliteit is voor de klankbordgroep wel zeer gewenst, maar kan op korte termijn nog niet ingevuld worden. Een module die gegevens over biologische stress en opbrengstverlies door ziekten, plagen en onkruiden levert, is op aangeven door de klankbordgroep niet geprioriteerd omdat biologische stress een relatief klein effect heeft op opbrengst van gras en maïs bij het huidige management (milieu-technisch gezien zou de prioritering anders kunnen uitvallen, in bepaalde regio's in Nederland is reductie van de emissie van gewasbeschermingsmiddelen een belangrijk thema). De vijf modules worden bij voorkeur ontwikkeld als web-based services die als App op te roepen zijn in een internet-platform dat GEO-tools heeft om percelen en variatie daarbinnen in kaart te brengen. Het Akkerweb-platform is hiervoor een goed alternatief waarmee een vliegende start gemaakt kan worden.

Ontwikkelperspectief

Het ontwikkelperspectief (hoofdstuk 6) van de benodigde vijf modules voor het adviessysteem staat samengevat in onderstaande Tabel 1.1. Uit onze analyse blijkt dat binnen 3 jaar een basis adviessysteem gerealiseerd kan worden waarmee voor gras- en maïs op basis van data over bodemvocht, nutriënten en groei opbrengstvoorspelling gedaan kan worden, bedrijfseconomische berekeningen gedaan kunnen worden en precisielandbouwadviezen gegeven kunnen worden. Het adviessysteem kan op termijn verbeterd worden door toevoeging van sensortechnologie die data over de kwaliteit van geoogst product, gewasstadia, biologische stress, diergedrag in de wei (alleen voor weides met begrazing) en specifieke bodemeigenschappen leveren, maar hiervoor is verdiepend onderzoek nodig. Daarbij wordt in Tabel 1.1 aangeven welke uitbreiding binnen 3-7 jaar gerealiseerd kan worden en waarbij naar verwachting de ontwikkeling van meer tijd kost. De onderbouwing van het ontwikkelingsperspectief in Tabel 1.1 staat in hoofdstuk 6 in de Tabellen 6.1 (sensoren), 6.2 (modellen), 6.3 (componenten van modules) en 6.5 (benodigde R&D om specifieke sensoren beschikbaar te krijgen).

Tabel 1.1

Ontwikkelingsperspectieven per module per termijn, binnen beoogd integraal adviessysteem.

Modules	Gras/maïs	Korte termijn 1-3 jaar	Middellange termijn 3-7 jaar	Lange termijn > 7 jaar
Bodemvocht	Gras/maïs	Wordt in basis toegepast in BeregeningsSignaal. Koppeling met sensoren bodemvocht (tensio) en meting grondwaterstand (divers). Uitbreiding model voor draagkracht.	Koppeling met remote sensing (NDVI). Verbeteren en uitbreiden relaties bodemvocht en draagkracht. Koppeling model grondwaterstands-verloop.	Koppeling met radar om vochtinhoud bovengrond te meten.
Bemesting	Gras/maïs	Bemestingsadvies is reeds beschikbaar via bedrijfsmanagement tools. Deze koppelen aan data analyses. Optimalisatie meststoffengebruik en berekenen van organische stofbalans. Berekening van N-mineralisatie.	Koppeling data sensoren betreffende nutriënten drijfmest met NIRS.	Koppeling met data sensoren voor bepalen elementen in de bovengrond.
Graslandgebruik	Gras	GraslandGebruiksWijzer (planning) koppelen aan bestaande bedrijfsmanagement tools.	Koppeling real time data weidegang (stappenteller).	Koppeling real time data daadwerkelijke grasopname koeien
Groei	Gras	Model Gras2007 is robuust en praktijkrijp. Koppeling maken met modules bodemvocht, bemesting en graslandgebruik. Koppeling met data (hoogtemetingen).	Koppeling met metingen remote sensing voor opbrengstmeting (NDVI).	Koppeling sensoren die voederwaarde bepalen (NIRS).
	Maïs	Groeimodel voor maïs is beschikbaar. Koppeling maken met modules bodemvocht en bemesting.	Koppeling met metingen remote sensing voor opbrengstmeting (NDVI).	Koppeling sensoren die voederwaarde bepalen (NIRS).
Nutriëntenbalans	Gras	Voor voorspelling gebruik maken van modules grasgroei, bemesting en graslandgebruik.	Voor gerealiseerde balans input sensoren meting hoeveelheid en inhoud (kunst)mestgift en eendoogst bij maaïen.	Koppeling real time data daadwerkelijke grasopname koeien.
	Maïs	Voor voorspelling gebruik maken van modules maïsgroei en bemesting.	Koppeling input sensoren meting hoeveelheid en inhoud (kunst)mestgift en eendoogst.	

Advies en aanbevelingen

Op basis van de haalbaarheidsstudie komen we tot de conclusie dat een basis adviessysteem voor integrale toepassing van precisielandbouw als managementvorm bij de productie van ruwvoer in Nederland binnen afzienbare tijd mogelijk is (conclusies in hoofdstuk 7). De signalen van voorlopers en de klankbordgroep bij dit project geven ook aan dat het logisch en mogelijk is om een volgende

stap naar concreetheid te maken. Om de realisatie van het adviessysteem te bespoedigen, bevelen wij twee sporen aan:

1. Een gecoördineerde ontwikkeling van het basis adviessysteem door thans beschikbare componenten te implementeren en te testen onder praktijkomstandigheden. Dit kan door in een aantal relevante regio's in Nederland (één implementatie- en demonstratiebedrijf per regio, bijv. 4 regio's) de componenten van het adviessysteem softwarematig bij elkaar te brengen in een internetplatform, het gebruik ervan te monitoren gedurende ca. 2 groeiseizoenen, modules te valideren en zo nodig bij te stellen. In jaar 3 zou het systeem dan gedemonstreerd kunnen worden;
2. Om het basis adviessysteem te kunnen verbreden na 3 jaar, is aanvullend onderzoek op enkele thema's nodig, om hiermee de gewenste sensortechnologie voor specifieke (kwaliteits-)data te ontwikkelen en integreren. Dit zal een verdere boost geven aan het gebruik van het adviessysteem in de praktijk en bijdragen aan beter bedrijfsresultaat en minder milieubelasting. Voor de ontwikkelvraagstukken die met de lange termijn te maken hebben, is het advies om aansluiting te zoeken bij fundamentele onderzoeksprogramma's. Een aantal middellange termijn (3-7 jaar) ontwikkelvraagstukken kan met gerichte R&D-projecten zonder al te veel risico's gerealiseerd worden, daar deze berusten op concepten die elders al hun meerwaarde getoond hebben.

De ontwikkeling van het adviessysteem heeft naast het praktische werk een stuurgroep of andere organisatievorm die waakt en stuurt over aandachtspunten die te maken hebben met open data beleid, kwaliteit en eigendom van data, brede toegankelijkheid van het systeem voor aanbieders van data en diensten, nieuwe verdienmodellen, privacy van data-eigenaren, en implementatie van het adviessysteem in onderwijs.

Tot slot

Voor de concrete uitwerking van de ontwikkeling, implementatie en validatie van het integrale adviessysteem op basis van dit haalbaarheidsonderzoek, adviseren wij een plan van aanpak op te stellen. Hierin moeten de organisatie, technische uitvoering en kosten inzichtelijk worden. Op basis daarvan kunnen potentiële opdrachtgevers een duidelijke keuze maken over kosten, baten en verwachte realisatie tijd. Daarmee kan een belangrijke bijdrage geleverd worden aan het droombeeld 'Een operationeel adviessysteem dat melkveehouders helpt om binnen gestelde bedrijfseconomische, milieu en maatschappelijke randvoorwaarden de ruwvoeropbrengst te maximaliseren en om de ruwvoer kwaliteit op minimaal perceelniveau te optimaliseren'; van advies op bedrijfsniveau naar perceelniveau en pleksgewijs, van advies op jaarbasis naar dagbasis, en van metingen achteraf naar actuele en voorspellende metingen.

Executive summary

Objective

The objective of the study is to investigate the short and (medium) long term feasibility of an precision farming advisory system for production of grass and maize fodder on dairy farms in the Netherlands. The results are used to give recommendations on how a practical advice system for operational decisions can be realized in the near future (within 3 years) through the integration of existing components (data, sensors and models), and how this system can be improved in the long term by additional R&D. The core of the advice is given in Table 1.1 of this executive summary.

Background

Precision farming is a management concept where crop plants get the most accurate treatment they need, at the right time and at the smallest possible scale, in order to maximize the crop yield within economic, environmental and social constraints. The interest in precision agriculture has increased in recent years, especially on large arable farms. The wide availability of several new technologies, such as global positioning systems (GPS), soil, crop and yield sensors, new ICT (internet platforms, smartphones, Apps), and autonomous vehicles, is a good basis for development and implementation of precision agriculture measures on farms. Currently, technology is not restrictive to apply precision farming measures on a scale of 10 to 10 m. Next steps are about achieving effective integration of sensor data, models, key figures and machines in an operational and integral advisory system for precision in grass and corn on dairy farms. Benefits of precision agriculture are lower input of fertilizers, water, labor and resources, higher crop yields and less adverse effects on people and the environment. To date, these advantages in fodder production are still hardly captured, especially in comparison with developments in arable farming. Agricultural contractors, who do the cultivation and harvesting of grass and corn, often have GPS and sometimes crop sensors, but hardly exploit their potential for precision agriculture. The reason for this report is that the authors and the ordering parties (Dutch dairy board ZuivelNL and the board of the province of Overijssel) see good opportunities to increase sustainability of grass and maize production in the Netherlands with precision farming.

End user requirements

The results in this report are based on opinions, wishes and constraints mentioned by end users of the advisory system to be developed. We did an inventory within a focus group of more than 20 contractors and farmers in North Brabant, Overijssel and Northeast. The focus group is the advisory board of the project. We also did a literature review on sensor technology and models. Based on the analysis of these data, we describe how a modular based advice system may look like. This blueprint can serve as a basis for the implementation of precision agriculture in the fodder production in the Netherlands. It shows how the modules can be realized, and what additional R&D is needed in the coming 10 years to meet all end users wishes.

The general wish of the focus group is:

"An operational advisory system that helps farmers within economic, environmental and social constraints to maximize fodder yields and quality, at least at individual field level, and, if possible, site-specifically within fields."

According to the focus group, the following shifts in the advisory system are needed: (1) a shift in advice from farm level to individual field level to field grids level, (2) advice from an annual basis to a daily basis, and (3) a shift from measurements afterwards to check operations to measurements upfront with predictive value.

The focus group mentioned seven key innovations:

1. Determination of the actual grass yield and nutritional value;
2. Prediction of the grass yield and nutritional value for the weather forecast period (3-15 days);
3. Prediction of the maize yield and nutritional value for the long term (1-3 months);
4. Measurement of actual growth conditions, such as soil temperature, soil moisture, nutrients;
5. Modelling of factors that determine crop growth, such as soil, water management, nutrient and weather;
6. An integral advice system which gives at a glance robust cultivation attentions with high reliability;
7. Advices at least per field and, if possible, by within field grids of ca 10 by 10 m.

Technology and information needs is presented in Chapter 2 of this report in crop calendars (Figure 2.1) and in a flow diagram (Figure 2.2). These requirements are the basis for the comprehensive advice system for operational decisions in fodder production in the Netherlands.

Sensors and data

Precision farming relies on use of sensor data on soil, plant, animal and environmental conditions. A broad overview of currently available and innovative sensor technology is summarized in Table 3.1 in Chapter 3. The sensors are rated on technological maturity, practical use, reliability and cost-effectiveness. We conclude that a basic advisory system for precision farming can be made with currently available sensors that can measure soil (e.g. soil organic matter, pH, clay, soil moisture), crop (aboveground biomass, nitrogen in the crop yield) climate and animal behavior parameters. Sensors that can measure important crop stages, biological stress (diseases, pests, weeds), nutritional value of harvested product, and nutrient levels in organic manure, are not yet mature for use in practice in an advisory system. However, this is not limiting to already start with the implementation of a basic advice system.

Models

Models are needed for interpretation of the sensor data, and for making the operational advices on precision farming. An overview of relevant agricultural models on the subjects of hydrology, crop growth, nutrients, grazing and farm economics, and specific advice modules, is presented in Table 4.1 in Chapter 4. The models and modules are rated on suitability for operational advice, availability, use in practice, and reliability. We conclude that the availability of models and modules is not limiting for the development of the basic advisory system. This advisory system mainly involves hydrological, crop growth, nutrients and business models.

Analysis

The end user requirements and the literature study on models and sensors were input for the analysis (Chapter 5, Figure 5.4) whether or not an operational advice system with at least seven key innovations is feasible within 3 years. We conclude that a basic advice system for precision consisting of five modules is sufficient to realize the wishes of the advisory board, and may be realized by an integral linking of existing components. These five modules (with notes) are:

1. Soil moisture module (displays current moisture status and forecasting available moisture);
2. Fertilizer application module (gives fertilizing the soil condition and availability of fertilizers);
3. Grassland use module (gives current yield and optimization of the harvest time);
4. Growth and nutritional value module (provides current and forecast production growth and nutritive value);
5. Nutrient balance module (keeps track of how much fertilizer is given and how much product is harvested).

The need for a nutritional value and crop quality component in the advisory system is very desirable, but cannot be made without additional fundamental research. A module that provides data on biological stress and yield losses due to diseases, pests and weeds, is indicated by the advisory board but not prioritized because biological stress has a relatively small effect on yield of grass and corn

under current management conditions (from an environmental point of view, this module probably would be prioritized; in some regions in the Netherlands reduction of emission of pesticides is an important theme). The five modules are preferably designed as web-based services and/or Apps on an internet platform that has GEO tools to visualize within field variation. The Akkerweb platform (www.akkerweb.nl) can serve as such a platform.

Outlook

The development perspective (Chapter 6) of the five modules for the basic advice system is summarized in Table 1.1. We estimate that within 3 years, a prototype of basic advice system with the five modules can be realized. The system combines data on soil moisture, nutrients and crop growth with economic models in order to keep track of field specific forage production and to apply operational precision farming measures such as site specific fertilizer use and irrigation. The advice system may be improved over time by adding sensor technology that provides data on the quality of harvested product, crop stages, biological stress, animal behavior in the meadow (for pastures with grazing only) and specific soil properties, but requires in-depth research. In addition, Table 1.1 indicates the extension of the system that may be achieved within 3-7 years. The underpinning of the development perspective is given in the Tables 6.1 (sensors), 6.2 (models), 6.3 (components of modules) and 6.5 (required R & D to get specific sensors available).

Table 1.1

Development perspectives per module per term, within envisaged integral advice system.

Modules	Grass/maize	Short term 1-3 year	Medium term 3-7 year	Long term > 7 year
Soil moisture	Grass/maize	In base used in Irrigation Signal. Coupling with soil moisture sensors (tensio) and measurement of groundwater (divers). Expansion model for sward baring capacity.	Coupling with remote sensing (NDVI). Improving and expanding relationships soil moisture and baring capacity. Coupling with modelling groundwater course.	Coupling with radar to measure moisture content of topsoil.
Manuring	Grass/maize	Fertilization is already available through business management tools. Linking this with data analysis. Optimizing fertilizer use and calculation of organic matter balance. Calculation of N-mineralization.	Coupling with data sensors on nutrient slurry with NIRS.	Coupling with data sensors for determining elements in the topsoil.
Grassland use	Grass	Grassland Use Indicator (planning) connect to existing farm management tools.	Coupling with real time data grazing (pedometer).	Coupling real-time data recording actual grass uptake by cows.
Growth	Grass	Model Gras2007 is robust and ready for practice. Pairing with modules soil moisture, fertilization and pasture use. Coupling with data (grass height).	Coupling with remote sensing measurements for yield measurement (NDVI).	Coupling with sensors that determine nutritional value (NIRS)
	Maize	Growth model for corn is available. Coupling with modules soil moisture and fertilization.	Coupling with remote sensing measurements for yield measurement (NDVI).	Coupling with sensors that determine nutritional value (NIRS).
Nutrient balance	Grass	For prediction making use of modules grass growth, fertilization and pasture use.	For realized balance input sensors measuring quantity and content (art) manure and final harvest by mowing.	Coupling with real time data recording actual grass uptake cows.
	Maize	For prediction use modules corn growth and fertilization.	Coupling with input sensors measuring quantity and content manure use and final harvest.	

Advice and recommendations

Based on the feasibility study, we conclude that a basic advisory system for full application of precision agriculture as a management form in the production of forage in the Netherlands is possible within the foreseeable future (conclusions in Chapter 7). This conclusion is confirmed by comments of precision farming pioneers and members of the advisory board of this project. In order to accelerate the

realization of the basic advisory system, we recommend two tracks:

1. A coordinated development of the basic advice system with currently available components, and to implement and test it under practical conditions. This can be done in a number of relevant regions in the Netherlands (one deployment and demonstration farm per region, eg. four regions), by bringing together on these farms the components of the advisory system software on an internet platform. Use of the system should be monitored during approximately two growing seasons, to validate and, if necessary, to adjust. After year 3, the system may then be demonstrated to end users;
2. To be able to broaden the basic advice system after 3 years, additional research is needed on some themes. Development of specific sensors (forage quality) and tools for data integration is required. This will give a further boost to the use of the advisory system in practice and contribute to improved business performance and lower environmental impact. For the development issues related to the long-term, it is advised to seek an alliance with fundamental research programs. A number of medium-term (3-7 years) development challenges may be targeted in R&D projects without too many risks of failure, because they have shown their added value already elsewhere.

The development of the advisory system needs alongside the practical work a steering group or other organization that gives guidance for the open data policy, quality and ownership of data, wide accessibility of the system to providers of data and services, new business models, privacy of data owners, and implementation of the advisory system in education.

Concluding remarks

For the practical implementation of the development, implementation and validation of the integrated advisory system based on this feasibility study, we recommend to prepare a detailed description of the required next steps. Herein, the organization, technical implementation and costs of the system are made transparent. It allows stakeholders and end users to make a clear choice about costs, benefits and expected completion time of the system. We believe that with the basic advisory, an important contribution can be made to the focus group dream "An operational advisory system that helps farmers within economic, environmental and social constraints to maximize fodder yields and quality, at least at individual field level, and, if possible, site-specifically within fields."

1 Inleiding

De technologische ontwikkeling op het gebied van sensoren ten behoeve van de landbouw gaan steeds verder. De intrede van precisielandbouw is voor wat betreft teeltondersteuning in grondgebonden landbouw voor de akkerbouw en vollegronds groenteteelt verder dan in de melkveehouderij. Dit komt voornamelijk omdat in de melkveehouderij het grootste deel van het bedrijfsareaal uit blijvend grasland bestaat en dit onderdeel is van aan totaal bedrijfssysteem. Gras wordt in meerdere sneden geoogst, waarbij zowel gemaaid als geweid wordt. Vooral door weidegang hebben melkveehouders weinig of geen zicht op de uiteindelijke opbrengst van een snede. Tegelijk gaan veel veehouders zich nog meer concentreren op het diermanagement als gevolg van schaalvergroting. Dit terwijl aandacht voor ruwvoerproductie essentieel is voor behoud van bedrijfsrendement en een verdere verduurzaming van het nutriëntengebruik .

Precisielandbouw biedt voor de melkveehouderij de kans om verder te ontwikkelen richting een duurzame bedrijfsvoering. Met behulp van precisielandbouw kan efficiënter omgegaan worden met mineralen (m.n. stikstof, fosfaat, kali) en water. Efficiënt en effectief omgaan met mineralen en water is zowel positief voor de landbouw, als voor het milieu; een betere benutting betekent minder emissies richting water en atmosfeer. Sensorsystemen genereren steeds betere kwantiteits- en kwaliteitsparameters voor biomassa. Door te investeren in de ontwikkeling van precisielandbouw kan op termijn de opbrengst- en voederwaarde worden gemeten en voorspelt op perceelsniveau, zo mogelijk ook bij toepassing van weidegang. Dit inzicht geeft naar verwachting een aanzienlijke efficiëntie verbetering. Geschat wordt dat opbrengstverhoging 10 à 15% bedraagt bij dezelfde input (vocht en nutriënten).

In Nederland bestaat anno 2014 het merendeel van het landbouwareaal uit gras en maïs (Bron; CBS). Door het grote beslag op het landbouwareaal en het economisch belang van de melkveesector, heeft een efficiëntievergroting een grote impact en dat maakt het investeren in precisielandbouw interessant. De uitdaging is om de diverse datastromen zodanig te combineren dat dit in de gewenste informatiebehoefte van de veehouder voorziet. Daarbij moet de informatie gemakkelijk toegankelijk en praktisch te interpreteren zijn. Te denken valt aan een computerprogramma dat data vertaald in concrete adviezen; een adviesstelsel voor het dagelijkse management van de teelt van gras- en maïs.

In het kader van het project GrasMais-Signaal is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd met als doel het verkrijgen van inzicht in het gebruik van sensoren en modellen om de opbrengst en kwaliteit van ruwvoer te voorspellen. Het te ontwikkelen adviesstelsel combineert verschillende datastromen, echter deze vertegenwoordigen verschillende kennisvelden, zoals klimaat, bodem, hydrologie, gewasgroei en graslandgebruik. Een integratie van de verschillende kennisvelden is zodoende een vereiste. Modellen die de verschillende kennisvelden vertegenwoordigen spelen hier een belangrijke rol in, zeker als het gaat om het voorspellen van opbrengst en kwaliteit.

Om de gewenste informatiebehoefte van melkveehouders in beeld te krijgen zijn de eisen & wensen geïnventariseerd bij een klankbordgroep van melkveehouders en loonwerkers (Hoofdstuk 2). Daarbij is een inventarisatie uitgevoerd van de huidige stand der techniek van de sensorsystemen (Hoofdstuk 3) en van de beschikbare modellen die verschillende kennisvelden vertegenwoordigen (Hoofdstuk 4). Op basis van deze inventarisaties is geanalyseerd hoe de verschillende datastromen bij elkaar gebracht kunnen worden tot modules (hoofdstuk 5). Tot slot is de haalbaarheid van het realiseren van het beoogde adviesstelsel uitgewerkt en wordt een advies gegeven over de verdere ontwikkeling (hoofdstuk 6).

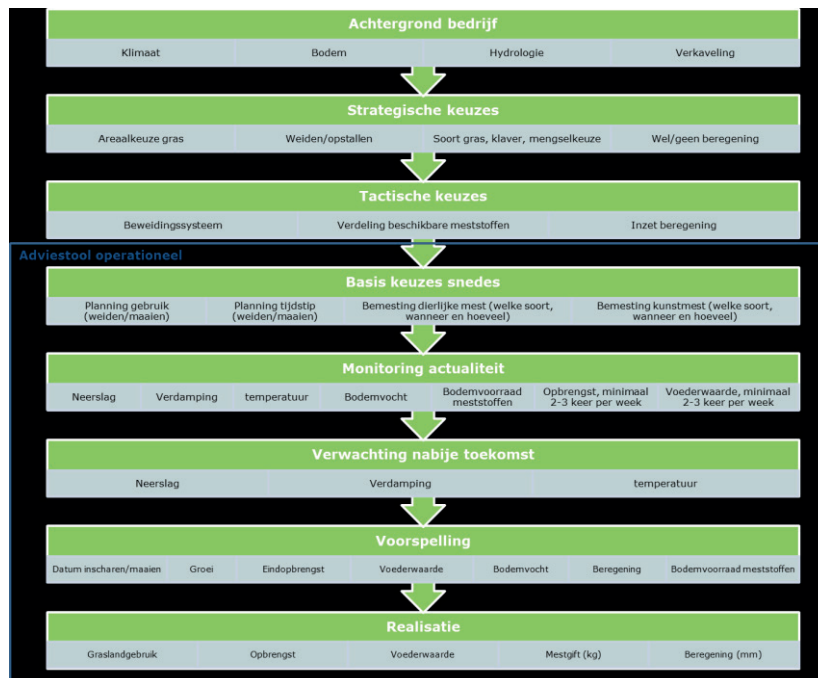
Om het systeem te karakteriseren en om aan te geven waar deze in essentie aan moet voldoen, is op basis van de inventarisatie een 'droombeeld' geformuleerd:

Een operationeel adviessysteem dat melkveehouders helpt om op hun bedrijf binnen gestelde milieu- en maatschappelijke randvoorwaarden de ruwvoeropbrengst te maximaliseren en om de ruwvoer kwaliteit te optimaliseren.

Om verder richting te geven aan de vernieuwing die het systeem moet brengen zijn door de klankbordgroep de volgende sleutelinnovaties geformuleerd:

- Bepaling (meten) van de actuele grasopbrengst en voederwaarde;
- Voorspelling van de grasopbrengst en voederwaarde voor de weersverwachtingstermijn (3-15 dagen);
- Voorspelling van de maïsoopbrengst en voederwaarde voor de lange termijn (1-3 maanden);
- Meten van factoren die de actuele groeiomstandigheden weergeven, zoals bodemtemperatuur, bodemvocht, nutriënten
- Modelmatige koppeling van factoren die gewasgroei bepalen, zoals bodem, waterhuishouding, nutriënten en weer;
- Gecombineerd adviessysteem waarbij op één overzicht teelt- attenties worden gegeven met een hoge betrouwbaarheid;
- Advies tenminste per perceel en zo mogelijk per grid.

Om een beeld te krijgen van waar het beoogde adviessysteem in moet voorzien, is in Figuur 2.2 een voorbeeld uitgewerkt voor de productie van een snede gras. De informatiebehoefte van melkveehouders is heel breed van strategisch tot operationeel niveau. Het adviessysteem moet voorzien in data en adviezen op het operationele niveau. Voor de groei van een snede gras worden basis keuzes gemaakt als het gaat om het te verwachten grasgebruik en de benodigde bemesting. Vervolgens worden de groei en de randvoorwaarden voor groei gemonitord. De weersverwachting is een belangrijk gegeven voor de verwachte groei in de nabije toekomst. Voorspeld wordt welke acties ondernomen moeten worden, zoals beregenen bij droogte, of wat de opbrengst, de voederwaarde en het oogsttijdstip zullen zijn. De gerealiseerde opbrengst, voederwaarde en gebruikte inputs als bemesting en beregening dienen zo snel mogelijk na oogst bekend te zijn voor het maken van keuzes voor de volgende snede.



Figuur 2.2 Informatiebehoefte melkveehouders voor de productie van een snede gras. Een adviessysteem voorziet in data en adviezen op operationeel niveau.

3 Sensoren

3.1 Wat zijn bruikbare sensoren?

Precisielandbouw kan niet zonder sensoren. Een sensor levert namelijk data. Het is een apparaat dat, al of niet volledig geautomatiseerd, de status of verandering van een object (plant, dier, bodem, atmosfeer, etc.) kan meten en uitdrukken in een objectieve waarde. Er zijn momenteel veel sensoren bekend die potentie of reeds toepassingen hebben in de landbouw. Sensoren zijn onontbeerlijk bij de transitie naar precisielandbouw, waarin op basis van data teeltmaatregelen geoptimaliseerd naar ruimte en tijd, en dus duurzamer, uitgevoerd worden.

In dit hoofdstuk komen bodem- (paragraaf 3.2), gewas- (paragraaf 3.3), klimaat- (paragraaf 3.4 en 3.5) en beweidingssensoren (paragraaf 3.6) aan de orde. Per sensor wordt een toelichting op het meetprincipe en de toepassing gegeven. In Tabel 3.1 staan alle sensoren die we hebben beoordeeld, weergegeven, met inschatting van technologie- (TRL) en marktrijpheid (MRL). Voor GrasMaïs-Signaal zijn voor de korte termijn vooral die sensoren interessant die TRL 6 of meer hebben, waarmee eerste praktijkervaringen zijn opgedaan, en waarvan financieel voordeel, voldoende betrouwbaarheid en gebruiksgemak is aangetoond. Hieronder worden de beoordelingscriteria van de sensoren toegelicht.

Technologierijpheid van een sensor voor een bepaalde toepassing werd beoordeeld met een TRL-waarde. **De TRL-classificatie** (zie Figuur 3.1) is afkomstig uit de ruimtevaarttechnologie. Hoe hoger de waarde op een schaal van 1 tot en met 9, hoe verder de technologie ontwikkeld is. Bij TRL-waarden van 7 of meer is aangetoond dat de technologie werkt, en dat hooguit nog ontwikkeling van het systeem nodig is voor specifieke toepassingen. TRL is dus een maat voor toepasbaarheid.

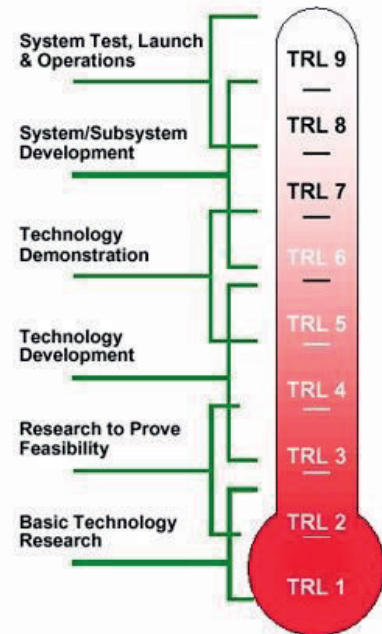
Marktrijpheid is lastiger eenduidig te beoordelen. Hier hebben we met minstens 3 indicatoren gewerkt om de kansen voor een sensortoepassing in te schatten: mate van adoptie van de innovatie (ve sensor) door de praktijk, informatie over kosten en baten van gebruik van de sensor en informatie over betrouwbaarheid van de data (nauwkeurigheid en leveringszekerheid). Gebruiksgemak is ook een belangrijk criteria, maar hierover kon in veel gevallen niets gezegd worden daar de sensor nog nauwelijks gebruikt wordt.

Adoptie indicator: We hebben geschat in welke fase van de innovatie adoptie levenscyclus (http://en.wikipedia.org/wiki/Early_adopter) de sensortoepassing zich bevindt. Er worden in deze cyclus vijf fasen onderscheiden: innovator, early adopter, early majority, late majority en laggard fase (fase-classificatie 1, 2, 3, 4, 5, respectievelijk). In de innovator fase (1) is minder dan 3 % van de markt gebruiker van de innovatie. In de Early adopter fase is 3 – 16 % gebruiker van de innovatie. Hoe verder in de cyclus, hoe meer toepassers er zijn. Bij classificatie 0 zijn er geen gebruikers bekend.

Kosten-baten indicator: We hebben geschat of financieel voordeel van het sensorsysteem te verwachten is in maïs en grasteelt op basis van wat nu bekend is. Als met onderzoek aangetoond is dat er duidelijke financiële voordelen zijn van gebruik van het sensorsysteem, dan wordt dit aangegeven met een + in de tabel. Als er geen duidelijke financiële voordelen zijn, wordt dit aangegeven met -/+. En als er geen informatie beschikbaar is, wordt dit met een ? aangegeven in de tabel.

Betrouwbaarheid indicator: In dit criterium wordt zowel nauwkeurigheid als de leveringszekerheid van de sensordata beoordeeld, voor zo ver bekend. Als zowel de nauwkeurigheid van de sensordata als de leveringszekerheid van de data aansluit bij wensen praktijk, dan wordt dit met een + beoordeeld in de tabel. Als één of beiden beperkend zijn, wordt dit met -/+ of met – aangegeven, respectievelijk. En als er geen informatie beschikbaar is, wordt dit met een ? aangegeven in de tabel. Hierbij moet bedacht worden dat bij veel sensoren kalibratie een groot effect heeft op de nauwkeurigheid, en dus nauwkeurigheid van een sensor niet los gezien kan worden van de aanvullende kalibratie service.

TRL-level	Description (following European Space Agency)
1	Basic principles observed and reported
2	Technology concept and/or application formulated
3	Analytical & experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept
4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment
5	Component and/or breadboard validation in relevant environment
6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)
7	System prototype demonstration in a space environment
8	Actual system completed and "Flight qualified" through test and demonstration (ground or space)
9	Actual system "Flight proven" through successful mission operations



Figuur 3.1 Technology Readiness Level (TRL) schaal [Bron: http://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level, november 2014].

Tabel 3.1

Overzicht van sensoren die (op termijn) toepasbaar zijn bij de verduurzaming van de teelt en verwerking van gras en maïs, met beoordeling van technologie-rijpheid (TRL) en marktgegevens (MRL).

Type meting / sensor	Toelichting	Technologie rijpheid (TRL)	Marktrijpheid (MRL)					
			Adoptie fase		Finan. voordeel		Betrouwbaarh.	
			Maïs+Gras	Gras	Maïs	Gras	Maïs	Gras
Bodemparameters								
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Electr. geleidbaarheid (EC) (ER en EM)	8-9	1	1	+	+	+	+
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)	6-9	0	0	?	?	?	?
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Natuurlijke gamma-straling meting	6-8	1	1	-/+	-/+	-/+	-/+
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Veris (combi ER, VIS-NIR, pH meting)	8-9	0	1	?	+	+	+
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Dualem (EM meting)	8-9	1	1	+	+	+	+
Zuurgraad	pH-meting	9	4	4	+	+	+	+
Bodemverdichting	Penetrologger	8-9	1	1	+	+	+	+
Bodemvocht	Ground penetrating radar	5	0	0	?	?	?	?
Bodemvocht	Zuigspanning of waterspanning	9	2	2	+	+	+	+
Grondwaterstand	Peilbuis	9	5	5	+	+	-/+	-/+
Grondwaterstand	Divers in peilbuis	9	2	2	+	+	+	+
Bodemmineralen (nutriënten)	Bepaling dichtheid/concentratie	9	4	4	+	+	+	+
Gewasparameters								
Gewashoogte	Hoogtemeting met duimstok	9	2	0	+		+	
Gewashoogte	Grashoogtemeters	9	2	0	+		+	
Gewashoogte	Ultrasoon, laser	9	1	1	+	?/+	+	?/+
Gewashoogte	Optisch, Lidar, radar, zie biomassasens.	4-6	1	1	?/+	?/+	-/+	-/+
Bovengrondse biomassa	Near sensing (optisch) diverse merken	9	1-2	1-2	+	+	+	+
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (optisch), diverse sat.	8	1	1	+	+	-/+	-/+
Bovengrondse biomassa	Hyperspectrale camera's	8	1	1	-/+	-/+	+	+
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (radar)	4	0	0	-/+	-/+	-/+	-/+
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (lidar)	6	0	0	-/+	-/+	-/+	-/+
Opbrengstsensoren	Fysieke stroom van product	6-9	1	3	-/+	-/+	-/+	-/+
Gewastemperatuur, verdamping	Warmte uitstraling	8-9	1	1	-/+	-/+	-/+	-/+
Gewasstadium	remote sensing (optisch, radar, lidar)	4-6	0	0	-/+	-/+	-/+	-/+
Plantstress	Fluorescentie	4-6	0	1	?	?	-/+	-/+
Onkruid	Beeldanalyse	5-8	1	1	?	?	+	+
Ziekten	Beeldanalyse	4-6	0	0	?	?	-/+	-/+
Inhoudstoffen/Kwaliteit								
Droge-stof gehalte in product	NIRS	5-6	1	1	?	?	?	?
Eiwit	NIRS	4-6	1	1	?	?	?	?
Inhoudstoffen gewas	NIRS	4-6	1	1	?	?	?	?
Inhoudstoffen mest	NIRS	4-6	1	1	?	?	?	?
Klimaat								
Buienradar/weerbericht	neerslag, temperatuur, etc.	9	+	+	+	+	+	+
Micro-klimaat	Weerstation met div. sensoren	9	2	2	+	+	+	+
Beweidings								
Accelerometer	Versnellingsopnemer aan poot of nek	6-9	2		+		+	
Halster druksensor	Drukmeting, kauwgedrag	4-5	0		-/+		-/+	
Halsband microfoon	geluidmeting, kauwgedrag	6-7	1		-/+		-/+	

3.2 Bodemsensoren

Aan een bodem kun je een groot aantal eigenschappen meten. Tezamen bepalen deze eigenschappen voor een groot deel de gewasopbrengst van een perceel. Voor de teler is het wenselijk dat een sensor of platform van sensoren de variatie binnen het perceel (bodem of gewas) vastlegt en deze gegevens vervolgens zodanig beschikbaar stelt dat deze in ieder Geografisch Informatie Systeem (GIS) gebruikt kunnen worden. In Bijlage 3 worden belangrijke bodemfactoren toegelicht. Hierna wordt uiteengezet welke bodemsensoren er op dit moment commercieel beschikbaar zijn voor het meten van bodemeigenschappen, met toelichting op bruikbaarheid. Tabel 3.1 bevat het overzicht van deze sensoren.

3.2.1 Geleidbaarheid en straling als maat voor bodemeigenschappen

Textuur en andere bodemparameters kunnen worden afgeleid uit de metingen aan de zogenaamde 'Electrical Conductivity' (EC) of elektrische geleidbaarheid van de bodem (Corwin & Lesch, 2005). De EC metingen in de landbouw werden destijds ontwikkeld om het zoutgehalte van geïrrigeerde landbouwgronden te bepalen (Corwin & Lesch, 2003), maar EC metingen hebben inmiddels een belangrijke plaats ingenomen binnen de precisielandbouw voor het in kaart brengen van bodemvariatie binnen percelen. Zie afbeelding Figuur 3.2 waarin landbouwgrond in de USA gescand wordt met een EC sensor.



Figuur 3.2 Gebruik EC sensor in USA.

Het bepalen van de elektrische geleidbaarheid van de bodem kan worden gedaan door (1) de elektrische weerstand (ER) of (2) de elektromagnetische inductie (EM) te meten. Elektrische weerstandsmetingen zijn een zogenaamde invasieve methode, waarbij de elektroden door de grond worden getrokken. Hierbij is het van belang dat deze een goed contact maken met de bodem. Als de grond droog is of grover materiaal (stenen) bevat, zal dit de metingen minder betrouwbaar maken (Corwin & Lesch, 2005).

Het meten van EC met behulp van elektromagnetische inductie is een niet-invasieve methode. Een zendspoel die zich vlak boven de grond bevindt, induceert een elektromagnetisch veld, en de bodem wekt daardoor een tweede elektromagnetisch veld op. De ontvangspoel neemt de totale effecten waar. Bodemeigenschappen zoals het kleigehalte en bodemvochtgehalte zorgen voor een verschil in amplitudo en fase tussen het eerste en tweede EM veld. De grootte daarvan is een maat voor de elektrische geleidbaarheid (Corwin & Lesch, 2005).

EC metingen worden o.a. beïnvloedt door de bodemvochttoestand van de bodem. Bij hogere bodemvochttoestand is de relatie tussen EC metingen en bodemtextuur stabiel. Het is daarom raadzaam om deze metingen onder natte omstandigheden uit te voeren, nabij de veld capaciteit (Saey *et al.*, 2012). Van Meirvenne *et al.* (2013) pleiten ervoor om EC als primaire bodemfactor aan te merken, en dus niet als secundaire parameter die een maat is voor andere bodemparameters. In hun studie was er een sterke relatie tussen de tarwe opbrengst en de EC waarden. De relatie tussen EC metingen (verkregen met EM apparatuur) en pH, bodemtextuur en ook organisch stof was sterk in de studie van (Vitharana *et al.*, 2008). Toch wordt aangeraden om de EC metingen altijd aan te vullen met bodemanalyses van het betreffende perceel. Directe relaties tussen een opbrengstkaart en een EC kaart zijn niet altijd gemakkelijk te maken omdat de interacties tussen de bodemfactoren en weersomstandigheden ook een rol kunnen spelen (Corwin & Lesch, 2003) en relaties altijd veld afhankelijk zijn.

Op basis van bovenstaande informatie geven we EC-metingen voor het maken van bodemkaarten een TRL-waarde 8-9, met de aantekeningen dat voor sommige grondsoorten aanvullende kalibratie nodig is voor vertalen van de sensorwaarden naar bodemparameters.

3.2.2 Veris systeem

Veris (<http://www.veristech.com/products/soilec.aspx>) brengt verschillende apparatuur op de markt voor het doen van EC metingen. Ze verschillen onderling in de dieptes waarop de waarnemingen worden gedaan en in de ophanging (geschikt voor achter trekker, achter quad).

Het Veris MSP3 platform (zie Figuur 3.3) wordt in de landbouw toegepast om de geleidbaarheid, de zuurgraad en het organisch stof gehalte in dezelfde werkgang te meten.



Figuur 3.3 Toepassing Veris MSP3 voor het meten van geleidbaarheid, zuurgraad en organisch stofgehalte.

MSP3 staat voor Mobile Sensor Platform en combineert metingen aan de geleidbaarheid van de bodem (EC), reflectiemetingen in het zichtbare licht (VIS: golflengte 380-780 nm) en nabij infrarode (NIR) deel van het spectrum. De Veris MSP3 bodemsensor levert in één werkgang gegevens over het organisch stof gehalte, de textuur en de pH van de bodem. De optische sensor meet elke seconde de reflectie (Schans & Berg, 2013). De zuurgraadbepaling wordt afhankelijk van de rijsnelheid elke 20-100m gedaan. Aan de hand van de gemeten waarden binnen een perceel kan een taakkaart voor het bekalen worden opgesteld.

In een uitgebreide studie in de VS werden de resultaten van bodemmetingen verkregen met behulp van de Veris OpticMapper vergeleken met lab analyses (Lund, 2011). Deze studie omvatte 20 velden die verspreid lagen in 7 staten, en een totaal van 570 ha besloegen. De correlatie (R^2) tussen lab analyses van organisch stof en de sensor data lagen tussen de 0.57 en 0.95.

Het Veris sensor platform (Veris MSP3) is door Agrometius in Nederland geïmporteerd, en is in het kader van het programma Precisielandbouw (PPL) getest op veenkoloniale grond (Schans & Berg, 2013). De pH sensor gaf systematisch hogere waarden dan er door middel van lab onderzoek met de pH KCL methode werden bepaald. De correlatie tussen deze twee bepalingen was voor de percelen gemiddeld 0.73. Het organisch stof gehalte werd afgeleid uit EC-SH, Red en Infra Red metingen en hierbij lagen de correlaties met gemeten waarden rond de 0.6. De berekende kalkgift (veenkoloniaal bouwplan) voor de twee onderzochte dalgrond percelen, reflecteerde de grote variatie in organisch stof van deze 2 percelen (1,2 -19 ton Dolokal en 3,4 -12,8 ton Dolokal).

Agrometius verricht metingen op landbouwgronden met een MSP3 sensor tegen betaling van 150 euro/ha (bron: <http://precisielandbouw.groenkennisnet.nl/Veris-MSP3-bodemsensor.ashx>). Agrifirm en Agrometius hebben gezamenlijk een dienst ontwikkeld voor bekalen. Voor 175 euro/ha wordt er een scan gemaakt en een taakkaart geleverd om plaatsspecifiek te bekalen. Tevens worden daarbij 3 bodemmonsters genomen van het betreffende perceel. Het apparaat kan ook op grasland worden gebruikt. Het apparaat meet bij een rijsnelheid tussen de 8 en 12 km/uur. Het platform registreert Lat en Long WGS 84 coördinaten, reflectie in het rood, reflectie van infrarood, en ratio van deze twee, hoogte, rijsnelheid, EC bouwvoor en EC profielen pH (Schans & Berg, 2013).

Veris MSP3 platform wordt geschat op TRL 8-9, met de aantekeningen dat voor sommige grondsoorten aanvullende kalibratie nodig is en dat de ER metingen bij voorkeur gedaan worden op onbeteelde grond met pF tussen 2 en 3. Voor grasland is Veris MSP3 minder geschikt. Er zijn aanwijzingen dat de metingen wel gedaan worden in grasland zonder schade aan te brengen aan de productie.

3.2.3 Dualem systeem

Een andere bodemsensor die commercieel beschikbaar is, is de Dualem 1 sensor (zie Figuur 3.4). Deze sensor meet op basis van het EM principe (electromagnetische inductie) en bevindt zich niet in de grond, zoals bij de ER meting van Veris, maar boven de grond (Serrano *et al.*, 2013). Nadeel is hierbij dat vegetatie een ruis kan geven op de metingen (Serrano *et al.*, 2013).

Boven kale grond van een perceel in Vlaanderen (Saey *et al.*, 2012) leverde de Dualem-21S EMI sensor gedetailleerde informatie over de ondergrond waarbij patronen op verschillende schaalgrootte konden worden onderscheiden (bron: <http://www.dualem.com/products/>).

Dualem sensoren worden geschat op TRL 8-9, met de aantekeningen dat voor sommige grondsoorten aanvullende kalibratie nodig is en dat EM metingen ook op beteelde grond als permanent grasland gedaan kunnen worden mits de vegetatie niet te groot is.



Figuur 3.4 Toepassing van de Dualem bodemsensor op beteelde grond.

3.2.4 Gamma straling als maat voor textuur en organisch stof

Uit metingen aan de gamma straling van de grond kunnen verschillende bodemkernmerken worden afgeleid zoals klei gehalte van de bodem. Deze techniek is destijds ontwikkeld door Grasty *et al.* (1985) en werkt als volgt: Radioactiviteit door de van nature voorkomende radioactieve nucliden (^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U (Potassium, Thorium and Uranium) wordt met behulp van een (kristal) sensor gemeten. De sensor is bevestigd aan een quad en meet iedere paar seconden. Vervolgens worden door interpolatie en interpretatie van de gegevens een bodemkaart van textuur, organisch stof etc gemaakt. Bij deze vertaalslag is het van belang dat er ook bodembepalingen aan het betreffende veld zijn gedaan om de uitslag te kalibreren.

De kosten van een gamma straling scan liggen tussen de 62,50 en 110 euro per ha. Voor de provincies Friesland, Groningen, Drenthe is een minimale afname 5 ha vereist, voor de resterende provincies is dit 20 ha (Bron: <http://www.vandenborneardappelen.com/365/bodembemonstering#7>).

Altic en Dacom brengen dit op de markt in Nederland (zie Figuur 3.5 waarbij het systeem op een quad is gemonteerd). De bestanden die worden verkregen kunnen worden bekeken in een geo-teeltregistratie-software zoals Crop-R of Akkerweb. Het systeem wordt momenteel getest en verder ontwikkeld in het kader van het IJKakker programma. Daarnaast vermarkt het bedrijf Medusa Sensing BV deze technologie voor verschillende toepassingsgebieden zoals de mijnbouw en archeologie. In een studie in België werden gemeten bodemfactoren, EC waarden verkregen met EM apparatuur en meetresultaten van de gamma straling vergeleken (Van Meirvenne *et al.*, 2013). Uit de analyse (Principal Component Analyse) bleek dat de waarden van de EC metingen een groter aandeel hadden in het verklaren van de bodemfactoren dan de uitslag van de gammastraling metingen. De gamma straling sensortechnologie wordt geschat op TRL 6-8, met de aantekening dat de kalibratiemethode van de techniek verder ontwikkeld moet worden. De techniek loopt daardoor iets achter t.o.v. EC sensoren.



Figuur 3.5 Gamma sensor achterop een quad gemonteerd.

3.2.5 Sensoren voor bepaling van bodemvocht

In de literatuur geven diverse studies de bruikbaarheid van NIRS/VIS sensoren aan voor het in kaart brengen van variatie in bodemeigenschappen (zie paragraaf 3.2.2). Roberts *et al.* (2011) vergeleken dichtbij metingen aan de bodem verkregen met de ACS 210 Crop Circle (VIS en NIR sensor) met spectrale beelden gemeten met een vliegtuigje op 1824m hoogte (resolutie 0.3m) om organisch-stofgehalte uit af te leiden. Alle sensoren gaven een redelijk goede voorspelling, maar overall moest wel veld specifieke informatie worden gebruikt om de voorspellingen te kalibreren ($R^2 > 0.76$). Spectrale beelden gaven mindere schommelingen door veldverschillen.

De totale hoeveelheid stikstof in een bodem en organisch N kan worden geschat met NIRS metingen (zie overzicht in (Cécillon *et al.*, 2009)). Onder ideale omstandigheden is het mogelijk om ook mineraal N en P en K af te leiden uit NIRS metingen aan bodemmonsters (Cécillon *et al.*, 2009). De voorspellende waarde van NIRS voor bodemvochtgehalte, respiratie en bodem microbiologische biomassa werd ook als goed bevonden (zie studies in (Terhoeven-Urselmans *et al.*, 2008)). De voorbehandeling van de monsters was hier wel van belang. Deze studie geeft aan wat er mogelijk in de toekomst ontwikkeld zou kunnen worden.

Het geautomatiseerd en on-the-go monitoren van nitraat in de bodem geeft nog te variabele resultaten onder veldomstandigheden (zie referenties op p. 84 van (Adamchuk *et al.*, 2004)).

Bodemvochtbepalingen worden vooral gedaan aan de hand van één op een vaste plaats staande sensor per veld, en hebben dus waarde voor het monitoren van de bodemvochttoestand in de tijd. Leveranciers van bodemvochtsensoren zijn o.a. Eijkelkamp en Dacom. De meest recente bodemvochtsensor van Dacom is de Sensetion (zie Figuur 3.6). Het apparaat is eenvoudig te installeren in het veld en er hoort een App bij voor het beregeningsadvies. Een Sensetion pakket bestaat uit 5 meters en kost 4975 euro, grofweg dus 1000 euro per sensor/puntmeting.



Figuur 3.6 Bodemvochtsensor Sensetion van Dacom.

Naast deze puntmetingen kan de ruimtelijke variatie binnen een perceel in bodemvocht worden afgeleid uit EC metingen of NIR sensing, maar hier is nog geen commerciële toepassing van bekend. Het afleiden van het bodemvocht uit de diëlektrische constante (zie Andrade *et al.*, 2011a in (Adamchuk *et al.*, 2004) p. 76) is een mogelijke benadering. Maar bodemfactoren zoals textuur en temperatuur en zoutgehalte kunnen de uitkomst van deze metingen beïnvloeden (zie p. 76 (Adamchuk *et al.*, 2004)).

Sensoren die de reflectie van VIS en NIR kunnen meten zijn er in heel veel soorten. De TRL-waarde van deze sensoren is een 9, maar een aantal toepassingen is nog onvoldoende praktijkrijp (6 of lager). Er is een groot aantal toepassingen, waaronder het in kaart brengen van patronen in een bodem of gewas en het meten van inhoudsstoffen. De meetwaarden tonen ruimtelijke variatie in bodemvocht, textuur en biomassa. Voor sommige toepassingen is ontwikkeling van kalibratiemethode nodig. Zie ook het hoofdstuk over gewassensoren.

Peilbuizen om grondwaterstand te bepalen zijn al heel lang in gebruik. Waterschappen en particulieren beheren in Nederland een heel groot aantal van deze peilbuizen. Recentelijk zijn er sensoren op de markt gekomen die het peil in de buis automatisch meten in de tijd en de data versturen naar een data base. Deze zogenaamde 'divers' worden door o.a. Eijkelkamp op de markt gebracht. De TRL van deze divers is 9, bruikbaarheid hangt af van de peilbuis (zie Figuur 3.7 voor beeldvorming peilbuis en divers).



Figuur 3.7 Peilbuis en divers.

Ground penetrating radar sensor heeft de potentie om toegepast te gaan worden in precisielandbouw (Adamchuk *et al.*, 2004) om bijvoorbeeld bodemvocht op een niet-invasieve manier te bepalen. Hoge frequentie EM golven worden uitgezonden door de sensor, en een ontvangende sensor registreert de gereflecteerde EM golven als functie van tijd (zie verwijzing naar Davis & Annan, 2002 in (Adamchuk *et al.*, 2004)). Diverse bedrijven werken aan toepassingen, maar de technologieontwikkeling en kalibratie vergt nog veel aandacht. De TRL-waarde van deze technologie in de landbouw wordt geschat op 3 - 5. Er is nog relatief veel R&D nodig om deze technologie te ontwikkelen tot een toepassing in de landbouw.

3.2.6 Bodemverdichting

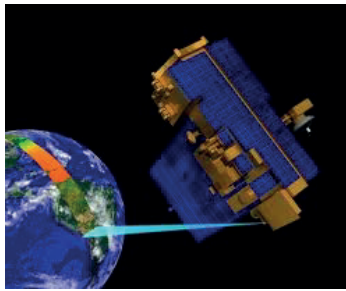
Bodemverdichting kan gemeten worden met een penetrologger (zie Figuur 3.8, penetrologger hangt naast de quad; zie ook Figuur in paragraaf 3.2.4) die de indringingsweerstand meet met de daar bijbehorende coördinaten. Boven de 3MPa is wortelgroei onmogelijk (Bron: p. 23 in (Zwart *et al.*, 2011)). Het kan dus nuttig zijn om bodemverdichting in kaart te brengen en gericht actie te ondernemen op plekken of stroken met een te hoge mate van bodemverdichting. De TRL-waarde van penetrologgers is 8-9.



Figuur 3.8 Penetrologger gemonteerd op de zijkant van een quad.

3.3 Gewassensoren

In deze paragraaf komen diverse gewassensoren aan de orde. Eerst wordt biomassa sensing vanaf grote afstand (*remote sensing*) met satellieten en drones besproken. In Figuur 3.9 staat een afbeelding van de Aster Terra satelliet. Vervolgens komt biomassa-sensing met sensoren op de tractor of machine aan de orde. Tot slot worden nog enkele specifieke sensoren besproken, zoals gewashoogte- en gewaskwaliteitssensoren.



Figuur 3.9 Aster Terra satelliet.

3.3.1 Biomassa sensing vanuit satellieten en drones

Satellietbeelden zijn er in allerlei soorten en maten. Allereerst is er het verschil tussen type sensoren. Er zijn optische, thermische, radar en Lidar sensoren, waarbij de eerste twee passief zijn, dat wil zeggen ze meten straling van een externe bron (zonlicht, warmte-uitstraling van de aarde) en de laatste twee actief zijn, ze meten de hoeveelheid teruggekomen straling van hun eigen stralingsbron. De verschillende typen sensorsystemen staan samengevat in Tabel 3.2.

Tabel 3.2

Overzicht sensortypen voor gewasmonitoring vanuit satellieten en drones.

Sensor type	Meetprincipe	Golflengte	Satelliet	Landbouw-toepassingen
Optisch	Gereflecteerd zonlicht	0.4-2 μm	Landsat, MODIS, MSG, Spot, DMC, Rapideye, Sentinel-2	Biomassa, gewasclassificatie
Thermisch	Warmte-uitstraling van de aarde	8-12 μm	Landsat, MODIS, MSG	Verdamping
Radar	Backscatter en hoek van door sensor uitgezonden radargolven	2-30 cm	Radarsat, Envisat, Sentinel-1	Bodemvocht, gewasstructuur (geen last van bewolking), biomassa, gewasclassificatie
Lidar	Afstand en tijd van terugkaatsing van door sensor uitgezonden laserlicht	0.6-1 μm	ICESAT (drones en vliegtuigen)	maaiveldhoogte, gewashoogte, biomassa

De beelden die de sensorsystemen produceren kunnen verder worden ingedeeld met behulp van drie resolutietypes: de ruimtelijke, temporele en spectrale resolutie, waarbij een trade-off plaatsvindt tussen de verschillende types (bijvoorbeeld meer spectrale banden gaat ten koste van de ruimtelijke resolutie) (Tabel 3.3). De ruimtelijke resolutie zegt iets over het detailniveau waarmee het aardoppervlak kan worden geobserveerd. De temporele resolutie geeft aan hoe vaak de desbetreffende satelliet overkomt en dus om de hoeveel dagen een satellietbeeld beschikbaar komt. Hierbij moet wel worden aangetekend dat bewolking ervoor kan zorgen dat een groot deel van de optische en thermische satellietbeelden onbruikbaar zijn, zeker in het bewolkte Nederland. De spectrale resolutie geeft het aantal spectrale banden weer waarin de straling wordt gemeten. Voor biomassa bepaling zijn vooral de optische spectrale banden in het groen, rood en nabij-infrarood (NIR) van belang. De Red-edge band (tussen het rood en NIR in) is van belang voor chlorofyl gehalten van de plant.

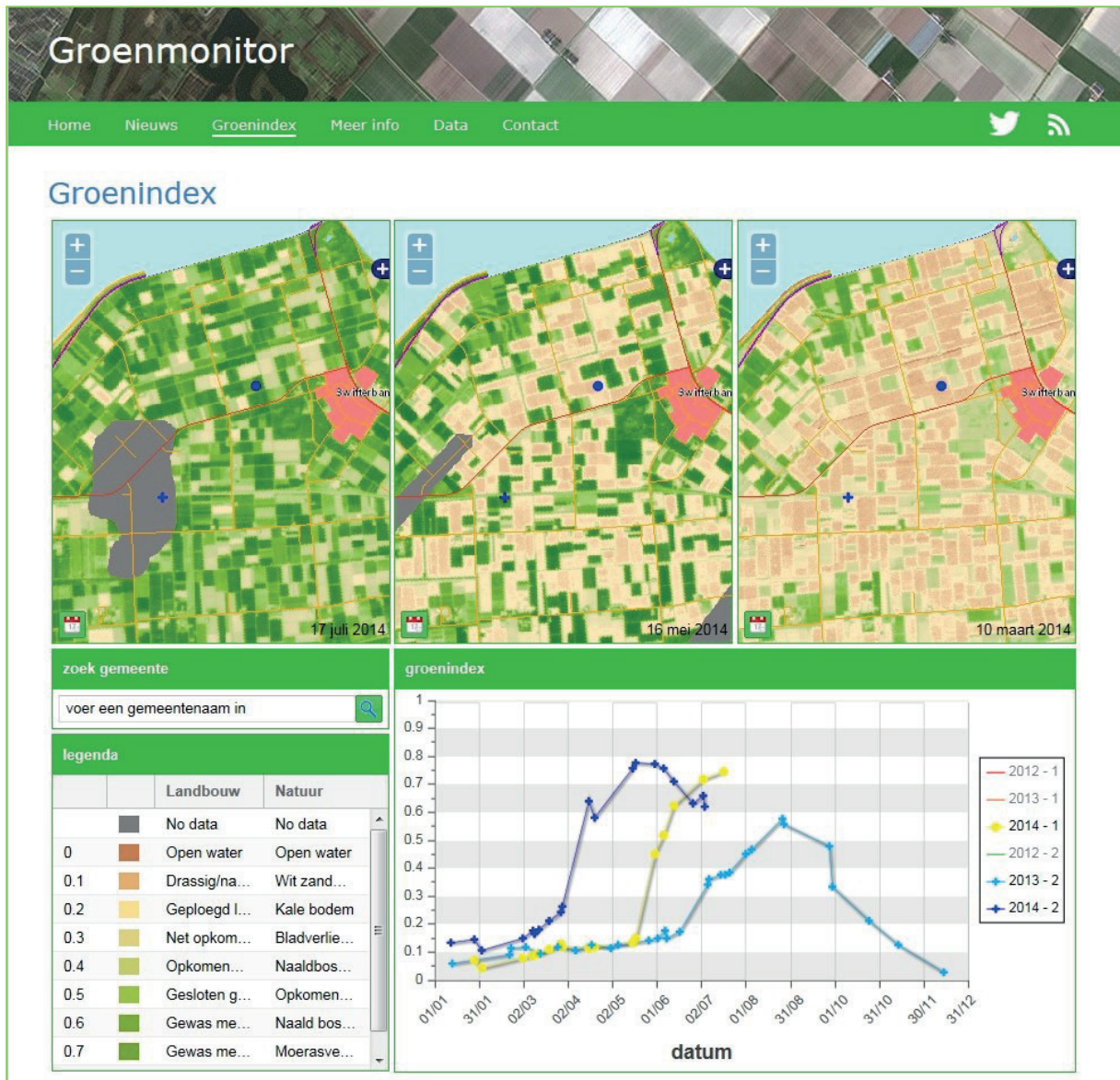
Tabel 3.3

Overzicht resolutietypen bij monitoring vanuit satellieten en drones.

Resolutie type	Gewenste resolutie	Detectieniveau	Satelliet	Toepassingen
Ruimtelijk	100-1000 m	Regionaal	MODIS, MSG	Weersvoorspelling, klimaatmonitoring
	20-50 m	Veld	Landsat, DMC	Gewasclassificatie en monitoring
	5-10 m	Intra-veld	Spot, Rapideye	Precisielandbouw
	0.5-2 m	Straat	Pleiades, Quickbird	Infrastructuur monitoring
	0.1-0.5	Plant	Drones, Luchtfoto's	Gewasziekte monitoring
Temporeel	2-10 weken	Incidenteel	Landsat, Spot	Landgebruik en verandering
	Minimaal 3x per week	Regelmatig	MODIS, MSG, DMC	Weersvoorspelling, Fenologie, gewasgroei-monitoring

Voor landbouwdoeleinden is het van belang dat biomassa van de individuele gewassen minimaal op perceelsniveau gevolgd kan worden en het liefst met een wekelijkse update. Voor de optische sensoren en biomassa sensing geldt in principe een TRL van 8-9. Voor radar en Lidar ligt dit lager, respectievelijk 4–6 en 6-8. Beperking bij optische sensoren is dat er geen opnames mogelijk zijn bij bewolkt weer. Hierna wordt een voorbeeld gegeven de Groenmonitor.nl, een voorbeeld van een biomassa monitoring service.

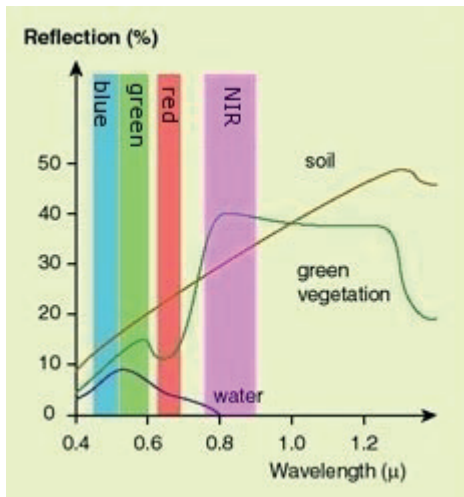
De groenmonitor geeft de actuele vegetatiekaart van Nederland weer, welke verkregen is uit DMC satellietbeelden (25 m resolutie, 3x per week een opname) (zie Figuur 3.10).



Figuur 3.10 Printscren van de Groenmonitor.

Voor onbewolkte (gedeeltes van) satellietbeelden wordt de NDVI groenindex berekend. De NDVI groenindex is een indicator van de hoeveelheid groene biomassa met een waarde tussen de 0 en 1. De groenindex waarden kunnen "vertaald" naar landbouwkundige processen of natuurontwikkeling over de seizoenen. Zo kan men per perceel de gewasontwikkeling volgen.

Hoe wordt de NDVI gemeten? Planten, of beter gezegd groene biomassa, absorberen grotendeels het rode zonlicht middels de fotosynthese en reflecteren het merendeel van het Nabij-Infrarode (NIR) licht. Bij kale bodems (rotsen, zand, geploegd land) is dit verschil veel kleiner (Figuur 3.11).



Figuur 3.11 Reflectie-eigenschappen van kale bodem, vegetatie en water.

Dit principe wordt gebruikt om vegetatie indicatoren te berekenen. De meest bekende is de Normalised Difference Vegetation Index (NDVI). De NDVI is een ratio tussen de reflecties van het rode en het NIR licht:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

Waarbij ρ_{NIR} en ρ_{red} de reflecties van de zonnestraling in het NIR (DMC band 1) en het rood (DMC band 2) zijn. De index loopt van 0 tot bijna 1 waarbij waarden van 0 water weergeven, waarden tussen 0.1 en 0.2 kale bodem weergeven. Vanaf ongeveer 0.2 vindt er plantengroei plaats met een verzadigd signaal tussen 0.8 en 0.9 dat groene biomassa van meerdere bladlagen weergeeft. Naast de NDVI zijn er nog andere vegetatie indices gedefinieerd, zoals de WDI (verzadigd minder snel bij meerdere bladlagen) en NDVI₇₀₅ (de Red-edge NDVI, die beter chlorofyl weergeeft).

Drones en hyperspectrale camera's Voor precisielandbouwdoeleinden is een resolutie van 25 m echter niet genoeg. Er zijn wel hogere resolutie satellietbeelden, maar die komen niet vaak genoeg over om het gewas wekelijks te volgen. Drones kunnen dan uitkomst bieden.

Een drone is een onbemand luchtvaartuig (in het engels Unmanned Aerial Vehicle (UAV)) welke op afstand bestuurd kan worden of die volgens een geprogrammeerde vluchtopdracht handelen. Naast militaire en civiele toepassingen worden drones ingezet om met hoge ruimtelijke, temporele en spectrale resolutie landbouwgewassen in kaart te brengen. Voor het besturen van een commercieel ingezette drone is in Nederland een opleiding vereist en een vergunning nodig. De TRL van drones is relatief hoog, er liggen beperkingen bij de regelgeving vanwege veiligheid en bij de kosten van inzet van drones.

Figuur 3.12 toont een camera onder een onbemande helikopter.



Figuur 3.12 Camera onder een onbemande helikopter

Drones vliegen vaak met hyperspectrale camera's als sensoren. Hyperspectrale camera's hebben filters die het kleurenbeeld splitsen in honderd 'pakketjes' met bandbreedtes van enkele nanometers. Eigenlijk komt het erop neer dat je verschillen ziet die je met het blote oog niet kan zien. De mens ziet drie kleuren: rood, groen en blauw. De hyperspectrale camera ziet naast honderden banden in het blauw, groen en rood ook nog in het nabij- en midden-infrarood. Hyperspectrale camera's zijn echte onderzoeksinstrumenten en daarom niet direct toepasbaar in de precisielandbouw. Wat ze wel leveren is informatie over de optimale spectrale bandcombinatie voor bijv. biomassaschatting, onkruidherkenning of stikstoftekort. Zo zijn de proximal sensoren mede voortgekomen uit onderzoek met hyperspectrale camera's. De TRL van deze camera's ligt op 8-9 als het gaat om biomassamonitoring. Voor detectie van plantstress of ziekten en plagen ligt de TRL beduidend lager, 3-6.

3.3.2 Biomassa sensing met proximal sensoren

Eerst wordt een toelichting gegeven op voor de praktijk beschikbare sensoren die van dichtbij (nearby of proximal sensing) de bovengrondse biomassa van een gewas kunnen inschatten. Vervolgens worden opbrengstsensoren besproken die bruikbaar zijn bij het bepalen van maïs en grasopbrengsten.

Op dit moment zijn er ten minste 4 proximal sensorsystemen op de markt in Nederland om de biomassa van een gewas in kaart te brengen. In Tabel 3.4 staan deze systemen samengevat weergegeven. Deze systemen zijn afgeleid van het principe dat je de hoeveelheid biomassa kan schatten als je gewasreflectiemetingen doet bij zichtbaar (VIS) en near-infrarood (NIR) licht. De systemen leveren een index, die een maat is voor de hoeveelheid biomassa op een bepaalde plaats. Hieruit is bijvoorbeeld ook de bladdichtheid LAI (Leaf area index) te schatten.

Tabel 3.4

Biomassa near Sensing systemen in Nederland

Sensor	Sensor type en index	Leverancier NL	Achtergrond informatie
OptRx	Actief, NDVI	Ag Leader	http://precisielandbouw.groenkennisnet.nl/CropCircle-optRx.ashx
GreenSeeker	Actief, NDVI	Agrometius / Trimble	http://precisielandbouw.groenkennisnet.nl/GreenSeeker.ashx
Yara N sensor	Actief en passief, S1, S2 en Sn	Yara	http://precisielandbouw.groenkennisnet.nl/Yara-N-sensor.ashx
Fritzmeier Isaria Sensor	Actief, REP	Fritzmeier Umwelttechnik	http://www.umwelt.fritzmeier.de

Bronnen: (Swagemakers, 2012) en genoemde websites

De biomassa geeft o.a. informatie over de noodzaak tot bijmesten, groei en afrijping van het gewas. De biomassa wordt, zoals eerder genoemd, afgeleid van de gemeten gewasreflectie. Een breed gebruikte Index is de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (zie paragraaf 3.3.1). Zowel de Greenseeker als de OptRx sensor maken gebruik van de NDVI. De Yara N sensor geeft de reflectiewaarden weer in de S1, S2 en Sn en de sensor is er in 2 varianten: een actieve, niet van daglicht afhankelijke sensor en een passieve, van daglicht afhankelijk sensor. De sensoren van de GreenSeeker, OptRx en Fritzmaier zijn alle 3 actieve sensoren (zie Figuur 3.13).



Figuur 3.13 Niet daglicht afhankelijke sensoren van GreenSeeker, OptRx en Fritzmaier.

De resolutie van de metingen is afhankelijk van het aantal sensoren en het bereik per sensor. Een OptRx sensor heeft bijvoorbeeld een bereik van 130 cm (loodrecht hoogte tot het gewas). Een pakket met 4 OptRx sensoren kost ca. 17.000 euro (Swagemakers, 2012). De sensoren worden zo gemonteerd op een machine of tractor dat lijnscans van het gewas gemaakt worden (Swagemakers, 2012). De onderzoeksvariant van OptRx heet CropCircle. De N-Sensor daarentegen bestaat uit 4 sensoren geïntegreerd in één systeem. Dit systeem wordt op de cabine van een tractor gemonteerd, en meet het gewas links en rechts van de tractor in 4 richtingen. Hoogte van de meting is ca. 2 to 4 meter. Een Yara N sensor actief kost ca. 30.000 euro; de passieve variant kost ca. 16.000 euro. Een Greenseeker systeem kost tot een werkbreedte van 30 m ca. 11.000 euro (4 sensoren) (Swagemakers, 2012). Voor het systeem van Fritzmeier bestaande uit 2 sensoren moet ca. 20.000 euro worden betaald (Swagemakers, 2012).

Verder zijn er diverse handheld systemen om puntmetingen van biomassa te doen. In onderzoek wordt veel met de CropScan sensor gewerkt (zie Figuur 3.14). Een zeer recent ontwikkeld hand-held apparaat voor de praktijk is de RapidSCAN CS-45 (Holland, 2014). Het bevat 3 spectrofotometers (RED: 670 nm, RED edge 730 nm en NIR 780 nm). Het systeem is compatibel met CropCircle ACS-470. Er worden verschillende vegetatie indices gemeten waaronder de NDVI. Het apparaat biedt de mogelijkheid om aan de hand van de metingen adviezen te krijgen via de daarvoor ontwikkelde Apps: N-Rec Split App, N-Rec Dose App, LAI estimator App, Biomass Estimator App.



Figuur 3.14 CropScan sensor, handheld systeem om puntmetingen van biomassa te doen.

Yara-N sensor is een systeem/sensor dat naast biomassa ook de N-status van het gewas meet gebaseerd op reflectie metingen en op dit moment is de module om de stikstof gift af te stemmen op de reflectiewaarden beschikbaar voor aardappels, winter koolzaad, winter- en zomer gerst, wintertarwe, maïs en enkele nieuwe gewassen (zie Figuur 3.15, een ALS N_Sensor). Daarnaast wordt de Yara N sensor ook gebruikt om de hoeveelheid loofdoodemiddel af te stemmen op de hoeveelheid biomassa (Van Evert *et al.*, 2012).

Het afstemmen van de bijbemesting van P en K aan de hand van sensoren is op dit moment nog niet mogelijk. Een uitgebreid overzicht van de literatuur op dit vlak wordt gegeven in het rapport van Ros en Bussink (2012).



Figuur 3.15 ALS N_Sensor dat de N-status van een gewas meet.

Voorgenoemde sensorsystemen kunnen ook op moment van oogst gebruikt worden om de bovengrondse biomassa te meten. Alleen bij gras kan dit als een schatting voor de opbrengst gebruikt worden. Bij maïs is dit moeilijk te realiseren door de hoogte van het gewas. Opbrengstmetingen bij gras en maïs kunnen daarnaast ook aan de stroom product in de maai- of opraapmachine. Hiervoor

zijn diverse meetsystemen op de markt die de massa flow in de machine geo-gerefereerd kunnen meten. Dit systeem werkt goed bij maïshakselaars, maar minder goed bij grasoogst, omdat oogsten bestaat uit maaien, wiersen en oprapen. Natuurlijk kan op perceelniveau ook een goede opbrengstschatting verkregen worden via wegen van afgevoerd product.

De TRL-waarde van deze sensoren is hoog (9), maar een aantal toepassingen is nog onvoldoende praktijkrijp (6 of lager). De metingen zijn vooral bruikbaar op staande biomassa (dus voor het maaien). De meetwaarden (indices) zijn te gebruiken bij variabel bemesten en opbrengstschattingen (alleen voor gras).

Meetsystemen van fysieke hoeveelheid geogst product op oogstmachines hebben een TRL 9 voor maïs en een TRL 6 voor gras.

3.3.3 Grashoogte meten

De eenvoudigste manier om gewashoogte te meten is meten met een meetstok. Kosten variëren tussen de 10 euro voor een duimstok tot meer dan 3000 euro voor een geavanceerd meetsysteem. Er zijn diverse meetsystemen op de markt (<http://edepot.wur.nl/306363>) (zie Figuur 3.16). De meetsystemen TES, JenQ, FarmW en piepschuim, kosten rond de 100 euro, gaven allemaal een goed resultaat. Ze vergen wel enige inspanning wat betreft handmatige metingen.



Figuur 3.16 Verschillende uitvoeringen van grashoogtemeters voor handmatig gebruik.

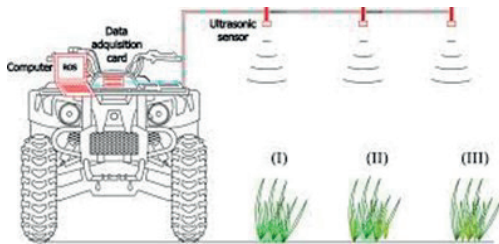
De C-Dax Pasture Meter XC1 (Figuur 3.17) uit Nieuw-Zeeland is geschikt om de grashoogte op een relatief groot deel van een perceel te meten (Medema, 2011). Nadeel is wel dat over het gewas gereden moet worden. Met dit apparaat kun je voor en na het beweiden meten wat de grashoogte is. Zo wordt helder welke plekken minder goed produceren en hoeveel de koeien hebben gegeten. Er zit een module op die de gegevens omrekent naar droge stof. De prijs voor een C-Dax meter inclusief GPS bedraagt ongeveer 3600 euro. Voor meer info, zie; http://www.c-dax.co.nz/index.php?page=shop/flypage&product_id=17331&parent_cats=8fb6a98cdda3e6ee46d4a736f8efb89d



Figuur 3.17 C-Dax Pasture Meter XC1.

Grashoogte meten kan ook met ultrasone sensoren (zie bijv AgriCon, en Figuur 3.18), of met laser (zie p. 61 in (Trotter *et al.*, 2010)). Deze sensoren maken echter geen onderscheid tussen de vitale en

afstervende biomassa. Trotter *et al.* (2013) onderzochten in hun studie hoe goed actieve Red/NIR sensoren onder veldomstandigheden de hoeveelheid biomassa kunnen aangeven. Ze testten de relatie tussen de biomassa (ds) en vegetatie indices waarbij de log getransformeerde Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) de beste correlatie met de droge stof biomassa gaf. De kosten van een ultrasone sensor en eenvoudige lasers liggen tussen de 50 en 500 euro, afhankelijk van type en kwaliteit.



Figuur 3.18 Ultrasonische sensor AgriCon.

De TRL waarde van gewashoogte meters is 9 voor gras en 5-9 voor maïs. Dit geldt zowel voor meetstokprincipe als voor ultrasone sensoren en de laser metingen. De TRL voor maïs is gewasstadium afhankelijk (alleen toepasbaar, en dus hoge TRL, bij gewashoogte tot een meter, vroeg in het seizoen). Nadeel metingen in gras is dat het gewas betreden moet worden wil men grote delen van het perceel gemeten hebben.

3.3.4 Ontwikkelingen geavanceerde camera's

Met behulp van multi- of hyper-spectrale camera's en of fluorescentie-metingen kunnen, aanvullend op biomassa sensing (TRL 8-9), beelden worden geanalyseerd op de aanwezigheid van onkruiden, ziekten en plagen, of aanwezigheid van droogte- of nutriëntenstress. Voor al deze aanvullende toepassingen geldt dat er nog nauwelijks praktijktoepassingen zijn (TRL 3-6). Een goed voorbeeld van ontwikkeling van deze technologie is de Inspector door WageningenUR (Schut *et al.*, 2006) (zie Figuur 3.19).



Figuur 3.19 Toepassing hyper-spectrale camera met de Inspector, ontwikkeld door WageningenUR (Schut *et al.*, 2006).

Op dit moment zijn er diverse ontwikkelingen met hyperspectrale camera's gekoppeld aan drones. Hieronder worden enkele resultaten met detectie van onkruiden genoemd, deze zijn het meest praktijkrijp. Onkruiden kunnen op verschillende manieren problemen veroorzaken in grasland en maïs zoals opbrengstverlies door concurrentie om water, licht en nutriënten en het bemoeilijken van de oogst doordat onkruidplanten verstrikt raken in de oogstmachine en/of verslept worden. Daarnaast kan de aanwezigheid van een onkruidplant in het te oogsten product ongewenst zijn doordat deze giftig is (Jacobs kruiskruid).

De H sensor van Agricon is wereldwijd de eerste commercieel beschikbare sensor die soorten onderscheidt door het combineren van beeldherkenning en reflectiemetingen. De hoeveelheid toegepast herbicide wordt real-time afgestemd op de waarneming in het veld. Op dit moment is de H sensor beschikbaar voor maïs en granen.

De hoge resolutie van near-sensing beelden geeft de meest nauwkeurige detectie van onkruiden. De sensor zal of op een autonoom navigerend platform kunnen worden bevestigd of op de trekker/spuitboom zodat er real-time kan worden bestreden.

Aan de hand van biomassametingen kunnen op kale grond onkruiden worden opgespoord (Kempenaar *et al.*, 2009). Er zijn verschillende biomassasensoren praktijkrijp zoals WeedIT en de WeedSeeker. WeedIt wordt door Rometron in Nederland op de markt gebracht. Weed Seeker (<http://www.weedseeker.nl/>) wordt door Homburg op de markt gebracht. Fluorescentietechniek is bruikbaar om stress bij planten te meten, zie o.a. toepassing van meten van herbicidenstress in maïs (www.mlhd.nl; (Kempenaar *et al.*, 2011) (zie Figuur 3.20).



Figuur 3.20 MLHD Photosystem 1 meter.

In Nederland is (Van Evert *et al.*, 2011) een prototype ontwikkeld voor het detecteren en mechanisch bestrijden van ridderzuring (*Rumex obtusifolius* L) in grasland (zie Figuur 3.21). Onkruidherkenning gebeurt aan de hand van beeldherkenning. Voor meer praktische informatie zie <http://www.ruud.wur.nl/>. Aan de hand van beeldanalyse is een systeem gemaakt om aardappelopslag te herkennen (Nieuwenhuizen *et al.*, 2010). In een recent overzicht van technologieën die beschikbaar zijn voor onkruidherkenning (Peteinatos *et al.*, 2014) worden de voor-en nadelen per systeem belicht.



Figuur 3.21 Prototype voor het detecteren en mechanisch bestrijden van ridderzuring (*Rumex obtusifolius* L) in grasland (Van Evert *et al.*, 2011).

In een studie met verschillen suikerbiet cultivars werd onderzocht of er met behulp van fluorescentie metingen een onderscheid gemaakt kon worden tussen de verschillende oorzaken van plantenstress (Leufen *et al.*, 2014). Er werd gekeken naar droogte, stikstof tekort en de aanwezigheid van ziekten. Het bleek niet mogelijk om aan de hand van de metingen de onderliggende oorzaak te bepalen.

3.3.5 Sensing van kwaliteitsparameters

3.3.5.1 Droge stofgehalten

De technologie die vooral gebruikt wordt om inhoudsstoffen te meten, is NIRS. Aan diverse toepassingen in gras- en maïsproductie wordt gewerkt (zie Figuur 3.22), zoals aan de toepassing van metingen van inhoudsstoffen in geoogst product of nutriënten en in drijfmest.



Figuur 3.22 Toepassing NIRS voor meten van inhoudstoffen.

In een studie door (Büscher *et al.*, 2014) werd een NIRS sensor in een zelfrijdende hakselaar bevestigd, in de flow van het geogste product. Grasland haksel gemeten met sensor vs. bepaald in lab liet een R^2 van 0.84 zien, en voor maïshaksel was dit 0.83. Feenstra (2014) noemt een ander systeem voor maïs waarbij de meting gebaseerd is op de hoeveelheid ruimte tussen de invoerrollen. Aanschafprijs voor deze extra functionaliteit op de hakselaar is 15.000 euro (Feenstra, 2014). Een soortgelijk systeem is ook beschikbaar voor grasland, dan met een NIRS sensor in de blaaspijp, maar de droge stof metingen blijken nog te onbetrouwbaar (Feenstra, 2014 #650).

De TRL van deze NIRS systemen voor het meten van inhoudstoffen c.q. kwaliteit van gras en maïs ligt op een 4-6, het proof of principle is aangetoond, in sommige situaties is ook een redelijk voorspellende waarde aangetoond onder praktische omstandigheden. De meetwaarde zijn echter sterk afhankelijk van omgevingsfactoren. Kalibratie dient nog verder ontwikkeld te worden.

3.3.5.2 Ruw eiwit/VCos

In een studie in Nieuw Zeeland werd de hyperspectrale ASD FieldSpec Pro sensor gebruikt om het ruw eiwit gehalte te detecteren in graslanden. Deze sensor werd gecombineerd met de Canopy Pasture Probe om gelijke verlichting van het plantmateriaal te waarborgen. De resultaten lieten een sterke relatie tussen de veldmetingen en lab bepalingen zien voor ruw eiwit ($R^2 = 0.78$). (Yule *et al.*, 2014). Er wordt momenteel onderzocht of de eerder (paragraaf 3.2.2) genoemde RapidSCAN CS-45 (Holland, 2014) gebruikt kan worden (http://www.nieuweoogst.nu/scripts/edoris/edoris.dll?tem=LTO_TEXT_VIEW&doc_id=169684) om ruw eiwit gehalte mee te bepalen. De eerste indruk is dat dit nog toekomstmuziek is. De TRL van deze sensorsystemen ligt op 6.

3.4 Klimaatsensoren

3.4.1 Sensoren op het bedrijf

Er is een groot scala aan sensoren op de markt om klimaatmetingen te doen. De belangrijkste parameters zijn temperatuur, (fotosynthetisch actieve) straling, luchtvochtigheid, windsnelheid en neerslag. Nederland beschikt over een uitgebreid netwerk van weerstations waar deze parameters gemeten worden. Daarnaast hebben telers soms een eigen weerstation. Zo'n weerpaal of weerstation wordt aangeschaft om meer nauwkeurige informatie over de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, neerslag, windsnelheid, windrichting en zonnestraling te hebben. Dacom levert weerpalen vanaf 2190 euro. Daarnaast moet dan 150 euro betaald worden aan licentiekosten voor Windows. De weerpalen worden aanvullend geleverd worden met bodemvochtsensoren. In Figuur 3.23 wordt een weermeetpaal getoond. De TRL waarden van de klimaatsensoren en meetstations liggen hoog (8–9).

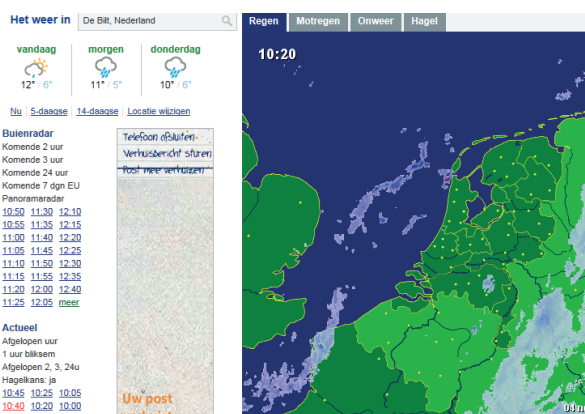


Figuur 3.23 Weermeetpaal.

3.5 Meteo-data van het KNMI/meteoconsult

Op basis van weermodellen van bijv. KNMI, die gevoed worden met waarnemingen vanuit sensoren in satellieten en grondstations, worden weersvoorspellingen geleverd. Voor de Nederlandse situatie zal het altijd lastig blijven om voorspellingen goed te doen, zeker als het gaat om dagen vooruit voorspellen. Dit komt doordat ons weer sterk onder invloed staat door slecht voorspelbare processen in de dampkring die het weer in Nederland beïnvloeden.

Toch zijn er diensten ontwikkeld waar telers op kunnen sturen. Denk bijvoorbeeld aan de Buienradar die vrij beschikbaar is en gebruikt kan worden om het tijdstip van maaien of oogsten op af te stemmen (zie Figuur 3.24). Naast Buienradar zijn er andere weersvoorspellingen en service die te gebruiken zijn om klimaatgegevens relevant voor de teelt perceels specifiek te verkrijgen.



Figuur 3.24 Printscreen van de Buienradar (www.buienradar.nl).

3.6 Beweiding

Sensoren die informatie leveren over wat een koe doet waar en wanneer in de wei kunnen bijdrage aan optimalisatie van beweiding en ruwvoerproductie. Voor de registratie van het vreet- en herkauwedrag van individuele koeien komt steeds meer sensortechnologie voor de praktijk beschikbaar. Daarbij wordt gebruik gemaakt van sensoren met verschillende werkingsprincipes voor het detecteren van bewegingen van een dier. Hier volgt een overzicht.

3.6.1 Accelerometer of versnellingsopnemer

Met een accelerometer of versnellingsopnemer bevestigd aan een poot of aan de kop kan de mate van beweging van een dier (activiteit) worden vastgesteld. De parameter 'activiteit' wordt vooral gebruikt voor de detectie van tochtige en zieke koeien. Deze wordt inmiddels door meerdere fabrikanten/leverancier in de praktijk verkocht (TRL 9).

Uit de informatie verzameld met een aan de poot bevestigde versnellingsopnemer worden ook steeds meer gedragsparameters afgeleid. Systemen als IceCubes (IceRobotics Ltd, Edinburgh, Schotland,

UK), Smarttag Leg (Nedap Livestock Management, Groenlo, NL) leveren informatie over de tijd die ieder dier per blok van 15 minuten besteedt aan liggen, staan en lopen. Hieruit kan het volledige gedragspatroon over een etmaal op dierniveau worden vastgesteld. Slimme software (de Mol *et al.*, 2014) analyseert de verzamelde gegevens en geeft attenties wanneer plotselinge afwijkingen als gevolg van gezondheidsproblemen optreden (TRL 8). Ook is bijvoorbeeld uit de hoogte van het activiteitsniveau of uit de tijd besteed aan lopen af te leiden of een dier weidegang heeft. Wordt de accelerometere aan de kop bevestigd dan geven de gemeten bewegingen informatie die gerelateerd kan worden aan het vreet- en herkauwgedrag van een dier. De SensOor (Agis Automatisering BV, Harmelen, NL, <http://www.agis.nl/Innovaties/CowmanagerSensOor.aspx>) kan worden bevestigd aan de oormerken (Zie Figuur 3.25). Aan de hand van de oorbewegingen wordt per tijdsblok van een uur het gedrag van de koe geïnclassificeerd in herkauwen, eten, rusten of actief. In een onderzoek naar de nauwkeurigheid en precisie van deze sensor werden visuele waarnemingen vergeleken met de sensor metingen. Er was een sterke correlatie tussen de waarnemingen en de sensor metingen (Bikker *et al.*, 2014). Voor herkauwen en rusten bleek het systeem praktijkwaardig (TRL 9), voor het eetgedrag was het veelbelovend (TRL 7) en voor het actieve gedrag is nog additioneel onderzoek nodig (TRL 6). De bewegingssensor in de Smarttag Neck (Nedap Livestock Management, Groenlo, NL, wordt met een halsband onder tegen de hals van een dier bevestigd (zie Figuur 3.25). Uit een analyse van de stand en de bewegingen van de kop wordt per tijdsblok van een kwartier een schatting gemaakt van de tijd besteed aan het zoeken en opnemen van voer en of gras. Momenteel wordt de nauwkeurigheid van deze sensor gevalideerd (TRL 5). Evenals bij de aan de poot bevestigde versie wordt uit de informatie verzameld door de Smarttag Neck ook een activiteitsparameter voor tochtdetectie afgeleid. (Bron: <http://nl.nedap-livestockmanagement.com/oplossingen/koeien/smarttag-hals-met-vreetmonitoring>)



Figuur 3.25 Bewegingssensoren om vreet- en herkauwgedrag van een koe te meten. Links de SensOor van Agis Automatisering BV en rechts de Smarttag Neck van Nedap Livestock Management.

3.6.2 Halster met drukopnemer

Bij deze technologie wordt door middel van een druksensor de kauwbeweging van een koe geregistreerd. De techniek opgenomen in een halster om de kop van een koe (RumiWatch, ITIN + HOCH GmbH, Zwitserland), bestaat uit een met vloeistof gevulde neusband met een druksensor. De kauwbewegingen van de bek van de koe worden door drukveranderingen in de neusband geregistreerd. Software classificeert deze informatie in herkauwen, vreten of overige activiteiten. Validatie heeft uitgewezen dat het systeem zeer correct werkt (Nydegger *et al.*, 2011). Voorlopig wordt het vooral voor onderzoeks- en adviesdoeleinden gebruikt. Voor verdere toepassing in de praktijk is nog verdere ontwikkeling en onderzoek nodig (TRL 4).

3.6.3 Halsband met microfoon

Deze door SCR (SCR, Netanya, Israël) ontwikkelde techniek maakt gebruik van een microfoon, die door middel van een halsband en een contragewicht op de zijkant van de nek wordt gehouden. De microfoon registreert de kauwgeluiden die door de kaken van de koe worden gemaakt. Met behulp van analyse software wordt per blok van twee uur uit het geluidspatroon afgeleid hoeveel tijd besteed is aan het herkauwen van voer. Daarnaast wordt door het bewegen van de kop een gewichtje in de sensor heen en weer bewogen waarbij een klikje wordt gegenereerd, die ook door de microfoon wordt

geregistreerd. De frequentie van deze geregistreerde klikjes wordt omgezet in een activiteitswaarde, die gebruikt wordt voor tochtigheidsdetectie. In verschillende wetenschappelijk onderzoeken is deze techniek gebruikt en gevalideerd (Schirmann *et al.*, 2009). Het systeem wordt in Nederland op de markt gebracht onder de merknaam Qwes-HR (Lely Industries NV, Maassluis, NL) (TRL 6).

4 Modellen

4.1 Wat zijn bruikbare modellen?

Precisielandbouw kan niet zonder wiskundige modellen. Het begrip model, zoals dat in dit hoofdstuk gebruikt wordt, betreft software die gebruikt wordt voor een systematische analyse of het doen van voorspellingen. Analyses en voorspellingen worden gebruikt voor onderzoek, voor doorvertaling naar een praktisch advies of voor aansturing van machines. Andere aanduidingen voor modellen zijn rekenregels, algoritmen of Beleidsondersteunende systemen (BOSsen).

Voor het inventariseren van modellen lag de focus op (1) enkelvoudige modellen die betrekking hebben op hydrologie, groei en nutriënten en op (2) meervoudige modellen die vakgebieden combineren of binnen een vakgebied uit meerdere modellen bestaat, zoals bij het bemestingsadvies het geval is (model per element). Uitgangspunt is geweest dat de modellen bij voorkeur te gebruiken moeten zijn op perceelsniveau voor operationele beslissingen.

Voor de inventarisatie van beschikbare modellen is onder andere gebruikgemaakt van het visiedocument van WUR, Deltaris en KWR dat recent in juli 2014 is gepubliceerd (Reidsma *et al.*, 2014). In dit document is een overzicht gegeven van modellen op het gebied van hydrologie, gewas- of vegetatiegroei en nutriënten. Daarbij is een visie gegeven op het koppelen van hydrologische modellen met gewasgroeimodellen, vooral om de verdamping vanuit het oogpunt van waterbeheer zo goed mogelijk in te schatten. De meeste hydrologische modellen zijn ontwikkeld voor waterbeheer op nationale en regionale schaal en zijn er slechts enkele bruikbaar op perceelsniveau. In feite is dit alleen het model SWAP of een afgeleide hiervan het model metaSWAP. Voor het berekenen van het grondwaterstandsverloop op regionale schaal wordt het grondwatermodel Modflow gebruikt. Voor gewasgroei zijn meerdere groeimodellen beschikbaar. Daarbij is vooral de koppeling met een hydrologisch model interessant, omdat dit dan wellicht mogelijkheden biedt om groei te voorspellen op basis van de actuele bodemvocht- en weersituatie. Voorbeelden van dergelijk geïntegreerde modellen zijn SWAP-WOFOST en Waterpas. Deze worden nu echter alleen gebruikt voor onderzoeksdoeleinden.

In tabel 4.1 staan de geïnventariseerde modellen. Daarbij is aangegeven wie de beheerder is van het model, op welk schaalniveau het wordt toegepast (perceel of bedrijf), waar het voor te gebruiken is (onderzoek of praktijk), of de code beschikbaar is en of het in basis te gebruiken is voor een praktisch adviesstelsel. Voor de beoordeling van dit laatste criterium is gekeken naar de benodigde input (veelheid en complexiteit) en de robuustheid van het model (mate van kalibratie die nodig is). Vanaf deze paragraaf worden alle geïnventariseerde modellen afzonderlijk besproken.

Het merendeel van de geïnventariseerde modellen is primair bedoeld voor onderzoeksdoeleinden en (nog) niet geschikt voor operationeel gebruik. Praktische modellen op het gebied van hydrologie, groei en nutriënten zouden voor een adviesstelsel echter veel toegevoegde waarde hebben. Met de geselecteerde modellen uit dit hoofdstuk 4 wordt in hoofdstuk 5 verder gewerkt. In paragraaf 5.4 van hoofdstuk 5 is aangegeven hoe deze modellen in combinatie met data van sensoren en bepalingen kunnen bijdragen aan een basis adviesstelsel in de vorm van modules. Het aanbod aan modellen dat geschikt is voor een praktisch advies is breed genoeg om de modules te voeden. De modellen die primair bedoeld zijn voor onderzoek en niet geschikt zijn voor een praktisch advies, kunnen wel van grote waarde om de eenvoudiger, meer praktische modellen inhoudelijk te verdiepen.

Tabel 4.1

Overzicht enkel- en meervoudige modellen op perceels- of bedrijfsbasis voor hydrologie, groei, nutriënten en beweiding

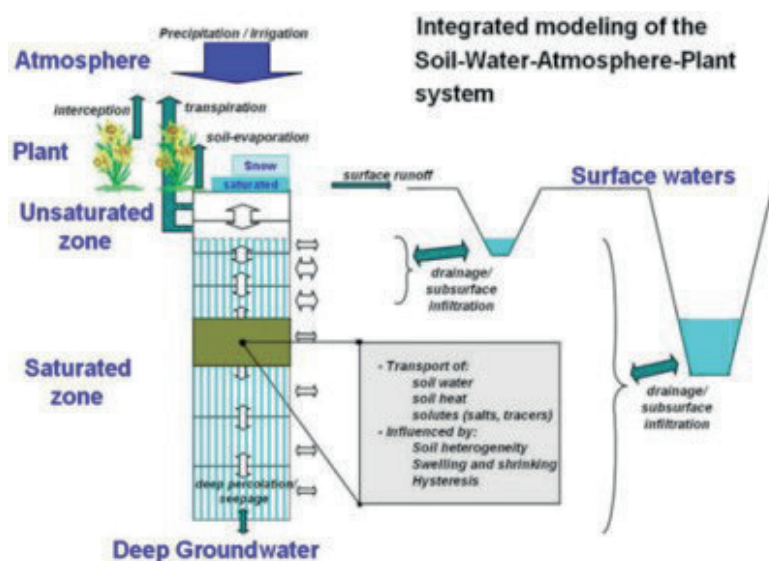
Model	Beheerder	Schaalniveau	Gebruik (onderzoek/ praktijk)	Code openbaar (wel / niet)	Geschikt voor praktisch advies (ja / nee)
Enkelvoudige modellen					
<i>Hydrologie</i>					
SWAP	Alterra	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
MetaSwap	Alterra	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
SIMGRO	Alterra	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
Sebal	Eleaf	Pixel	Onderzoek	Niet	Ja
Beregeningswijzer	Livestock Research	Perceel/bedrijf	Onderzoek	Niet	Ja
<i>Groei</i>					
WFOST	Alterra	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
GRAMIN,	Livestock Research	Perceel	Onderzoek	Wel	Ja
GRAS2007	Livestock Research	Perceel	Onderzoek	Niet	Ja
LINTUL	PRI	Perceel	Onderzoek	Wel	Ja
CNGras	PRI	Perceel	Onderzoek	Niet	Nee
<i>Nutriënten</i>					
ANIMO	Alterra	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
MINIP/NDICEA, Century en RothC/VSD+	Alterra, Louis Bolk Instituut	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee
<i>Beweiding</i>					
Graslandgebruikswijzer	Livestock Research	Perceel/bedrijf	Onderzoek	Niet	Ja
Meervoudige modellen					
BBPR	Livestock Research	Bedrijf	Onderzoek	Niet	Nee
SWAP-WFOST	Alterra	Perceel	Onderzoek	Niet	Nee
Waterpas	Alterra/ Livestock Research	Perceel/bedrijf	Onderzoek	Niet	Nee
Beregeningssignaal	ZLTO	Perceel/bedrijf	Praktijk	Niet	Ja
Bemestingsadvies	Livestock Research	Perceel	Praktijk	Wel	Ja

4.2 Hydrologie

4.2.1 SWAP

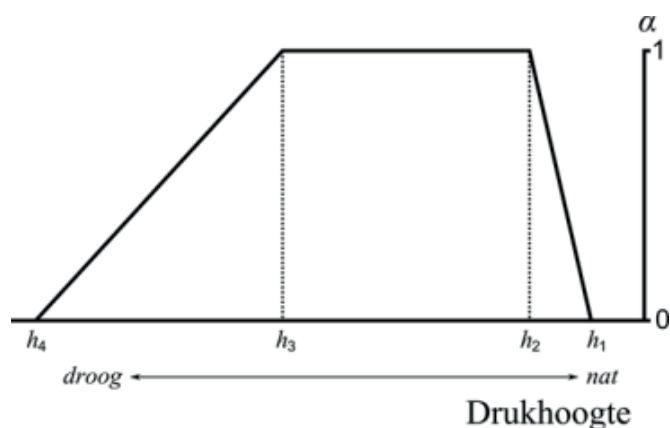
Bron: STOWA 2013. Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2a: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen. Rapport 37.

Het SWAP model (Soil-Water-Atmosphere-Plant, Figuur 4.1) simuleert het transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en, zij het in beperkte mate, de verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra. De eerste versie van het SWAP model werd, voor toepassingen op veldschaal, al in 1978 ontwikkeld (Feddes *et al.*, 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. SWAP wordt gezien als het standaardmodel voor het bepalen van de actuele verdamping als functie van meteorologische gegevens gecombineerd met gewas en bodemgegevens (Feddes en Raats, 2004).



Figuur 4.1 Schematisch overzicht van het bodem-water-atmosfeer-plant systeem, samengebracht in het model SWAP (www.SWAP.alterra.nl).

De reductie in actuele transpiratie als gevolg van beschikbaar vocht in de bodem wordt weergegeven door de zogenaamde wortelonttrekkingsfunctie. Zowel te droge als te natte omstandigheden leiden tot een niet optimale transpiratie omdat plantenwortels dan niet voldoende water kunnen opnemen. Voor het berekenen van reducties in de wateropname door te droge (watertekort) en te natte (zuurstoftekort) omstandigheden wordt de reductiefunctie van Feddes *et al.* (1978) gebruikt (Figuur 4.2). SWAP beschrijft elk van de factoren die deel uitmaken van de verdamping: evaporatie van de bodem, transpiratie van het gewas en interceptieverdamping. Zowel de potentiële als actuele evaporatie en transpiratie worden berekend.



Figuur 4.2 Relatieve wortelopname α (relatief ten opzichte van potentiële opname) als functie van de drukhoogte h volgens Feddes et al. (1978), zoals gebruikt voor de berekening van droogte- en natschade in SWAP. De wateropname door wortels neemt lineair af van h_3 tot h_4 door droogtestress. Tussen h_2 en h_3 is de wateropname optimaal ($\alpha=1$). Volgens deze functie neemt de wateropname af door zuurstofstress tussen de kritische grenswaarden h_2 en h_1 .

SWAP is ontwikkeld voor toepassing op veldschaal, maar wordt tevens ingezet voor het simuleren van de waterhuishouding op regionale schaal. Het ontbreken van regionale interacties tussen de SWAP-rekeneenheden stelt beperkingen aan het gebruik van SWAP in regionale toepassingen. MetaSWAP (Van Walsum en Groenendijk, 2008) is daarom ontwikkeld voor gebruik in het NHI en voor gebruik binnen regionale modellering in het algemeen, en maakt gebruik van de rekenresultaten van SWAP om de vochtverdeling en de waterfluxen te berekenen. De naam MetaSWAP is bewust gekozen om de relatie met SWAP als referentie-model in de naam zichtbaar te maken. Voor perceeltoepassingen waarvoor specifieke informatie over bodemprofiel en/of bodemfysica voorhanden zijn, heeft gebruik van SWAP de voorkeur.

Als de bodemvochtcondities niet optimaal zijn, bijvoorbeeld door vochttekort, neemt de potentiële transpiratie af tot de actuele transpiratie (Figuur 2). Niet alleen een tekort aan water in de wortelzone leidt tot transpiratiereductie, maar ook een tekort aan zuurstof, en een te hoog zoutgehalte van het bodemvocht kunnen tot reductie van de wateropname door de wortels leiden. Onder suboptimale vochtvoorziening in de wortelzone zal de potentiële transpiratie (T_p) afnemen tot de actuele transpiratie (T_a), wat gevolgen heeft voor de gewasopbrengst. De relatieve gewasopbrengst (Y_a/Y_p) wordt gelijk gesteld aan de relatieve transpiratie (T_a/T_p):

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \frac{T_a}{T_p} \quad (1)$$

In het SWAP-model voor de onverzadigde zone wordt het effect van de wateropname van plantenwortels beschreven door het opnemen van de zogenaamde 'sink-term' in de Richards' vergelijking voor stroming van water in de onverzadigde zone. De actuele wateropname S van planten wordt berekend door de maximale wateropname S_{\max} te vermenigvuldigen met stressfactoren voor droogte-, zuurstof- en zoutstress, respectievelijk α_{droogte} , α_{zuurstof} en α_{zout} (Kroes et al., 2009):

$$S(z) = \alpha_{\text{droogte}} \alpha_{\text{zuurstof}} \alpha_{\text{zout}} S_{\max}(z) \quad (2)$$

S_{\max} , de maximale wateropname door planten, wordt bepaald door de potentiële transpiratie te verdelen over verschillende diepten z aan de hand van het verloop van de worteldichtheid met de diepte. S_{\max} geïntegreerd over de worteldiepte, is dus weer gelijk aan de potentiële transpiratie. Integratie van $S(z)$ over de wortelzone levert de actuele transpiratie.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

SWAP is een puntmodel dat waterstroming en waterberging numeriek beschrijft en onder invloed van de processen en wateruitwisseling aan de drie randen, te weten meteo (verdamping, neerslag en temperatuur) aan de bovenrand, kwel / wegzijging aan de onderrand en drainage aan de zijrand. Als input vraagt het model in de eerste plaats een profielopdeling in horizonten met onderscheid in compartimenten die gekozen worden afhankelijk van het doel van de studie en waarin de dynamiek van het systeem doorklinkt. De input per horizont betreft de hydraulische eigenschappen van de bodem te weten de waterretentiekarakteristiek en de doorlatendheidskarakteristiek van de bodem. Hoewel het programma in de eerste plaats voor onderzoeksdoeleinden bedoeld is, is het programma bij de keuze van standaard invoerwaarden (bijvoorbeeld Staringreeks) redelijk gebruiksvriendelijk en behoeft het een beperkte kennis van de hydrologie.

4.2.2 MetaSWAP

Bron: Walsum, P.E.V. van & A.A. Veldhuizen, 2011. MetaSWAP_V7_2_0; Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-werkdocument 276 (referaat).

Veel vragen over het waterbeheer betreffen situaties en processen die worden beïnvloed door hydrologische terugkoppelingen op regionale en zelfs nationale schaal. MetaSWAP is bedoeld voor het vervangen van SWAP bij het grootschalig doorrekenen van bodem-plant-atmosfeerkolommen die gekoppeld zijn aan geïntegreerde gebiedsmodellen van grond- en oppervlaktewater. MetaSWAP is een 'meta'-model van SWAP. Het metaconcept is gebaseerd op een vereenvoudigde oplossing van de niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking om bodemfysische processen te beschrijven, de zogenaamde Richards-vergelijking. Deze vergelijking wordt vervangen door twee 'gewone' differentiaalvergelijkingen, één voor de procesbeschrijving, en één voor de waterbalans. Om het informatieverlies dat bij die vereenvoudiging optreedt te compenseren, is het nodig om MetaSWAP te kalibreren en te valideren op SWAP. In Van Walsum en Veldhuizen (2011) is beschreven hoe dit gedaan wordt, en tevens hoe de kwaliteit van het model is geborgd volgens de zogenaamde 'Status A' standaard van de WOT Natuur & Milieu.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

De basisberekeningen SWAP en metaSWAP zijn uitwisselbaar; zie input SWAP. Ook MetaSWAP is in basis een model voor onderzoeksdoeleinden.

4.2.3 SEBAL

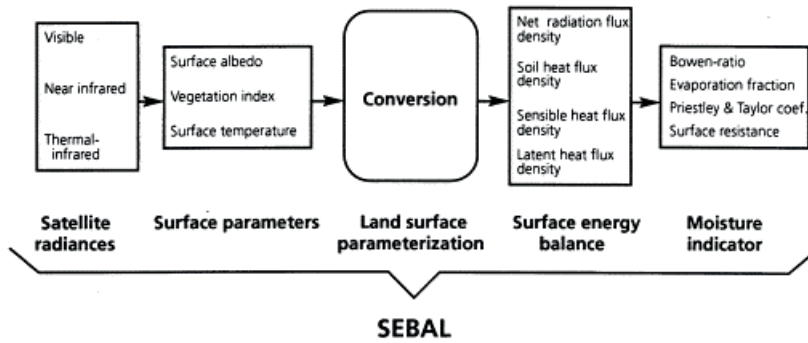
Bron:

http://www.waterwatch.nl/fileadmin/bestanden/Tools/A_scientific_description_of_SEBAL_procedure.pdf

Het model Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) berekent de actuele en potentiële evapotranspiratie (verdamping) op basis van een energiebalans en maakt hierbij gebruik van optische satellietbeelden (Bastiaanssen *et al.*, 1998). Tevens worden met het model indicatoren voor bodemvocht berekend. De berekeningen worden op pixel-grootte uitgevoerd.

De belangrijkste invoergegevens voor SEBAL betreffen spectrale straling in het zichtbare, nabij-infrarood en thermisch infrarode deel van het spectrum. SEBAL berekent per pixel een straling- en energiebalans. Aanvullend op de satellietbeelden zijn voor het gebruik van het SEBAL-model de volgende standaard weergegevens nodig: windsnelheid, luchtvochtigheid, straling en luchttemperatuur.

De spectrale stralingen worden omgezet in kenmerken van het landoppervlak, zoals oppervlakte albedo (lichtreflectie), bladoppervlakte-index (LAI), vegetatie-index (NDVI) en oppervlaktetemperatuur. Eerst wordt de momentane verdamping berekend en die wordt vervolgens opgeschaald naar dagwaardes. In Figuur 4.3 zijn de componenten van het SEBAL-model weergegeven.

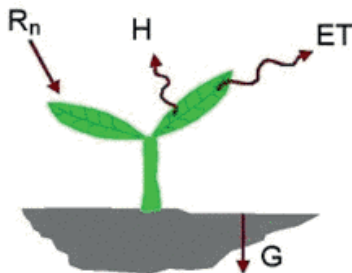


Figuur 4.3 Belangrijkste onderdelen van het model Surface Energy Balance Algorithm voor Land (SEBAL) waarbij met satellieten uitgezonden en gereflecteerde straling spectraal gemeten wordt. De spectrale stralingen worden omgezet in kenmerken van het landoppervlak welke vervolgens geconverteerd worden in een oppervlakte energiebalans en indicatoren voor bodemvocht (Bastiaanssen et al., 1998).

De basis voor het SEBAL-model is de oppervlakte-energie balans (www.waterwatch.nl). De momentane energie die nodig is voor verdamping wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$ET = R_n - G - H \quad (1)$$

waarbij ET de latente warmte flux (W/m²) is, R_n is de netto straling flux aan het oppervlak (W/m²), G is de bodem warmteflux (W/m²) en H is de voelbare warmte flux van de lucht (W/m²) (zie Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Oppervlakte-energie balans.

R_n wordt berekend met een stralingsbalans waarbij van de inkomende fluxen, de uitgaande fluxen worden afgetrokken. De in en uitgaande stralingsfluxen zijn geïllustreerd in Figuur 4.4 (www.waterwatch.nl).



Figuur 4.4 Oppervlakte stralingsbalans.

De Bodem warmteflux (G) wordt empirisch berekend als een G / R_n fractie met vegetatie indexen, oppervlaktetemperatuur, en oppervlakte-albedo. De voelbare warmtestroom (H) wordt berekend met behulp van de windsnelheid waarnemingen, geschatte oppervlakteruwheid, en het oppervlak aan de lucht temperatuurverschillen die worden verkregen door middel van een geavanceerde zelf-calibratie

tussen volledig droge ($\lambda E \approx 0$) en natte ($H \approx 0$) pixels. SEBAL maakt gebruik van een iteratief proces om te corrigeren voor de atmosferische instabiliteit veroorzaakt door effecten van oppervlakte verwarming.

De doorontwikkeling van de SEBAL modelformulering voor de groei van gewassen is in grote lijnen vergelijkbaar met de meeste numerieke modellen voor simulatie van gewasgroei en modellen voor ecologische productie op mondiale schaal. Een belangrijk verschil is echter dat de ontwikkeling van het gewas als gevolg van de grondsoort, de heersende waterbeheer voorwaarden en boer praktijken niet wordt berekend, maar wordt benaderd door middel van NDVI en temperatuur tijdprofielen.

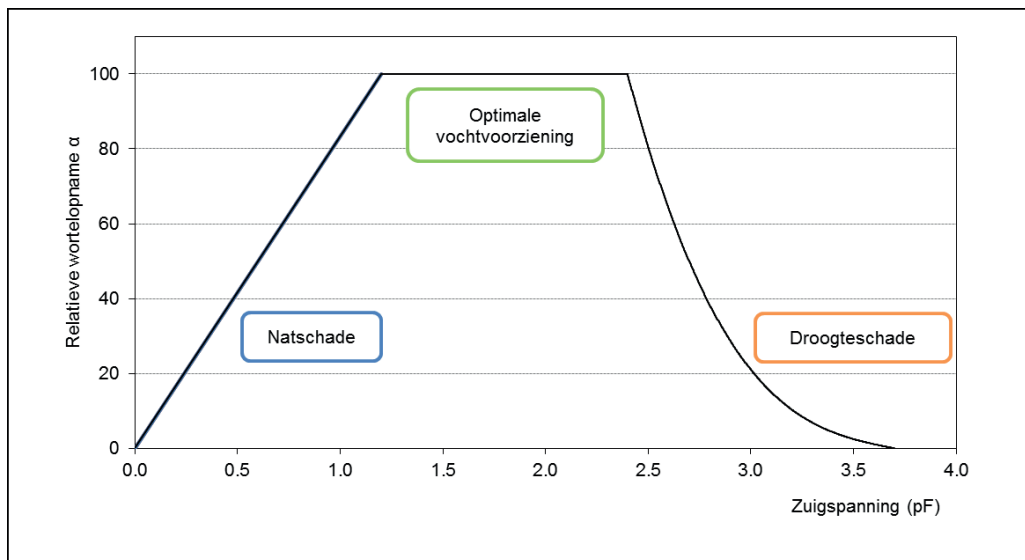
Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

Data die met SEBAL worden genereerd (verdamping) zijn via eLEAF (www.waterwatch.nl) beschikbaar en daarmee voor de praktijk toepasbaar.

4.2.4 BeregeningsWijzer

In het model BeregeningsWijzer wordt per perceel de actuele en de te verwachten bodemvochttoestand berekend aan de hand van een bodemvochtbalans en wordt aangegeven of en hoeveel er beregend moet worden. Het model betreft een relatief eenvoudig 'bakjesmodel', met als bakje de wortelzone die een hoeveelheid vocht kan bevatten. De grootte van het bakje wordt bepaald door de textuur van de bodem en de worteldiepte. Voor de textuur van de bodem wordt gebruik gemaakt van de bodemkwalificatie volgens de bouwstenen van de Staringreeks uit 1987, conform de aanbeveling volgens Wösten *et al.* (2012). De eenvoud van het programma zit vooral in het hanteren van één bouwsteen voor de bovengrond en één bouwsteen voor de ondergrond en het niet simuleren van de bodemvochttoestand boven veldcapaciteit ($pF=2$). Op zandgronden met relatief lage grondwaterstanden (waar voor de melkveehouderij berekening voornamelijk aan de orde is) is de veronderstelling dat de hoeveelheid vocht boven veldcapaciteit in zeer korte tijd als overschot naar de ondergrond verdwijnt en niet beschikbaar is voor gewasverdamping. Het principe van de vochtbalans is dat de hoeveelheid vocht in de wortelzone (het bakje) wordt aangevuld door neerslag en capillaire opstijging van vocht uit de verzadigde zone in de ondergrond en dat vocht verdwijnt door gewasverdamping. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de referentiegewasverdamping, waarbij geen onderscheid wordt gemaakt in evaporatie en transpiratie zoals dat in complexere hydrologische modellen zoals SWAP dat wel gedaan wordt. Evaporatie betreft de directe verdamping uit de onbedekte bodem en de verdamping van aanhangend vocht (interceptie). Transpiratie is de daadwerkelijke verdamping door het gewas.

Een belangrijk element in het berekenen van de vochtbalans is de relatie tussen de zuigspanning (drukhoogte) in de wortelzone en de gewasverdamping. De actuele verdamping wordt bepaald op basis van een Feddes-curve (Feddes *et al.*, 1978), waarbij de verdampingsreductie bij een relatief natte vochttoestand van de bodem (wortelzone) en bij een relatief droge vochttoestand van de bodem volgens verschillende functies wordt beschreven. Daarbij is voor het droge traject onderscheid gemaakt in een relatief hoge en in een relatief lage verdampingsvraag. Voor het droge traject is gekozen voor niet-lineaire functies op basis van expert judgement (I.E. Hoving en B. Aasman), omdat bij de gebruikelijke lineaire functies de verdamping te snel reduceert in vergelijking tot de praktijk. In Figuur 3 staat schematisch uitwerking van de Feddes functie zoals die voor gras, snijmaïs, aardappelen en bieten is toegepast.



Figuur 4.5 Relatieve Wortelopname α (relatief ten opzichte van potentiële opname) als functie van de zuigspanning (pF) volgens Feddes et al. (1978), toegepast in BBPR om de transpiratiereductie te berekenen, met een functie voor natschade' en een functie voor droogteschade. Bij ($\alpha = 100$) is de Wateropname optimaal.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

Het model is in meerdere pilots, die deel uitmaakten van Beregenen op maat in Noord-Brabant, op praktijkbedrijven getoetst. Daarbij blijkt het beschikbaar bodemvocht in de wortelzone goed voorspelt te worden. Ook bij toepassing van de Beregeningswijzer in BeregeningsSignaal (zie paragraaf 4.5.6) heeft de praktijk vertrouwen in het advies. Kwetsbare punten zijn een goede inschatting van de worteldiepte de keuze van de textuurklassen (Staringreeks) voor de boven – en ondergrond. Default waarden voor worteldiepte per grondsoort/gewas combinatie en koppeling met de bodemkaart, zoals dat in BeregeningsSignaal gefaciliteerd wordt, geeft de gebruiker een goede ondersteuning. Met de BeregeningsWijzer kan vooralsnog alleen de reductie van beschikbaar vocht berekend worden en niet de mate van vernatting. Voor relatief natte situaties, zoals veengronden met hoge slootpeilen, zou het een model als Beregeningswijzer inzicht kunnen geven in de draagkracht van de graszode of de bekwaamheid van de bodem voor grondbewerking. Deze functionaliteit is nog niet ontwikkeld, maar zou mogelijk aan het model toegevoegd kunnen worden.

4.3 Gewasgroei

4.3.1 WOFOST

Bron: <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST.htm>

WOFOST (World Food Studies) is een simulatiemodel voor de kwantitatieve analyse van de groei en productie van eenjarige akkerbouwgewassen. Het is een mechanistisch model dat gewasgroei verklaard op basis van de onderliggende processen zoals fotosynthese, ademhaling en hoe deze processen worden beïnvloed door omgevingsfactoren.

Met WOFOST kan de haalbare productie van gewassen, biomassa, watergebruik, etc. berekend worden voor een locatie gegeven kennis over grondsoort, soort gewas, meteorologische gegevens en gewasbescherming factoren (bv zaaidatum). WOFOST is gebruikt door veel onderzoekers over de hele wereld en is toegepast voor veel gewassen over een groot bereik van klimatologische en beheer omstandigheden. Bovendien wordt WOFOST geïmplementeerd in de Crop Growth Monitoring System, dat operationeel wordt gebruikt voor akkerbouwgewassen in Europa te monitoren en gewasopbrengst voorspellingen te doen voor het huidige groeiseizoen.

WOFOST is ontstaan in het kader van interdisciplinaire studies over mondiale voedselzekerheid en op

de potentiële productie wereld voedsel door het Center for World Food Studies (CWFS) in samenwerking met de Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Theoretische Productie Ecologie (WAU-TPE) en de DLO -Center voor Agrobiologisch Research and Soil Fertility (AB-DLO), Wageningen, Nederland. Na beëindiging van CWFS in 1988, heeft de DLO Staring Centrum (SC-DLO) de ontwikkeling van het model voortgezet in samenwerking met AB-DLO en WAU-TPE. Momenteel wordt het WOFOST model onderhouden en verder ontwikkeld door Alterra in samenwerking met de Plant Production Systems Group van Wageningen Universiteit (<http://www.pps.wur.nl/UK>) en de Agri4Cast eenheid van het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek in Italië (<http://mars.jrc.it/mars/About-us/AGRI4CAST>).

Vanuit ruimtelijk perspectief is WOFOST een eendimensionaal simulatiemodel, oftewel zonder verwijzing naar een geografische schaal. De omvang van een gebied waarvoor WOFOST kan worden toegepast is beperkt, omdat bij een te grote schaalgrootte er fouten gaan optreden door niet-lineaire respons van gewasmodellen op de invoer van het model. Zodoende worden eisen gesteld aan de grootte van de ruimtelijke eenheden. Door grote ruimtelijke eenheden op te splitsen in kleinere eenheden wordt dit probleem ondervangen. In Europa wordt WOFOST meestal toegepast bij ruimtelijke eenheden van 25x25 of 50x50 km. Fouten door schaalvergroting zijn dan te verwaarlozen.

Vanuit tijdsperspectief simuleert WOFOST de groei van gewassen met een temporele resolutie van een dag. In WOFOST, wordt de gewasgroei gesimuleerd op basis van eco-fysiologische processen. De belangrijkste processen zijn fenologische ontwikkeling, CO₂-assimilatie, transpiratie, ademhaling, verdeling van assimilaten over de verschillende organen en de vorming van droge stof.

WOFOST onderscheidt drie niveaus van gewasproductie:

- Potentiële productie welke wordt bepaald door gewasvariatie, gewasbescherming, straling en temperatuur;
- Water-gelimiteerde productie waarbij de potentiële productie wordt beperkt door de beschikbaarheid van water;
- Nutrient-gelimiteerde productie waarbij de water-gelimiteerde productie wordt beperkt door de beschikbaarheid van nutriënten.

De nutriënt-gelimiteerde productie is in WOFOST niet op een biofysische manier geïmplementeerd, maar wordt benaderd door post-processing van de water gelimiteerde productieresultaten. Een verdere vermindering van factoren (onkruid, ongedierte, vorst en ziekte) worden niet in aanmerking genomen in WOFOST.

In WOFOST is de beschikbaarheid van bodemvocht voor plantengroei een functie van de verdampingsvraag van de atmosfeer, de gewasgroep en de bodemkarakteristiek. Bij een optimale vochtvoorziening wordt het transpiratieverlies volledig gecompenseerd. Is een bodem te droog of te nat dan leidt dit tot een geringere wateropname door de wortels; in een droge bodem als gevolg van een tekort aan water, in een natte bodem als gevolg van zuurstoftekort. Een gewas reageert op waterstress door de huidmondjes te sluiten. Hierdoor vermindert de CO₂-assimilatie, waardoor de gewasproductie reduceert.

Het vochtgehalte in de wortelzone volgt in WOFOST uit een berekening van een vochtbalans op dagbasis. waarbij afhankelijk van de toepassing drie sub-modellen onderscheiden worden, namelijk voor het benaderen van een potentiële productie, het benaderen van een water-gelimiteerde productie zonder grondwaterinvloed (hangwaterprofiel) en het benaderen van een water-gelimiteerde productie met grondwaterinvloed, waarbij capillaire opstijging optreedt bij het droger worden van de wortelzone.

In paragraaf 4.3.2 wordt verder ingegaan op de modelkoppeling SWAP-WOFOST waarmee hydrologie en gewasgroei kan worden geïntegreerd. Daarbij wordt ook verder ingegaan op de toepassing van dit geïntegreerde model voor grasgroei zoals dat is gebruikt door Suppit en Kroes. (2011) en zoals dat gebruikt wordt voor het project WaterWijzer.

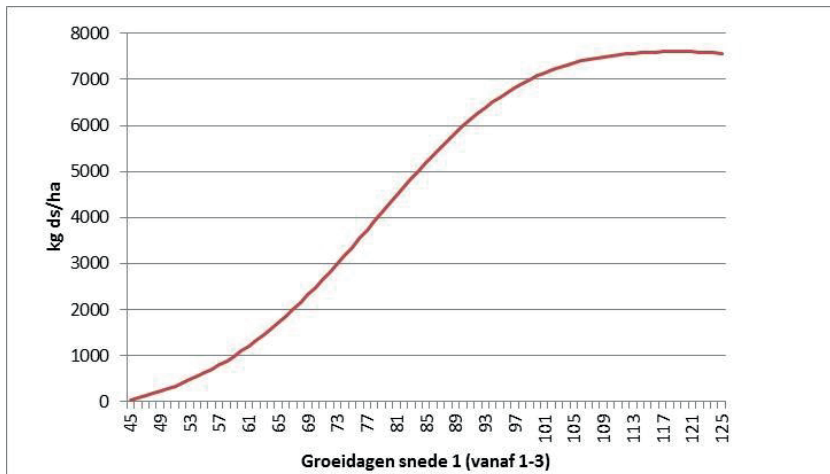
Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

WOFOST is in de eerste plaats een onderzoeksmodel, dat vooral geschikt is voor het simuleren van gewasgroei voor eenjarige gewassen. Verkend moet worden of het model zonder kalibratie bij standaard invoerwaarden de groei van een gewas goed simuleert. Toepassing van WOFOST zou voor het adviessysteem in eerste instantie interessant kunnen zijn voor snijmaïs. Binnen het project WaterWijzer (<http://waterwijzer.stowa.nl>) worden momenteel ervaringen opgedaan met het simuleren

van grasgroei met de modelkoppeling SWAP-WOFOST (zie paragraaf 4.5.2). De resultaten hiervan zijn nog te prematuur om het perspectief voor het simuleren van grasgroei te kunnen beoordelen. Vooralnog is de belangrijkste belemmering dat in WOFOST de nutriëntenvoorziening (vooral stikstof) niet als variabele in het model is opgenomen.

4.3.2 GRAMIN

Het empirische grasgroei-model Gramin is een stikstof (N) gestuurd model waarbij de groei is bepaald op basis van groeiverloopprouwen in de jaren 70 (IB prouwen, beschreven door W. Prins, PR prouwen beschreven door Wieling en de Wit, 1987). Het is een empirisch model, op basis van een sigmoïde curve (Figuur 4.6).



Figuur 4.6 Voorbeeld sigmoïde groeicurve.

De stikstof(na)werking is bepaald door Vellinga (1989, N nawerkingsprouwen jaren 70 en jaren 90, deels beschreven door Vellinga). De groeiparameters zijn geschat door middel van regressie, waarbij de stikstofgift, startdag van de groei (kalenderdag) en het aantal groeidagen als verklarende variabelen zijn gebruikt. De effecten van een zware voorgaande snede (hergroei-vertraging), stikstofnawerking, stikstoflevering uit de bodem en droogte en grondwatertrap zijn in de curves meegenomen.

De opbrengst wordt vervolgens gecorrigeerd voor eventuele droogtestress op basis van de HELP tabel. Een combinatie van grondsoort en grondwatertrap geeft een bepaalde opbrengstdepressie per jaar, die vervolgens in 33 decaden is opgeknipt en daarmee vervolgens een groeireductie per dag genereert.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

GRAMIN is een eenvoudig robuust model met een zeer beperkt aantal invoerparameters namelijk een startdatum voor groei, de stikstofgift per snede en het stikstofleverend vermogen van de bodem (NLV) op jaarbasis. Dit model wordt toegepast binnen BBPR. Door de empirische opzet van het model sluit het dicht aan bij de opbrengsten die in de praktijk gerealiseerd worden.

GRAS2007 is gemaakt volgens dezelfde opzet van GRAMIN, maar uitgebreider en geavanceerder (zie volgende paragraaf 4.3.3). GRAS2007 zal in de toekomst GRAMIN gaan vervangen binnen de bedrijfsmodellen van WLR. In hoofdstuk 5 is zodoende alleen nog uitgegaan van GRAS2007 als perspectiefvol groeimodel voor gras.

4.3.3 GRAS2007

GRAS2007 is eveneens een empirisch grasgroei-model dat gebaseerd is groeiverloopprouwen, maar ook op andere prouwen met alleen (eind)snede opbrengsten, waardoor de databank ten opzichte van die van GRAMIN aanzienlijk uitgebreid is. Daarbij maakt GRAS2007 gebruik van een N-balans, waarbij de N-opbrengst geschat wordt op basis van N uit de bodem, uit N gegeven met (kunst)mest en uit onbenutte N uit een vorige snede.

De N-opbrengst vanuit de bodem wordt als N-jaaropbrengst voor 3 basisgrondsoorten geschat (zand, klei en veen) en volgens een dubbele exponentiële curve verdeeld over het groeiseizoen (N-levering per dag). De (geschatte) N levering kan ook als input worden opgegeven. De N uit toegediende (kunst)mest wordt met een verdragingsfactor (tijd gift en tijd opname) opgenomen in de plant. Over de totale beschikbare N wordt een efficiëntie geschat. Vanuit een N opbrengst wordt vervolgens de droge stofopbrengst geschat door middel van een aantal factoren (snedenummer, dag in het seizoen, N gift en groeiduur). Per dag wordt een correctie toegepast voor eventuele droogtestress, op basis van de rekenregels uit FAO report 56 (vochtbalans model). Een eerste deelbeschrijving is gepresenteerd op het EGF-symposium 2014.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

Het model geeft een goede voorspelling van de grasgroei op goede cultuurgraslanden (80-100% Engels raaigras), maar ook voor graslanden met een meer gevarieerd grassenbestand (Holshof en van den Pol, 2014) die lager gewaardeerd worden. GRAS2007 is evenals GRAMIN een eenvoudig robuust model met een zeer beperkt aantal invoerparameters namelijk een startdatum voor groei, de stikstofgift per snede en het stikstofleverend vermogen van de bodem (NLV) op jaarbasis. Binnen het model Waterpas wordt een koppeling van GRAS2007 met SWAP op dagbasis toegepast om de grasgroei te berekenen voor specifieke hydrologische condities. Hoewel een uitgebreide validatie nog moet plaatsvinden blijkt dit realistische opbrengsten op te leveren.

4.3.4 CNGRAS

Het CNGras model is een simulatiemodel waarmee de C en N cycli in productiegrasland bestudeerd kunnen worden (Conijn, 2005). CNGras heeft als basis een groeivoorspelling op basis van LINTUL (zie paragraaf 4.3.5). Simulaties onder condities van optimale groeiomstandigheden, en water en stikstof gelimiteerde groei kunnen met het model gemaakt worden. CNGras bestaat uit diverse modules, waaronder een organische stof afbraak, mineralisatie, grondwaterbalans. Het model wordt gebruikt voor studies naar optimalisatie van management in relatie tot opbrengst, N-emissie en organische stof in de bodem Conijn en Henstra (2003).

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

CNGRAS is een onderzoeksmodel dat de water, N en koolstofhouding van gras beschrijft. Het model heeft een groot aantal parameters voor de verschillende processen. De geschiktheid van CNGRAS (en andere complexe modellen) voor gebruik in praktijksituaties wordt beperkt door de inspanning die nodig is om die parameters op praktijkpercelen te schatten.

4.3.5 LINTUL

De groeisnelheid van een gewas dat beschikt over voldoende water en nutriënten, en dat niet aangetast wordt door ziekten of plagen, is recht evenredig aan de hoeveelheid straling die door het gewas wordt ingevangen (Monteith, 1977):

$$G = e.f.S$$

waarin G = groeisnelheid ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$); e = de constante die het verband legt tussen de ingevangen straling en de groei (Light Use Efficiency, LUE) (kg MJ^{-1}); f = de fractie van de straling die door het gewas wordt onderschept (dimensieloos); en S = straling ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

LINTUL (Light Interception and Utilization) is een eenvoudig gewasgroeimodel dat potentiële productie berekent op basis van bovenstaande vergelijking (Spitters, 1990). In latere versies van het model wordt het effect van gebrek aan water (Spitters and Schapendonk, 1990) en een gebrek aan N (Shibu *et al.*, 2010) gesimuleerd. Een recente toepassing van LINTUL wordt gegeven door Haverkort *et al.* (2014). Alle LINTUL modellen werken met integratiestappen van één dag.

De ontwikkeling van het gewas wordt gekenmerkt door de temperatuursom vanaf de zaai of het poten:

$$dT = T_{\text{ave}} - T_{\text{basis}}$$

waarin dT = toename van de temperatuursom gedurende een bepaalde dag (C); T_{ave} = gemiddelde dagtemperatuur (C); en T_{basis} = gewasafhankelijke basistemperatuur voor ontwikkeling (C). Voor

sommige gewassen en omgevingen is het gewenst om bij temperaturen hoger dan T_{ave} de toename van de temperatuursom af te laten nemen.

De gevormde assimilaten worden verdeeld over de verschillende organen (blad, stengel, vrucht, wortels) aan de hand van een tabel, afhankelijk van het ontwikkelingsstadium. Dit geldt in principe ook voor het blad: een fractie van de assimilaten wordt toegewezen aan het blad, en vermenigvuldigd met het specifieke bladoppervlak (Specific Leaf Area, SLA, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) levert dit het nieuw gevormde bladoppervlak op. Echter, in het beginstadium van de groei wordt de toename van het bladoppervlak niet bepaald door de hoeveelheid beschikbare droge stof, maar door de delingssnelheid van het (beperkte) aantal cellen in het blad. De begingroei van het bladoppervlak wordt beter beschreven door een exponentiële functie:

$$dL = e^{rL}$$

waarin L = bladoppervlak (m^2); en r = relatieve groeisnelheid [dimensieloos].

De ontwikkeling van het wortelstelsel wordt gekarakteriseerd door de diepte waartoe de wortels reiken. Die diepte neemt lineair toe met het ontwikkelingsstadium van het gewas (of met het aantal dagen na zaaien of poten). De dichtheid van het wortelstelsel (cm cm^{-3} , g cm^{-3}) en de verdeling van de wortels in de ruimte wordt niet bijgehouden in LINTUL. De diepte van het wortelstelsel is belangrijk omdat het bepaalt welk deel van het water in de bodem in principe door het gewas kan worden opgenomen.

De bodem-water balans van een LINTUL model bestaat vaak uit één laag, maar soms ook uit meerdere lagen. In beide gevallen gaat het om een zogenaamd tipping bucket model: de bodemlaag wordt aangevuld met neerslag en irrigatie, als de capaciteit van de laag wordt overschreden loopt het teveel naar de onderliggende laag (of uit het profiel).

De potentiële transpiratie (PT) van een gewas is gelijk aan verdampingsvraag vermenigvuldigd met een factor ($0 \leq x \leq 1$) afhankelijk van het bladoppervlak. De hoeveelheid water die door de wortels kan worden opgenomen (PU, potential uptake) is afhankelijk van het watergehalte in de bodem. De gerealiseerde transpiratie (AT) is het minimum van de vraag en het aanbod: $AT = \min(PT, PU)$.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

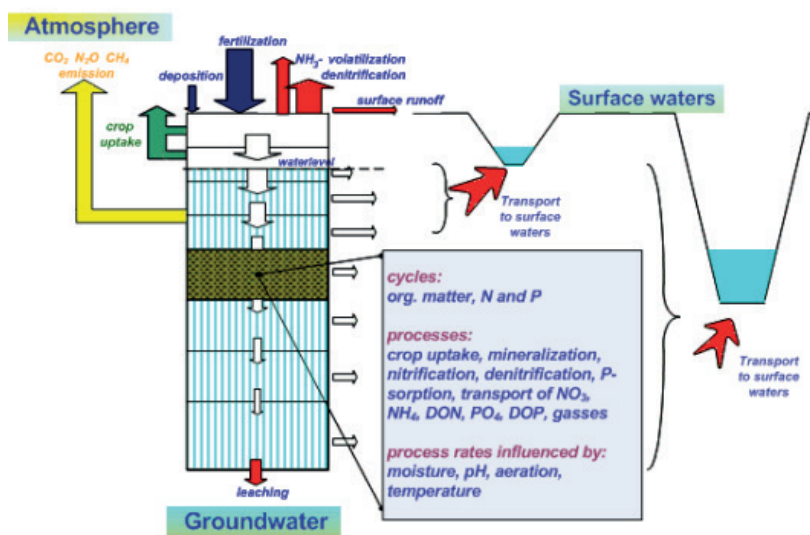
Het LINTUL model wordt veel gebruikt om studies te doen naar de productie van gewassen in verschillende regio's in de wereld. Als voorbeeld dient hier toepassing van LINTUL in aardappel (zie LINTUL-Potato-2.0 van Haverkort *et al.* (2014)). Van dit model wordt een APP ontwikkeld die te gebruiken is voor opbrengstvoorspelling van belangrijke akkerbouwgewassen. De APP wordt generiek opgezet voor gebruik in Akkerweb. Parameters zijn gewas-specifiek. Voor belangrijke gewassen, waaronder maïs en gras, zijn de parameters grotendeels beschikbaar.

4.4 Nutriënten

4.4.1 Animo

Bron: <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/ANIMO.htm>

Animo is een gedetailleerd proces-georiënteerd simulatiemodel om nitraatuitspoeling naar het grondwater, N-en P-belasting van het oppervlaktewater en de emissie van broeikasgassen te kunnen kwantificeren. Het model simuleert het transport van voedingsstoffen en de emissie van broeikasgassen als functie van bodem en waterbeheer, landgebruik en bemestingsniveau voor een breed scala aan bodemtypen en verschillende hydrologische omstandigheden. Het model wordt vooral gebruikt voor de ex-ante evaluatie van het mestbeleid en wetgeving op regionale en nationale schaal. Het model omvat beschrijvingen van de koolstof, stikstof en fosfor kringloop voor zowel het onverzadigde als het verzadigde deel van de bodem. Transportroutes van de bodem naar het grondwater, oppervlaktewatersystemen en de atmosfeer zijn schematisch weergegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Transportroutes voedingsstoffen van de bodem naar het grondwater, oppervlaktewatersystemen en de atmosfeer.

Animo bestaat uit een beschrijving van de organische stofkringloop, de stikstofkringloop en de fosforkringloop. Het model richt zich op de volgende processen:

- Bemesting of toevoegingen aan de bodem-systeem (kunstmest, mest, gewasresten, atmosferische depositie);
- Mineralisatie van voedingsstoffen in relatie tot de vorming en afbraak van verschillende soorten organisch materiaal zoals organische meststoffen, wortelresten, opbrengstverliezen en inheemse bodem organische stof;
- NH₃-vervluchtiging en emissie naar de atmosfeer;
- Nitrificatie van NH₄ en denitrificatie van NO₃;
- Opname en diffusie in bodemdeeltjes, beschreven door een combinatie van onmiddellijke en tijdsafhankelijke sorptie en chemische precipitatie van fosfaten (Schoumans en Groenendijk, 2000);
- Opname door de vegetatie;
- Transport van opgeloste organische en anorganische voedingsstoffen met waterstroom naar diepere bodemlagen en aangrenzende oppervlaktewater systemen;
- Oppervlakkige afstroming van deeltjes en opgeloste organische fosfor en anorganisch fosfaat naar aangrenzende percelen (runoff en erosie);
- Simulatie van het transport van voedingsstoffen in scheuren van kleigronden en in macroporeuze veengronden evenals de uitstoot van broeikasgassen (CO₂, N₂O, CH₄).

Hydrologische invoergegevens met betrekking tot bodem vochtgehalten en waterfluxen zijn afgeleid van de output van het ondersteunen van hydrologische modellen. De SWAP-model wordt meestal gebruikt om dit type ingang genereren. De ruimtelijke discretisatie van de ondersteunende hydrologisch model moeten worden afgestemd op de verdeling van de bodemlagen in het ANIMO-model.

Het model heeft drie opties voor het simuleren van stikstof en fosfor opname door gewassen en natuurlijke vegetaties. Een van de opties is om vooraf berekende gewas opname tarieven op te leggen per tijdstap. Hiertoe kunnen de resultaten van de QUADMED model gebruikt worden.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

Animo is een geavanceerd onderzoeksmodel dat niet bedoeld is voor toepassing in de praktijk. Verkend moet worden of bij een gestandaardiseerde invoer zonder kalibratie van modelparameters het model tot een goede simulatie komt van praktijksituaties. Ook moet bekeken worden of de tijdschaal waarop het model werkt terug te brengen is tot dagbasis.

4.4.2 Modellen organische stof en mineralisatie

Bron: Hans Kros en Luc Bonten (Alterra van Wageningen-UR), december 2014.

Een deel van de stikstof die nodig is voor de productie van veevoeding zal gedurende het jaar vrijkomen door mineralisatie van organische mest en van reeds in bodem aanwezig organisch N. Om het vrijkomen van dit N gedurende het jaar te voorspellen kunnen computermodellen worden gebruikt. In deze paragraaf worden verschillende bestaande modellen beschreven waarmee binnen WUR ervaring is opgedaan. Omdat de mineralisatie van N gerelateerd is aan de mineralisatie van bodemorganische stof zullen ook organische stofmodellen worden besproken waarbij verderop wordt aangegeven op welke wijze hier stikstofmineralisatie aan gekoppeld kan worden. Tabel 4.2 geeft een overzicht van organische stof- en N mineralisatiemodellen die binnen WUR worden of werden gebruikt. De afzonderlijke modellen zijn in het onderstaande nader beschreven.

Tabel 4.2

Overzicht modellen voor bodemorganische-stof en/of stikstofmineralisatie

Model	Ecosysteem	Model-uitvoer ¹⁾	Modeltype/aantal pools	temporele resolutie	Referentie
Century	Grasland	BOS, NMIN	Complex/zes pools	jaar(?)	(Parton, 1996)
RothC	Landbouw	BOS	Eenvoudig/vijf pools	maand	(Coleman en Jenkinson, 1996)
VSD+ (RothC)	Natuur (landbouw in ontwikkeling)	BOS, NMIN	Eenvoudig/vijf pools	dag en jaar	Bonten <i>et al.</i> (in prep)
MINIPa/MINIPb	Landbouw	BOS,	Complex/oneindig aantal pools	jaar	(Janssen, 1984; Yang en Janssen, 2000)
NDICEA (MINIP)	Landbouw	BOS,NMIN	Complex/oneindig aantal pools	dag	www.ndicea.nl
DNDC	Landbouw	BOS, NMIN	Complex/acht pools	dag	(Li <i>et al.</i> , 1994)
YASSO	Bos (landbouw)	BOS	Eenvoudig/zes pools	?	(Liski <i>et al.</i> , 2005)
CESAR	Landbouwgrond, bos	BOS	Eenvoudig/één pool	jaar	(Vleeshouwers en Verhagen, 2002)

¹⁾ Beperkt tot de koolstofhuishouding en stikstofmineralisatie, BOS: bodemorganische stof, NMIN: N mineralisatie

In het verleden zijn er een aantal studies uitgevoerd waarin de functionaliteit van diverse organische stofmodellen die binnen Wageningen-UR in gebruik zijn is vergeleken. Zo hebben De Willigen *et al.* (2008), een vergelijking tussen de modellen MINIP, CESAR, RECAFS, ANIMO, NUCSAM en CENTURY uitgevoerd. Uit deze vergelijking kwam naar voren dat de tijdschaal waarop de modellen werken behoorlijk varieert, van enkele groeiseizoenen (ANIMO) tot enkele decennia (Century) (zie ook Tabel 4.2). Verder werd geconcludeerd dat de verschillen tussen de uitkomsten van de modellen in grote mate wordt bepaald door wijze waarop de modellen omgaan met omgevingsfactoren zoals nutriëntenbeschikbaarheid, pH, vochthuishouding en textuur.

In deze paragraaf is achtereenvolgens de modellering van bodemorganische stof, de modellering van de stikstofmineralisatie en tenslotte een voorstel van perspectievolle modellen/tools voor inzet in fase 2 beschreven.

Organische stof

Organische stof in de bodem is belangrijk voor het goed functioneren van de bodem. De twee belangrijkste functies zijn het vasthouden van water, waardoor een bodem niet snel uitdroogt en uitwisseling van kationen, enerzijds voor de levering van nutriënten als kalium en anderzijds om de zuurgraad van de bodem te bufferen. Organische stof in de bodem wordt langzaam afgebroken, waardoor er een constante aanvoer van nieuw organisch materiaal nodig is om de het organisch stofgehalte van de bodem op peil te houden.

Residuen van bio-energieproductie kunnen een bijdrage leveren aan het op peil houden van het organisch stofgehalte van de bodem. Om een indruk te krijgen of de hoeveelheid terug te voeren

residuen voldoende is om het organisch stofgehalte op peil te houden is een model nodig dat de afbraak van organisch stof in de bodem kan berekenen.

Modellen

In de literatuur zijn een groot aantal modellen te vinden (voor een overzicht zie onder andere: Smith *et al.*, 1997; Shibu *et al.*, 2004; Manzoni & Porporata, 2009). Het aantal modellen dat daadwerkelijk veel gebruikt wordt voor landbouwsystemen, waarvoor ook voldoende parameters beschikbaar zijn en die voldoende gevalideerd zijn is echter beperkt. In Nederland worden de volgende modellen regelmatig gebruikt:

- Century, dit model is ontwikkeld door verschillende onderzoeksgroepen uit de VS (Parton, 1996). In Nederland is het onder andere toegepast voor de berekeningen van de organische stofgehalten in Nederlandse bodems (Chardon *et al.*, 2009). Het is een relatief complex model met zes verschillende koolstofpools.
- RothC, dit model ontwikkeld is ontwikkeld bij het Rothamsted agricultural research station in Groot Brittannië. RothC is onder andere gebruikt in de Klimaatatlat (www.klimaatatlat.nl) voor de berekening van broeikasgasuitstoot van landbouwbedrijven te berekenen, in het project *Credits for Carbon Care* (<http://www.skbodem.nl/project/17>) en de BioESoil tool voor effecten van bio-energie residuen op bodemorganische stof (www.bioesoil.org). Dit model is iets eenvoudiger dan Century.
In het bodemchemische model VSD+ van Alterra is RothC gekoppeld aan N processen voor de berekening van N beschikbaarheid in natuurlijke ecosystemen. In een project over verzuring van landbouwgronden in China wordt dit model ook toegepast voor landbouwsystemen.
- MINIP(a/b), MINIPa is een organische stofmodel ontwikkeld bij Wageningen Universiteit (Janssen, 1984). MINIPb is een doorontwikkeling hiervan door Yang en Janssen (Yang en Janssen, 2000). Dit model is een zogenaamd cohortmodel wat betekent dat de afbraak van iedere toevoeging van residuen afzonderlijk in de tijd wordt berekend, waarbij de afbraaksnelheid afneemt met de leeftijd van organisch stoffractie. Dit betekent dat er uiteindelijk net zoveel pools zijn als dat er residu toevoegingen zijn aan de bodem.
In het model NDICEA van Louis Bolk Instituut (www.ndicea.nl) is N mineralisatie gekoppeld aan C mineralisatie volgens MINIPa. Het model NDICEA wordt veel gebruikt in de biologische landbouw.
- CESAR (Vleeshouwers en Verhagen, 2002). Dit is een iets eenvoudiger benadering door gebruik te maken van zogenaamd effectief organisch stof, dat wil zeggen die fractie van residuen die bijdraagt aan het bodemorganisch stof. Meestal wordt dit gedefinieerd als de fractie die overblijft na een jaar. Dit wordt dan gecombineerd met een constante afbraaksnelheid van het bodemorganische stof. Deze benadering wordt onder andere gebruikt in het project *Pellets for Power* voor de effecten van biomassa teelt in de Oekraïne (zie: <http://www.switchgrass.nl/en/show/Pellets-for-Power.htm>)
- DNDC (Li *et al.*, 1994). Een model voor de modellering van de broeikasgasemissie vanuit landbouw bodems, waaronder CO₂ en N₂O. Het model is o.a. gebruikt voor een gedetailleerde beschrijving van de bodemorganische-stof in Vlaanderen (Sleutel *et al.*, 2006) of regionaal op basis van eenvoudige aanpak (Sleutel *et al.*, 2007).
- Yasso (Liski *et al.*, 2005): is een eenvoudig model voor het berekenen van C opslag in bosbodems. Dit model is onder andere opgenomen in het EFISCEN model (Nabuurs *et al.*, 2002) dat gebruik wordt voor de modelleren van de C opslag in Europese bossen.

Daarnaast zijn door de IPCC rekenregels ontwikkeld ten behoeve van het Kyoto protocol om de effecten van landgebruik en landgebruiksveranderingen op de koolstofvastlegging te berekenen. Hierbij worden getabelleerde waarden voor referentie organische stofgehalten per klimaatzone gebruikt, gecombineerd met correctiefactoren voor landgebruik en beheer.

Op dit moment wordt in het kader van het project *Gezond Zand* (www.rom3d.nl/portfolio/gezond-zand/) samen met boeren in de Achterhoek praktijkonderzoek gedaan om het organisch stof gehalte in zandgronden te verhogen. Via een nulmeting zichtbaar gemaakt hoe het organische stof gehalte zich de laatste tien jaar ontwikkeld heeft. Op basis hiervan worden samen met de boeren gekeken welke maatregelen het beste genomen kunnen worden om het organischestof-gehalte te verhogen.

Modelinvoer

Invoer voor alle modellen zijn de hoeveelheid en kwaliteit van de residuen. De manier waarop de kwaliteit van de residuen wordt gekwantificeerd is afhankelijk van het model. Voor Century is de

kwaliteit afhankelijk van het lignine en stikstofgehalte van de residuen. Het voordeel van deze benadering is dat de kwaliteit van de residuen fysiek meetbaar is. In de overige modellen wordt een empirische indicator voor de afbreekbaarheid van verse residuen gebruikt. Deze empirische indicator is meestal door onderzoek bepaald voor de verschillende soorten residuen. In RothC wordt het verse residu verdeeld over twee pool, een goed en een slecht afbreekbare pools. Deze verdeling is voor verschillende soorten residuen via onderzoek bepaald. MINIP gebruikt een zogenaamde schijnbare leeftijd voor de residuen en bij het model CESAR wordt zoals vermeld een effectief organisch stofgehalte gebruikt.

Bij de IPCC benadering wordt geen onderscheid in de kwaliteit van het organisch stof gemaakt. In de meeste modellen is de afbraaksnelheid van de residuen en het bodemorganische stof afhankelijk van verschillende omgevingsfactoren, zoals klimaat/meteo en bodemeigenschappen. Voor alle modellen zijn temperatuurgegevens op maandbasis nodig. Daarnaast is in de meeste gevallen de afbraak afhankelijk van de vochttoestand van de bodem. Dit betekent dat voor de meeste modellen een eenvoudig hydrologisch model nodig. Hiervoor zijn neerslag-, temperatuur- en bodemgegevens nodig. Het model RothC berekent de effecten van vocht op een andere manier, door een vergelijking tussen potentiële verdamping en de neerslag. Ook hiervoor zijn meteogegevens nodig. De tool wordt mogelijk toegepast in gebieden waarvoor geen gedetailleerde meteogegevens beschikbaar zijn of door gebruikers die hier niet over beschikken. Een alternatief is dan om te werken met globale datasets van meteogegevens.

Modelkeuze

De uiteindelijke keuze van het organische stofmodel hangt voor een belangrijk deel af van de gegevens die beschikbaar zijn voor de uiteindelijke modelgebruiker. Hierbij spelen de volgende vragen rol:

- Welke karakteristieken van de residuen zijn beschikbaar?
- Welke bodemgegevens zijn beschikbaar?
- Welke meteo-gegevens en/of klimaatgegevens zijn beschikbaar?
- Wat is het referentie organische stofgehalte van de bodem?

Stikstofmineralisatie

De residuen die kunnen worden teruggevoerd naar de bodem en het bodemorganische stof bevatten stikstof. Om dit stikstof beschikbaar te maken voor opname door het gewas, moet dit vrijkomen uit het organische stof, de zogenaamde stikstofmineralisatie. Alleen een nutriëntenbalans is dus onvoldoende om aan te geven of voldoende stikstof beschikbaar. De stikstof-mineralisatie is gerelateerd aan de afbraak van het organische stof. De berekening van de stikstofmineralisatie kan daarom worden gekoppeld aan de berekening van het bodemorganische stof. Hiervoor zijn er een aantal mogelijkheden.

In het model Century is reeds een stikstofmodule aanwezig die stikstofmineralisatie kan berekenen. Ook voor het model MINIP is in de tool NDICEA van het Louis Bolk instituut een stikstofmodule gemaakt. Voor RothC is in het model VSD+ een koolstofmodule gemaakt. In al deze gevallen wordt de stikstofmineralisatie berekend door de afbraak van organische stof te koppelen aan de stikstofbehoefte van micro-organismen die verantwoordelijk zijn voor de afbraak van het organische stof. Het belangrijkste nadeel van deze methode is dat er relatief veel inputgegevens nodig zijn, omdat er een volledige stikstofbalans moeten worden berekend. Dus behalve de input van stikstof uit residuen zijn ook nodig de aanvoer van stikstof via andere bronnen als bemesting en depositie en de afvoer door gewasopname, denitrificatie en uitspoeling.

Een eenvoudigere benadering wordt beschreven door Bruun *et al.* (2006). Hierbij is de stikstofmineralisatie slechts afhankelijk van de afbraaksnelheid van het organische stof en C/N ratio van de bodem. Deze laatste methode kan worden gekoppeld aan alle organische stofmodellen, inclusief Century, RothC en MINIP.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

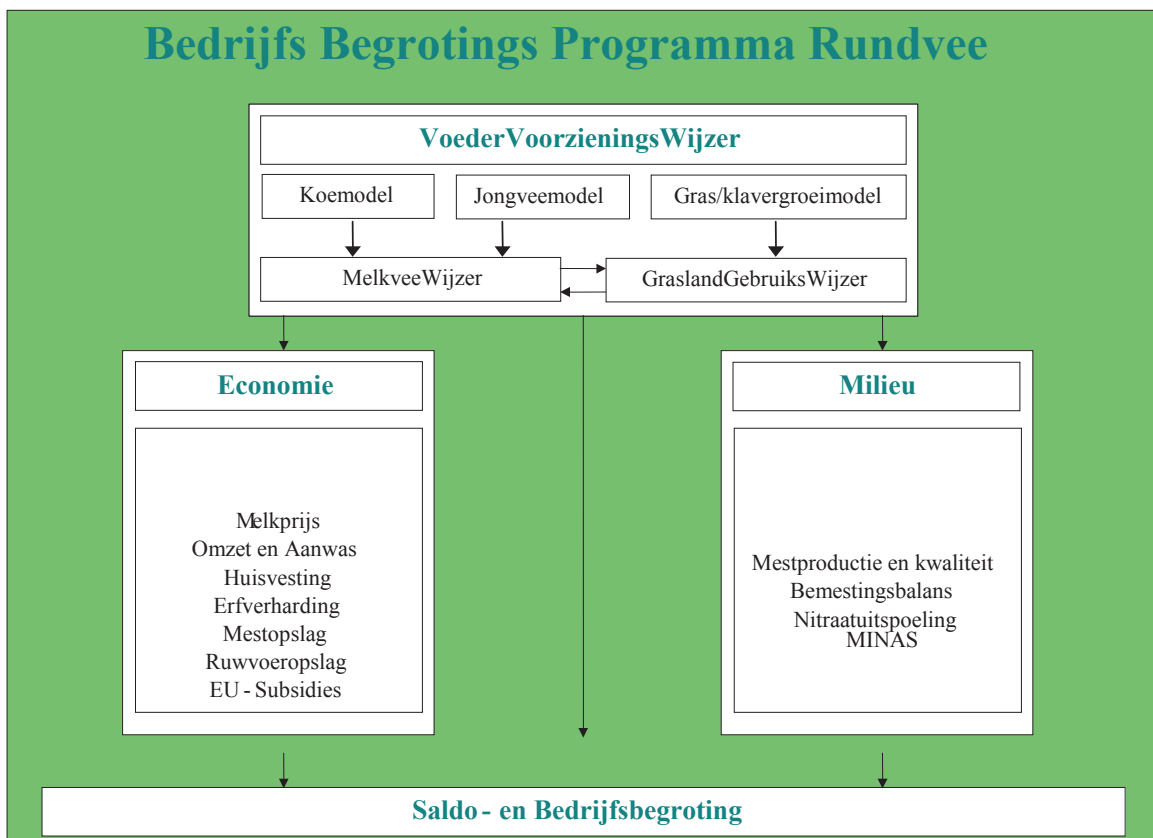
Uit bovenstaande inventarisatie volgt dat er binnen de WUR zijn momenteel drie modellen beschikbaar zijn die koolstof-en stikstofmineralisatie kunnen berekenen. Dit zijn MINIP/NDICEA, Century en RothC/VSD+. De verschillen tussen de modellen voor wat betreft benodigde invoer zijn gering. Voor alle modellen geldt verder dat met name het deel van de stikstofmineralisatie beperkt gevalideerd is. Voor de koolstofmineralisatie zijn er wel uitgebreide validaties uitgevoerd (o.a. Smith *et al.*, 1997).

Op basis van op dit moment beschikbare kennis is het lastig om nu reeds een keuze te maken, welke model het beste ingezet kan worden in fase 2. Om hier meer duidelijke te krijgen wordt voorgesteld om in fase 2 allereerst te starten met een uitgebreide vergelijking van de drie meest geschikte modellen. Waarbij met name gekeken wordt naar de benodigde invoer en de mate waarin deze beschikbaar is. Tevens dient hierbij gekeken te worden naar de validatie voor wat betreft stikstofmineralisatie op dag/weekbasis.

4.5 Meervoudige modellen

4.5.1 BBPR

Het BedrijfsBegrotingsProgramma Rundvee (BBPR) is een pakket van technische modellen, ontwikkeld voor het berekenen van een bedrijfsbegroting voor een melkveebedrijf (Schils *et al.*, 2007). Met BBPR kunnen landbouwkundige, milieukundige en bedrijfseconomische kengetallen in bedrijfsverband worden berekend. BBPR is opgebouwd uit verschillende modules op het gebied van voedervoorziening, economie en milieu, waaronder VVW. De opzet van BBPR staat in Figuur 4.8. De economische kengetallen in BBPR staan beschreven in de KWIN-Veehouderij (<http://www.wageningenur.nl/en/show/Handboek-Kwantitatieve-Informatie-Veehouderij-KWIN.htm>). Voor de kengetallen en rekenregels op het gebied van voeding, bemesting, grasgroei en graslandgebruik wordt uitgegaan van de meest recente en actuele onderzoeksresultaten, wetgeving en landbouwkundige advisering.



Figuur 4.8 BedrijfsBegrotingsProgramma Rundvee (BBPR); overzicht van de opbouw en onderlinge samenhang van de deelmodellen.

BBPR bestaat uit een aantal sub-modellen die geïntegreerd in BBPR gegevens genereren, uitwisselen en rapporteren. Voor de voedervoorziening zijn de modellen van belang die onderdeel uitmaken van de VoederVoorzieningsWijzer (VVW). De voeropname wordt bepaald op basis van resultaten van berekeningen met het (herziene) Koemodel (Zom *et al.*, 2002), waarmee de individuele voerbehoefte van het vee wordt berekend. Tevens berekent dit model de melkproductie afhankelijk van de voeropname. Het Koemodel berekent de voeropname op basis van voerfactoren (zoals chemische

samenstelling en verteerbaarheid) en koefactoren (zoals lactatiestadium, leeftijd en dracht). Uit de voeropname wordt de opname van energie (VEM) en eiwit (DVE) berekend. Daarbij wordt de verdeling van de opgenomen energie over onderhoud, dracht, gewichtsonwikkeling, melkproductie en de aanzet of mobilisatie van lichaamsreserves berekend.

De opbouw van de veestapel die voor de berekening met het Koemodel nodig is, wordt berekend met het Melkveemodel en het Jongveemodel voor respectievelijk melkvee en jongvee. Het Melkveemodel (Mandersloot en van der Meulen, 1991) berekent de (leeftijds)opbouw van de melkveestapel, afhankelijk van het afkalfpatroon (gespreid, herfst of voorjaarskalvend) en het vervangingspercentage. Het Jongveemodel (Mandersloot, 1989) berekent de opbouw van de jongveestapel.

Het inkuilmodel (WEVI/VWK) berekent de voederwaarde/kwaliteit van de graskuilen. Het model rekent vanaf de verse toestand op stam, maaiverliezen, veldverliezen (afhankelijk van de veldperiode), opraap/transportverliezen en inkuil/conserveringsverliezen in. De verliezen zijn afhankelijk van de gekozen maai- en inkuilmethode en de (opgegeven) NH₃ fractie.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

BBPR is een onderzoeksmodel dat niet direct toepasbaar is voor de praktijk. Voor de 'Wijzers' die Livestock Research uitbrengt, wordt wel veelvuldig BBPR als basis gebruikt. Hierbij kan een beperkt aantal uitgangspunten, die betrekking op het onderwerp van de betreffende Wijzer, gevarieerd worden.

Het is vooral de module VoederVoorzieningsWijzer dat bruikbaar is voor toepassing in het basis adviessysteem voor de planning van het graslandgebruik (zie paragraaf 4.5.5).

4.5.2 SWAP-WOFOST

Bron: STOWA 2013. Actualisatie schadefuncties voor de landbouw, tussenfase 2a: plausibiliteitstoets SWAP en enkele verkennende berekeningen. Rapport 37.

Het model SWAP bevat opties om te rekenen met een statische en een dynamische gewasontwikkeling.

Voor de statische gewasontwikkeling worden gewassenmerken als (boven)randvoorwaarde aan het model SWAP opgelegd. Het betreft gewassenmerken zoals de ontwikkeling in de tijd van de hoeveelheid bladeren en wortels en de diepte van de beworteling. Deze gewassenmerken variëren niet per kalenderjaar en de meteorologische omstandigheden hebben er geen invloed op. De reductie in gewasopbrengst wordt meestal gelijk gesteld aan de totale verdampingsreductie of aan de transpiratiereductie.

Voor de dynamische gewasontwikkeling is een interactie met het model WOFOST6.0 (Van Diepen *et al.*, 1989; Supit *et al.*, 1994) geïmplementeerd in SWAP. Met deze dynamische interactie varieert de gewasontwikkeling als gevolg van variaties in klimaat en bodem. Zonnestraling en bladontwikkeling bepalen de hoeveel straling die wordt vastgelegd en omgezet in droge stof. Daarbij wordt gerekend met de volgende processen: fenologische ontwikkeling, interceptie van globale straling, CO₂-assimilatie, ophoping van biomassa in bladeren, stam, oogstbaar product, knollen en wortels, bladsterfte en wortelgroei. De snelheid van assimilatie wordt beïnvloed door water- en zoutstress in de wortelzone waardoor ook de uiteindelijke gewasopbrengst wordt beïnvloed. Reductie in gewasopbrengst en transpiratie zullen meer dynamiek vertonen dan de statische modelversie omdat nu ook de waterbalans wordt beïnvloed door gewasgroei.

Een transparante koppeling tussen gewasgroei en bodemvochtcondities is cruciaal en vereist speciale aandacht. De verdamping is daarbij de verbindende factor. De verdamping zal met Penman-Monteith worden berekend en het gebruik van gewasfactoren zal worden geminimaliseerd. De verdampingsmethodiek wordt daarbij getoetst aan bestaande EC-metingen (Elbers *et al.*, 2009) en internationaal aan de recente FAO-methodiek (FAO, 2012). De relatie tussen de reductie van transpiratie en gewasopbrengst zal nader geanalyseerd worden met meer aandacht voor de relatieve transpiratie (T_a/T_p) omdat die maatgevend is voor de opbrengstreductie. Realistische gewasopbrengsten zijn nodig en het gebruik van zogenaamde management-factoren zal moeten worden onderbouwd. Dit zal verder worden uitgewerkt in het vervolg van fase 2, waarbij o.m. aan bod komen: i) *zaaidatum* in plaats van de opkomstdatum zoals nu gebruikelijk, ii) kieming en opkomst waarbij rekening wordt gehouden met temperatuur en vochtgehalte (Van Wijk *et al.*, 1988), iii) het effect van CO₂, dat expliciet zal worden gemodelleerd, uitgebreider zal worden toegelicht en worden afgestemd met het AquaCrop-model dat door de FAO internationaal wordt ingezet (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009), iv) zouttransport, waarbij zal worden geanalyseerd of het

modelconcept met de osmotische potentiaal als drijvende kracht voldoende is uitgekristalliseerd om te worden opgenomen (De Jong van Lier *et al.*, 2009).

Een ander aandachtspunt is de nieuwe zuurstofstressmodule in SWAP, die gekoppeld moet worden aan de zuurstofberekeningen in WOFOST. In WOFOST wordt assimilatie berekend, waarbij zuurstof wordt geproduceerd (fotosynthese) en tegelijkertijd is zuurstofstress bepalend voor die assimilatie. Daarom zal de zuurstofstressmodule van Bartholomeus *et al.* (2008) gekoppeld moeten worden met de dynamische wortelgroei in WOFOST. In de bestaande combinaties van SWAP met WOFOST is deze koppeling nog niet aanwezig. Dat geldt ook voor de koppeling van WOFOST met de nieuwe zoutmodule van SWAP.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

De modelkoppeling SWAP-WOFOST is uitsluitend te gebruiken voor onderzoeksdoeleinden. Daarbij is deskundigheid vereist van beide modellen. Eventuele toepassing in de praktijk is alleen te realiseren bij een gestandaardiseerde invoer en zonder kalibratie van modelparameters. Binnen het project WaterWijzer (<http://waterwijzer.stowa.nl>) worden momenteel ervaringen opgedaan met het simuleren van gewasgroei met SWAP-WOFOST voor de gewassen snijmais, aardappels en gras met als uitgangspunt een zoveel mogelijk gestandaardiseerde invoer en een zo beperkt mogelijke kalibratie van modelparameters. De resultaten hiervan zijn nog te prematuur om te kunnen beoordelen of praktijkopbrengsten goed gesimuleerd worden. Vooral voor grasgroei is een belangrijke belemmering dat in WOFOST de nutriëntenvoorziening (vooral stikstof) niet als variabele in het model is opgenomen.

4.5.3 Waterpas

Voor een aantal studies waarbij het effect bepaald is van oppervlaktewaterpeilen op de hydrologie en het economisch bedrijfsrendement van melkveebedrijven in het veenweidegebied, is gebruik gemaakt van een modelkoppeling tussen SWAP en BBPR, genaamd Waterpas (De Vos *et al.*, 2006). Aanvankelijk gebeurde dit op jaarbasis en tegenwoordig gebeurt dit dagbasis.

Binnen Waterpas wordt voor een melkveebedrijf op perceelsniveau de waterhuishouding doorgerekend met het model SWAP; vervolgens wordt de grasgroei berekend met het model GRAMIN of het vernieuwde grasgroeimodel GRAS2007, waarbij vochttekort of N-tekort leidt tot vertraagde groei en te natte omstandigheden beperking opleggen aan graslandgebruik vanwege beperkte draagkracht (met name beweiding). De VoederVoorzieningsWijzer (Werkgroep Normen voor de Voedervoorziening, 1991; Van der Kamp *et al.*, 2003) is een module binnen BBPR en deze simuleert aan de hand van de bedrijfsvoering het graslandgebruik (per perceel beslissing weiden, maaien en beweidingduur). BBPR berekent vervolgens de bedrijfseconomie en ook een nutriëntenbalans. Het graslandgebruik interacteert met de voeropname en de melkproductie van melkvee, dat wordt berekend met het Koemodel (Zom *et al.*, 2002), eveneens een module binnen BBPR. Zodoende hebben berekeningen op bedrijfsniveau voor de melkveehouderij een grote meerwaarde. Op gebiedsniveau is tot nu toe vooral gerekend voor veenweidegebieden (De Vos *et al.*, 2008).

De grenzen voor draagkracht in BBPR zijn gekozen op basis van Van Wijk (1984). Daarbij wordt voor maaien een vaste grens gehanteerd van 0.5 MPa, die wordt bereikt bij een drukhoogte van -40 cm (op 14 cm -mv).

Voor weiden is de minimale draagkrachtgrens gesteld op 0,25 MPa, echter er treedt dan wel extra schade op door vertrapping. Naarmate de draagkracht groter is neemt de vertrappingschade af. Bij een draagkracht groter dan 0,7 MPa treedt geen vertrapping meer op. De bijbehorende drukhoogtegrenzen zijn respectievelijk -30 en -70 cm.

De uitwisseling van data tussen SWAP en BBPR gebeurt in de meest geavanceerde uitwerking van Waterpas op dagbasis. In de minder geavanceerde uitwerking worden jaarberekeningen van SWAP als invoer voor BBPR gebruikt, wat een grovere benadering van de werkelijkheid betekent. Tot nu toe zijn berekeningen voor de polders Zegveld (De Vos *et al.* 2004), Krimpenerwaard (Hoving en De Vos, 2007) en de Vlietpolder (Van Bakel *et al.*, 2009) volgens de minder geavanceerde methode uitgevoerd. Met de koppeling op dagbasis zijn testberekeningen uitgevoerd en vergeleken met veldproefgegevens graspercelen van het Veenweidecentrum Zegveld. Hierbij kwamen vernatting en verdroging daadwerkelijk in de grasproductie tot uiting en werden de gemeten opbrengstniveau goed benaderd. Met deze geavanceerde methode zijn voor het adviesmodel VeenWijzer de schadepercentages voor vernatting, verdroging en gebruik berekend voor verschillende peilregimes en de toepassing van onderwaterdrains op basis van tien weerjaren. Daarmee zijn de schadepercentages goed onderbouwd en is het een aanzienlijke verbetering ten opzichte van het gebruik van de HELP-tabel.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

Waterpas wordt gebruikt voor onderzoeksdoeleinden en is als huidige modelkoppeling niet voor de praktijk toepasbaar door de specialistische invoer die de modellen behoeven. Verkend moet worden of met een gestandaardiseerde invoer de opzet van de modelkoppeling te gebruiken is voor het berekenen van de hoeveelheid bodemvocht, de gewasgroei en het graslandgebruik in de praktijk.

4.5.4 SIMGRO

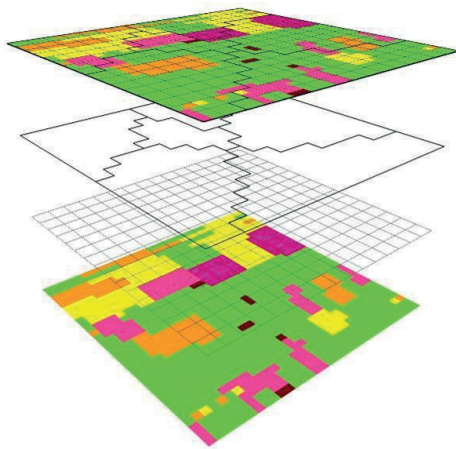
Bron: <http://www.wageningenur.nl/nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/Alterra/Faciliteiten-Producten/Software-en-modellen/SIMGRO/Theory.htm>

Theorie

SIMGRO 6 bestaat uit de metaSWAP model voor de onverzadigde zone en Modflow voor de regionale grondwaterstroming. Het oppervlaktewater kan worden gemodelleerd door middel van een SIMGRO gebaseerde module of SWQN. SIMGRO verbindt deze verschillende compartimenten door middel van flux en storativity-uitwisselingen. De model input bestaat uit verschillende hydrologische gegevens, zoals meteorologische gegevens, landgebruik, bodemsoorten, waterloop trajecten, stuwen en zo verder.

Schematisatie

Figuur 4.9 toont een voorbeeld van hoe sub-compartimenten geschematiseerd kunnen worden. De onderste laag betreft het gecombineerde landgebruik en de bodem-eenheden (die kunnen worden verkregen uit een overlay procedure van landgebruik en bodemkaarten). Dan volgt de laag met de cellen van het grondwater model. De derde laag wordt gevormd door het deelstroomgebied van het oppervlaktewatermodel. Oppervlaktewater gemodelleerd als een netwerk van waterloop trajecten die zijn aangesloten op deze deelstroomgebied. In de toplaag zijn de schematisaties gecombineerd.



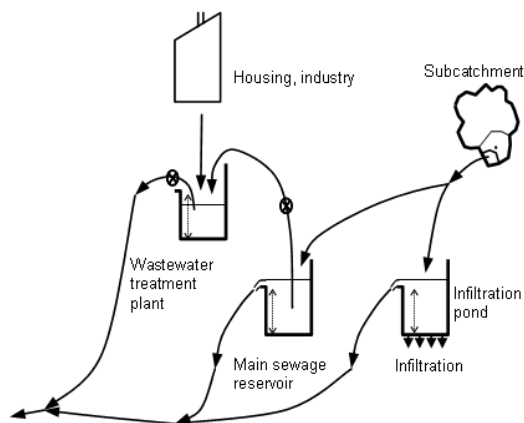
Figuur 4.9 Voorbeeld van hoe ruimtelijke schematiseringen van het geïntegreerde model worden geconstrueerd. De onderste laag heeft betrekking op de eenheden die verkregen zijn uit een overlay van landgebruik en bodemkaarten eenheden. De volgende laag vertegenwoordigt de cellen van het grondwater model, gevolgd door het deelstroomgebied van het oppervlaktewatermodel in de volgende laag. De bovenste laag laat zien hoe de schematisaties zijn gecombineerd.

Plant / bodem-atmosfeer interacties

Interacties met de atmosfeer zijn de motor van de regionale watersysteem. Interacties in SIMGRO bestaan van neerslag, gewasverdamping, interceptieverdamping, verdamping uit plassen en kale grond verdamping. Evapotranspiratie in SIMGRO wordt berekend met behulp van een gemodificeerde Makkink-methode. De natuurlijke neerslag kan worden vergroot door beregening uit oppervlaktewater of grondwater.

Bodemwater

Onverzadigde stroming in de ondiepe ondergrond wordt gemodelleerd met behulp van metaSWAP, een dynamische metamodel concept gebaseerd op steady-state-simulaties in SWAP. In het submodel bodemwater wordt alleen een stroming in de verticale richting verondersteld. De bodemwater dynamiek wordt beschreven met behulp van een serie van drie 'control boxes': één voor de wortelzone, één voor de ondiepe ondergrond, en één voor de diepe ondergrond (zie figuur 4.10). De stroombeschrijving van het bodemwater model eindigt bij het freatisch niveau, wat betekent dat de grens tussen de submodellen voor bodemwater en het grondwater op en neer beweegt, samen met de bewegingen van het freatische niveau.



Figuur 4.10 Schematische weergave van opslag-elementen en transmissieverbindingen in stedelijke gebieden.

Grondwater

Grondwater wordt gesimuleerd met behulp van een aangepaste versie van Modflow gemaakt door TNO (geen openbaar domein). De koppeling tussen het grondwatermodel en de subdomeinen van het topsysteem is ontworpen volgens het Open Modelling Interface filosofie.

Oppervlaktewater

De SIMGRO-gebaseerde module voor oppervlaktewater is gemodelleerd als een netwerk van waterloop trajecten. Elk traject vertegenwoordigt een reservoir dat interacteert met andere gekoppelde trajecten. Uitvoering van SIMGRO vertegenwoordigt zelfs de kleinste waterlopen. Stuwen en pompen kunnen worden gesimuleerd als onderdeel van het watersysteem.

Waterbeheer

Het model heeft een groot scala aan flexibele opties voor het simuleren van de impact van waterbeheer, zoals waterzuiveringsinstallaties, beregeningswater, stuwpeilbeheer en afvoerpompen. Het SIMGRO-model heeft een uitgebreide reeks opties voor het modelleren van de waterhuishouding van de stedelijke gebieden, zoals die door het schema in figuur 4.10 wordt weergegeven. In droge perioden is irrigatie van gewassen optioneel en dit hangt af van bodemvocht en de beschikbaarheid van oppervlaktewater of grondwater. Stuwpeilniveaus voor winter en zomer kunnen worden gedefinieerd, maar deze kunnen ook worden aangepast aan de gewenste oppervlakte peilen of grondwaterstanden.

Riolering

Drainage kan worden gesimuleerd met behulp van Modflow of SIMGRO functionaliteiten. Dit laatste houdt in dat er drainagekarakteristieken worden onderscheiden voor vier waterlooptypes: conventionele waterlopen, velddrains (beide met ingang en radiale weerstand, optionele horizontale weerstand), geulen (totale weerstand) en oppervlakkige maaiveld drainage (weerstand <1 d).

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

De model input bestaat uit verschillende hydrologische gegevens, zoals meteorologische gegevens, landgebruik, bodemsoorten, waterloop trajecten, stuwen en zo verder. Het model is in de eerste

plaats bedoeld voor onderzoeksdoeleinden. Voor de praktijk zou het vooral interessant zijn om gebruik te kunnen maken van de koppeling tussen de plant / bodem-atmosfeer interacties en de regionale grondwaterstroming. Dit om het effect van grondwaterstand op beschikbaar bodemvocht mee te kunnen nemen in het berekenen van groei en opbrengstvoorspelling. In de praktijk is nog weinig zicht op het verloop van de grondwaterstand en de invloed hiervan op gewasproductie.

4.5.5 Graslandgebruikswijzer

De Graslandgebruikswijzer (GGW) is een expertmodel dat onder het model BBPR (zie paragraaf 4.5.1) draait en waarmee het graslandgebruik van een melkveebedrijf gesimuleerd kan worden. Dit gebeurt op een manier zoals dat ook in de praktijk plaatsvindt. Een veehouder probeert het grasland zo te gebruiken dat het vee gedurende het gehele groeiseizoen geweid kan worden, en zal streven om ook voldoende gras te oogsten voor de winterperiode. Het model GGW maakt een gebruiksplan voor alle graspercelen van een bedrijf, waarbij de voederbehoefte van het vee en het grasaanbod van de betreffende percelen op het bedrijf zo goed mogelijk op elkaar worden afgestemd. GGW gebruikt gegevens uit enerzijds een groeiemodel, waarmee het grasaanbod op snedebasis wordt berekend, en anderzijds de grasbehoefte van de veestapel (Figuur 4.11).



Figuur 4.11 De Graslandgebruikswijzer (GGW) gebruikt voor het simuleren van graslandgebruik modellen die het grasaanbod en de grasbehoefte van een veestapel berekenen.

GGW maakt een planning van het perceelsgebruik op dagbasis, waarbij wordt uitgegaan van het basisprincipe dat maaien in dienst staat van de beweiding (Werkgroep Normen voor de Voederveorziening, 1991). Dit betekent, dat alleen het gras dat niet nodig is voor beweiding wordt gemaaid ten behoeve ruwvoerwinning. GGW maakt een perceelskeuze op basis van een puntenaantal dat per perceel (gebruikswaarde), met als eerste doel: beweiding. Daarbij is de planningshorizon niet beperkt tot één beweiding, maar wordt gekeken naar een reeks van beweidingen. Het perceel met de best scorende reeks wordt beweide. De punten worden toegekend op basis van criteria, zoals het gewenste opbrengstniveau, de gerealiseerde groeiuur, het gebruik van de vorige snede en het aantal dagen weiden. Naast de gemiddelde score die een perceel behaalt, wordt het perceelsgebruik binnen GGW ook gestuurd door de variatie in grasaanbod tussen percelen en de voorraad van grasaanbod. Dit zijn factoren die op langere termijn bepalend zijn voor het al of niet kunnen blijven weiden van vee.

Standaard wordt in GGW de grasgroei gegenereerd door de grasgroei modellen GRAMIN of GRAS2007, uitgegaan van een snede-, N levering bodem en N-bemestingsafhankelijke groei, welke wordt gecorrigeerd per grondsoort en de bijbehorende gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) als hydrologische kenmerken. De nat- en droogteschade is dan gebaseerd op percentages uit de Help-tabel (1987) en aanvullende aanpassingen van de productie op het gebied van weideresten en voederwaarde (Nijssen en Evers, 1999). Vanaf 2003 is het model uitgebreid met een verbeterde interactie tussen het weidende vee, het grasaanbod en de grasopname. Hierdoor wordt het effect van de weideresten in zowel een volgende maaisnede als een volgende weidesnede beter gesimuleerd (Werkgroep Normen voor de Voederveorziening, 1991; Van der Kamp *et al.*, 2003). De draagkracht van de bodem is echter sterk bepalend voor het graslandgebruik. Percelen met een onvoldoende draagkracht zullen zo mogelijk gemeden worden. Dit kan betekenen dat het vee in het voorjaar noodgedwongen later in de wei gaat, of gedurende het groeiseizoen tijdelijk opgesteld wordt, of in het najaar eerder naar binnen gaat. Wanneer de draagkracht onvoldoende is, wordt de zode door vee vertrapt of door veldwerkzaamheden sterk beschadigd. Dit is zowel op korte, als op lange termijn zeer nadelig voor de productiviteit en de bewerkbaarheid van de zode.

GGW is in ten behoeve van het Waterpas-model (koppeling SWAP-BBPR) uitgebreid met een draagkrachtfunctie, zodat het graslandgebruik ook hierop gestuurd wordt. Gegevens over drukhoogte om de draagkracht te bepalen, worden binnen het Waterpas-model door SWAP geleverd. In de gebruiksplanning van GGW worden de percelen met een onvoldoende draagkracht niet geweid of gemaaid. Zodra de drukhoogte lager wordt en de draagkracht weer voldoende is, worden deze

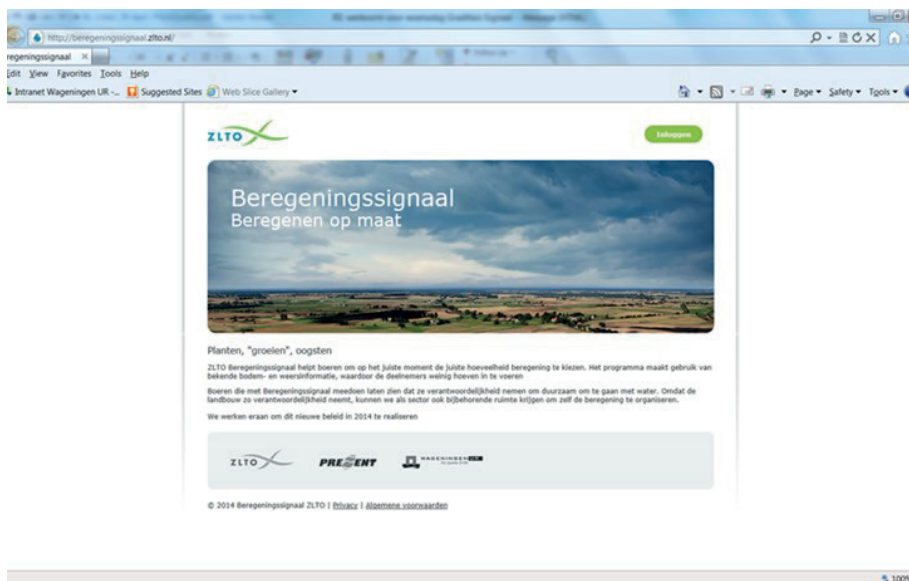
percelen wederom in de planning meegenomen. In GGW wordt onderscheid gemaakt tussen de benodigde draagkracht bij berijden en beweiden. In GGW wordt voor het graslandgebruik bij weiden uitgegaan van een meerdaags omweidingssysteem. Standweiden en moderne varianten van omweiden zijn vooralsnog moeilijk te simuleren.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

GGW wordt nu alleen binnen de module VoederVoorzieningsWijzer (VWV) van BBPR toegepast, waarin de koppeling is gelegd met het enerzijds het grasgroeimodel GRAMIN of GRAS2007 om het aanbod te bepalen en anderzijds MelkveeWijzer, het koemodel en het jongvee om de vraag te kwantificeren. GGW kan eventueel als afzonderlijk programma gebruikt worden, mits de invoer rondom de vraag en het aanbod van gras op een alternatieve manier wordt georganiseerd. Het ligt voor de hand om dezelfde programma's te gebruiken als die binnen VWV gebruikt worden.

4.5.6 BeregeningsSignaal

Voor het doelmatig inzetten van beregening biedt ZLTO het internetprogramma "Beregeningssignaal" aan. Dit programma is sinds 2014 landelijk beschikbaar voor gras, snijmaïs, aardappelen en bieten. Het programma geeft op elk gewenst moment een beregeningsadvies per ingevoerd perceel. Naast de aanbevolen beregeningsgift berekent het programma voor gras en snijmaïs ook het rendement van een beregeningsgift. De gebruiker krijgt per e-mail een bericht wanneer beregening wenselijk is. Het advies kan door de gebruiker op de website verder in detail bekeken worden. ZLTO heeft Beregeningssignaal gemaakt in samenwerking met Wageningen UR (LSR en PRI), Present Internet, DLV-Plant, Royal Haskoning en Suikerunie (Zie Figuur 4.12 met printscreen van het model).



Figuur 4.12 Printscreen van het model BeregeningsSignaal.

De gebruiker voert éénmalig de bedrijfsgegevens in, tekent zijn percelen digitaal in en geeft tenminste één peilbuis op voor het meten van de grondwaterstand. De bodemgegevens worden betrokken van de Bodemfysische Eenhedenkaart (BOFEK2012), schaal 1:50.000. Zie voor nader informatie: <http://www.wageningenur.nl/nl/show/Bodemfysische-Eenhedenkaart-BOFEK2012.htm>. De bodemgegevens worden automatisch gekoppeld aan de ingetekende percelen. Zelf moet de gebruiker per perceel aangeven welke peilbuis het beste als referentie kan dienen voor het grondwaterstandsverloop. Jaarlijks wordt per perceel aangegeven welk gewas geteeld wordt, wat de poot- of zaaidatum is en wat de verwachte worteldiepte is. Om het systeem up-to-date te houden, moet de gebruiker alleen beregeningsgiften en grondwaterstanden bijhouden. Weergegevens (neerslag, verdamping en temperatuur) worden automatisch ingelezen. Bij afwijkingen voor neerslag kunnen de hoeveelheden overschreven worden. Op basis van deze informatie wordt per perceel een bodemvochtbalans bijgehouden en een beregeningsadvies berekend. Voor gras en snijmaïs -bij melkveehouders- wordt desgewenst ook een economisch advies berekend op basis van de kosten en

baten van berekening. De kosten en baten worden uitgedrukt in een bedrag per kg product en dit wordt afgewogen tegen de actuele kosten voor het (alternatief) aankopen van ruwvoer. De actuele ruwvoorraad, de kans op herinzaai en het grasaanbod voor weiden als wegings-/risicofactoren in de berekening meegenomen. Het economisch advies wordt berekend met de module Economisch Criterium Beregenen op maat (EcBOM).

De weergegevens betreffen neerslagsom, verdamping (Makking) en temperatuur (minimum en maximum) op dagbasis, waarbij onderscheid wordt gemaakt in historische gegevens en de weersverwachting. Voor de verwachting wordt ook de neerslagkans gegeven. De gevallen neerslag (historisch) is gebaseerd op radarwaarnemingen en metingen van ruim 350 weerstations verspreid in heel Nederland. De radarpixels hebben een ruimtelijke resolutie van 1km bij 1km. Hieruit wordt de neerslag per perceel berekend en heeft als voordeel dat met de ruimtelijke variabiliteit rekening wordt gehouden. De voorspellingen zijn gebaseerd op het model ECMWF en worden tweemaal per dag vernieuwd. De verwachtingstermijn bedraagt 6 dagen. De temperatuur en verdamping zijn ruimtelijk minder variabel en worden betrokken van de 35 AWS KNMI-stations.

De neerslagsom en de verdamping worden gebruikt voor de vochtbalans en de temperatuur wordt gebruikt voor het voorspellen van de gewasontwikkeling en daarmee de groeifactor voor verdamping.

Aanvankelijk was het de bedoeling dat BeregeningsSignaal gebruik zou maken van remote sensing, in combinatie met een eenvoudige bodemvochtbalans, de BeregeningsWijzer. De eenvoudige balans zou worden geïkt met remote sensing, waarbij de optische beelden vertaald zouden worden in een bodemvochttoestand. De bodemvochtbalans zou daarbij vooral dienen om voor de nabije toekomst (termijn weersverwachting) een advies te genereren. Het programma is er gekomen, maar zonder remote sensing, vooral omdat de frequentie van de optische beelden veel te laag was, maar ook omdat de optische beelden zich lastig laten vertalen in een hoeveelheid bodemvocht. Uiteindelijk komt het advies nu alleen tot stand op basis van de BeregeningsWijzer. Wel wordt nog steeds gezocht naar een methode om het model te ijken met of te toetsen aan metingen.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

BeregeningsSignaal is ontwikkeld voor praktisch gebruik en geeft al in grote mate invulling aan de module Bodemvocht, één van de vijf modules die in het beoogde adviessysteem minimaal vertegenwoordigd zou moeten zijn (zie paragraaf 5.4). Het geeft inzicht in de actuele vochttoestand en voorspelt de beschikbare hoeveelheid vocht voor de weersverwachtingstermijn. In BeregeningsSignaal wordt een vertaling gemaakt naar beregeningsbehoefte, echter met dezelfde input en berekeningsmethode kan ook de mate van vernatting worden berekend om draagkracht van de graszode of bekwaamheid van de bodem voor grondbewerking te voorspellen. In BeregeningSignaal wordt gebruik gemaakt van het relatief eenvoudige model BeregeningsWijzer, dat in de eerste plaats is ontwikkeld voor het berekenen van de reductie van beschikbaar bodemvocht. Het berekenen van de mate van vernatting zou mogelijk aan het model toegevoegd kunnen worden. BeregeningsWijzer is eventueel te vervangen door een geavanceerd hydrologisch model, zoals SWAP. Voorwaarde daarbij is wel dat daarbij gebruik gemaakt wordt van standaard invoerwaarden. De mogelijkheden hiertoe dienen nader verkend te worden.

Meer informatie over de toegang tot en het gebruik van het programma is te vinden op:
<http://www.zlto.nl/item/10067/Beregeningssignaal>

4.5.7 Adviesbasis bemesting en voedergewassen

Bron: <http://www.bemestingsadvies.nl> en
<http://www.wageningenur.nl/en/show/Handboek-Melkveehouderij.htm>

De Adviesbasis bemesting grasland en voedergewassen is een uitgave van de Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (CBGV). De CBGV is een initiatief van LTO-Nederland. Het (voormalige) Productschap Zuivel financierde de activiteiten van de commissie. De commissie draagt er zorg voor dat er een onafhankelijk bemestingsadvies voor iedereen beschikbaar is.

De Adviesbasis bemesting grasland en voedergewassen bevat bemestingsadviezen voor grasland, grasland met klaver, graslandvernieuwing, maïs, granen voor GPS, voederbieten en luzerne. De adviesbasis wordt voortdurend gecontroleerd. Indien nodig worden adviezen gewijzigd of nieuwe adviezen toegevoegd.

De CBGV baseert haar adviezen bij voorkeur op zoveel mogelijk proefresultaten. Resultaten moeten daarbij wel afkomstig zijn van proeven die op een correcte wijze zijn aangelegd en uitgevoerd, en waarvan de waarnemingen netjes schriftelijk zijn vastgelegd en de resultaten op een navolgbare en algemeen aanvaardbare wijze zijn uitgewerkt. Voor de belangrijkste meststoffen zijn op basis van proefresultaten modellen gemaakt die de werking van de meststoffen voorspellen.

Een bemestingsplan is nodig om gewassen te voorzien van voldoende voedingsstoffen, om de beschikbare mest zo goed mogelijk verdelen over de gewassen en de percelen en om te voldoen aan de wettelijke gebruiksnormen. Hiervoor zijn ook de resultaten van grond- mestonderzoek nodig, evenals kennis van de werking van dierlijke mest en de nalevering van gewasresten. Veehouders vinden in de adviesbasis (www.bemestingsadvies.nl) zo veel mogelijk gegevens die nodig zijn om een goed bemestingsplan op te stellen en uit te voeren. Het advies werkt als een beslisboom, waarbij de planning van een teelt en de historie hiervan leiden tot een zo goed mogelijke afstemming van de mestgift op de behoefte van het gewas.

Perspectief voor implementatie in basis adviessysteem

De adviesbasis bemesting en voedergewassen is ontwikkeld voor gebruik in de praktijk en zodoende bij uitstek geschikt om toe te passen in het beoogde adviessysteem. Het adviesmodel (beslisboom) is relatief eenvoudig en zodoende gemakkelijk toe te passen. De praktische functionaliteit staat of valt met het automatiseren van de input. Dit betreft de bemestingstoestand van de bodem (analyses), de planning van het grondgebruik (bemestingsadvies) en de registratie van de daadwerkelijk toegediende hoeveelheid meststoffen. Voor wat betreft de planning van het graslandgebruik zou een koppeling gemaakt moeten worden met de GraslandgebruiksWijzer. Het organiseren van de input en het koppelen aan andere programma's is bij uitstek iets dat in het basis adviessysteem georganiseerd moet worden (zie paragrafen 5.4 en 5.5).

5 Analyse

5.1 Algemeen

Reeds bij de projectdefinitie is het uitgangspunt geweest dat sensorsystemen kunnen bijdragen aan het genereren van kwantiteits- en kwaliteitsparameters. Het werd belangrijk gevonden dat er specifieke modellen komen voor gras en maïs die deze gegevens kunnen verwerken en vertalen in managementinformatie om vooral operationele beslissingen te nemen. Zodoende stond het uiteindelijk gewenste resultaat in feite al vast, namelijk het adviessysteem dat al veelvuldig als uitgangspunt genoemd is. Wat nog open stond was een specificatie waar het systeem in essentie aan moet voldoen, een ontwerp volgens welke de diverse datastromen gekoppeld kunnen worden en het aangeven van de haalbaarheid volgens duidelijke beoordelingscriteria.

De uitgevoerde inventarisaties (eisen en wensen, sensoren en modellen) die in de voorgaande hoofdstukken zijn beschreven zijn belangrijke input. Deze informatie staat nog op zich en een nadere analyse is nodig om de 'ingrediënten' tot een geheel te vormen. In dit hoofdstuk is een nadere analyse gegeven van waar het programma inhoudelijk aan moet voldoen, in welke behoefte het moet voorzien, welke informatie beschikbaar is, hoe datastromen gekoppeld kunnen worden en hoe het uiteindelijk adviessysteem is te realiseren.

5.2 Gewenste toepassing – droombeeld

Het hoofdstuk eisen en wensen heeft een uitgebreide lijst van technische details opgeleverd waar de te ontwikkelen operationele adviessysteem aan moet voldoen. De uitdaging is om deze eisen en wensen zodanig te bundelen dat de samenhang duidelijk wordt en dat dit richting geeft voor de verdere ontwikkeling van de tool.

Uitgaande van het droombeeld dat in hoofdstuk 2 is geformuleerd:

'Een operationeel adviessysteem dat melkveehouders helpt om op hun bedrijf binnen gestelde milieu- en maatschappelijke randvoorwaarden de ruwvoeropbrengst te maximaliseren en om de ruwvoer kwaliteit te optimaliseren'

zijn de volgende ontwikkelingsstappen essentieel voor een adviessysteem:

- Van bedrijfsniveau naar perceelsniveau;
- Van jaarbasis naar dagbasis;
- Van metingen achteraf naar actuele en voorspelde waarnemingen.

Een alles omvattend systeem, dat op alle vragen aangaande ruwvoerproductie een antwoord heeft, zou een ideale beantwoording van het droombeeld zijn. Het is echter een utopie om dit in één keer te realiseren, nog afgezien van het budget dat hiervoor nodig is. Het uitgangspunt is om te starten met oplossingen die de grootste impact hebben en die op kortere termijn haalbaar zijn.

De grote lijn is dat sensoren data leveren en dat modellen deze data vertalen in voorspellingen en adviezen. Structuur in enerzijds de informatiebehoefte van de ondernemer en anderzijds de datastromen is essentieel om een concreet beeld te kunnen vormen van het uiteindelijke adviessysteem. De verdere analyse in dit hoofdstuk is hierop gericht. In de volgende paragrafen zijn de volgende drie stappen uitgewerkt:

- Focus op operationele informatie. Welke informatiebehoefte betreft dit concreet (5.3)?;
- Het opknippen van datastromen tot modules die de vereiste kennisvelden vertegenwoordigen om het geheel overzichtelijk te houden (5.4);
- Realisatie van een adviessysteem door de modules via een platform te koppelen (5.5).

5.3 Behoeft managementinformatie ondernemer

Belangrijk is dat de tool aansluit op de informatiebehoefte van de ondernemer. Bij de te ontwikkelen adviessysteem ligt de focus op operationele vraagstukken, zoals dat in het droombeeld geformuleerd is. Bij de verkenning van de eisen en wensen is echter gebleken dat gemakkelijk informatie van verschillende managementniveaus door elkaar gebruikt wordt. In het onderstaande is met voorbeelden de informatiebehoefte voor de managementniveaus strategisch, tactisch en operationeel nader uiteengezet.

Strategisch

- Wel of geen weidegang
- Arealen gras, maïs en overig
- Continuteelt of vruchtwisseling
- Huisvesting, mestopslag, mestverwerking
- Wel of geen berekening

Tactisch

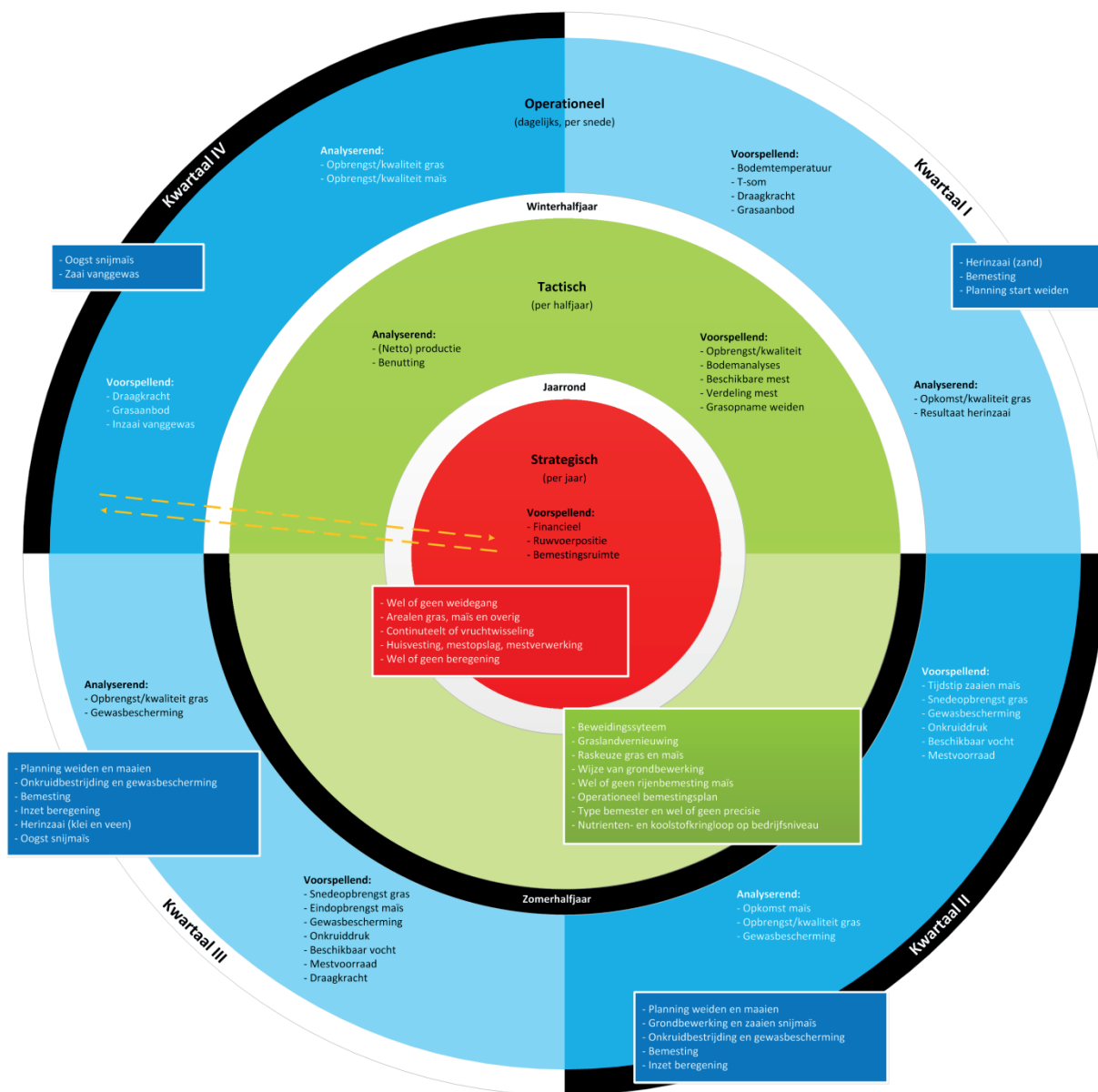
- Beweidingsysteem
- Graslandvernieuwing
- Raskeuze gras en maïs
- Wijze van grondbewerking
- Wel of geen rijenbemesting maïs
- Operationeel bemestingsplan
- Type bemester en wel of geen precisie
- Nutriënten- en koolstofkringloop op bedrijfsniveau

Operationeel

- Herinzaai
- Bemesting
- Planning weiden en maaien
- Grondbewerking en zaaien snijmaïs
- Onkruidbestrijding en gewasbescherming
- Inzet berekening
- Oogst snijmaïs
- Zaaï stikstofvanggewas

De informatiebehoefte voor de verschillende managementniveaus is schematisch weergegeven in Figuur 5.1. Per niveau is de afhankelijkheid van de tijd weergegeven, waarbij jaarlijks het patroon hetzelfde is vergelijkbaar met de teeltkalenders in Bijlage 2. Aan de figuur is zodoende de titel managementkalender meegegeven. Met de ronde vorm wordt de jaarlijkse cyclus van ruwvoerproductie, en de informatiebehoefte die hiermee gepaard gaat, benadrukt. Aangegeven is of de informatie voorspellend of analyserend van aard is.

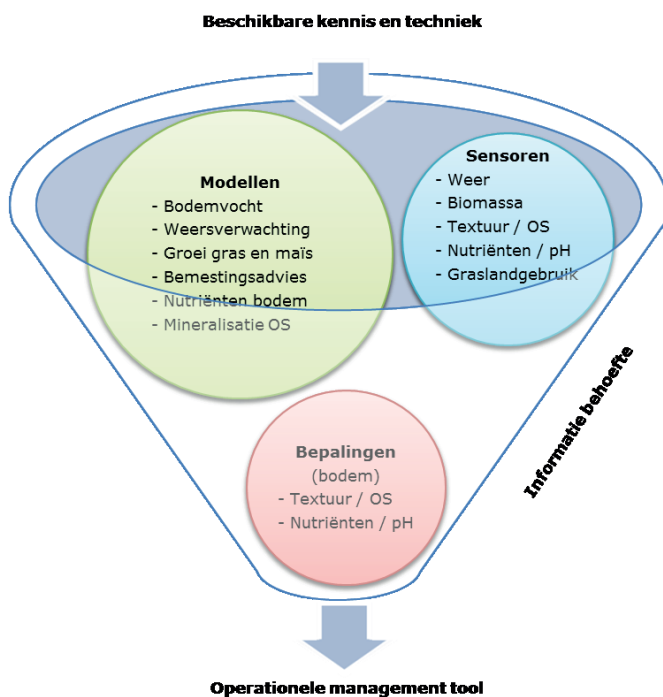
In Bijlage 4 staat een overzicht met daarin de informatiebehoefte in relatie tot managementniveau, de eisen & wensen, het tijdstip/seizoen wanneer informatie gewenst is, de beschikbare tools en de beschikbare modellen. Uit dit overzicht blijkt welke tools nu al op de bedrijven aanwezig zijn. Dit is nog onvoldoende om het gewenste adviessysteem te kunnen optuigen.



Figuur 5.1 Management kalender voor ruwvoerproductie op een melkveebedrijf waarbij de informatiebehoefte per managementniveau (strategisch, tactisch en operationeel) onderscheiden is. Per niveau is de tijdgebondenheid aangegeven. De informatie is voorspellend of analyserend van aard.

5.4 Koppelingen datastromen tot modules

Informatie (data) die voor het ontwikkelen van een operationeel adviessysteem beschikbaar is, wordt gegenereerd met modellen, sensoren en bepalingen. Bepalingen zijn bijvoorbeeld het karteren van de bodem of het uitvoeren van laboratoriumanalyses om de textuur, het organische stofgehalte (OS), de zuurgraad (pH) en de bemestingstoestand van de bodem vast te stellen. Het te ontwikkelen adviessysteem kan van de drie datastromen gebruik maken. In Figuur 5.2 is dit proces schematisch weergegeven. Hierbij zijn voor de modellen, sensoren en bepalingen de belangrijkste items die gerelateerd zijn aan ruwvoerwinning vermeld.



Figuur 5.2 Schematische weergave van het verzamelen van datastromen binnen de informatiebehoefte die er is om te komen tot een operationele managementtool.

Om verder richting te geven aan de koppeling van de items die in Figuur 5.2 staan weergegeven is aan de hand van de verkende eisen en wensen gekeken waar inhoudelijk de grootste kennisbehoefte ligt op het gebied van ruwvoerproductie. Dit is samen te vatten in vijf modules:

1. Bodemvocht; actuele vochttoestand en voorspelling beschikbaar vocht;
2. Bemesting; bemestingstoestand van de bodem en beschikbaarheid van meststoffen;
3. Graslandgebruik; actuele opbrengst en optimalisatie van het oogstmoment;
4. Groei en voederwaarde; actuele productie en voorspelling groei en voederwaarde;
5. Nutriëntenbalans; hoeveel mest is er gegeven en hoeveel product is er geogst.

N.B. Een module biotische stress, met daarin effecten van ziekten, plagen en onkruiden op groei en productie, en input voor managementbeslissingen bij beheersing van ziekten, plagen en onkruiden, wordt op aangeven van de eindgebruikers niet geprioriteerd. De klankbordgroep van de gebruikers geeft aan dat ze met de huidige adviesystemen voor beheersing ziekten, plagen en onkruiden voldoende uit de voeten kunnen in gras en maïs. Met andere woorden, ze zijn van mening dat ze biologische stress voldoende kunnen uitsluiten.

De definitie van een module is als volgt: een computerprogramma dat diverse datastromen (sensoren, modellen en analyses) combineert, een interface heeft en antwoorden geeft die toegevoegde waarde hebben ten opzichte van hetgeen een veehouder weet of waarneemt met z'n huidige kennis of beschikbare hulpmiddelen.

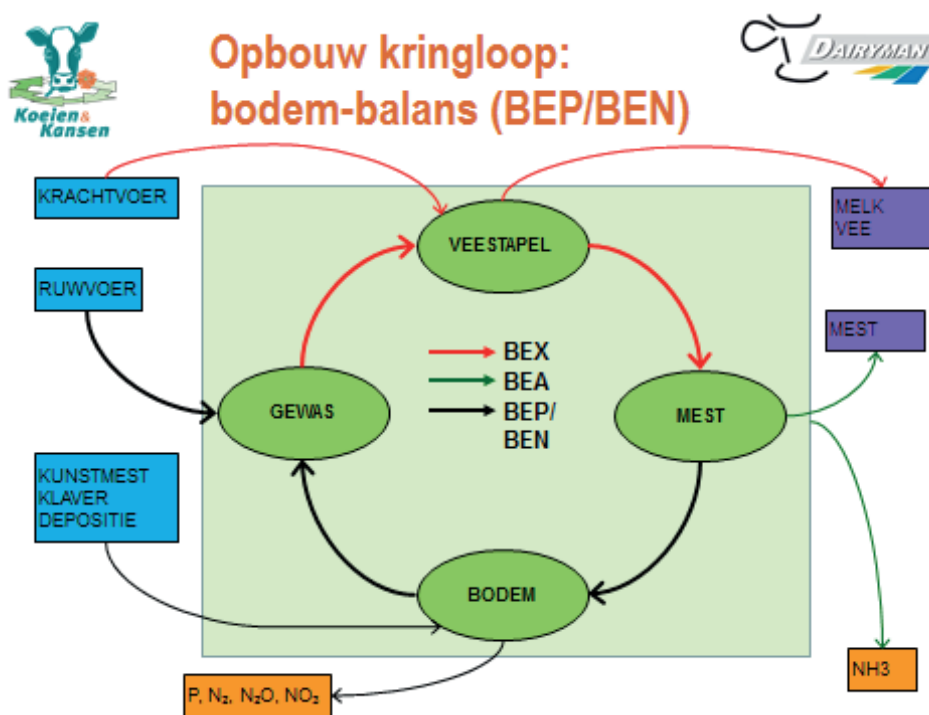
Ad 1. Gewasgroei is volgens Doorenbos en Kassam (1979) recht evenredig aan de vochtvoorziening, uitgaande van een voldoende nutriëntenvoorziening. Door de variabiliteit in het weer is de vochtvoorziening een dynamische en onzekere productiefactor. Inzicht in de invloed van de vochtvoorziening op de productie is zodoende gewenst, evenals de uiteindelijke efficiëntie van het vochtgebruik. De basis hiervoor is het opstellen van een bodemvochtbalans.

Ad 2. Het optimaal benutten van nutriënten is een voorwaarde om de ruwvoerproductie te kunnen maximaliseren. Dit vereist een goede afstemming van de mestgift op de bemestingstoestand van de bodem en de te verwachten opbrengst. Aan de orde zijn de beschikbaarheid van organische mest, een eventuele differentiatie van nutriënten door mestscheiding en de verwachten opbrengst.

Ad 3. De keuze van het oogstmoment heeft grote invloed op de productie en de voederwaarde van gras. Het product van deze twee bepaalt de uiteindelijke netto productie. De module graslandgebruik zou inzicht moeten geven in beide aspecten om de planning van het graslandgebruik te verbeteren. Beslissingen worden ondersteund met metingen van de actuele of recente gewastoestand.

Ad 4. Een voorspelling van de grasgroei is nodig om het optimale oogsttijdstip te bepalen en om het graslandgebruik te plannen. Daarbij is inzicht in voederwaarde en inhoud stoffen een belangrijke wens. Vooral het weer is een onzekere factor. Het relateren van groei aan bodemvocht, stikstofbemesting en graslandgebruik is essentieel. Voor de voorspelling van de groei van snijmaïs is vooral de relatie met zaaitijdstip, het daadwerkelijke groeiverloop in het voorjaar, de temperatuur, de nutriëntenvoorziening en beschikbaar bodemvocht belangrijk.

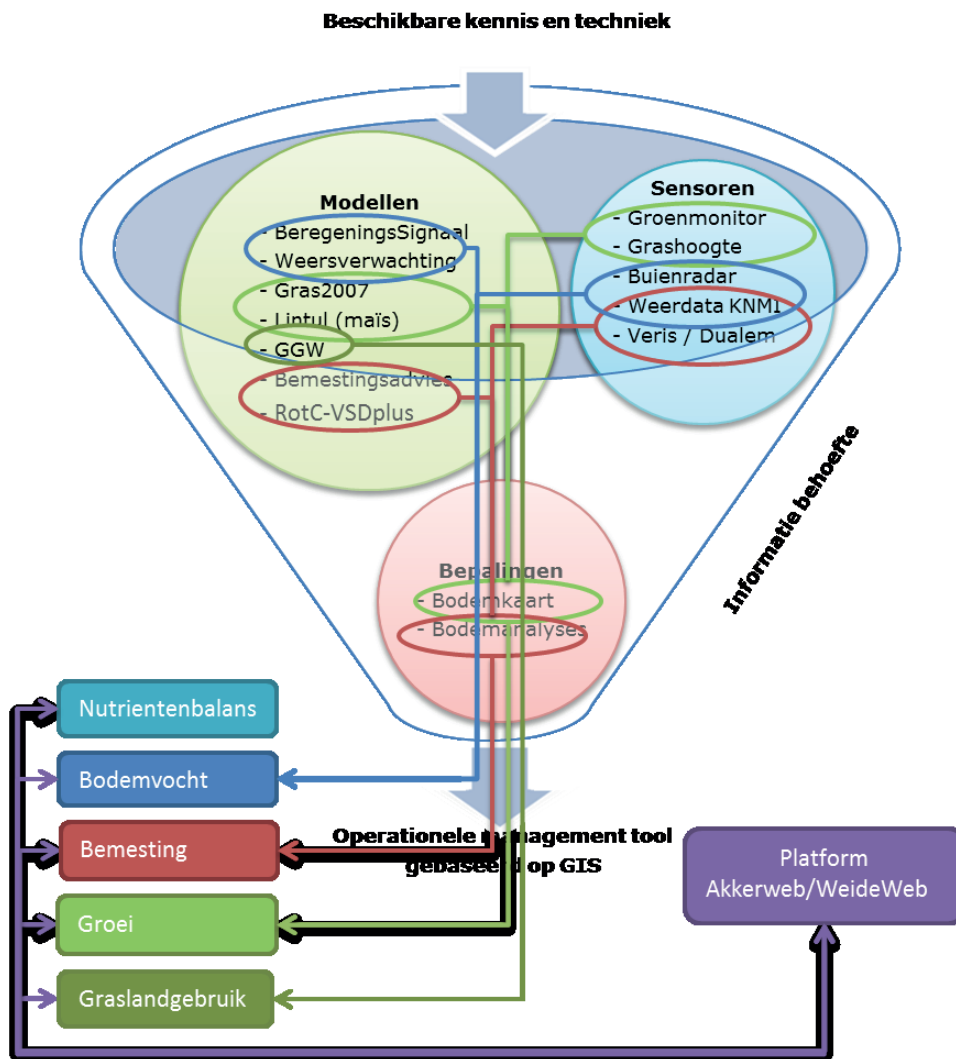
Ad 5. De benutting van nutriënten wordt inzichtelijk door een mineralenbalans op te stellen. Het verschil tussen de aan- en afvoer van nutriënten is het overschot dat in de vorm van verschillende emissies verdwijnt. De verhouding tussen het overschot en de aanvoer geeft de benutting weer. Door de kringloop van nutriënten te berekenen wordt ook zichtbaar waar (vee, bodem, bedrijf) de verliezen optreden. Op melkveebedrijven wordt vooralsnog uitsluitend een mineralenkringloop op bedrijfsniveau berekend, omdat de individuele snedeopbrengsten van gras veelal onbekend zijn, zeker als het gaat om weidesneden. Om nutriënten beter te benutten is een mineralenbalans op perceelsniveau vereist. Dit draagt ook bij aan het verbeteren van de kringloop op bedrijfsniveau. Daarbij is met een verbetering van de bodembenutting het grootste economische voordeel te behalen. Een eenvoudige weergave van een nutriëntenkringloop volgens de Kringloopwijzer (<http://www.verantwoordeveehouderij.nl/nl/mijnkringloopwijzer/Achtergrond.htm>) is weergegeven in Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Weergave nutriëntenkringloop op een melkveebedrijf volgens de Kringloopwijzer (<http://www.verantwoordeveehouderij.nl/nl/mijnkringloopwijzer/Achtergrond.htm>).

5.5 Realisatie modules en adviessysteem

Nu de kennisbehoefte van de verschillende modules bekend is, moet bekeken worden hoe concreet per module koppelingen tussen datastromen (sensoren en modellen en bepalingen) gemaakt kunnen worden. Vervolgens vormen de modules tezamen het beoogde adviessysteem. In Figuur 5.4 is per module hier een uitwerking aan gegeven. De vorm van de applicatie waarin de modules gebruikt worden staat hierbij nog open. Voor het adviessysteem is hierin wel een keuze gemaakt door aan te geven dat gebruik gemaakt moet worden van een platform (zie onderstaande toelichting).



Figuur 5.4 Schematische weergave van het verzamelen van datastromen om te komen tot modules die input vormen voor een operationele adviessysteem. Om de modules te koppelen en om deze te voeden met generieke data (bodem, weer, geo-informatie) is een koppeling met een platform aangegeven (bijvoorbeeld Akkerweb of Weideweb als te maken kloon hiervan).

De vijf genoemde modules zijn het 'laaghangende fruit' van een mogelijk uitgebreidere reeks modules die uiteindelijk noodzakelijk zijn om het geschetste droombeeld te verwezenlijken. Afgezien van de benodigde informatie en functionaliteit van iedere module moet gekozen worden in welke vorm deze worden gerealiseerd. In principe kan gekozen worden voor:

- Stand-alone modules. Elke module is een losstaand programma dat moet worden geïnstalleerd op de PC (zoals bijvoorbeeld BBPR);
- Web-based applicaties. Elke module is een losstaand programma dat draait op het internet (zoals bijvoorbeeld het BeregeningsSignaal);

-
- Set van web-based applicatie die draaien op een platform. De module staat als APP op een platform en maakt gebruik van de basis functionaliteiten die het platform biedt (zoals bijvoorbeeld het Akkerweb platform).

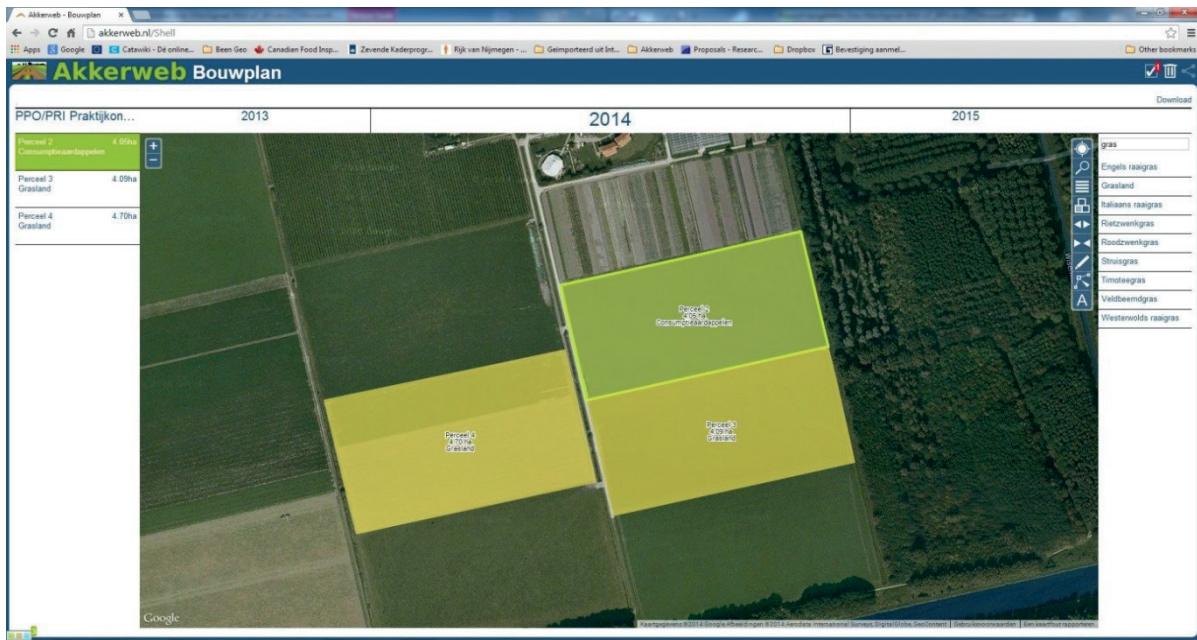
Het gebruik van stand-alone PC programma's in de agrarische sector tanende. De teler zit niet de hele dag op één plek. Het is handig als hij zijn modules kan gebruiken waar een PC, laptop, tablet of mobiel beschikbaar is. Het probleem van updates/downloads is dan ook verdwenen; op het internet staat steeds de laatste versie. Het gebruik van web-based applicaties is de trend. Het nadeel van zogenaamde 'single purpose' web applicaties voor telers die nu verschijnen is dat voor iedere applicatie de hele infrastructuur (dataconnecties, geo-tools, basis functionaliteit) opnieuw moet worden gebouwd en dat elke applicatie een andere look and feel heeft wat verwarrend is voor de gebruiker. Veel handiger is het om met een platform te werken.

Een platform biedt generieke functionaliteit die elke beoogde module kan gebruiken. De generieke functionaliteit kan zijn:

- Een geografische omgeving die door elke module kan worden gebruikt;
- Gemeenschappelijke dataconnecties met dataleveranciers (RVO, AgroXpertus, Altus, etc.);
- Gemeenschappelijk kaartmateriaal als achtergrond (Google, OpenStreetMap, kaartmateriaal van www.pdok.nl);
- Een identieke 'look and feel' waardoor de verschillen applicaties (hier de beoogde modules) makkelijker in het gebruik zijn;
- Basisfunctionaliteiten die voor elke applicatie nodig zijn zoals accountsbeheer, hosting, uptime zekerheid, scaling, etc., maar ook basisdata: weer, weersvoorspelling, grondsoort;
- Gemeenschappelijk gebruik van modellen (groeimodellen, schaderelaties, populatiedynamica van ziekten en plagen);
- De teler gegevens zijn uitwisselbaar tussen de modules.

Daarom geven wij verder invulling aan de uitwerking van het adviessysteem op basis van het platform Akkerweb. Gezien alle voorgaande analyses lijkt dit momenteel de beste insteek. Het Akkerweb platform is een recente ontwikkeling waaraan de WUR participeert. Dit maakt het mogelijk om een het platform zonder veel problemen aan de gestelde eisen van het GrasMais-Signaal aan te passen, en biedt zelfs de mogelijkheid een kopie van het platform te gebruiken als platform voor veehouders. Uiteraard met een naamgeving die meer tot de verbeelding spreekt voor onze doelgroep. Mogelijke namen zijn bv. Weideweb of GraslandWeb.

In Figuur 5.5 staat een screenshot van de bouwplanmodule die gratis binnen het platform wordt aangeboden. In Akkerweb worden data visueel gemaakt op basis van geografische achtergrondkaarten. In het screenshot is duidelijk de aanduiding van de percelen te zien door een directe link met de rvo gewaspercelen. Met kleuren worden nadere specificaties aangegeven.



Figuur 5.5 Platform Akkerweb met visualisatie van data op basis van geografische achtergrondkaarten.

Het platform beschikt over de functionaliteit die voor elke beoogde module nodig is (zie kader). Hierdoor is de ontwikkeling van een applicatie goedkoper; alleen de logica van de applicatie en de specifieke interface moeten worden gebouwd. De logica – de onderliggende modellen van de beoogde modules – zullen beschikbaar worden gesteld als aparte web services. Deze kunnen daardoor ook aan externe applicaties, buiten het platform om, beschikbaar worden gesteld en kunnen, uiteraard alleen met toestemming van de eigenaar, door derden (ontwikkelaars) worden gebruikt om nieuwe applicaties te ontwikkelen die niet op het platform draaien. Hiermee wordt de samengevoegde kennis ter beschikking gesteld aan een ruimer publiek dan de platform gebruikers zelf. Bovendien kunnen de met Akkerweb technologie ontwikkelde modules zowel als gewone APPs op het Akkerweb platform draaien, maar ook als stand alone applicatie buiten het platform om worden aangeropen en gebruikt. De Akkerweb omgeving is dan niet zichtbaar maar wordt wel gebruikt.

Akkerweb basis functionaliteiten

- **Account:** Een individuele inlog waardoor bestanden alleen voor de gebruiker (de teler) toegankelijk zijn. Via 'single sign on' is de gebruiker direct ingelogd bij de voor hem relevante modules en apps zodat herhaald inbrengen van gegevens wordt voorkomen.
- **Achtergrondkaarten:** Het tonen van geografische informatie op een naar keuze instelbare achtergrond: Google maps, OpenStreetMap, Bing, Top10, of elke andere gewenste achtergrond.
- **NAW gegevens percelen:** Staan binnen alle applicaties die de teler wil gebruiken ter beschikking.
- **Percelen intekenen en inlezen:**
 - Beschikking geografische perceelinformatie overheid: Gewaspercelen vanaf 2009 tot heden zijn beschikbaar. Met de teler inlog bij de basisregistratie kan zijn hele bedrijf worden opgehaald.
 - Bedrijf management systemen (BMS): De geografische informatie uit CROP-R en CropView en Comwaes (Agrovision) kunnen worden ingelezen (xml bericht inlezen)
 - Percelen inlezen, intekenen, aanpassen: percelen kunnen handmatig worden ingetekend of ingelezen vanuit verschillende geografische formats: shape files, Google polygonen etc. en aangepast worden.
- **Teeltgegevens.** Kunnen worden opgehaald uit het Bedrijf Management systemen van de teler of indien nodig zelf worden toegevoegd.
- **Sensor data:** Tractor logs, data via .csv, .xlsx, .dbf, .dat, maar ook satelliet data (o.a. geotiff), kunnen worden ingelezen.
- **Bewerkingen:** Standard functionaliteit voor het bewerken van geografische informatie. Percelen aanpassen, splitsen, objecten toevoegen, omzetten van rasterbestanden en andere formats in visuele informatie.
- **Koppelingen:** Met externe Agro partijen, o.a. NAK, NAK AGRO, De Groene Vlieg, AgroXpertus en Alterra en NEO zijn web services ontwikkeld om gegevens op te halen.
- **Tactische informatie:** Bodemkaarten, actueel weer, 30 jaar weergemiddelde en weervoorspelling .
- **Opslag:** Data zijn en blijven eigendom van de teler en kunnen naar behoefte tijdelijk worden gebruikt of worden opgeslagen voor latere toepassing.
- **Output:** Generieke output is mogelijk. Als csv bestand, als pdf voor plaatjes, etc. De functionaliteit kan in elke applicatie worden gebruikt.
- **ISOBUS en shape:** taakkaarten kunnen zowel in ISOBUS als shape format worden aangemaakt.

Het Akkerweb platform biedt gratis aan:

- Account teler;
- Achtergrondkaarten;
- Basis APP's (Bouwplan, Satelliet, Kaartlagen, etc.);
- Teler kan informatie delen met derden;
- Gegevens ophalen en opslaan.

Akkerweb App's delen met elkaar:

- NAW gegevens;
- Percelen;
- Informatie betreffende de eigen kaartlaag.

Akkerweb is een open platform. Iedere organisatie kan instappen en mede eigenaar worden van het platform en mede de richting van de ontwikkeling bepalen. Er is geen winstoogmerk. Wel moet er betaald worden voor hosting en moeten commerciële APP's een beperkt percentage van de gemaakte winst afdragen om het platform kostenneutraal te kunnen beheren. Iedereen mag een APP ontwikkelen voor het Akkerweb platform die kunnen draaien op de eigen server of op de Akkerweb Amazon servers. Concurrentie mag, bedrog wordt niet getolereerd. Wageningen UR staat garant dat alleen wetenschappelijk onderbouwde kennis op Akkerweb komt te staan.

6 Haalbaarheid en advies

6.1 Haalbaarheid

Voor de implementatie van sensoren en modellen, als belangrijke bouwstenen, in een te ontwikkelen adviessysteem voor de melkveehouderij, is het uitgangspunt om te starten met oplossingen die de grootste impact hebben en die haalbaar zijn. Haalbaarheid is een lastig begrip, omdat hier pas inhoud aan kan worden gegeven wanneer de toetsingscriteria duidelijk zijn. De factor tijd speelt ook een grote rol; technieken die nu nog niet praktijkrijp zijn, zijn dit misschien over een aantal jaren wel. Als eerste stap in de verdere invulling van haalbaarheid zijn de volgende termijnen onderscheiden:

- Korte termijn (1-3 jaar): voldoet aan de vereiste criteria
- Middellange termijn (3-7 jaar): toepassing heeft nog onzekerheden, maar potenties worden gezien
- Lang termijn (> 7 jaar): toepassing is nog volledig onzeker, maar potenties worden gezien

Voor de geïnventariseerde sensoren is in Tabel 6.1 is met de kleuren groen, oranje en geel respectievelijk het ontwikkelingsperspectief aangegeven voor de korte, middellange en lange termijn.

Tabel 6.1

Ontwikkelingsperspectief korte termijn (groen), middellange termijn (oranje) en lange termijn (geel).

Type meting/sensor	Toelichting
<i>Bodemparameters</i>	
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Veris (combi ER, VIS-NIR, pH meting)
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Duaem (EM meting)
Bodemverdichting	Penetrologger
Bodemvocht	Zuigspanning of waterspanning
Grondwaterstand	Divers in peilbuis
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Natuurlijke gamma-straling meting
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)
Bodemvocht	Ground penetrating radar
<i>Gewasparameters</i>	
Gewashoogte	Grashoogtemeters
Gewashoogte	Ultrasoon, laser
Bovengrondse biomassa	Near sensing (optisch) diverse merken
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (optisch), diverse sat.
Bovengrondse biomassa	Hyperspectrale camera's
Opbrengstsenoren	Fysieke stroom van product
Gewas temperatuur, verdamping	Warmte uitstraling
Gewas stadium	remote sensing (optisch, radar, lidar)
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (radar)
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (lidar)
Onkruid	Beeldanalyse
Plantstress	Fluorescentie
Ziekten	Beeldanalyse
<i>Inhoudstoffen/Kwaliteit</i>	
Droge-stof gehalte in product	NIRS
Eiwit	NIRS
Inhoudstoffen gewas	NIRS
Inhoudstoffen mest	NIRS
<i>Klimaat</i>	
Buienradar en weerbericht	Neerslag, temperatuur, verwachting
Micro-klimaat	Weerstation met div. sensoren
<i>Beweiding</i>	
Accelerometer	Versnellingsopnemer aan poot of nek
Halster druksensor	Drukmeting, kauwgedrag
Halsband microfoon	geluidmeting, kauwgedrag

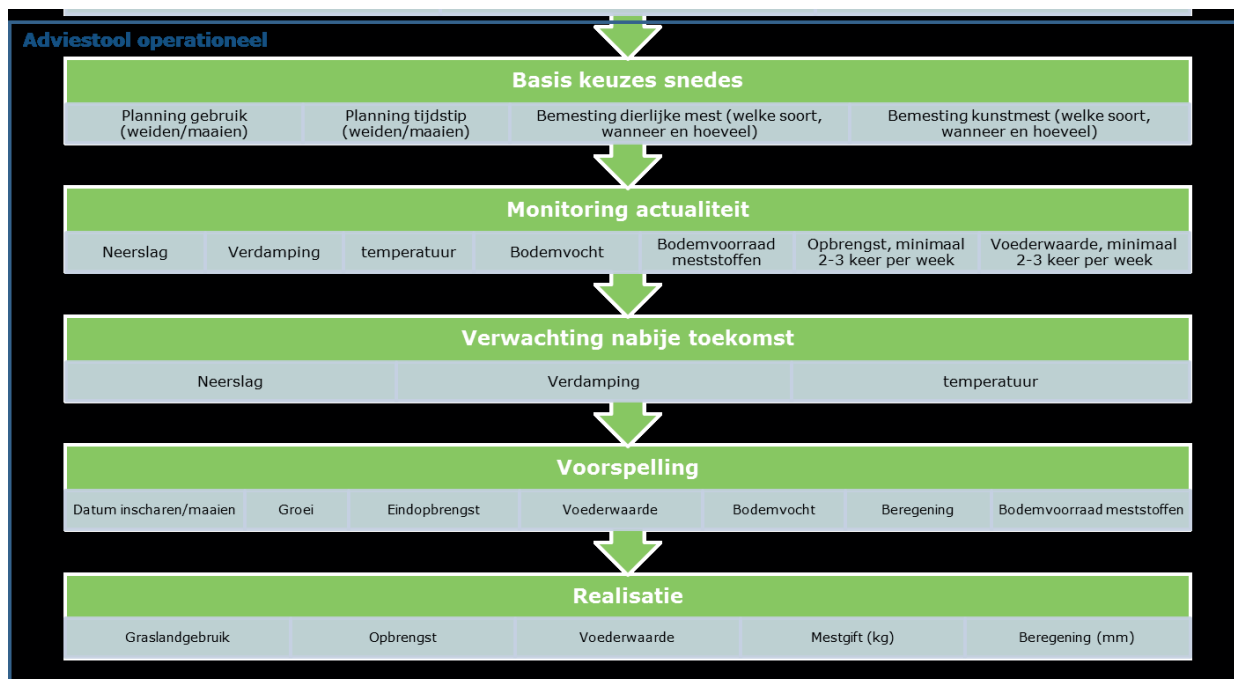
Het ontwikkelingsperspectief van modellen is niet uitgedrukt in termijnen, omdat de beschikbare technieken op het gebied van programmeren en data-ontsluiting hiervoor veel minder beperkend zijn (ze zijn aanwezig of niet). Markt en budget voor ontwikkeling bij nieuwe ideeën zijn hierbij vooral

leidend . Ook de beschikbaarheid van generieke data is bepalend. Modellen automatisch voorzien van invoer is een belangrijke stap in het operationaliseren van een adviessysteem, omdat het invoeren van data veel tijd kost en de kans op fouten zeer groot is. De invoer van data door gebruikers moet tot een minimum beperkt blijven omdat anders de animo voor het gebruik van een adviessysteem beperkt is. Dit bleek althans heel duidelijk tijdens de ontwikkeling van BeregeningsSignaal (2009-2013), waardoor voor dit programma is ingezet op een maximaal gebruik van generieke data.

Als tweede stap in de verdere invulling van haalbaarheid zijn de toetsingscriteria gehanteerd om per model of sensor te specificeren in hoeverre het bijdraagt aan het ontwikkelingsperspectief van de modules op de korte termijn. De toetsingscriteria zijn:

- a) de informatiebehoefte waarin het voorziet binnen de groei van een snede of teelt;
- b) de meerwaarde ten opzichte van niet of minder bruikbaar geachte modellen en sensoren;
- c) een voldoende betrouwbaarheid;
- d) de beschikbaarheid voor implementatie.

De informatiebehoefte in een adviestool, zoals die schematisch in Figuur 2.2 voor één grassnede staan vermeld, zijn (1) de basis keuzes, (2) monitoring actualiteit, (3) verwachting nabije toekomst, (4) voorspelling en (5) realisatie. Het operationele deel waarin het beoogde adviessysteem moet voorzien is teruggehaald in Figuur 6.1.



Figuur 6.1 Het beoogde adviessysteem uitgewerkt voor de productie van een snede gras, dat voorziet in data en adviezen op operationeel niveau. Gedurende de groei van een snede of teelt volgen verschillende informatiebehoefte elkaar op.

Voor de modellen en sensoren die op de korte termijn bruikbaar worden geacht staat in tabel 6.2 een specificatie van de toetsingscriteria. De modellen hebben voor wat betreft de informatiebehoefte vooral betrekking op basiskeuzes (1), monitoring actualiteit (2) en voorspelling (4). De sensoren voorzien vooral in het kunnen monitoren van de actualiteit (2). Meteogegevens (generieke data) zijn voor de verwachting van de nabije toekomst essentieel. Alleen het vaststellen van de opbrengst door de fysieke stroom van het product te meten draagt bij aan realisatie. Verder is managementregistratie essentieel in het vastleggen van hetgeen daadwerkelijk gerealiseerd is op het gebied van bemesting en berekening. Voor het vaststellen van de voederwaarde zijn nog geen accurate sensoren beschikbaar. De uiteindelijke samenstelling en voederwaarde bij eindoogst kan vooralsnog alleen nauwkeurig worden bepaald met laboratoriumanalyses achteraf.

Tabel 6.2

Toetsingscriteria voor modellen en sensoren die bruikbaar geacht worden op de korte termijn.

Modellen en sensoren	Informatiebehoefte	Meerwaarde (modellen beschrijvend en sensoren TRL ¹⁾)	Betrouwbaarheid (modellen beschrijvend en sensoren + en -)	Beschikbaarheid
Modellen				
Beregeningswijzer	Monitoring actualiteit. Voorspelling.	Robuust model voor bodemvocht. Bij gebruik van generieke data beperkte invoer door ondernemer.	Gevalideerd o.b.v. veldwaarnemingen. Wordt toegepast in BeregeningsSignaal.	Code niet openbaar, wel beschikbaar (WLR).
SEBAL - verdamping	Monitoring actualiteit.	Berekent verdamping op pixelbasis. Bij voldoende hoge resolutie perceelsspecifieke verdamping.	Gevalideerd o.b.v. veldwaarnemingen.	Code niet openbaar. Model is gepubliceerd. Output beschikbaar via Waterwatch.
MINIP/NDICEA, Century en RothC/VSD+	Basiskeuze snede/teelt. Monitoring actualiteit. Voorspelling.	Voorspelling N-mineralisatie is missing link in bemestingsadvies.	N-mineralisatie is beperkt gevalideerd. Voor C-mineralisatie zijn er wel uitgebreide validaties.	Openbare code en model beschikbaar via Alterra. Onderzoeksmoet nog worden vertaald in operationeel model.
Bemestingsadvies	Basiskeuze snede/teelt.	Onmisbaar bij opstellen van bemestingsplan.	Gebaseerd op veldexperimenten.	Advies is gepubliceerd. Model beschikbaar via WLR.
LINTUL	Monitoring actualiteit. Voorspelling.	Eenvoudig procesmodel dat gewasopbrengsten van eenjarige gewassen goed voorspelt.	Beperkte validatie.	Model is gepubliceerd. Model beschikbaar via PRI.
GRAS2007	Monitoring actualiteit. Voorspelling.	Robuust stochastisch model dat snedeopbrengsten goed voorspelt.	Genereert realistische opbrengsten. Grote validatieset.	Model moet nog gepubliceerd worden. Model beschikbaar via WLR.
Graslandgebruikswijzer	Voorspelling	Planningsmodule met op praktijk gebaseerde beslisregels.	Planningsmodule is uitgebreid beproefd binnen BBPR.	Model niet gepubliceerd. Model beschikbaar via WLR.
Sensoren				
Textuur - Veris / Dualem	Monitoring actualiteit.	8-9	+	commercieel beschikbaar
Bodemverdichting - Penetrologer	Monitoring actualiteit.	8-9	+	commercieel beschikbaar
Zuigspanning bodem	Monitoring actualiteit.	9	+	commercieel beschikbaar
Grondwaterstand	Monitoring actualiteit.	9	-/+	commercieel beschikbaar
Grashoogte	Monitoring actualiteit.	9	+	commercieel beschikbaar
Biomassa near sensing (optisch)	Monitoring actualiteit.	9	+	commercieel beschikbaar
Biomassa remote sensing (optisch)	Monitoring actualiteit.	8	-/+	commercieel beschikbaar
Biomassa-hyperspectraal	Monitoring actualiteit.	8	+	commercieel beschikbaar
Opbrengst - fysieke stroom product	Realisatie	6-9	-/+	commercieel beschikbaar
Gewastemperatuur	Monitoring actualiteit.	8-9	-/+	commercieel beschikbaar
Weerstation micro-klimaat	Monitoring actualiteit.	9	+	

De aangegeven modellen en sensoren zijn componenten om te implementeren in het beoogde adviessysteem. Zoals al aangegeven zijn ook het gebruik van generieke data en data vastlegging essentieel. Voor een nadere invulling van het perspectief op de korte termijn is in Tabel 6.3 per module aangegeven welke generieke data gewenst is, welke modellen en sensoren aan de gestelde criteria voldoen en in welke zin deze gebruikt worden (als input, voor berekening of validatie/kalibratie), van welke bepalingen gebruik wordt gemaakt en welke managementregistratie dient plaats te vinden. Uit tabel 6.3 blijkt dat de modules op zichzelf ook weer input zijn voor andere modules, successievelijk te beginnen bij de module Bodemvocht. De afhankelijkheid tussen de modules is per met kleuren weergegeven. Een nieuwe kleur geeft aan dat het gebruik van een component voor de betreffende module op zich zelf staat voor een basale berekening, dus zonder relatie met de andere modules.

Tabel 6.3

Componenten generieke data, modellen, sensoren, bepalingen en managementregistratie voor een adviessysteem zoals dat op de korte termijn te realiseren is. Met kleuren is de relatie tussen de modules aangegeven; successievelijk is van links naar rechts een module input voor een volgende module. Een nieuwe kleur geeft aan dat het gebruik van de component voor de betreffende module op zich zelf staat.

Componenten adviessysteem	Bodemvocht	Bemesting	Groei	Graslandgebruik	Nutriëntenbalans
Generieke data					
Bodemkaart	Input	Input	Input	Input	Input
Meteo					
- Neerslag	Input	Input	Input	Input	Input
- Verdamping	Input	Input	Input	Input	Input
- Temperatuur	Input	Input	Input	Input	Input
Modellen					
Beregeningswijzer	Berekening	Berekening	Berekening	Berekening	Berekening
SEBAL - verdamping	Input ¹⁾	Input	Input	Input	Input
MINIP/NDICEA, Century en RothC/VSD+		Berekening	Berekening	Berekening	Berekening
Bemestingsadvies		Berekening	Berekening	Berekening	Berekening
LINTUL			Berekening	Berekening	Berekening
GRAS2007			Berekening	Berekening	Berekening
Graslandgebruikswijzer				Berekening	Berekening
Sensoren					
Textuur - Veris / Dualem	Input	Input	Input	Input	Input
Bodemverdichting - Penetrologer	Input	Input	Input	Input	Input
Zuigspanning bodem - tensio en EC	Val./Kal. ²⁾	Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.
Grondwaterstand - divers	Input	Input	Input	Input	Input
Grashoogte (handmatig of ultrasoon)			Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.
Biomassa near sensing (optisch)			Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.
Biomassa remote sensing (optisch)			Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.
Biomassa-hyperspectraal			Val./Kal.	Val./Kal.	Val./Kal.
Opbrengst - fysieke stroom product		Input	Val.	Val.	Input
Gewastemperatuur - warmteuitstraling	Input	Input	Input	Input	Input
Weerstation micro-klimaat	Input	Input	Input	Input	Input
Bepalingen (laboratorium)					
Nutriënten, pH, OS		Input	Input	Input	Input
Samenstelling en voederwaarde gewas			Val.	Val.	Input
Managementregistratie					
Uitgevoerde bemesting		Input	Input	Input	Input
Uitgevoerd graslandgebruik		Input	Input	Input	Input
Actuele grasopbrengst		Input	Input	Input	Input
Actuele maïsoopbrengst					Input

¹⁾ Het betreft weliswaar een berekening, maar dient als verfijnde input voor verdamping (perceelsbasis)

²⁾ Validatie / Kalibratie

Voor de duidelijkheid is de afhankelijkheid tussen de modules weergegeven in Tabel 6.4.

Tabel 6.4

Modules zijn input voor de successievelijk aangegeven modules.

Componenten adviessysteem	Bodemvocht	Bemesting	Groei	Grasland-gebruik	Nutriënten-balans
Modules					
Bodemvocht		Input	Input	Input	Input
Bemesting			Input	Input	Input
Groei				Input	Input
Graslandgebruik					Input

Tot zover het ontwikkelingsperspectief voor de korte termijn. Hiermee kan een goede start gemaakt worden met de realisatie van een adviessysteem. In de volgende paragraaf (6.2) wordt geadviseerd hoe dit verder aan te pakken.

Om de horizon wat verder te leggen dan alleen de korte termijn is ook een doorkijk gegeven naar de middellange en lange termijn. Het betreft hier vooral de ontwikkelingen en perspectieven voor de sensoren. Voor de sensoren uit Tabel 6.1 die respectievelijk oranje of geel gearceerd zijn is het ontwikkelingsperspectief voor de middellange en lange termijn nader uitgewerkt in Tabel 6.5. Voor de middellange termijn betreft het de verdere technische ontwikkeling die nodig is voor implementatie, maar waarvan de meerwaarde voor een adviessysteem duidelijk is. Voor de lange termijn betreft het technische ontwikkelingen die potentie hebben, maar fundamenteel onderzoek vereisen. In het bijzonder wordt aanbevolen om sensoren die inhoudsstoffen en beweidingsparameters meten door te ontwikkelen.

Tabel 6.5

Sensoren die of verder ontwikkeld moet worden voor implementatie op de middellange termijn (oranje) of ontwikkelingsperspectief hebben op de lange termijn (geel), maar nader fundamenteel onderzoek behoeven.

Type meting / sensor	Toelichting	Te ontwikkelen / ontwikkelingsperspectief
<i>Bodemparameters</i>		
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Natuurlijke gamma-straling meting	Het kalibratiesysteem voor deze technologie dient verbeterd te worden
Textuur (o.a. lutum en o.s.)	Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)	Hier is onderzoek nodig om de gewenste modellen te ontwikkelen.
Bodemvocht	Ground penetrating radar	Het proof of principle is aangetoond, maar toepasbaarheid om de hoeveelheid bodemvocht in bouwvoor aan te tonen ontbreekt
<i>Gewasparameters</i>		
Gewasstadium	remote sensing (optisch, radar, lidar)	Hier is onderzoek nodig om de gewenste modellen te ontwikkelen.
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (radar)	Idem
Bovengrondse biomassa	Remote sensing (lidar)	Idem
Onkruid	Beeldanalyse	Prototypes tonen technische haalbaarheid aan, maar doorontwikkeling vision technologie en modellen nodig om economische toepassingen te realiseren.
Plantstress	Fluorescentie	Onderzoek aan vision technologie en modellen nodig om toepassingen te realiseren.
Ziekten	Beeldanalyse	Idem
<i>Inhoudsstoffen/Kwaliteit</i>		
Droge stofgehalte in product	NIRS	Het kalibratiesysteem voor deze technologie dient verbeterd te worden
Eiwit	NIRS	Idem
Inhoudsstoffen gewas	NIRS	Idem
Inhoudsstoffen mest	NIRS	Idem
<i>Beweiding</i>		
Accelerometer	Versnellingsopnemer aan poot of nek	Prototypes tonen technische haalbaarheid aan, maar doorontwikkeling modellen nodig om economische toepassingen te realiseren.
Halster druksensor	Drukmeting, kauwgedrag	Idem
Halsband microfoon	geluidmeting, kauwgedrag	Idem

De uiteenzetting van de ontwikkelingsperspectieven voor de drie termijnen is in tabel 6.6 samengevat per module. Daarbij is aangegeven wat realiseerbaar is op de korte termijn, wat nog ontwikkeld moet worden op de middellange termijn en wat ontwikkelingsperspectief heeft op de lange termijn.

Tabel 6.6

Samenvatting ontwikkelingsperspectieven per module per termijn.

Modules	Gras/maïs	Korte termijn 1-3 jaar Realiseerbaar	Middellange termijn 3-7 jaar Te ontwikkelen	Lange termijn > 7 jaar Ontwikkelingsperspectief
Bodemvocht	Gras/maïs	Wordt in basis toegepast in BeregeningsSignaal. Koppeling met sensoren bodemvocht (tensio) en meting grondwaterstand (divers). Uitbreiding model voor draagkracht.	Koppeling met remote sensing (NDVI). Verbeteren en uitbreiden relaties bodemvocht en draagkracht. Koppeling model grondwaterstands-verloop.	Koppeling met radar om vochtinhoud bovengrond te meten
Bemesting	Gras/maïs	Bemestingsadvies is reeds beschikbaar via bedrijfsmanagement tools. Deze koppelen aan data analyses. Optimalisatie meststoffengebruik en berekenen van organische stofbalans. Berekening van N-mineralisatie.	Koppeling data sensoren betreffende nutriënten drijfmest met NIRS.	Koppeling met data sensoren voor bepalen elementen in de bovengrond
Graslandgebruik	Gras	GraslandGebruiksWijzer (planning) koppelen aan bestaande bedrijfsmanagement tools.	Koppeling real time data weidegang (stappenteller)	Koppeling real time data daadwerkelijke grasopname koeien
Groei	Gras	Model Gras2007 is robuust en praktijkrijp. Koppeling maken met modules bodemvocht, bemesting en graslandgebruik. Koppeling met data (hoogtemetingen)	Koppeling met metingen remote sensing voor opbrengstmeting (NDVI)	Koppeling sensoren die voederwaarde bepalen (NIRS)
	Maïs	Groei-model voor maïs is beschikbaar. Koppeling maken met modules bodemvocht en bemesting	Koppeling met metingen remote sensing voor opbrengstmeting (NDVI)	Koppeling sensoren die voederwaarde bepalen (NIRS)
Nutriëntenbalans	Gras	Voor voorspelling gebruik maken van modules grasgroei, bemesting en graslandgebruik.	Voor gerealiseerde balans input sensoren meting hoeveelheid en inhoud (kunst)mestgift en eendoogst bij maaien	Koppeling real time data daadwerkelijke grasopname koeien
	Maïs	Voor voorspelling gebruik maken van modules maïsgroei en bemesting	Koppeling input sensoren meting hoeveelheid en inhoud (kunst)mestgift en eendoogst	

6.2 Advies

Algemeen

Het is duidelijk geworden (Tabel 6.6, is ook Tabel 1.1 in de samenvatting) dat een basis adviessysteem voor integrale toepassing van precisielandbouw als managementvorm bij de productie van ruwvoer in Nederland binnen drie jaar mogelijk is. Om de realisatie van het adviessysteem te bespoedigen, bevelen wij een tweesporenbeleid aan dat aangestuurd wordt vanuit overheden en bedrijfsleven. Het ene spoor is gericht op de integratie, implementatie en validatie van bestaande componenten van het systeem op voorbeeldbedrijven. Het andere spoor is gericht op verbreding van het systeem naar mogelijkheden die nu nog niet mogelijk zijn vanwege oplosbare technische beperkingen. Tevens geven we enkele aandachtspunten mee voor flankerend beleid.

Implementatie basis adviessysteem op de korte termijn (spoor 1)

Initieer een gecoördineerde ontwikkeling van een basis adviessysteem door thans beschikbare componenten te implementeren en te testen onder praktijkomstandigheden. Dit kan door in een aantal relevante regio's in Nederland (één bedrijf per regio, bijv. 4 regio's) de componenten van het adviessysteem softwarematig bij elkaar te brengen in een internetplatform, het gebruik ervan te monitoren gedurende ca. 2 groeiseizoenen, modules te valideren en zo nodig bij te stellen. In jaar 3 zou het systeem dan gedemonstreerd kunnen worden.

Voor het realiseren van het basis adviessysteem wordt geadviseerd om te starten met de vijf afzonderlijke modules (bodemvocht, bemesting, groei, graslandgebruik en nutriëntenbalans) waarbij de data van sensoren en modellen gekoppeld worden volgens de componenten die voor de korte termijn realistisch geacht worden. De modules moeten zelfstandig kunnen functioneren om ze ook voor andere toepassingen te kunnen gebruiken, om het geheel beter te kunnen begroten en overzichtelijk te houden en om het advies zo goed mogelijk aan te laten sluiten bij de eisen en wensen van de gebruikers. De definitie van een module zoals die in paragraaf 5.4 is geformuleerd is nogmaals als volgt: een computerprogramma dat diverse datastromen (sensoren, modellen en analyses) combineert, een interface heeft en antwoorden geeft die toegevoegde waarde hebben ten opzichte van hetgeen een veehouder weet of waarneemt met z'n huidige kennis of beschikbare hulpmiddelen.

De modules moeten zelfstandig kunnen functioneren, maar er is ook een duidelijke overlap in benodigde data. Zodoende zijn de modules op zichzelf ook weer input voor andere modules. Successievelijk is de afhankelijkheid van de modules als volgt: bodemvocht, bemesting, groei, graslandgebruik en nutriëntenbalans. Geadviseerd wordt om de modules in deze volgorde te realiseren voor een zo geavanceerd mogelijk resultaat.

Het op open source software gebaseerde internet-platform Akkerweb is geschikt om de modules van het adviessysteem toepasbaar te maken op bedrijfsniveau. Een belangrijke aandachtspunt bij realisatie is dat de interface naar de eindgebruikers voldoende moet aansluiten bij praktisch gebruik. Technisch gezien zijn hier geen beperking, wel vergt het specifieke aandacht bij de ontwikkeling en wordt dit bij voorkeur gedaan in overleg met een gebruikersgroep rondom de voorbeeldbedrijven.

R&D voor verbreding adviessysteem op de (middel)lange termijn (spoor 2)

Om het basis adviessysteem te kunnen verbreden na 3 jaar, is aanvullend onderzoek op enkele thema's nodig, om hiermee de gewenste sensortechnologie voor specifieke (kwaliteits-)data te ontwikkelen en integreren. Dit zal een verdere boost geven aan het gebruik van het adviessysteem in de praktijk en bijdragen aan beter bedrijfsresultaat en minder milieubelasting. Een aantal middellange termijn (3-7 jaar) ontwikkelvraagstukken kan met gerichte R&D-projecten zonder al te veel risico's gerealiseerd worden, daar deze berusten op concepten die elders al hun meerwaarde getoond hebben. Dit geldt met name voor sensoren die informatie geven over inhoudstoffen en nutriënten in gewassen, mest en bodems, en diergedrag. Ook wordt voorzien dat een verder verdieping van de modellen die in de modules gebruikt worden nodig. Voor de ontwikkelvraagstukken die op de lange termijn het adviessysteem nog verder versterkt of verbreed, is het advies om aansluiting te zoeken bij fundamentele onderzoeksprogramma's.

Aandachtspunten

Er zijn een aantal aandachtspunten die noemenswaardig zijn en zo mogelijk aanvullend beleid vereisen om het adviessysteem een succes te maken. Deze punten hebben te maken met een actief open data beleid (is ingezet door Nederlandse overheid), toegankelijkheid van het te gebruiken internet-platform voor alle aanbieders van data en diensten (kan met Akkerweb), borging van eigendom van data en privacy van de eigenaar (kan met Akkerweb, maar vergt ook sectorale en (inter)nationale aandacht), data-controlesystemen en -certificaten (standaardisatie, deels gerealiseerd; FAIR-data (Findable, Accessable, Interoperable, Reliable) is voorwaarde voor precisielandbouw), implementatie van het concept in onderwijs en opleiding (kan via lectoraten bij HBO scholen en CIV MBO scholen, denk ook aan helpdesk bij koepelorganisaties). Het is te overwegen om een stuurgroep op te richten die de implementatie van het adviessysteem coördineert en waakt over de aandachtspunten.

Voor de concrete uitwerking van de ontwikkeling, implementatie en validatie van het integrale adviessysteem op basis van dit haalbaarheidsonderzoek, adviseren wij een plan van aanpak op te stellen. Hierin moeten de organisatie, technische uitvoering en kosten inzichtelijk worden. Op basis daarvan kunnen potentiële opdrachtgevers een duidelijke keuze maken over kosten, baten en verwachte realisatie tijd. Daarmee kan een belangrijke bijdrage geleverd worden aan het droombeeld van de klankborggroep en andere potentiële eindgebruikers.

7 Conclusies

- Dankzij de beschikbaarheid en/of gebruik van nieuwe technologieën komt integrale toepassing van de precisielandbouw als managementvorm dichtbij. Op dit moment is de technologie niet beperkend om precisielandbouw op belangrijke teeltmaatregelen toe te passen. Het gaat nu om het bewerkstelligen van een effectieve integratie van sensordata, modellen, kengetallen en machines in belangrijke precisielandbouwtoepassingen en een integraal adviesstelsel voor de melkveehouderij;
- Het droombeeld van een integraal adviesstelsel is: 'Een operationeel adviesstelsel dat melkveehouders helpt om binnen gestelde bedrijfseconomische, milieu en maatschappelijke randvoorwaarden de ruwvoeropbrengst te maximaliseren en om de ruwvoer kwaliteit op minimaal perceelniveau te optimaliseren';
- Hierbij zijn volgens de klankbordgroep de volgende stappen essentieel: (1) van advies op bedrijfsniveau naar perceelniveau en pleksgewijs, (2) van advies op jaarbasis naar dagbasis, en (3) van metingen achteraf naar actuele en voorspellende metingen;
- Het te ontwikkelen adviesstelsel maakt van meerdere datastromen gebruik, zoals sensoren, modellen, bepalingen en generieke data (meteo, bodemkaarten ed.);
- De beschikbaarheid van sensoren die data over toestand van bodem (zoals organische stof, pH, lutum, bodemvocht), gewas (bovengrondse biomassa, stikstof in het gewas, fysieke opbrengst), dier en klimaat kunnen leveren, is niet beperkend voor het opzetten van het gewenste adviesstelsel;
- Sensortechnologie waarmee voederwaarde van geoogst product, nutriëntengehalten in vloeibare mest, belangrijke gewasstadia en biologische stress (ziekten, plagen, onkruiden) gemeten kan worden, is nu nog niet ver genoeg ontwikkeld voor gebruik in het adviesstelsel;
- De behoefte aan een onderdeel (module) voederwaarde en gewas kwaliteit is voor de klankbordgroep wel zeer gewenst, en wordt daarom opgenomen in het advies voor ontwikkeling van het adviesstelsel;
- De behoefte aan een onderdeel (module) beheersing biologische stress krijgt van de klankbordgroep minder prioriteit, en wordt daarom niet opgenomen in het advies voor de ontwikkeling van het adviesstelsel;
- Het aanbod aan modellen en modules is breed genoeg om te starten met een basis adviesmodule. Het gaat hier vooral om hydrologische, gewasgroei, nutriënten en bedrijfseconomische modellen;
- Een basis adviesstelsel voor precisielandbouw bestaande uit vijf modules volstaat om het droombeeld van de klankbordgroep te realiseren, en kan voor een groot deel gerealiseerd worden door een integrale koppeling van bestaande componenten. De modules zijn:
 - Bodemvocht
 - Bemesting
 - Groei
 - Graslandgebruik
 - Nutriëntenbalans
- Binnen 3 jaar kan een basis adviesstelsel gerealiseerd dat voor gras- en maïs, op basis van data over bodemvocht, nutriënten en groei, opbrengstvoorspellingen, bedrijfseconomische berekeningen en precisielandbouwadviezen geeft;

-
- Het adviessysteem kan op termijn verbeterd worden door toevoeging van sensortechnologie die data over de kwaliteit van geoogst product, gewasstadia, biologische stress, diergedrag in de wei (alleen voor weides met begrazing) en specifieke bodemeigenschappen leveren, maar hiervoor is verdiepend onderzoek nodig;
 - Aanbevolen wordt om in de eerste plaats een basis adviessysteem te ontwikkelen met de componenten die voor de korte termijn realiseerbaar zijn en om deze te testen onder praktijkomstandigheden;
 - Voor de middellange termijn (3-7 jaar) zou strategisch onderzoek opgezet kunnen worden om de gewenste sensortechnologie voor specifieke (kwaliteits-)data te ontwikkelen en integreren;
 - Voor de vraagstukken die met de lange termijn (> 7 jaar) te maken hebben, is het advies om aansluiting te zoeken bij fundamentele onderzoeksprogramma's.

Literatuur

- Adamchuk VI, Hummel JW, Morgan MT & Upadhyaya SK (2004) On-the-go soil sensors for precision agriculture. 44, 71-91.
- Bikker JP, Laar Hv, Rump P *et al.* (2014) Technical note: Evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity. *Journal of Dairy Science* 97, 2974-2979.
- Bikker, J.P., van Laar,H., Rump, P., Doorenbos, J., van Meurs, K., Griffioen, G.M. & Dijkstra, J. (2014) Technical note: Evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity. *Journal of Dairy Science*, Volume 97, Issue 5, May 2014, Pages 2974–2979.
- Boogaard H.L., A.J.W. De Wit, J.A. te Roller, C.A. Van Diepen (2011) WOFOST CONTROL CENTRE 1.8; User's guide for the WOFOST CONTROL CENTRE 1.8 and the crop growth simulation model WOFOST 7.1.3. Wageningen (Netherlands), Alterra, Wageningen University & Research Centre.
- Bouman B.A.M., van Keulen H., van Laar H.H., Rabbinge R. (1996) The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52:171-198. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X\(96\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/0308-521X(96)00011-X).
- Bruun, S., J. Luxhøi, J. Magid, A. de Neergaard, L. S. Jensen. 2006. A nitrogen mineralization model based on relationships for gross mineralization and immobilization, *Soil Biology & Biochemistry* 38, 2712–2721.
- Büscher W, Twickler P, Maack C, Marquering J & Müller M (2014) NIRS Sensor controlled total-mixed-ration for nutrient optimized feeding of dairy cattle. *Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture*. 20-23 July 2014, Sacramento, California, USA.
- Cécillon L, Barthès BG, Gomez C *et al.* (2009) Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science* 60, 770-784.
- Chardon, W.J., H.I.M. Heesmans en P.J. Kuikman, 2009. Trends in carbon stocks in Dutch soils: datasets and modeling results. Alterra, Wageningen, 43 pp.
- Coleman, K. en D.S. Jenkinson, 1996. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: D.S. Powlson, P. Smith en J.U. Smith (Eds). *Evaluation of Soil organic matter models, Using Existing Long-Term Datasets*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.
- Conijn J.G. (2005) CNGRAS : A dynamic simulation model for grassland management and C and N flows at field scale. Report Plant Research International 107, Wageningen.
- Conijn, J.G., Henstra P. (2003) Effecten van bemestingsstrategieën op grasopbrengsten en stikstofverliezen onder gemaaid grasland : een simulatiestudie. Report Plant Research International 66, Wageningen.
- Corwin DL & Lesch SM (2003) Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal* 95, 455-471.
- Corwin DL & Lesch SM (2005) Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 11-43.
- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk & 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. Technical document 45, DLO Winand Staring centre, Wageningen.
- de Mol, R.M, André, G., Bleumer, E.J.B., van der Werf, J.T.N., de Haas, Y. & van Reenen, C.G., 2014. Applicability of day-to-day variation in behavior for the automated detection of lameness in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, Volume 96, Issue 6, June 2013, Pages 3703–3712.
- De Willigen, P., B.H. Janssen, H.I.M. Heesmans, J.G. Conijn, G.L. Velthof en W.J. Chardon, 2008. Decomposition and accumulation of organic matter in soil; comparison of some models. Alterra-rapport : 1726. Alterra, Wageningen, 73 pp.
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny H. (1978) Simulation of field water use and crop yield Pudoc, Wageningen.

-
- Feddes R.A., Raats P.A.C. (2004) Parameterizing the soil–water–plant root system, in: R. A. Feddes, *et al.* (Eds.), *Unsaturated-zone Modeling: Progress, Challenges, Applications* Wageningen UR Frontis Series Wageningen. pp. 95-141.
- Feenstra J (2014) Nieuwe meetssystemen voor opbrengst en kwaliteit gras nog te duur of niet betrouwbaar genoeg. *Veeteelt. Gras Extra*. P 4-9
- GGP, 2000. *Graslandgebruiksplanner (GGP)*. Praktijkonderzoek Veehouderij, Handleiding GGP versie 2. Lelystad.
- Grasty RL, Glynn JE & Grant JA (1985) The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. *Geophysics* 50, 2611–2620.
- Hanegraaf M & Alebeek F (2014) Bodemleven en nutriëntenlevering. Powerpoint Presentatie <http://edepot.wur.nl/292713>.
- Haverkort A.J., Sandana P., Kalazich J. (2014) Yield Gaps and Ecological Footprints of Potato Production Systems in Chile. *Potato Research* 57:13-31. DOI: 10.1007/s11540-014-9250-8.
- HELP-tabel, 1987. De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige productie. Rapport van de werkgroep HELP-tabel. Mededelingen Landinrichtingsdienst 176, Utrecht.
- Heuvelink E & Kierkels T (2005) Stikstof: het belangrijkste voedingselement voor de plant. *Onder Glas*, 24- 25.
- Hoeks P, van Middelkoop JC, Philipsen AP *et al.* (2012) Bemestingsadvies. Animal Sciences Group, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, Lelystad.
- Holland KH (2014) Hand-held sensor for measuring crop reflectance and assessing crop biophysical characteristics. *Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture*. 20-23 July 2014, Sacramento, California, USA.
- Janssen, B.H., 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. *Plant Soil* 76, 297-304.
- Jayasuriya H, Al-Adawi S, Al Wardy M & Al Hinai K (2014) GIS mapping of soil compaction and moisture distribution for precision tillage and irrigation management. *Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture*. 20-23 July 2014, Sacramento, California, USA.
- Kempenaar C, Lotz LAP, Snel JFH, Smutny V & Zhang HJ (2011) Predicting herbicidal plant mortality with mobile photosynthesis meters. 51, 12-22.
- Kempenaar C, Weide RYvd, Been TH, Zande JCvd & Lotz LAP (2009) Precisielandbouw en gewasbescherming: kansen, witte vlekken en kennisvragen. *Plant research International, Nota 588*, Wageningen.
- Kierkels T & Heuvelink E (2005) Kalium, de grote regelneef bij tal van processen in de plant. *Onder Glas*, 12-13.
- Kroes J.G., Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Jacobs C.M.J. (2009) *SWAP version 3.2, Theory description and user manual*, Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- KWIN 2014-2015. Wageningen, Livestock Research van Wageningen-UR. *Handboek Kwantitatieve Informatie Veehouderij*.
- Leufen G, Noga G & Hunsche M (2014) Selection of fluorescence indices for the proximal sensing of single and multiple stresses in sugar beet. *Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture*. 20-23 July 2014, Sacramento, California, USA, 1-11.
- Li, C., S. Frolking en R.C. Harriss, 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem. Cycles* 8 (3), 237-254.
- Liski, J., T. Palosuo, M. Peltoniemi en R. Sievänen, 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecol. Model.* 189 (1-2), 168-182.
- Lund ED (2011) Proximal sensing of soil organic matter using the Veris OpticMapper. *The Second Global Workshop on Proximal Sensing-Montreal*, 76-79.

-
- Mandersloot F. & M. A. van der Meulen (1991) Simulatie van voeding en groei van jongvee. Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij. Lelystad, Publicatie. 71.
- Mandersloot F., (1989) Simulatie van voeding en groei van jongvee. Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij (PR). Lelystad, Rapport nr. 116.
- Mandersloot F., A.T.J. van Scheppingen, J.M.A. Nijssen (1991) Modellen rundveehouderij : overzicht en onderlinge samenhang modellen voor simulatie van melkveebedrijven. Proefstation voor de Rundveehouderij (PR) Lelystad, rapport 72, Lelystad.
- Medema P (2011) Snel grashoogte meten. *Veeteelt Techniek* Juli, 17.
- Monteith J.L. (1977) CLIMATE AND EFFICIENCY OF CROP PRODUCTION IN BRITAIN. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 281:277-294. DOI: 10.1098/rstb.1977.0140.
- Nabuurs, G.J., A. Pussinen, T. Karjalainen, M. Ehrhard en K. Kramer, 2002. Stemwood volume increment changes in European forests due to climate change; a simulation study with the EFISCEN model. *Glob. Change Biol.* 8 (4), 304-316.
- Nieuwenhuizen AT, Hofstee JW, Zande JCvd, Meuleman J & Henten EJv (2010) Classification of sugar beet and volunteer potato reflection spectra with a neural network and statistical discriminant analysis to select discriminative wavelengths. *Computers and Electronics in Agriculture* 73, 146-153.
- Nydegger, F., Gygax, L., & Wendelin, E. (2011) Automatic measurement of jaw movements in ruminants by means of a pressure sensor. *Agrarforschung*, 2. 60-65.
- Parton, W.J., 1996. The CENTURY model. In: D.S. Powlson, P. Smith en J.U. Smith (Eds). *Evaluation of soil organic matter models*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 283-291.
- Peteinatos GG, Weis M, Andújar D, Rueda Ayala V & Gerhards R (2014) Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection. 70, 190-199.
- Rommelink GJ, Blanken K, Middelkoop JCv, Ouweltjes W & Wemmenhove H (2013) *Handboek melkveehouderij 2013*(373. Wageningen UR Livestock Research [etc.], Lelystad.
- Ritzema HP, Heuvelink GBM, Heinen M *et al.* (2012) Meten en interpreteren van grondwaterstanden : analyse van methodieken en nauwkeurigheid(122. Alterra, Wageningen.
- Roberts DF, Adamchuk VI, Shanahan JF, Ferguson RB & Schepers JS (2011) Estimation of surface soil organic matter using a ground-based active sensor and aerial imagery. *Precision Agriculture* 12, 82-102.
- Ros GW & Bussink DW (2012) Ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen. Toepassingsmogelijkheden van gewassensoren in de Nederlandse precisielandbouw: een literatuurstudie Rapport 1454.N.11. Nutriënten Management Instituut NMI bv.
- Saey T, De Smedt P, De Clerq W *et al.* (2012) Identifying soil patterns at different spatial scales with a multi-receiver EMI sensor. *Soil Science Society of America Journal* 77, 382-390.
- Schans DAvd & Berg Wvd (2013) Testen, Validatie en Toepassing van het Veris-sensorplatform Veldanalyse van twee percelen op veenkoloniale grond(47. PPO-AGV, Lelystad.
- Schils R.L.M., M.H.A. de Haan, J.G.A. Hemmer, A. van den Pol-van Dasselaar, J.A. de Boer, A.G. Evers, G. Holshof, J.C. van Middelkoop, R.L.G. Zom (2007) DairyWise, A Whole-Farm Dairy Model. *Journal of Dairy Science*90 (11):5334 -5346.
- Schirmann, K., von Keyserlingk, M.A.G., Weary, D.M., Veira, D.M. & Heuwieser, W., 2009. Technical note: Validation of a system for monitoring rumination in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, Volume 92, Issue 12, December 2009, Pages 6052–6055.
- Schooten HAv, Philipsen AP & Groten JAM (2013) *Handboek snijmaïs*(196. Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- Schut AGT, Van Der Heijden GWAM, Hoving I *et al.* (2006) Imaging spectroscopy for on-farm measurement of grassland yield and quality. 98, 1318-1325.
- Serrano J, Shahidian S & Marques Da Silva J (2013) Comparing the DUALEM and VÉRIS sensors for mapping soil properties C3 - *Precision Agriculture 2013 - Papers Presented at the 9th European*

- Shibu M.E., Leffelaar P.A., van Keulen H., Aggarwal P.K. (2010) LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations: Application to rice. *European Journal Of Agronomy* 32:255-271. DOI: 10.1016/j.eja.2010.01.003.
- Sleutel, S., S. De Neve en G. Hofman, 2007. Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78 (3), 265-278.
- Sleutel, S., S. De Neve, D. Beheydt, C. Li en G. Hofman, 2006. Regional simulation of long-term organic carbon stock changes in cropland soils using the DNDC model: 1. Large-scale model validation against a spatially explicit data set. *Soil Use and Man.* 22 (4), 342-351.
- Spitters C.J.T. (1990) Crop growth models: their usefulness and limitations. *Acta Horticulturae* 267:349-368.
- Spitters C.J.T., Schapendonk A. (1990) EVALUATION OF BREEDING STRATEGIES FOR DROUGHT TOLERANCE IN POTATO BY MEANS OF CROP GROWTH SIMULATION. *Plant and Soil* 123:193-203. DOI: 10.1007/bf00011268.
- Swagemakers J (2012) Gewassensoren zijn kostenbesparend. *Akkermagazine*, 22-25.
- Terhoeven-Urselmans T, Schmidt H, Georg Joergensen R & Ludwig B (2008) Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. 40, 1178-1188.
- Trotter MG, Lamb DW, Donald GE & Schneider DA (2010) Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. *Crop and Pasture Science* 61, 389-398.
- Van der Kamp, A., J. de Boer, A. Evers, G. Holshof en R. Zom, 2003. Voederverzorging in BBPR. Lelystad, Animal Sciences Group. Intern rapport 496.
- Van Evert FK, Samsom J, Polder G *et al.* (2011) A robot to detect and control broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) in grassland. 28, 264-277.
- Van Evert FK, van der Voet P, van Valkengoed E, Kooistra L & Kempenaar C (2012) Satellite-based herbicide rate recommendation for potato haulm killing. *European Journal of Agronomy* 43, 49-57.
- Van Meirvenne M, Islam MM, De Smedt P *et al.* (2013) Key variables for the identification of soil management classes in the aeolian landscapes of north-west Europe. *Geoderma* 199, 99-105.
- Van Walsum P.E.V., Groenendijk P. (2008) Quasi Steady-State Simulation of the Unsaturated Zone in Groundwater Modeling of Lowland Regions. *Vadose Zone Journal* 7:769-781. DOI: 10.2136/vzj2007.0146.
- Vitharana UWA, Van Meirvenne M, Simpson D, Cockx L & De Baerdemaeker J (2008) Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143, 206-215.
- Vleeshouwers, L.M. en A. Verhagen, 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Glob. Change Biol.* 8 (6), 519-530.
- Werkgroep Normen voor de Voederverzorging, 1991. Normen voor de Voederverzorging. Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij. Lelystad, Publicatie nr. 71.
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers en A. Bolman, 2012. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Wageningen, Alterra. Alterra-rapport 2387.
- Yang, H.S. en B.H. Janssen, 2000. A mono-component model of carbon mineralization with a dynamic rate constant. *Eur. J. Soil Sci.* 51 (3), 517-529.
- Yule I, Grafton M, McVeagh P & Pullanagari R (2014) Exploiting the variability in pasture production on new Zealand hill country. Proceedings of the 12th International Conference on Precision Agriculture. 20-23 July 2014, Sacramento, California, USA.

Zom R.L.G, J.W. van Riel, G. André, G. van Duinkerken (2002) Voorspelling voeropname met Koemodel 2002. Praktijkonderzoek Veehouderij, Lelystad. PraktijkRapport Rundvee 11, Lelystad.

Zwart KB, Akker JJHvd, Bussink DW *et al.* (2011) Waterkwaliteit bij de wortel aangepakt(92. Alterra, Wageningen.

Zwart KB, Wolfs A, Kikkert A, Termorshuizen A & Burgt GJHMvd (2013) Tien vragen en antwoorden over organische stof(8. HLB, Wijster.

Bijlage 1 Visie, eisen en wensen

Gehanteerde definities;

Visie: mening over dit project en hoe dit dient aangepakt te worden

Eis: Dit onderdeel/onderwerp dient minimaal gerealiseerd te worden. Zonder dit onderdeel/onderwerp kan het model geen succes worden.

Wens: Een pluspunt als dit onderdeel/onderwerp gerealiseerd kan worden, is geen eis. Zonder dit onderdeel/onderwerp kan het model toch een succes worden.

Eisen en wensen, algemeen

			Visie	Eis	Wens
A1.	Technisch				
	a)	Een mogelijke oplossingsrichting voor dit project is de koppeling van satellietgegevens aan bestaande groei modellen voor gras en voor maïs op de opbrengsten met >95% betrouwbaarheid te kunnen voorspellen. Uit het haalbaarheidsonderzoek zal duidelijk moeten worden welke groei modellen beschikbaar zijn.	X	X	
	b1)	Een reeds bestaand groei model voor gras en voor maïs zal als basis voor de applicatie dienen. Dit groei model wordt gevoed met de satellietgegevens, op basis daarvan wordt een advies voor de melkveehouder gegenereerd. Inzichtelijk gemaakt zal moeten worden hoe dit technisch wordt vormgegeven. Kunnen de verschillende data en modellen gekoppeld worden, welke conversie dient er plaats te vinden, en hoe vindt de conversie plaats.	X		
	b2)	De outputgegevens kunnen gepresenteerd worden via de kringloopwijzer.			X
	b3)	Het model dient toepasbaar te zijn voor zowel bedrijf met als zonder beweiding.	X		
	c)	Het ontwikkelde model dient te kunnen functioneren zonder daarbij afhankelijk te zijn van andere modellen of modules, tenzij deze zonder voorwaarden beschikbaar zijn. Uitwisselbaarheid met kringloopwijzer kan zorgen voor snelle uitrol in de praktijk.		X	
	d)	De gegevens van het model dienen beschikbaar te zijn via een exportbestand. Dit kan bijvoorbeeld in isobusformat of .exc-bestand (kringloopwijzer).			X
	e)	Er dient een uitspraak gedaan te worden over de frequentie en praktische bruikbaarheid van satellietbeelden (zijn er vaak genoeg actuele beelden beschikbaar, hoe zit het met storende invloeden zoals bewolking). Of dient er een uitspraak gedaan te worden over een vervangende informatiebron om het doel te kunnen bereiken.	X		
	f)	Het model dient een 'advies op maat' te kunnen leveren. Beschrijving van de actie die de veehouder moet nemen. Rekening houden met type grondsoort.		X	
	g)	Koppeling met bodemanalyses om deze te kunnen gebruiken als benchmark voor bijvoorbeeld NLV, pH en OS%.	X		
	h)	De bodemtoestand vóór zaaien is sterk bepalend voor de acties die de veehouder uitvoert. Eenmaal gezaaid heeft een veehouder weinig handvaten om nog te sturen bij met name snijmaïs.	X		
A2.	Klimaat en voorspellend vermogen				
	a)	De weersverwachting dient geïntegreerd te zijn in het model.	X	X	
		- Moment van maaien/beweiden afstemmen op feiten en weersverwachting. (Er is twijfel over de betrouwbaarheid van weersvoorspellingen)		X	
		- Droogperiode van gras afstemmen op gewenste voederkwaliteit en weersomstandigheden (eis)			X
		- Bemesting koppelen aan de vochtvoorziening/weersverwachtingen		X	

			Visie	Eis	Wens
	b)	Het draagvlak van de ondergrond meenemen in de overweging voor het juiste oogstmoment (is dit relevant / voegt dit iets toe voor de veehouder?). Draagkracht grond inzichtelijk.	X	X	X
		- Koppelen aan weersomstandigheden (neerslag, temperatuur en zonuren)		X	
		- Koppelen aan weersverwachtingen		X	
		- Koppelen aan bodemsoort		X	
	c)	Voorspellingen over marktontwikkelingen en voorraden			
		- Marktvoorspellingen voederprijzen maïs en gras	X		
		- Veehouder moet minimaal 4 tot 5 maanden voervoorraadbuffer hebben om in te spelen op marktfluctuaties	X		
A3. Mineralenbalans					
	a)	Optimalisatie van N- en P-benutting	X	X	
	b1)	Inzicht geven in de verdeling van mineralen op bedrijfsniveau (N en P, onderscheid tussen dierlijke en kunstmest).			X
	b2)	Inzicht in wat de koe produceert. Plaats specifieke drijfmestbemesting			X
	b3)	Inzicht geven in de eiwitteelt (% x DS) in Nederland en aansturen op verhoging.	X		
	c)	Inzicht geven in de verdeling van voederopbrengsten op perceelsniveau (kVEM, eiwit (N), fosfor (P) en (wens: Kali (K))) --> mineralen, spoorelementen en aminozuren		X	X
	d)	Inzicht geven in de mineralenbenutting door bemesting te koppelen aan de opbrengsten. Koppeling leggen tussen A3.b1 en A3.c			X
	e)	Digitale kaarten ontwikkelen die bovenstaande weergeven.		X	
	f)	Loonwerkers hebben een unieke kans om in de winter bemestingsplannen uit te werken en te adviseren. Lange termijn binding met de bedrijven.	X		
A4. Bewustwording & Imago					
	a)	De boeren dienen zich bewust te worden van grasland- en maïsmanagement. Wordt al versterkt middels de kringloopwijzer. Link met de kringloopwijzer leggen, maar hier niet direct aan koppelen 'kringloopwijzer wordt een verplichting'.	X		X
		- Kosten en batenoverzicht op perceelsniveau: zie punt Input/Output (€, nutriënten, motivatie)		X	
		- Aanhaken op verduurzaming van de sector (maximale output uit minimale input): koppeling met kringloopwijzer essentieel! Bij wet geregeld via BEX, BEP en BEN.		X	
	b)	Resultaten uit het model moeten leiden tot direct toepasbaar advies voor veehouders	X	X	
		- Toevoegen aan bestaande (management) programma's en/of internet applicaties. Koppelen aan kringloopwijzer.			X
	c)	Van belang is dat er een stimulans wordt gegeven aan de ontwikkeling van precisielandbouw. Meer data, is meer mogelijkheden.	X		X
	d)	Vaststellen van KPI's (key performance indicators) voor analyse en opname in kringloopwijzer.		X	
	e)	Gemiddelde melkveehouder kan de voerteelt verder professionaliseren.	X		
		- Akkerbouw als voorbeeldfunctie benutten (specialist + kennisbank)		X	
		- Traditionele sector en opheffen van bedrijfsblindheid			X
		- 'Ja maar....' houding ombuigen in 'Ja en....' De veehouder prikkelen en keuzes laten maken.		X	
	f)	Communicatie en PR		X	
		- Gebruik maken van gebruikservaringen van veehouders uit de 'middenmoot'. Veehouders moeten zich herkennen in de communicatie. Veehouder aan het woord		X	

			Visie	Eis	Wens
		- Beschrijven van concrete acties op high-tech gebied die een veehouder kan toepassen en daarbij het te behalen resultaat benoemen.		X	
		- Verschillende casussen (m.n. op basis van grondsoort) beschrijven en koppelen aan rendement voor de veehouder.		X	
		- Loonwerker dient hier een rol in te pakken. Investeringsen zullen vaak door hen gedaan worden: key-innovator in het geheel.		X	
A5. Gebruiksvriendelijkheid					
	a)	Dient een eenvoudig toe te passen model zijn (dient gebruikt te kunnen worden door >75% van de melkveehouders). 25% Zelfstandig gebruik door de veehouder en 75% met behulp van een adviseur.	X	X	
	b)	De betrouwbaarheid dient groot te zijn	X	X	
	c)	De informatie uit het model dient duidelijk te zijn	X	X	
	d)	Er dient een concreet advies gegeven te worden voor de ondernemer	X	X	
	e)	Het model dient aan te sluiten bij bestaande informatiebronnen	X	X	
	f)	Er dient een duidelijke scheiding te zijn tussen het grasmodel en het maïsmodel.	X	X	
		- Bij gras onderscheid maken tussen beweiding en maaien/oogsten			X
	g)	Het model dient beschikbaar te zijn via een smartphone en/of tablet computer (zowel Apple als Android)	X		X
	h)	Bemestingsruimte verdienen door aantoonbare hoge mineralenefficiëntie via BEX, BEN en BEP.		X	

Eisen en wensen, maïs

M1. Gewasttoestand en informatie					
	a)	Het model dient de volgende parameters te kunnen genereren voor maïs (betrouwbaarheid >95%):	X	X	
		- Opbrengst snijmaïs in ton/ha (in september en oktober >1 x per week)		X	
		- Droge stof percentage snijmaïs (>2 x per week)		X	
		- Zetmeelgehalte snijmaïs (>2 x per week)		X	
		- Eiwitgehalte snijmaïs (>2 x per week)		X	
		- VEM-waarde snijmaïs (>2 x per week)		X	
		- Indicatie fosfortoestand gewas (>2 keer per week)		X	
		- Perceelsoppervlakte (ha)		X	
		- Watervoorziening via grondwater (per hectare)			X
		- Genereren van een opbrengstkaart per perceel		X	
	b)	Bij maïs het bepalen van de gewasstadia gedurende het groeiseizoen:	X	X	
		- (verwachte) pluim- en kolfzetting			X
		- Bepalen van het juiste oogstmoment		X	
		- Voederwaardeverloop voorspellen voor de komende drie weken (zetmeel, VEM, eiwit). Met name relevant voor bedrijven met veel maïs (zandgronden)			X
		- Opbrengstverloop voorspellen voor de komende drie weken (kg DS)			X
		- t.b.v het oogstmoment opbrengsten afwegen tegen voederwaarde (kg DS, zetmeel, VEM). Mestplaatsingsruimte verdienen.	X	X	
M2. Input/Output (€, nutriënten, motivatie)					
	a)	Het model dient concrete adviezen en tips te geven voor bemesting. Bodemtoestand voorafgaand aan zaaien plaatsspecifiek verbeteren ter voorkoming van symptoombestrijding nadien.	X	X	X
		- Rekening houden met bodemtemperatuur		X	
		- Rekening houden met temperatuursom		X	
		- Rekening houden met bodemsoort (klei vs. Zand)		X	
		- Rekening houden met regio (weersinvloeden)		X	
		- kg N-organisch Bemestingsadvies		X	
		- kg N-mineraal Bemestingsadvies		X	

	-	kg P Bemestingsadvies		X	
	-	Totaal bemestingsadvies (N, P, K en spoorelementen)		X	
	-	Adviesing voor basisbemesting (vooraf) en bladbemesting (groeiperiode)		X	

Eisen en wensen, gras

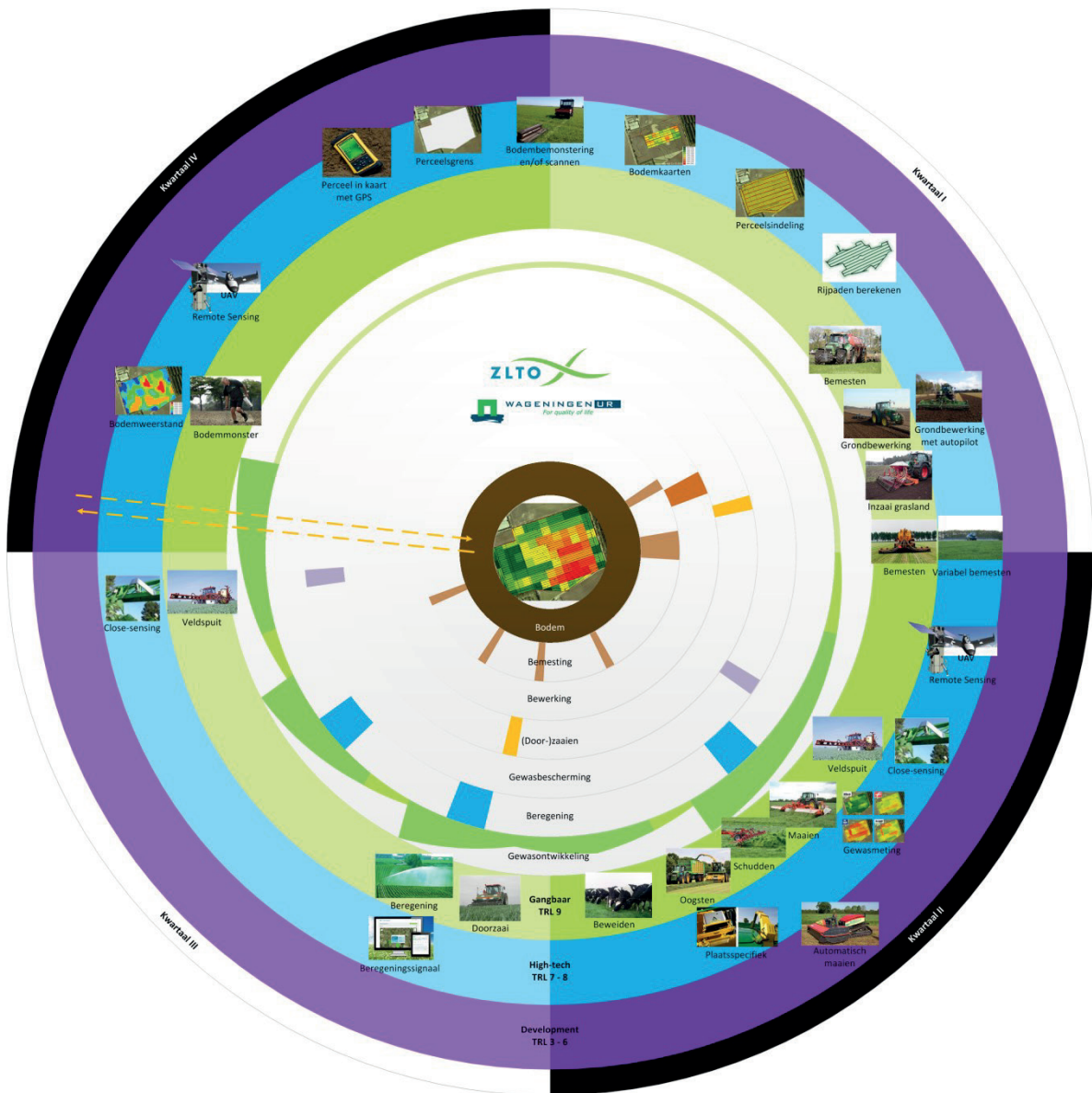
G1. Gewastoeestand en informatie					
	a)	Het model dient de volgende parameters te kunnen genereren voor gras bij beweiding (betrouwbaarheid >95%):	X	X	
		- VEM- en eiwitproductie uit stikstof meststof (kg) = Groei-efficiëntie. Rekening houden met verdunningseffect eiwit bij toename kg DS/ha			X
		- Opbrengst gras in ton/perceel of hectare(dagelijks)		X	
		- Droge stof percentage gras op stand (dagelijks)		X	
		- Suikergehalte gras op stand (dagelijks)		X	
		- Fosforgehalte gras op stand (dagelijks)		X	
		- Eiwitgehalte gras op stand (dagelijks)		X	
		- VEM-waarde gras op stand (dagelijks)		X	
		- Grasopname in kg product per koppel (dagelijks)		X	
		- Grasopnamebehoefte in kg product per koppel (dagelijks)		X	
		- Grasopname-efficiëntie (grasopname/grasbehoefte)		X	
		- Grasaandeel in % van de totaal aanwezige gewassen		X	
		- Fluctuatie in grasgroei door het seizoen heen (groeicyclus gras i.c.m. weersomstandigheden)			X
		- Aandeel klaver qua verdeling in de percelen (met name van belang voor N-levering later in het seizoen)			X
		- Perceelsoppervlakte (xx.xx.xx)		X	
	b)	Het model dient de volgende parameters te kunnen genereren voor gras bij maaien (betrouwbaarheid >95%):	X	X	
		- VEM- en eiwitproductie uit meststoffen (kg N en P) (Groe-efficiëntie)			X
		- Opbrengst gras in ton/perceel of hectare tijdens (beoogd) oogstmoment		X	
		- Droge stof percentage gras op stand (dagelijks)		X	
		- Suikergehalte gras op stand (dagelijks)		X	
		- Fosforgehalte gras op stand (dagelijks)		X	
		- Eiwitgehalte gras op stand (dagelijks) --> Amino-zuren		X	X
		- VEM-waarde gras op stand (dagelijks)		X	
		- Droge stof percentage gras tijdens (beoogd) oogstmoment		X	
		- Suikergehalte gras tijdens (beoogd) oogstmoment		X	
		- Eiwitgehalte gras tijdens (beoogd) oogstmoment		X	
		- VEM-waarde gras tijdens (beoogd) oogstmoment		X	
		- Grasaandeel in % van de totaal aanwezige gewassen		X	
		- Perceelsoppervlakte (xx.xx.xx)		X	
	c)	Het model moet in staat zijn om het juiste in- en uitschaarmoment te bepalen (weidemanagement):	X	X	
		- Bepalen van het juiste uitschaarmoment van het huidige perceel (minimaal dagelijks)		X	
		- Bepalen van het volgende in te scharen perceel (dagelijks bepalen van beste optie)		X	
		- Bepalen van het juiste inschaarmoment van het volgende perceel		X	
		- Automatisch genereren van een beweidingsschema --> advies			X
		- Kosten en baten afwegen tussen het huidige perceel en het volgende perceel (dagelijks o.b.v. voederwaarden)			X
		- Perceelsoppervlakte en productie totale koppel daarin meenemen (dagelijks)			X
	d)	Het model moet kunnen voorspellen wat de opbrengsten zijn bij het (beoogde) maai en oogstmoment:	X	X	

		- Bepalen van de gewastoestand, maai- en oogstmoment en weersvoorspellingen		X	
		- Voorspellen van verschil in voederwaarden tussen 's ochtends en 's avonds maaien en oogsten		X	
	e)	Toepassen van precisiebeweiding op basis van de grassamenstelling	X	X	
		- Beweiding aan laten sluiten op de behoefte van de koe		X	
		- Onderscheid kunnen maken op basis van productie (hoog productief, laag productief en droogstaand)			X
	f)	Verbeteren van logistiek tijdens bewerkings- en oogstmomenten	X		
		- Inzicht bij de loonwerkers welke high-tech technieken beschikbaar zijn			X
		- Capaciteit van de wagen aanpassen op de verwachte opbrengsten en het dragend vermogen van de grond			X
G2. Input/Output (€, nutriënten, motivatie)					
	a)	Geef een inschatting van het rendement voor de melkveehouder door deelname/gebruikmaking van het model.		X	
		- Wat zijn de extra opbrengsten (€)		X	
		- Wat zijn de gedeerde opbrengsten (€)		X	
		- Wat zijn de extra kosten (€)		X	
		- Wat zijn de gedeerde kosten (€)		X	
	b)	Door het model dient een analyse gemaakt te worden over te verwachten input (nutriënten) en de output (voeder)		X	
		- Jaarlijks vaststellen van nutriënteninput (BEX,BEP en BEN moeten simpel gekoppeld kunnen worden aan model). Bemestingsruimte te verdienen door de veehouder!		X	
		- Jaarlijks vaststellen van nutriëntenoutput (op basis van gewastoestand en informatie zie punt Gewastoestand en informatie)		X	
	c)	Het toepassen van gerichte en pleksgewijze bemesting op basis van feitelijke informatie.	X	X	
		- bemesting op basis van opbrengst resultaten uit het voorgaande jaren (incourante plaatsen niet bemesten en courante plaatsen juist extra).		X	
		- BEP en BEN gebruiken voor bemestingsefficiëntie op bedrijfsniveau (3-jarig gemiddelde).		X	
		- onderscheid maken in dierlijke (vaste en drijfmest), kunstmestvervangers, kunstmest en stikstofleverend vermogen (NLV) --> bemestingsadvies op basis van beschikbare mestsoorten (dierlijke mest, kunstmestvervangers en kunstmest)			X
	d)	Bemestingadvies voor meerdere snede's			X
		- bemestingsschema automatisch opstellen voor N, P en K		X	
		- bemestingsschema automatisch bijstellen voor N, P en K op basis van gewasgroei		X	
		- Mogelijkheid voor pleksgewijze bemesting voor N, P en K			X
		- onderscheid maken in N, P en K uit dierlijke (vaste en drijfmest), kunstmestvervangers en kunstmest. N ook meenemen op basis van depositie, stikstofbinders en stikstofleverendvermogen van de percelen.			X

Bijlage 2 Teeltkalenders blijvend grasland en snijmaïs

GrasMaïs Signaal

Teeltkalender Gras (continue)



GrasMaïs Signaal

Teeltkalender Snijmaïs



Bijlage 3 Bodemfactoren

Aan een bodem kan je een groot aantal eigenschappen meten. Tezamen bepalen deze eigenschappen voor een groot deel de gewasopbrengst van een perceel.

Textuur

Textuur beïnvloedt de vochttoestand van de bodem en het vermogen om voedingsstoffen vast te houden, kortom een indicator voor de bodemvruchtbaarheid. Daarnaast geeft textuur een indicatie voor de bewerkbaarheid en slempegevoeligheid van de grond. Onder bodemtextuur worden de minerale bestanddelen van de bodem kleiner dan 2 mm verstaan. Er zijn grofweg drie textuurklassen: klei (<2µm), silt (2-50µm) en zand (>50µm en < 2mm).¹

Bodemverdichting

Bodemverdichting van landbouwgronden wordt voornamelijk veroorzaakt door het berijden van te natte grond (in het voorjaar) en het gebruik van zware landbouwmachines. Bij bodemverdichting neemt het poriënvolume in de grond af (Jayasuriya *et al.*, 2014; Zwart *et al.*, 2011) wat de stroming van lucht en water bemoeilijkt. Uiteindelijk worden de zuurstofniveaus in de bodem (te) laag. Bodemverdichting heeft effect op de water- en nutriëntenhuishouding, gewasontwikkeling, bodemleven, beworteling, ziektedruk en gewasopbrengst (Zwart *et al.*, 2011). Een uitgebreide beschrijving van de problematiek rondom bodemverdichting kan gevonden worden in (Zwart *et al.*, 2011).

Organische stof

Organisch stof (OS) heeft een positief effect op de bodemvruchtbaarheid van de grond. Het speelt een belangrijke rol in de nutriëntenlevering, vochtthuishouding en de bodemstructuur (Zwart *et al.*, 2013). Organische stof beïnvloedt door binding de activiteit van bodemherbiciden. Via plantenresten en dierlijke mest wordt organisch materiaal aan de bodem toegevoegd. Daar wordt het uiteindelijk door micro-organismen in de bodem, zoals schimmels en bacteriën, omgezet in onverteerbare resten, oftewel stabiel organisch stof dan wel humus genoemd (Zwart *et al.*, 2013).

pH

De pH of zuurgraad van de bodem heeft effect op de groei van planten, waarbij ieder gewas zijn eigen optimum heeft. Daarnaast heeft de pH effect op de beschikbaarheid van nutriënten en het bodemleven. Voor kleigrond is de pH ook van belang voor de bodemstructuur (Hoeks *et al.*, 2012).

Nutriënten

We beperken ons hier tot de hoofd elementen N, P en K.

Stikstof (N) is een essentieel element voor planten doordat het als bouwstof in eiwitten, enzymen, DNA, etc. aanwezig is. Stikstof wordt opgenomen uit de bodem als nitraat of als ammonium. Opname van het negatief geladen nitraat is actief en zorgt tevens voor opname van de positief geladen Ca, K en Mg ionen. Het positief geladen ammonium wordt passief opgenomen door de plant en zorgt niet voor de opname van Ca, Mg en K (Heuvelink & Kierkels, 2005).

Fosfor (P), wordt als fosfaat (PO₄⁻) opgenomen door de plant. Dit element speelt een rol bij de fotosynthese en ademhaling van de plant en het is van groot belang voor de vorming van eiwitten zoals het DNA van de plant. Fosfaat is veelal gebonden aanwezig in de bodem en slecht beschikbaar voor de plant. Verhoging van de pH d.m.v. bekalken kan helpen om een deel van het vastgelegde fosfaat vrij te krijgen. http://databank.groenkennisnet.nl/granen_fosfaat.htm

Kalium (K) is het derde hoofdelement in de plantenvoeding. Als osmoticum zorgt het K⁺ ion ervoor dat de cellen onder voldoende spanning staan. Dit is van belang voor de verdamping en de fotosynthese. Ook speelt kalium een rol bij het transport. De plant neemt stikstof en fosfor op als

¹ Een eerder, nu niet meer gebruikt begrip is het afslibbaarheidspercentage van de grond: Afslibbaar% = klei% + 0,3*silt% (Bron: http://blgg.agroxpertus.nl/wiki/textuurklassen_geraadpleegd_op_9_juli_2014)

negatief geladen ionen (nitraat, fosfaat). Het positief geladen K⁺ compenseert hiervoor. Daarnaast is kalium is als cofactor betrokken bij vele enzymreacties in de plant (Kierkels & Heuvelink, 2005).

Gras & stikstof Gedurende het seizoen kan de stikstofgift aan de gewasbehoefte worden aangepast om een goede droge stof opbrengst en evenwichtig verloop van het ruw eiwit gehalte te waarborgen. Basale rekenregels hiervoor zijn bijvoorbeeld te vinden op de volgende site:

<http://www.bemestingsadvies.nl/bemestingsadvies.html>. Door te bepalen hoeveel biomassa er aanwezig is kan een nauwkeurigere schatting gemaakt worden van de hoeveelheid N die met de opbrengst van het perceel verdwijnt. Voor sensoren die biomassa meten: zie paragraaf 1.2

Gras & fosfaat Fosfaatbemesting is niet alleen noodzakelijk voor een goede opbrengst maar ook om te zorgen dat melkkoeien voldoende fosfor opnemen (Hoeks *et al.*, 2012). De hoeveelheid fosfaat bemesting wordt afgeleid uit de hoeveelheid fosfaat in gras (uitgedrukt in g P per kg droge stof) en de hoeveelheid P in de bodem. Beiden zullen dus door de sensoren moeten worden bepaald.

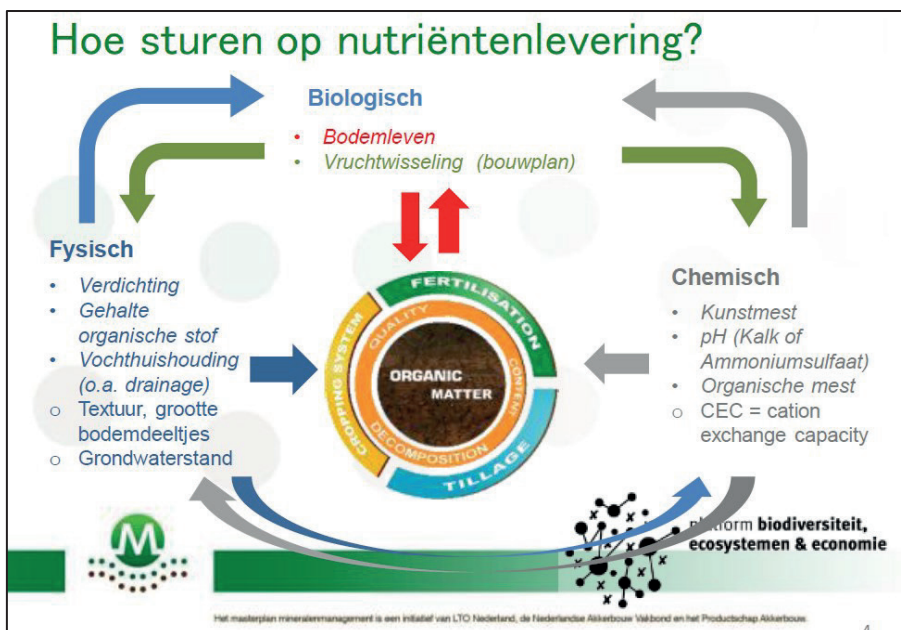
Gras & Kalium Net als voor de andere nutriënten wordt ook bij kalium zowel de toestand in de bodem als in het gewas meegenomen bij de bepaling van de grootte van de gift.

Maïs & stikstof Bij het zaaien van maïs wordt met stikstof bemest (meestal met dierlijke mest). Daarnaast kan afhankelijk van de omstandigheden nog een tweede gift worden toegediend voor het 6 blad stadium. Bij een lage N_{min} kan dit nodig zijn (koud voorjaar) (Schooten *et al.*, 2013).

Maïs & fosfaat Een goed wortelstelsel is van belang voor de goede opname van fosfaat, en dat hangt weer mede samen met de structuur van de bodem. Op kopakkers waar de structuur van de bodem slechter is, zal de beworteling minder zijn en de fosfaatopname minder goed. Maïs is gevoelig voor fosfaat gebrek. Bijvoorbeeld in het voorjaar als de bodem een lagere temperatuur heeft wordt fosfaat opname bemoeilijkt en kleurt het jonge maïs gewas rood (bron: http://databank.groenkennisnet.nl/maïs_fosfaat.htm). Fosfaat gebrek zorgt voor een lagere opbrengst en een vertraagde groei en afrijping van het gewas.

Bodemleven

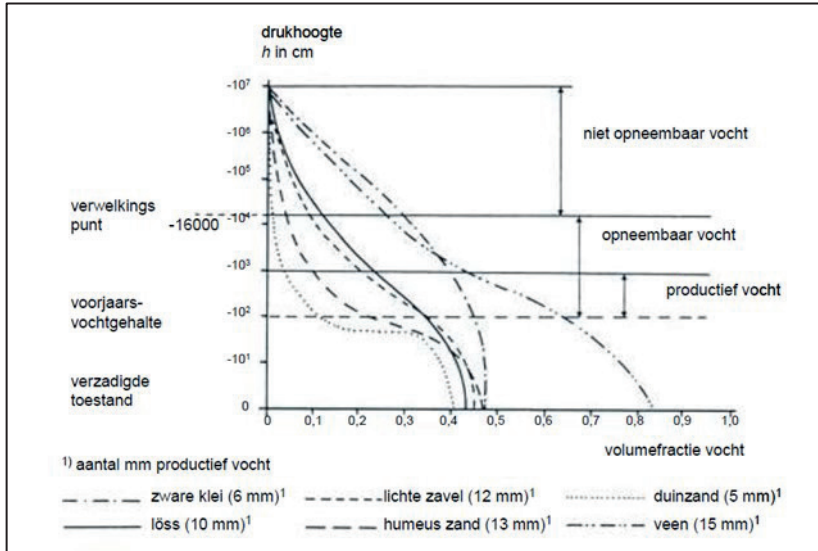
Het bodemleven omvat alle organismen die zich in de bodem bevinden. Het is een complex systeem van bacteriën, schimmels, regenwormen, springstaarten en veel andere groepen. De geschatte hoeveelheid bodemleven in een hectare bouwland is wel 4 tot 5 ton (Bron: groen kennisnet). Het bodem(eco)systeem beïnvloedt processen zoals de mineralisatie die van belang zijn voor de goed groei van het gewas (Figuur B1). Organisch stof is van groot belang voor het goed functioneren van het bodemleven.



Figuur B1 Schematische weergave van processen in een bodem-ecosysteem (Hanegraaf & Alebeek, 2014).

Bodemvocht

De hoeveelheid vocht in de bodem heeft een groot effect op de groei van een gewas. Bodemvocht is de hoeveelheid vocht in de bodem in de verzadigde zone. Deze wordt vaak uitgedrukt als volumefractie: het volume aandeel water in relatie tot het totale bodemvolume (m^3 water per m^3 grond) (Remmelink *et al.*, 2013). De energietoestand van het water in de bodem wordt uitgedrukt in drukhoogte h (in cm of m). Deze waarde is een maat voor de uitdrogingstoestand van de bodem en geeft de beschikbaarheid van bodemvocht voor het gewas weer (Remmelink *et al.*, 2013).



Figuur B2 Vochtkarakteristieken van monsters van zes verschillende grondsoorten (Remmelink *et al.*, 2013).

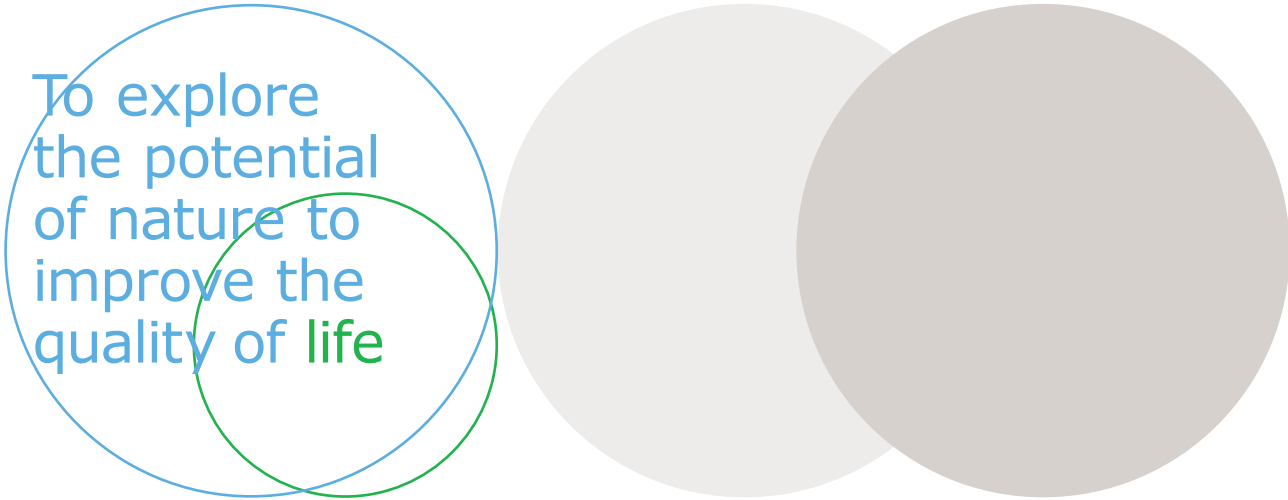
De vochtkarakteristiek van een bodem laat de relatie tussen de drukhoogte en de volumefractie vocht in de bodem zien. Hieruit kan worden afgeleid hoeveel vocht er beschikbaar is voor de plant (Figuur B2). Optimale groei vindt plaats tussen -100 en -300 cm drukhoogte. De relatie tussen bodemvocht en drukhoogte is grondsoort specifiek. Naast het beschikbare vocht in de bewortelde zone, draagt ook het beschikbare vocht uit het grondwater en de capillaire nalevering tussen de onderkant van de bewortelbare zone en de grondwaterspiegel bij aan de opneembare bodemvochtvoorraad (Remmelink *et al.*, 2013).

Grondwaterstanden en slootpeilen

Grondwater is "al het water dat zich onder het bodemoppervlak in de verzadigde zone bevindt en dat in direct contact met bodem of ondergrond staat" (p. 19 Ritzema *et al.*, 2012). De grondwaterstand is van belang voor het goed hydrologisch functioneren van het perceel en daarmee voor de gewasgroei. Voor de landbouw wordt het grondwaterpeil relatief laag gehouden. Voor iedere combinatie van grondsoort en gewas is er een bepaalde norm. Daarnaast is een laag peil gewenst voor het begaanbaar zijn van het perceel. Daar tegenover staat dat te laag peil leidt tot verdroging. Er zijn verschillende manieren om de grondwaterstand te meten zoals grondwaterstandbuizen, piëzometers, open boorgaten en veldschattingen (Ritzema *et al.*, 2012).

Bijlage 4 Overzicht informatiebehoefte, tools en sensoren

Managementniveau	Informatie	Tijdstip / seizoen	Eisen & wensen	Tools	Sensoren
Strategisch Bedrijfsopzet - melkproductie per ha - beweidingssysteem (wel of geen weidegang) - arealen gras / maïs / overig - continuïteit of vruchtwisseling - huisvesting / mestopslag / mestverwerking - arbeid en technologie - verkaveling en toegang - bodem / hydrologie	Voorspellend Voorspellend - financiële opbrengst - mest/mineralen - zelfvoorziening ruwvoer - hoeveelheden gras/maïs - uren weidegang	Niet seizoen gebonden Jaarbasis	Vergelijken bedrijfsvarianten Inzichtelijk maken verschillen veranderde bedrijfsopzet per perceel met weergave exacte oppervlakte	Computermodellen BBPR Waterpas Veenwijzer digitale bodemkaarten	Totalen op bedrijf
Tactisch Teelt - raskeuze hoofdgewas - gewaskeuze en doel vanggewas - bodem en hydrologie - graslandvernieuwing Bemesting - operationeel bemestingsplan - type bemester en wel of geen precisie - wel of geen rijenbemesting maïs Beregening - installatie - instellingen (sector, norzelgrootte) Beweiding - bijvoedingsniveau - mate van omweiden - mate van ruwvoerwinning Nutriënten en koolstof kringloop op bedrijfsniveau - gewasopbrengst - voederwaarde en inhoudstoffen - efficiënties nutriënten Nutriënten en koolstof kringloop op perceelsniveau - gewasopbrengst - voederwaarde en inhoudstoffen - efficiënties nutriënten	Voorspellend/analyserend Voorspellend - opbrengst en kwaliteit - persitentie Voorspellend - beschikbaarheid mest - verdeling mest Voorspellend - inzet capaciteit - kostprijs en saldo Voorspellend - opname kg ds/dag - kosten ruwvoerwinning Analyserend - kengetallen productie - kengetallen benutting N/P - emissies Analyserend - kengetallen productie - kengetallen benutting N/P - emissies	Winterhalfjaar Januari - maart Januari - maart Januari - maart Januari - maart December - maart December - maart	Geavanceerde instructie Informatie per perceel Informatie per perceel Informatie per perceel Informatie per perceel Informatie op bedrijfsniveau Informatie per perceel	Handleidingen en computermodellen Rassenlijst Herinzaaiwijzer Instructie WLR/NMI www.bemestingsadvies.nl Economisch criterium Beregenen op maat (ECBOM) Beweidingswijzer Kringloopwijzer Kringloopwijzer	Voorraad/capaciteit - weerstation - pelbuizen - doorstroommeter
Operationeel Zaaien - waar en wanneer Gewasbescherming - waar, wanneer en hoeveel Onkruidbestrijding - waar, wanneer en hoeveel Bemesting - waar, wanneer en hoeveel Beregening - waar, wanneer en hoeveel Draagkracht - waar en wanneer voor weiden en berijden Gewasopbrengst en -kwaliteit - dagelijkse planning beweiding - verwachte grasopbrengst/-voederwaarde bij maaien - verwachte maïsoopbrengst/-voederwaarde bij oogst - planning oogtmoment maïs - daadwerkelijke gewasopbrengst	Voorspellend/analyserend Voorspellend - bekwaamheid bodem Analyserend - gewasstadium en aantasting Analyserend - herkenning onkruiden Voorspellend - bodemvoorraad - mest voorraad Voorspellend - beschikbaar bodemvocht Voorspellend - mate van draagkracht Voorspellend/analyserend - voorspelling grasaanbod - grasopbrengst maïsoopbrengst Voorspellend - maïsoopbrengst Analyserend	Zomerhalfjaar dagbasis voorjaar dagbasis dagbasis snedebasis (gras) jaarbasis (maïs) dagbasis (mei-sept) dagbasis dagbasis dagbasis dagbasis (juli-sept) dagbasis (sept-okt) snede of eindoogst	'Advies op maat', inzicht productie en inhoud - Advies per dag op basis van bodem en weer - Advies per dag op basis van aantasting en weer - Herkenning onkruiden en mate van bezetting - Advies per dag op basis van bodem en weer - Voorraadbeheer - Advies per dag op basis van bodem en weer - Advies per dag op basis van bodem en weer - Koppeling satellietbeelden en voorspelling - Groei en kwaliteit per dag op basis van bodem en weer - Groei en kwaliteit bij eindoogst op basis van bodem en weer - Herkennen gewasstadia - Inzicht opbrengsten/elwitproductie per perceel	Tools met voorspellend karakter op perceelsniveau www.bemestingsadvies.nl BeregeningsSignaal Graslandkalender, Feedwedge, Vers weidegras dashboard Groenmonitor	Meting actuele toestand - Meting bodemvocht - Grashoogtemeter - Handspectrometer - Flowmeter - Remote sensing



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life

Wageningen UR Livestock Research
Postbus 338
6700 AH Wageningen
T 0317 480 10 77
E info.livestockresearch@wur.nl
www.wageningenUR.nl/livestockresearch

Livestock Research Rapport 842



Wageningen UR Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
