

# Sensoren en gewasmodellen voor precisielandbouw

Literatuuronderzoek DISAC deelproject E-pieper

Corné Kempenaar, Chris van Dijk, Fenny van Egmond, Franck Goldbach, Gerrit Polder, Annette Pronk



---

# Sensoren en gewasmodellen voor precisielandbouw

Literatuuronderzoek DISAC deelproject E-pieper

Corné Kempenaar, Chris van Dijk, Fenny van Egmond, Franck Goldbach, Gerrit Polder, Annette Pronk  
Met support van Leon van Hamersveld en Hans van Rheenen (Firma Eijkelkamp)

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, januari 2018

---

Rapport WPR-758

---

Kempenaar, Corné, Chris van Dijk, Fenny van Egmond, Franck Goldbach, Gerrit Polder, Annette Pronk, 2018. *Sensoren en gewasmodellen voor precisielandbouw; Literatuuronderzoek DISAC deelproject E-pieper*. Wageningen Research, Rapport WPR-758. 46 blz.; 17 fig.; 5 tab.; 51 ref.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/498321>.

Trefwoorden: precisielandbouw, ICT, sensoren, gewasmodellen

  2018 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Agrosystems, Postbus 16, 6700 AA Wageningen; T 0317 48 07 00; [www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research)

KvK: 09098104 te Arnhem  
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-758

Foto omslag: Taakkaart variabel doseren loofdoodmiddel

---

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Bodemsensoren</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding	11
2.2	Vlakdekkende metingen	11
2.2.1	Electromagnetische geleidbaarheid (EMI)	12
2.2.2	Natuurlijke radioactiviteit (gamma straling)	12
2.2.3	VIS-NIR-MIR reflectie systemen (licht reflectie)	13
2.2.4	Grondradar (GPR)	14
2.2.5	XRF Röntgen Diffractie Fluorescentie	15
2.2.6	Overigen	16
2.3	Puntmetingen	16
2.3.1	Time Domain Reflectance (TDR)	16
2.3.2	EC meting bodemvocht	17
2.3.3	Tensiometer	18
2.3.4	pH	18
2.3.5	Verdichting	18
2.3.6	Nutriënten	18
<b>3</b>	<b>Gewassensoren</b>	<b>19</b>
3.1	Inleiding	19
3.2	Bovengrondse biomassa	20
3.2.1	VIS en NIR Reflectie	20
3.2.2	Nearby of proximal sensing	21
3.2.3	Remote sensing	22
3.3	Bovengrondse biomassa (gras)	22
3.3.1	Lichtonderbreking	22
3.3.2	Ultrasoon (akoestisch)	23
3.4	Abiotische stress/Leaf stress	24
3.4.1	Infraroodthermografie	24
3.5	Droge stof en Inhoudsstoffen	24
3.6	Nearby detectiesystemen van onkruiden, ziekten en plagen	25
3.6.1	Onkruiddetectie en bestrijding	25
3.6.2	Ziekten en plagen herkenning	26
<b>4</b>	<b>Klimaatsensoren</b>	<b>28</b>
4.1	Meteorologische data openbare platforms	28
<b>5</b>	<b>Oogstsenoren</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Overige sensoren</b>	<b>32</b>
6.1	Radio-frequency identification (RFID)	32
6.2	Biosensoren	32

---

<b>7</b>	<b>Gewasmodellen</b>	<b>33</b>
7.1	Modellen	33
7.2	Basisstructuur voor modelberekeningen	34
7.3	Modellen voor de berekening van potentiële groei en opbrengst	34
7.3.1	Potentiele groei- en opbrengst	34
7.3.2	Beschikbare modellen voor potentiële groei en opbrengstvoorspellingen	35
7.4	Modellen voor de berekening van reducerende factoren	35
7.4.1	Reductiefactoren	35
7.4.2	De reductiefactor voor water	36
7.4.3	De reductiefactor voor stikstof	36
7.4.4	De reductiefactoren voor ziekten en plagen	37
7.5	Informatiebehoefte modellen	37
7.6	Toepassing van groei en opbrengst voorspellende modellen	37
7.6.1	De vraag naar specifieke parameters	37
7.6.2	Perceelniveau	37
7.6.3	Invoer actuele gegevens in berekeningen	38
7.7	Afwegingen en modelkeuze	38
7.7.1	Groei- en opbrengst voorspellende modellen	38
7.7.2	Modellen voor de berekening van reducerende factoren	38
<b>8</b>	<b>Conclusies</b>	<b>40</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>43</b>

---

# Samenvatting

Het 'Data Intensive Smart Agrifood Chains' (DISAC) programma is een 4-jarig publiek-privaat R&D programma (2016-2019) gericht op het verbeteren van de economische en ecologische duurzaamheid van belangrijke Nederlandse agri-food ketens door introductie van innovatieve technologieën (sensoren, analytics en IT) uit het HTSM domein. De focus ligt op de aardappel productieketens en ruwvoerproductie (gras) voor de zuivel sector. Het project kent drie deelprojecten: N-sensing (gras productie), E-pieper (aardappel) en Connectivity (IT infrastructuur).

De doelstelling van het E-pieper project is aantonen dat o.b.v. sensor-data en gewasgroeimodellen adviezen en inzichten kunnen worden gegenereerd op het gebied van kwaliteitsmonitoring, sturing in de aardappelteelt en bij inschuring die zinvol zijn voor telers. Ofwel 'laten zien dat het werkt' en het creëren van draagvlak bij telers en adviseurs. De werking moet worden aangetoond op verschillende voorbeeldbedrijven. Daarvoor moeten keuzes worden gemaakt welke sensordata en gewasgroei-modellen nodig zijn en aan welke minimale voorwaarden de voorbeeldbedrijven moeten voldoen. Onderstaand voorstel zal worden voorgelegd aan het Steering Committee van het E-pieper deelproject die hierover een beslissing zal nemen.

## *Sensoren*

Voor het meten van de bodemparameters wordt geadviseerd gebruik gemaakt van sensorsystemen die zich in de praktijk hebben bewezen (o.a. Veris scan, YARA N-sensor, Eijkelpamp). Ter validatie en als backup wordt aanbevolen de parameters ook te bepalen door middel van laboratorium analyses van grondmonsters. Additioneel zijn twee prototype sensoren toegevoegd voor bepaling van bodemnutriënten en microbiële activiteit. De nutriënten sensor wordt ontwikkeld binnen het DISAC N-sensing deelproject. De bovengrondse biomassa en het stikstof gehalte zijn belangrijke parameters om de gewasontwikkeling gedurende het seizoen te kunnen volgen en te sturen. De gewasontwikkeling kan elke 10 dagen in beeld worden gebracht met behulp van een Bioscope-biomassakaart. Ter validatie is het aan te bevelen op verschillende momenten gedurende het groeiseizoen het N-gehalte in het gewas te bepalen d.m.v. laboratorium bepalingen ('bladsteeltjes-methode'). Gezien de doelstelling van het project 'laten zien dat het werkt' wordt voorgesteld bestaande adviesmodules te gebruiken voor het adviseren van de telers m.b.t. toepassing van bodemherbiciden, Phytophthora bestrijding, loofdoding en N-bijbemesting (geen ontwikkeling nieuwe modules). Voor het genereren van adviezen is het van belang dat er naast een lokale weervoorspelling ook een aantal meteorologische parameters op perceelsniveau worden gemeten. Hiervoor zijn diverse systemen (weerstations) beschikbaar. Opbrengstkaarten worden waar mogelijk met behulp van de oogstmachines gemaakt. Specifieke knolparameters worden batchgewijs voor inschuring met behulp van lijnscanners en een 3D model bepaald (Shape from Silhouette principle). Aanvullend worden enkele parameters als schildikte en suikergehalte 'handmatig' bepaald. Tabel 1 geeft een overzicht van de parameters die op de betreffende percelen van de voorbeeldbedrijven minimaal verzameld zouden moeten worden en de sensorsystemen die daarvoor het meest geschikt zijn.

## *Modellen*

Voor de meeste Nederlandse akkerbouwgewassen zijn de modelparameters voor potentiële groei en opbrengst bekend. Dit pleit ervoor om voor een model te kiezen dat is gebaseerd op de conversie van onderschepte straling of licht in droge stof (RUE of LUE) en rekening houdt met suboptimale omstandigheden (water en stikstof gelimiteerd). Geadviseerd wordt om hiervoor het Tipstar model te gebruiken. Hiermee kan voor het betreffende gewas een representatieve groei en opbrengstvoorspelling worden berekend.

## *Voorwaarden voorbeeldbedrijven*

Om aan de projectdoelstellingen te kunnen voldoen zijn enkele minimale voorwaarden geformuleerd waaraan voorbeeldbedrijven met betrekking tot PL-technieken aan zouden moeten voldoen. Deze hebben met name betrekking op (sensor)data, beslisregels, IT-infrastructuur en mechanisatie.

Deze zijn:

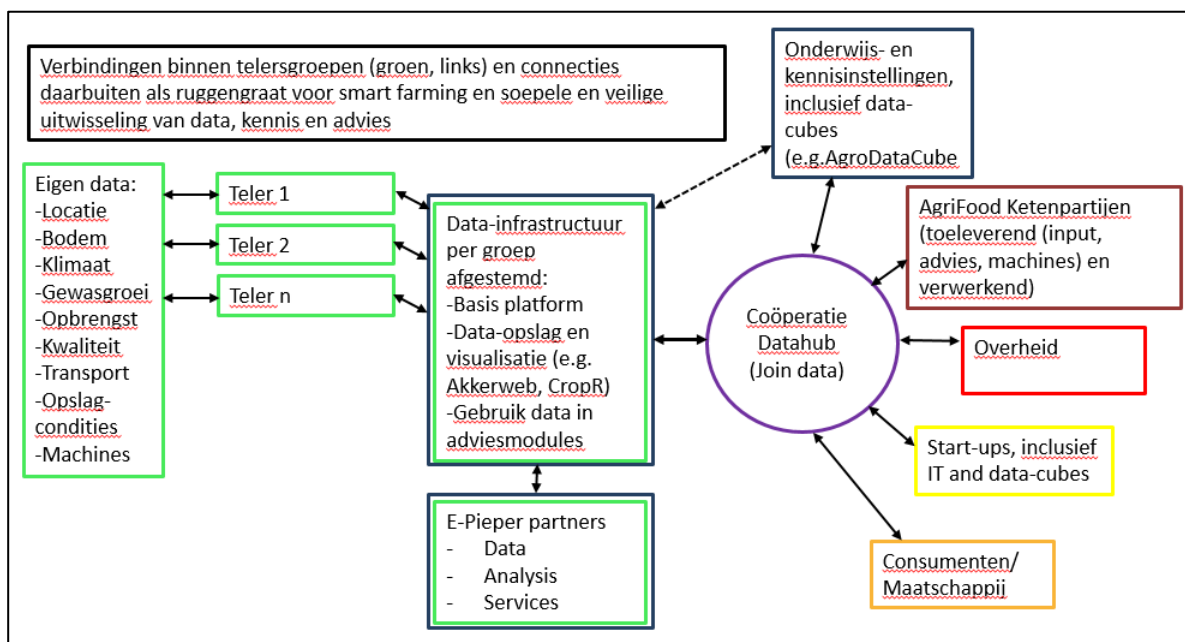
- Affiniteit met PL-technologie ('early adopters') en bereid zijn hier 2 a 3 jaar aan mee te werken.
- Het hebben van een digitaal teeltregistratiesysteem (FMIS).
- Het hebben van een nauwkeurig GPS-systeem en machinesturing (RTK).
- Het hebben/kunnen werken met een datamanagement-platform (zoals Akkerweb, Crop-R, 365 Farmnet, FarmWorks of gelijkwaardig). Toegang hebben tot open data via o.a. de platforms.
- Het hebben of laten maken van bodem- en gewaskaarten die variatie binnen percelen in kaart brengen. De PL-technieken hiervoor zijn beschikbaar en betaalbaar. Het hebben van opbrengstkaarten is een pré.
- Toegang hebben tot adviesmodules horend bij PL-toepassingen in webservices (voor de geprioriteerde PL-toepassingen zijn adviesmodules beschikbaar, kan via datamanagement platforms).
- Het kunnen inzetten van machines die variabel kunnen doseren van de PL-toepassingen. Het betreft hier m.n. planters, strooiers, spuiten en oogstmachines.
- Tolsma-Grisnich bewaarstechniek.
- Voldoende connectiviteit op het bedrijf (internet, uitwisseling taakkaarten tussen computer en machines).

#### Data infrastructuur

Naast het onderzoek naar de beschikbaarheid van sensoren en modellen zoals beschreven in dit rapport heeft TNO onderzoek gedaan welke data-architectuur, -infrastructuur en -analytics het beste toegepast kunnen worden in een E-Pieper systeem. Omdat de beoogde data-infrastructuur door verschillende stakeholders/(eind)gebruikers gebruikt moet kunnen worden, zal er een IT-architectuur op hoofdlijnen worden opgezet voor verwerking van alle ruimtelijke en temporele data die tijdens de teelt (in het gewas, onder en bovengronds), bij opslag en transport, tot aan de verwerking beschikbaar komen.

De infrastructuur is bedoeld voor onderzoek, analyse en modelontwikkeling door zowel de industriële als kennispartners en voor operationele inzet van visualisatie middelen en modellen ter ondersteuning van de beoogde gebruikers zoals telers, teeltadviseurs, opslag, aardappelverwerkende bedrijven, etc.

Voor een succesvolle introductie van smart farming technieken op de verschillende pilot-bedrijven is een soepele en veilige uitwisseling van data, kennis en advies belangrijk. Hiervoor worden verbindingen gelegd binnen telersgroepen en connecties gemaakt met de partijen daarbuiten. Een schematische weergave van deze informatiestromen is weergegeven in Figuur 1.



**Figuur 1** Schematische weergave van verbindingen tussen telersgroepen (groen, links) en de connecties daarbuiten.



**Tabel 1** Overzicht van de parameters die op de betreffende percelen van de pilot-bedrijven minimaal verzameld zouden moeten worden en de sensorsystemen die daarvoor het meest geschikt worden geacht.

Bodemparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Geleidbaarheid (EC)	perceelsscan	Veris MSP3, Dualem EM38	
	puntmeting		Eijkelkamp; On-line
Lutum-gehalte	perceelsscan	Veris MSP3, Dualem EM38	
Organische stof	perceelsscan	Veris MSP3, Dualem EM38	
pH	perceelsscan	Veris MSP3, Dualem EM38	
Bodemvocht	Puntmeting	diverse	Schokbelasting; CO2
	Puntmeting		Eijkelkamp
Bodemtemperatuur	Puntmeting	diverse	Schokbelasting; CO2
	Puntmeting		Eijkelkamp
Lutum-gehalte; organische stof; pH	Puntmeting (grondmonster)	Lab-bepaling	
NPK	puntmeting		Eurofins, Eijkelkamp
Nutriënten	puntmeting	prototype	DISAC N-sensing deelproject
Bodemactiviteit	puntmeting	prototype	Eijkelkamp; Microbiële activiteit
Gewasparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Biomassa	perceelsscan	Bioscope	Elke 10 dagen biomassa kaart beschikbaar
N status	puntmeting	Lab-bepaling	Bladsteeltjes-methode
Gewasgroei	modelmatig	Tipstar gewasgroeimodel	water en N gelimiteerd, geschikt voor de betreffende locatie; weervoorspelling en bodemvocht parameters
Toepassing bodemherbiciden; Phytophthora bestrijding; loofdoding; N-bijbemesting	Advies-modellen	webservices	
Klimaatparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Temperatuur	Puntmeting	weerstation	
RV	Puntmeting	weerstation	
Neerslag	Puntmeting	weerstation	
Windsnelheid	Puntmeting	weerstation	
Windrichting	Puntmeting	weerstation	
Straling	Puntmeting	weerstation	
Lokale weersvoorspelling		webservices	
Oogstparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Opbrengst	perceelsscan	Load-cell	opbrengstkaarten via oogstmachines
Knolmaat	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks
Knolvolume	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks
Onderwatergewicht	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks i.c.m. weegsensor
Schildikte	Per knol	handmatig	Batchgewijs
Suikergehalte	Per knol	Lab-bepaling	Batchgewijs

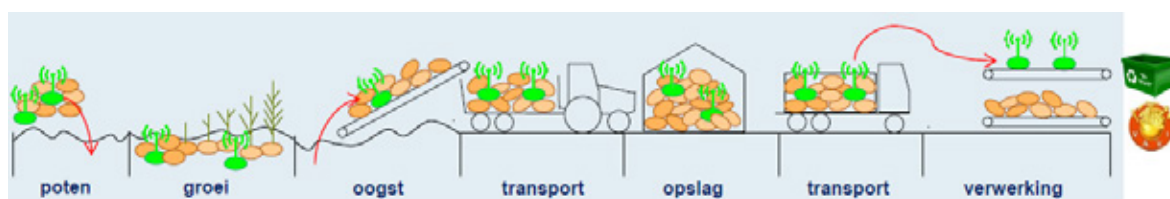


# 1 Inleiding

De agrarische sector staat voor de uitdaging meer te produceren en meer te verduurzamen, dat wil zeggen meer opbrengst per hectare realiseren met minder input en milieubelasting ('meer met minder'). De gedachte is dat nieuwe technologieën zoals GPS, sensortechnologie, ICT en robotisering een belangrijke rol kunnen spelen om de transitie naar productie en kwaliteitsverhoging met minder milieubelasting te realiseren. De meerwaarde ligt op het vlak van besparingen op input (arbeid, energie, water, meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen), hogere opbrengsten door maatwerk, minder kans op emissies naar het milieu en residuen in het gewas en meer gemak en kwaliteit bij de uitvoering van teeltmaatregelen. De toepassing van sensortechnologie in de agrarische sector is volop in ontwikkeling en vormen een belangrijk onderdeel in de transitie naar precisielandbouw, een vorm van landbouw, waarbij planten (of dieren) heel nauwkeurig die behandeling krijgen die ze nodig hebben.

In 2017 is gestart met het 'Data Intensive Smart Agrifood Chains' (DISAC) programma. DISAC is een 4-jarig publiek-privaat R&D programma (2016-2019) gericht op het verbeteren van de economische en ecologische duurzaamheid van belangrijke Nederlandse agri-food ketens door introductie van innovatieve technologieën (sensoren, analytics en IT) uit het HTSM domein. De verwachting is dat door toepassing van zoveel mogelijk real-time en object-specifieke data, innovatieve data infrastructuren en data-analytics een betere teelt- en ketensturing mogelijk wordt dat aanzienlijk zal bijdragen aan verduurzaming van agrifood ketens. De focus ligt op de aardappel productieketens en ruwvoerproductie (gras) voor de zuivel sector. Het project kent drie deelprojecten: N-sensing, E-pieper en Connectivity.

Het deelproject E-pieper is gericht op optimalisatie van kwaliteit in de aardappel keten (Figuur 2) door gebruik te maken van 'E-pieper' multi-sensor en data-infrastructuur. E-pieper moet data-intensieve sturing van teelt en verwerking van en big data analytics in aardappelen mogelijk maken. Verschillende meetprincipes worden gebundeld in compacte sensor-units die in bodems en bewaarplaatsen relevante data vastleggen die groei en kwaliteit van aardappelknollen beïnvloeden. De data dienen draadloos en veilig verstuurd te kunnen worden naar opslag voor monitoring en analyse, om hiermee teelt- en ketenoptimalisatie te doen. E-Pieper staat voor een gerichte toepassing van actuele, locatie-specifieke data in combinatie met andere relevante data, nieuwe data analysemethoden en toegesneden agronomische modellen. Ook zal teelt- en ketentransparantie toenemen via nieuwe track & trace mogelijkheden.

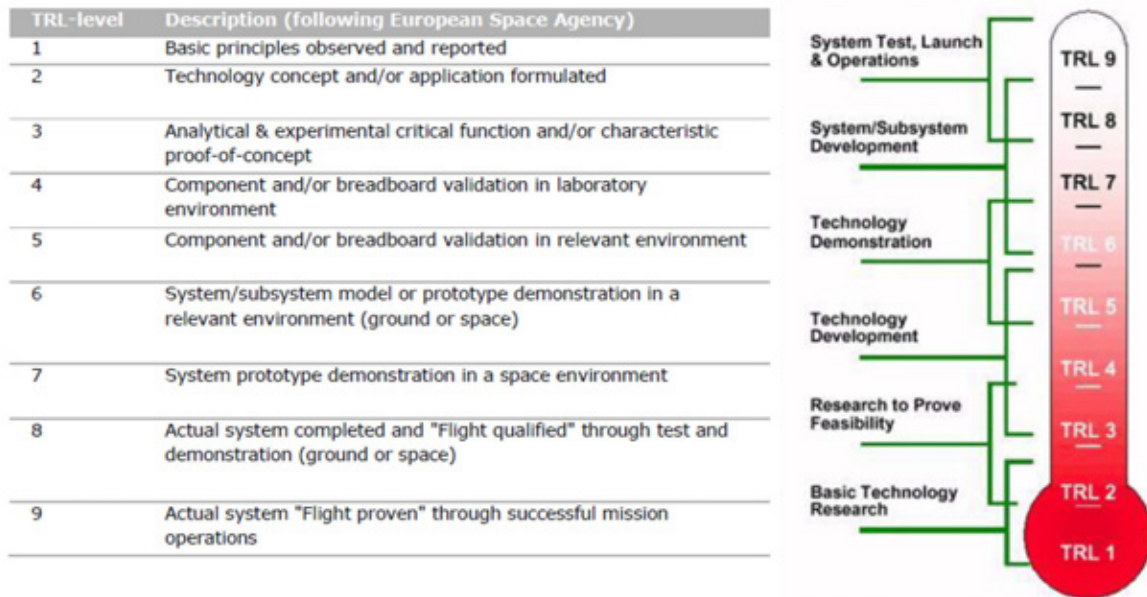


**Figuur 2** Schematisch overzicht van een deel van de aardappelketen waarbij op verschillende momenten tijdens de teelt, bij opslag en transport, tot aan de verwerking ruimtelijke en temporele data beschikbaar komt.

In het kader van het E-pieper project is een zo compleet mogelijk overzicht samengesteld van sensoren geschikt voor het meten van bodem-, gewas-, klimaat- en oogstparameters. In het overzicht zijn per sensor het meetprincipe, nauwkeurigheid, specifieke kenmerken en toepassingsmogelijkheden zo volledig mogelijk beschreven. In Hoofdstuk 2 t/m 5 worden de verschillende meetprincipes-sensor combinaties kort beschreven (het overzicht met alle detailinformatie is separaat beschikbaar). Hierbij is tevens aangegeven wat de toepassingsmogelijkheden en de betrouwbaarheid zijn, uitgedrukt als

technologierijpheid (TRL). Technologierijpheid van een sensor voor een bepaalde toepassing wordt weergegeven met een TRL-waarde op een schaal van 1 tot en met 9 (Figuur 3). Hoe hoger de waarde, hoe verder de technologie ontwikkeld is. Bij TRL-waarden van 7 of hoger is aangetoond dat de technologie werkt, en dat hooguit nog ontwikkeling van het systeem nodig is voor een praktijktoepassing. In hoofdstuk 6 wordt kort ingegaan op biosensoren en sensoren voor tracking & tracing. Het tweede onderdeel van deze studie was het samenstellen van een overzicht van de beschikbare gewasgroeimodellen en de gewas-, bodem- en klimaat-parameters die daarbij een rol spelen. In Hoofdstuk 7 worden de beschikbare modellen met hun voor- en nadelen beschreven.

Tenslotte wordt in Hoofdstuk 8 een voorstel gedaan van sensor systemen en modellen die als meest geschikt worden geacht voor het genereren van adviezen en inzichten op het gebied van kwaliteitsmonitoring, sturing in de aardappelteelt en bij inschuring. Dit rapport zal als advies worden voorgelegd aan het Steering Committee van het E-pieper deelproject die hierover een beslissing zal nemen.



**Figuur 3** Technology readiness level ([https://en.wikipedia.org/wiki/Technology\\_readiness\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level)).

---

## 2 Bodemsensoren

### 2.1 Inleiding

De metingen van bodemparameters zoals beschreven in de tabel vallen uiteen in twee typen, vlakdekkende metingen van (proxies van) bodemeigenschappen en puntmetingen van (deels dezelfde) bodemeigenschappen. De vlakdekkende metingen geven informatie op 1 of meer dieptes over (proxies van) bodemeigenschappen en zijn goed in staat de ruimtelijke variatie in kaart te brengen. Wanneer deze technieken voor monitoring worden ingezet zal hetzelfde meetpatroon d.m.v. RTK-GPS moeten worden gereden/gevlogen. De puntmetingen geven informatie op 1 of meer dieptes op 1 locatie van 1 of meer bodemeigenschappen. Deze kunnen nauwkeuriger zijn dan de vlakmetingen en kunnen in een aantal gevallen voor de duur van een groeiseizoen in het veld worden geïnstalleerd om de veranderende omstandigheden per uur of dag te meten. De representativiteit van deze metingen is volledig afhankelijk van de locatie keuze door de gebruiker. Een combinatie van beide technieken kan worden ingezet om een betrouwbaar, vlakdekkend beeld te krijgen van de gewenste bodemeigenschappen waarbij de vlakdekkende informatie wordt gebruikt om de locatie van de (monitoring) puntmetingen te bepalen.

### 2.2 Vlakdekkende metingen

Deze metingen worden over het algemeen uitgevoerd door een sensor lopend, rijdend of vliegend over het perceel te bewegen in raaien. Hiermee wordt een meetwaarde verkregen zoals de electromagnetische geleidbaarheid, natuurlijke radioactiviteit of lichtreflectie welke een maat is voor de bodemeigenschap die in kaart moet worden gebracht. De nauwkeurigheid en precisie van het resultaat is dan deels afhankelijk van de (fysische of chemische) relatie tussen dat wat gemeten wordt met de sensor en de kalibratie naar doelparameter. Voor de sensoren in de tabel geldt dat de textuur van de bodem, het klei-, silt, zand-, organische stofgehalte, soms de pH en soms bepaalde nutriënten met deze technieken goed in kaart kunnen worden gebracht. De methoden zijn commercieel beschikbaar en hebben in de tabel dan ook een hoge TRL gekregen. Voor (beschikbare) nutriënten, bodemvocht, bodemopbouw, bodemstructuur zijn deze relaties minder duidelijk en zal het resultaat afhankelijk zijn van de relatie van de doelbodemparameter met de eigenschappen die wel goed in kaart kunnen worden gebracht. Op percelen waar weinig ingrepen zijn gedaan in de natuurlijke bodemprocessen zal deze relatie vaak nog in stand zijn. Op percelen waar veel management ingrepen zijn gedaan zal deze relatie moeilijk tot niet te vinden zijn. Daarom hebben dezelfde technieken bij deze bodemeigenschappen in de tabel een lagere TRL gekregen.

Voor deze categorie proximal sensoren wordt niet verwacht dat binnen afzienbare tijd nieuwe meetprincipes/technieken beschikbaar komen. Wel zijn enkele ontwikkelingen gaande op het gebied van satelliet en airborne metingen zoals GNSS scattering, passive microwave, radar. Ook zijn de proximal EMI, ERT en VISNIR en MIR sensoren technisch verbeterd waardoor zij in veldsituaties beter toepasbaar zijn dan 10 jaar geleden. Daarnaast worden met name in VISNIR en MIR reflectie sensoren steeds goedkopere en handzamere sensoren ontwikkeld, al dan niet met verlies van nauwkeurigheid. Dit is ook beschreven voor de 'plant' sensoren. Ook worden de kalibratie 'libraries' en statistische analysetechnieken voor dergelijke sensoren steeds beter zodat de verwachting is dat deze metingen, indien een fysische/chemische relatie aanwezig is, steeds nauwkeuriger, handzamer en goedkoper zullen worden. Dit is verder uitgewerkt in de tabel per bodemparameter en per sensor in de tekst hieronder.

---

### 2.2.1 Electromagnetische geleidbaarheid (EMI)

Metingen van de electromagnetic induction (EMI) of de electrical conductivity (EC) van de bodem zijn vaak gecorreleerd aan (een combinatie van) de textuur, het vochtgehalte, het organische stof gehalte, de porositeit, temperatuur en het gehalte aan zouten in de bodem. Hierdoor kan EC ook een maat zijn voor een bepaalde mate van verdichting van de bodem wanneer de data met andere data bronnen wordt gecombineerd. Ook kunnen in een situatie met weinig (management) ingrepen bodemeigenschappen die gerelateerd zijn aan de textuur, zoals een aantal nutriënten, in kaart worden gebracht. Omdat per meetpunt alleen EC wordt gemeten en er meerdere verklarende factoren zijn, is een goede kalibratie van EC naar bodemeigenschap essentieel.

Bij een meting met EMI wordt een slee of handheld apparaat met 2 of meer spoelen over de bodem voortbewogen. Tussen de spoelen wordt een elektromagnetisch veld geïnduceerd wat een tweede veld en Eddy currents opwekt. De sterkte en richting zijn een maat voor de elektrische geleidbaarheid en de magnetische susceptibiliteit (MS) van de bodem. MS is gevoelig voor ferromagnetische eigenschappen van de bodem zoals organische stof (met Fe complexen), aardewerk en bakstenen. De meetdiepte wordt bepaald door de afstand(en) tussen de spoelen.

Bij een meting met EC wordt een stroom gecreëerd tussen 2 of meer grote elektrodes of coulters (metalen schijven) die over de bodem worden getrokken. Tussen deze elektrodes meten andere elektrodes (metalen schijven) de afname in potentiaal. Dit is een maat voor de elektrische weerstand van de bodem. Dit wordt omgerekend naar elektrische geleidbaarheid.

Deze methode kan ook worden toegepast in een niet-rijdende opstelling waarbij de elektrodes als pinnen in de grond worden gestoken (elektrische weerstandsmeting, RM15). Op een van de elektrodes staat stroom, de ander meet de potentiaal in de bodem. Hieruit wordt de elektrische weerstand berekend. Hierbij wordt vaak 1 meting per m<sup>2</sup> uitgevoerd wat een erg gedetailleerd beeld oplevert. Ook kan een snoer met secties van zend en ontvang elektrodes over de grond worden getrokken (Ohm-mapper). Door de toepassing van meerdere elektrodes wordt een diepteprofiel verkregen en gaat sneller dan de RM15 metingen. Goed contact met de bodem is echter essentieel.

Voor beide methoden geldt dat wanneer op meerdere spoel of schijf afstanden wordt gemeten een diepte profiel van de EC in de rijrichting kan worden berekend. Zo kan een vlakdekkend beeld van de EC en dus bodemopbouw en textuur worden verkregen. Voor omrekening van EC en MS naar bodemeigenschappen worden of standaard EC klassen voor textuurklassen gebruikt, of boorpunt-beschrijvingen en lab metingen van bodemmonsters door middel van lineaire regressie.

De betrouwbaarheid van de technieken hangt af van de veldomstandigheden, de gebruikte apparatuur, de kalibratie van de apparatuur en de correlatie van de toegepaste omrekening. Te natte veldomstandigheden, een niet goed contact tussen de elektrodes en de bodem of de aanwezigheid van ijzeren materialen verstoren de meting. Nieuwere sensoren hebben over het algemeen een verbeterde kalibratie module, wat een juist gebruik van de apparatuur kan bevorderen. De mate van correlatie tussen de proxy (EC of MS) en de bodemeigenschap bepaalt ook de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van de resulterende kaart.

Voor het meten van het kleigehalte wordt EMI en EC succesvol ingezet. Daarom schatten we deze technieken voor deze parameter in op TRL waarde 8. De correlatie met andere parameters zoals (grotere) vochtverschillen, nutriënten, verdichting is afhankelijk van de meetsituatie. Daarom schatten we de technieken voor de andere hierboven genoemde parameters in op TRL 4.

### 2.2.2 Natuurlijke radioactiviteit (gamma straling)

Natuurlijke radioactiviteit in de bodem is voornamelijk afkomstig van de van nature voorkomende radioactieve nucliden <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th en <sup>238</sup>U (en de niet-natuurlijke nuclide <sup>137</sup>Cs) en is gecorreleerd aan de provenance (herkomst) van bodemmineralen en de textuur van de bodem. Binnen een geologische eenheid kan het kleigehalte, leemgehalte, mediane korrelgrootte en (grotere verschillen in) het organische stof gehalte vaak goed worden bepaald. Bodemparameters die een relatie hebben met

---

deze fysische bodemparameters kunnen door deze relatie ook in kaart worden gebracht. De aanwezigheid van de relatie en dus de betrouwbaarheid van de kaart, bijvoorbeeld voor nutriënten, zal echter afhangen van het bodemtype en de mate van verstoring of menselijk ingrijpen zoals bemesting van een akker. Hierdoor zal voor deze eigenschappen altijd lokaal moeten worden gekalibreerd om de relatie te verifiëren en te ijken.

De gamma straling van natuurlijke radioactiviteit wordt gemeten met een gammaspectrometer met scintillatiekristal. Veel gebruikte kristaltypen zijn NaI, CsI en BGO. Deze verschillen van elkaar in samenstelling, energie resolutie, breekbaarheid, dichtheid en dus efficiëntie, en prijs. Met de gammaspectrometer wordt het radioactieve spectrum tussen 0.04-3 MeV gemeten. De vorm en sterkte van dit spectrum wordt bepaald door de verhouding tussen en de aanwezige concentratie tussen de nucliden. Omdat de vervalreeksen van de nucliden en de daarbij horende energie frequenties bekend zijn kan deze 'spectral signature' of fingerprint worden gebruikt voor de analyse van het gemeten spectrum naar concentraties van nucliden in de bodem. Dit gebeurt door middel van Full Spectrum Analyse (FSA; Hendriks, 2001) waarbij de fingerprints van de nucliden in een chi-squared algoritme worden gefit op het totale spectrum om de concentratie per nuclide te krijgen. Ook wordt de Windows-analyse toegepast, waarbij de concentraties in typerende bandbreedtes worden gebruikt als maat voor de concentratie. Bijdrage van andere nucliden aan deze bandbreedtes wordt gecorrigeerd d.m.v. stripping factors. (IAEA, 2003) Beide methoden leveren de concentraties aan  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  en  $^{238}\text{U}$  in Bq/kg per meetpunt.

De meting kan worden uitgevoerd op 1 punt, door de gammaspectrometer bevestigd aan een voertuig over de bodem te rijden of door de gammaspectrometer onder een UAV of vliegtuig. De resolutie van de meting is afhankelijk van de afstand tot de bodem en dus afhankelijk van het platform. Voor grotere afstanden is een grotere sensor nodig bij gelijk blijvende nauwkeurigheid omdat het een passieve meting is. Wat gemeten wordt is de straling die wordt uitgezonden door de bodem en het oppervlak bereikt zonder eerst geabsorbeerd te worden door massa (bodem en water). Deze straling is typisch afkomstig van 0-50 cm-mv met de bulk afkomstig van 0-15 cm en 95% van het signaal van 0-30 cm-mv. Hierdoor is het een goede meting van de textuur van de bouwvoor. Door attenuatie/absorptie van straling heeft vocht invloed op de meting. Een stelregel is dat 1% vocht ook 1% van de straling absorbeert.

De correlatie van concentraties van nucliden naar bodemeigenschappen wordt uitgevoerd door lineaire regressie op een 'library' van metingen van zowel gamma straling als in het lab bepaalde fysische bodemeigenschappen van hetzelfde monster. De relaties met fysische bodemeigenschappen zijn constant binnen gebieden met gelijke provenance en bewezen in de literatuur (van der Klooster *et al.*, 2011). Daarom schatten wij de TRL van deze technieken voor deze parameters in op TRL 8-9. De relaties met nutriënten en andere aan fysische parameters gerelateerde parameters zal vaak op veldschaal opnieuw moeten worden geverifieerd en gekalibreerd. Daarom schatten wij de TRL van deze technieken voor deze parameters in op TRL 4-5.

### 2.2.3 VIS-NIR-MIR reflectie systemen (licht reflectie)

Sensoren voor zichtbaar (visible – VIS, 300-750 nm), nabij-infrarood (near-infrared – NIR, 750-1400/2500 nm) en mid-infrarood (mid-infrared – MIR, 2500 -25000 nm) licht meten de reflectie en dus absorptie van licht wat op een oppervlak valt. In de bodem zullen dit kwarts, veldspaten, organische componenten zoals lignine en cellulose en andere mineralen en chemische / organische bindingen zijn. Wanneer deze elementen voldoende onderscheidend zijn in het resulterende (hyperspectrale) signaal kunnen deze met deze methode in kaart worden gebracht. Dit kan vaak voor organische koolstof, kleigehalte/mineralen,  $\text{CaCO}_3$  (MIR) en ijzeroxiden en de kleur van de bodem (VISNIR). Op basis van deze parameters kunnen in een aantal gevallen ook uitspraken worden gedaan over pH, CEC, organische stof, Fe/Mn verbindingen, mineralogie en bodemvocht en -structuur.

De sensoren voor VISNIRMIR metingen kunnen actief of passief zijn. Dat betekent dat ze of een eigen interne lichtbron hebben waarvan het uitgezonden lichtspectrum exact bekend is, of ze gebruiken de zon als lichtbron. Dit laatste betekent dat altijd ook tegelijk een meting van het invallende zonlicht wordt uitgevoerd om te corrigeren voor verschillen hierin. Het licht wat op de te meten bodem valt zal

---

deels gereflecteerd worden en deels geabsorbeerd. De sterkte en golflengte waarop dit gebeurt is afhankelijk van de gemeten elementen/componenten. Elke component heeft zo een unieke spectrale signature (handtekening) met verschillende reflecties afhankelijk van de golflengte.

Wanneer bodemmonsters zowel in het laboratorium als spectraal met een spectrometer worden gemeten, worden deze gegevens opgeslagen in een spectrale library (bibliotheek). Op basis hiervan kunnen via diverse statistische methoden verbanden worden gelegd tussen spectra en fysische en chemische bodemeigenschappen. Dit spectrale model of kalibratie kan vervolgens worden gebruikt om andere spectrale metingen zonder labmetingen om te rekenen naar bodemeigenschappen. Aangezien waterreflecties een belangrijk deel van het spectrum bezetten en daarbij reflecties van andere bodemeigenschappen maskeren, werkt deze techniek het beste op luchtgedroogde monsters.

Voor bodemeigenschappen met spectral features/signatures buiten de vochtbanden kan de techniek ook in het veld en vanuit satellietbeelden worden gebruikt om de bodemeigenschappen te schatten. Dit kan alleen wanneer geen vegetatie of wolken aanwezig zijn. Een andere, meer algemene beperking van de techniek is dat de doordringing van het signaal in de bodem beperkt is tot maximaal een paar centimeter. Dit komt omdat golflengten in dit deel van het spectrum relatief kort zijn. Een voordeel van deze techniek is dat hij toepasbaar is op alle schaalniveaus, zowel in het lab, op puntniveau in het veld, vanuit een UAV of vliegtuig en vanuit een satelliet. Dit maakt de metingen makkelijker schaalbaar, alhoewel door bedekking van de bodem in Nederland een landsdekkend beeld van de bodem met hoge resolutie op basis van spectroscopie niet mogelijk zal zijn.

De betrouwbaarheid van de techniek is sterk afhankelijk van de kwaliteit en spectrale resolutie van de gebruikte apparatuur, juiste verwerkingsmethoden, goede en relevante libraries van bodemeigenschappen, en de mate van correlatie tussen het spectrale signaal en de te correleren bodemparameter. Wereldwijd is een trend gaande naar het openstellen van libraries en andere data als open data. Dit zijn onder andere de EU LUCAS-database (GCO), de Global Soil Spectral Library (Viscarra-Rossel *et al.*, 2016) en de ICRAF-ISRIC database. Op dit moment hebben commerciële toepassingen van VISNIR spectroscopie echter de neiging om een privé-database op te bouwen, waardoor consistente meetkwaliteit en -methoden worden gewaarborgd, maar wat wel de kosten verhoogd. Daarbij wordt steeds meer gewerkt met het realtime aanbieden van de resultaten van metingen in het veld. Voor niet-punt metingen en nieuwe technieken of parameters wordt de data analyse vaak achteraf op kantoor uitgevoerd.

VIS-NIR-MIR spectroscopie is een in opmars zijnde techniek die wanneer goede libraries en instrumenten worden gebruikt in staat is een heel aantal bodemeigenschappen in de bovenste cm van de bodem in kaart te brengen. Vanwege deze voorwaarden schatten wij de TRL van deze techniek voor kleigehalte en organische stof in op TRL 7. Voor andere parameters schatten wij de TRL van deze techniek in op TRL 4-5.

#### 2.2.4 Grondradar (GPR)

Grondradar systemen worden gebruikt voor het in kaart brengen van de bodemopbouw, waarmee bedoeld wordt scherpe texturele laagovergangen, objecten in de bodem zoals infrastructuur, fundamenteen en archeologie en kan soms worden ingezet voor indicaties van verdichting, verstoring, verschillen in bodemvocht of grondwaterstanden. De mogelijkheden om deze laatste parameters in beeld te brengen zijn sterk afhankelijk van de lokale meetomstandigheden en opbouw van de bodem.

Een grondradarsysteem bestaat uit een zend- en een ontvangstspool die een elektromagnetisch signaal de bodem in zenden en reflecties ontvangen. Het uitgezonden signaal wordt gereflecteerd op overgangen tussen materialen met verschillen in di-elektrische constante. De tijd tussen uitzenden en ontvangen van het signaal een maat voor de afgelegde afstand. Met informatie over de snelheid van het signaal (deze is afhankelijk van de di-elektrische constante van het medium waar het signaal doorheen gaat) kan dit worden omgerekend naar de diepte. De di-elektrische constante van een materiaal wordt bepaald door de eigenschappen van het materiaal zoals klei, zand, gravel, veen, lucht, water, zouten, olie, ijzerhoudendheid etc. Omdat de bodem altijd een wisselende combinatie hiervan bevat moet de snelheid van het signaal in een bepaalde laag geïjk worden, maar het is ook



---

de reden dat het systeem in staat is om verschillen in samenstelling in deze materialen in de bodem waar te nemen. Wanneer di-elektrische eigenschappen van verschillende materialen weinig verschillen op korte afstand (droog zand en zandhoudend beton zonder lucht tussen beide, graduele textuurovergangen met een verloop van 20 cm tussen twee textuurklassen) zal de grondradar de verschillen in materialen niet waar kunnen nemen.

Het dieptebereik en de verticale resolutie van een grondradarsysteem is afhankelijk van de frequentie en de sterkte van het uitgezonden signaal en de eigenschappen van de bodem die gemeten wordt. Lagere uitgezonden frequenties (100-400 MHz) zullen een groter penetrerend vermogen hebben maar een lagere verticale resolutie. Hogere frequenties (750 MHz-2.5 GHz) zullen een lager penetrerend vermogen hebben maar een hogere verticale resolutie. Vochtige sterk kleihoudende bodems geleiden het signaal beter (het signaal is dan sneller verdwenen of 'op') en zullen daarom een kleinere meetdiepte hebben (1-3 m-mv bij 300 MHz) dan droge zandige bodems (4-7 m-mv bij 300 MHz).

De meting wordt over het algemeen uitgevoerd door een grondradarsysteem achter een voertuig of persoon aan te slepen in een slede, voort te duwen in een loopkarretje of om deze net boven de grond aan een voertuig te bevestigen en daarmee de meting uit te voeren. De gekozen methode is afhankelijk van de meetomstandigheden en de gebruikte radar. Systemen met lagere frequenties zijn vaak ook groter.

Grondradar systemen kunnen op twee manieren gekalibreerd worden. Wanneer de eigenlijke diepte van scherpe laagovergangen in de bodem bekend is kan op basis van de looptijd van het signaal de di-elektrische constante worden berekend en toegepast worden op de rest van de laag(en).

Wanneer deze informatie ontbreekt maar parabolen zichtbaar zijn in de lagen kan de di-elektrische constante aan de hand hiervan worden bepaald. Als kan worden aangenomen dat de parabool de reflectie is van een steen of klein/middelgroot rond object dan is de helling van de staarten van de parabool een maat voor de snelheid van het signaal in de laag tot aan het object. Samen met de looptijd van het signaal kan dan de di-elektrische constante berekend worden.

De di-elektrische constante wordt vervolgens gebruikt om de looptijden van het signaal om te rekenen naar diepte zodat een verticale dwarsdoorsnede van de bodem in de meetrichting wordt verkregen. In deze dwarsdoorsnede kunnen de waargenomen laagovergangen of objecten handmatig of semi-automatisch worden aangegeven en met coördinaten en diepte op kaarten worden geplotted.

Wanneer in een van beide gevallen ook informatie over de textuur van de lagen bekend is kan een uitspraak worden gedaan over de vochtigheid van de bodem op basis van verwachte en eigenlijke di-elektrische constante.

Wanneer de juiste frequentie en meetmethode worden ingezet en de bodemopbouw geschikt is om in te meten met grondradar (scherpe laagovergangen aanwezig, vlakke bovengrond, geen ijzer in ev. bodembedekking, object binnen verwachte meetdiepte) is de grondradar goed in staat de bodemopbouw in kaart te brengen. Daarom schatten wij de TRL van deze techniek voor deze parameters in op TRL 8. Omdat voor het in kaart brengen van bodemvocht of grondwaterstanden meer kalibratie data per meting nodig is en de data analyse complexer is schatten wij de TRL van deze techniek voor deze parameters in op TRL 4-5.

### 2.2.5 XRF Röntgen Diffractie Fluorescentie

Handheld XRF apparatuur meet de totale concentraties van atomen en dus elementen in de bodem zoals Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Te, Ti, V, Zn en Zr. Wanneer metingen op goed gemengde monsters worden gedaan en worden gecorrigeerd voor het vochtgehalte kunnen duplo analyses in het veld dezelfde nauwkeurigheden halen als analyses op gehomogeniseerde monsters in het lab. Wanneer voldoende kennis van bodemprocessen en andere eigenschappen zoals pH, CEC etc. bekend zijn, kunnen deze concentraties wellicht worden omgerekend naar plant-beschikbare concentraties, maar deze worden niet gemeten door de XRF.

De XRF is een handheld apparaat wat gebruik maakt van een Röntgenbuis. Deze bestraalt het monster materiaal met hoog energetische fotonen. Elk atoom heeft verschillende schillen met elektronen rondom zich die het atoom in evenwicht houden. De fotonen schieten elektronen uit die schillen door

---

hun hoge energie niveau. Het atoom wil dat evenwicht herstellen en heeft een prioriteit dicht bij de kern. Het zal dan ook elektronen uit de buitenste schillen terug laten vallen naar de binnenste schillen. Daarbij komt fluorescerende energie vrij die voor elk atoom een specifiek energieniveau heeft. Deze uitgezonden energie wordt gemeten door de XRF wat een energiespectrum oplevert wat de atoomsamenstelling van het gemeten materiaal weergeeft. Het energie niveau geeft aan welke atomen aanwezig zijn, de sterkte van de energie per niveau geeft aan hoeveel van dat atoom aanwezig is. Zo kan de samenstelling in ppm worden gemeten van het deel van het monster waarin de Röntgenstraling door kan dringen, in bodem is dit typisch 5-7 mm. Vanwege dit lage doordringend vermogen is een goede homogenisatie van het monster en een duplo meting op een andere plaats op hetzelfde monster van belang voor een nauwkeurig en precies resultaat. Ook vanwege dit lage doordringend vermogen beperkt de aanwezigheid van vocht het monstervolume en zal hier dus voor gecorrigeerd moeten worden. Dit kan door een gemiddeld of monster specifiek vochtgehalte te bepalen met andere meettechnieken en de gemeten gehalten te corrigeren.

Omdat met Röntgenstraling wordt gewerkt is kennis van (de gevaren van) straling bij de veldwerker vereist voor een veilige toepassing al zijn veel systemen uitgerust met verschillende beveiligingsmaatregelen.

De XRF is ontwikkeld voor het meten van de totale concentraties elementen in een materiaal en ook de bodem. Dit geldt met name voor de zwaardere elementen. Lichtere elementen zoals P zijn echter met nieuwere apparaten steeds beter te meten. Daarom schatten wij de TRL van deze techniek voor deze parameters in op TRL 8-9. Voor het bepalen van plant beschikbare nutriënt concentraties kunnen deze waarden als input worden gebruikt, maar zal veel aanvullende kennis en parameters nodig zijn om een goede inschatting te maken. Daarom schatten wij de TRL van deze techniek voor deze parameters in op TRL 2-3.

## 2.2.6 Overigen

Naast de hierboven genoemde methoden zijn er enkele andere proximal sensoren die mogelijk interessant kunnen zijn. Zij zijn niet uitgebreid apart beschreven omdat ze op dit moment als minder relevant voor het doel van dit onderzoek worden gezien. Dit zijn bijvoorbeeld magnetometers, seismische, trekkracht en diesilverbruik metingen.

## 2.3 Puntmetingen

Voor de puntmetingen geldt dat voor bodemvocht, temperatuur, EC, verdichting, pH zijn goede en betrouwbare meetmethoden beschikbaar zijn met hoge TRL's. Voor bodemvocht worden meetmethoden en sensoren steeds verder verbeterd. De meetprincipes zullen echter niet snel wijzigen. Voor alle vlakdekkende en een groot deel van de punt meetmethoden geldt dat de uitvoering of installatie van de technieken uitgevoerd dient te worden door een expert.

### 2.3.1 Time Domain Reflectance (TDR)

Bodemvochtbepalingen kunnen bepaald aan de hand van het meetprincipe dat is gebaseerd op de dielektrische constante van de bodem (WUR; Van Balendonck en Hillhorst). Meest toegepaste techniek is Time Domain Reflectometry die ook geschikt is voor andere media dan grond (bijvoorbeeld substraten). De sensor genereert een elektrische puls in de bodem. De door de bodem gereflecteerde puls wordt door de sensor opgevangen en omgezet in een meetsignaal. De vorm van de gereflecteerde puls is sterk afhankelijk van de hoeveelheid vocht in het medium rond de pennen. De dielektrische constante van de bodem kan er snel en nauwkeurig (tot 2%) mee worden bepaald. Leveranciers van bodemvochtsensoren en systemen zijn o.a. Dacom ([www.dacom.nl](http://www.dacom.nl)) en Delta-T ([www.delta-t.co.uk](http://www.delta-t.co.uk)). De meeste systemen zijn eenvoudig te installeren in het veld (één puntmeting) en worden geleverd met een softwareprogramma voor het opstellen van een beregeningsadvies.

### 2.3.2 EC meting bodemvocht

Uit: Gras-mais signaal (Hoving *et al.*, 2014):

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 4). 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 4** 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)) 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 gewassensensoren.

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 5 voor beeldvorming peilbuis en divers).



**Figuur 5** Peilbuis en divers.

### 2.3.3 Tensiometer

Tensiometers zijn gebaseerd op het meten van drukverschillen (Rawlings, 1976), wanneer de bodem rond de keramiecel uitdroogt wordt er zoveel water aan onttrokken totdat er een evenwicht met het omringende bodemvocht is. De ontstane onderdruk wordt zichtbaar gemaakt met een manometer of met een elektronische druksensor vastgelegd.

### 2.3.4 pH

Uit: Gras-mais signaal (Hoving *et al.*, 2014):

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 (Van der Schans & Van der 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.

### 2.3.5 Verdichting

Uit: Gras-mais signaal (Hoving *et al.*, 2014):

Bodemverdichting kan gemeten worden met een penetrologger die de indringingsweerstand meet met de daar bijbehorende coördinaten. Boven de 3 MPa is wortelgroei onmogelijk (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.

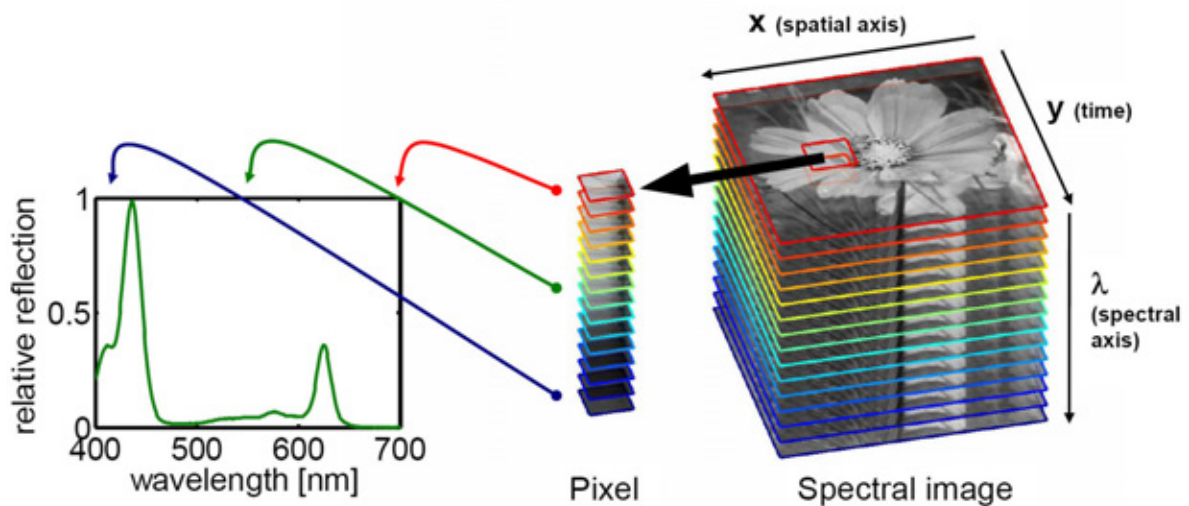
### 2.3.6 Nutriënten

Er is nog een gebrek aan geschikte in situ meetmethoden voor plantbeschikbare nutriënten. Totale elementconcentraties zijn bijvoorbeeld met een XRF wel goed in kaart te brengen, deze techniek wordt steeds verder ontwikkeld om ook lichtere elementen met voldoende precisie en meetrange te kunnen meten. Ook zijn wereldwijd verschillende plantbeschikbare elementen succesvol in kaart gebracht met VISNIR spectroscopy. Het succes van deze techniek voor plantbeschikbare nutriënten is echter niet constant en lijkt bodemtype en management afhankelijk te zijn. Voor deze parameters zullen dan ook labanalyses van bodemonsters nog steeds de beste optie zijn.

# 3 Gewassensoren

## 3.1 Inleiding

Veel gewaseigenschappen zoals bovengrondse biomassa, droge stof gehalte en inhoudsstoffen kunnen worden bepaald aan de hand van hyperspectrale beelden. Het is een van de meest krachtige beeldverwerkingsmethoden op het gebied van plant fenotyping. Bij hyperspectrale beelden bevat elke pixel een reeks aan waarden die corresponderen met de reflectie, de emissie of de transmissie van straling bij een bepaalde golflengte (Figuur 6). Aangezien er per pixel data van een volledig spectrum beschikbaar is, bieden hyperspectrale metingen niet alleen de mogelijkheid standaardafmetingen van een object zoals grootte en vorm te bepalen, maar levert ook informatie voor segmentatie van het object en de toepassing van statistische modellen zoals 'partial least squares' voor het bepalen van plant-eigenschappen als droge stofgehalte, stikstofstatus, suiker- of lycopene concentraties of chlorofyl-gehalte.



**Figuur 6** Een hyperspectraal beeld bestaat uit een ruimtelijke 2D weergave van een object in combinatie met een derde spectrale as met de golflengtes van een deel van het elektromagnetische spectrum, bijvoorbeeld het zichtbare gedeelte (400-700nm) of het infrarood deel (700-2300nm). Elke pixel bevat informatie over de gekozen bandbreedte (Uit: Van der Heijden & Polder, 2015).

Hyperspectrale metingen en de bijbehorende beeldverwerking hebben ook enkele nadelen, de belangrijkste zijn (1) de hoeveelheid licht die nodig is voor een goede opname, (2) de tijd die nodig is om een volledig spectraal beeld te verkrijgen, (3) de hoeveelheid data die wordt gegenereerd, (4) de benodigde reken capaciteit voor verwerking van de beelden en (5) de complexiteit van het combineren van meerdere afbeeldingen (vooral als planten bewegen). Om deze nadelen deels te ondervangen kan in plaats van het volledige spectrum te gebruiken, ook een geselecteerd aantal golflengtes (banden) worden gebruikt. Deze techniek staat bekend als multispectrale beeldvorming. Een *best-of-both-worlds* benadering kan zijn om hyperspectrale beelden in de onderzoeks- en ontwikkelingsfase te gebruiken. Afhankelijk van de gewenste toepassing kunnen de meest geschikte banden geselecteerd worden en vervolgens in een multispectrale camera worden ingebouwd. Hierdoor wordt het meten en verwerken van beelden voor het bepalen van planteigenschappen aanzienlijk sneller.

De combinatie van spectrale en ruimtelijke informatie door toepassing van sensoren is uitermate geschikt voor heel veel verschillende toepassingen. Echter, soms is voor het bepalen van een bepaalde

gewasparameter ook een eenvoudige spectrale puntmeting voldoende. Traditionele spectrometers zijn o.a. Ocean Optics, Jeti of SeaWave.

De 'machine-vision' industrie is zich inmiddels bewust van het potentieel van spectrale beeldverwerking en steekt veel energie in de ontwikkeling van nieuwe hyperspectrale en multispectrale beeldsensoren. De belangrijke spelers op dit gebied zijn Specim (<http://www.specim.fi>), Ocean Optics/Pixelteq (<https://pixelteq.com>), Imec (<https://www.imec-int.com/en/hyperspectral-imaging>), Silios (<https://www.silios.com>) en Delta Optical Thin Film (<https://www.deltaopticalthinfilm.com>).

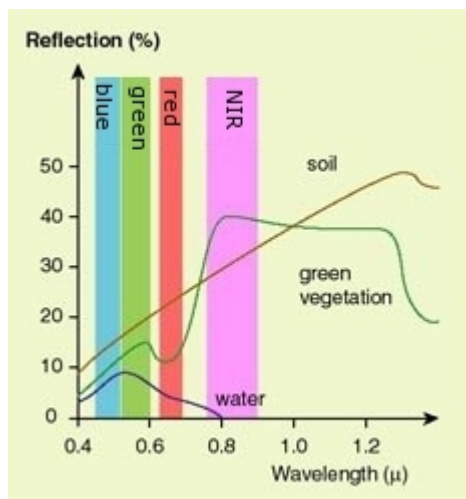
De grote camera producenten ontwikkelen momenteel ook goedkopere multispectrale sensoren en zoeken daarbij de samenwerking met Wageningen UR voor onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van deze camera's in de land- en tuinbouw.

Relatief nieuw op de consumentenmarkt zijn sensoren die aan een smartphone kunnen worden gekoppeld en waarvan de meetdata 'in de cloud' worden geanalyseerd. Deze apparaten bestaan meestal uit goedkopere spectrofotometers in het NIR-bereik. Voorbeelden zijn de SCIO (<https://www.consumerphysics.com/>) die meet bij een golflengte van 700-1100nm en NIRscan (<http://www.ti.com/tool/dlpnirnanoevm>) die meet bij een golflengte van 900-1700nm. Deze sensoren kunnen gebruikt worden om verschillende gewasparameters te meten.

## 3.2 Bovengrondse biomassa

### 3.2.1 VIS en NIR Reflectie

Licht dat op een gewas valt wordt geabsorbeerd, gereflecteerd of getransmitteerd. Absorptie vindt vooral plaats in het chlorofyl, dat de energie uit lichtdeeltjes gebruikt voor fotosynthese. Chlorofyl absorbeert voornamelijk licht in het blauwe (400-500 nm) en rode (600-700 nm) deel van het spectrum. Kenmerkend voor planten is dat licht in het groene deel van het spectrum (500-600 nm) grotendeels wordt gereflecteerd (chlorofylfluorescentie). Nabij infrarood licht (NIR; +/- 1000 nm) wordt door planten voor circa de helft gereflecteerd en andere helft wordt getransmitteerd (Figuur 7).



**Figuur 7** Reflectie-eigenschappen van kale bodem, vegetatie en water.

VIS en NIR reflectie metingen kunnen worden gebruikt voor het afleiden van verschillende gewas-specifieke indices (>100 verschillende indices bekend) waarmee o.a. de biomassa (groei) en toestand van een gewas gedurende het groeiseizoen kan worden gevolgd en de gewas-variantie binnen een perceel kan worden bepaald (Ros & Bussink, 2012; Kikkert, 2009). Een veel gebruikte index is de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) die iets zegt over de hoeveelheid biomassa en fotosyntheseactiviteit van een gewas. Relaties tussen de gewasindex en de planteigenschappen blijken

gewas en sensorspecifiek te zijn. Dit betekent dat de onderliggende algoritmes niet uitwisselbaar zijn tussen de verschillende sensor-systemen (Groenkennisnet).

Reflectie metingen voor de bepaling van de bovengrondse biomassa kunnen van dichtbij (nearby of proximal sensing) met een hand-held of op een tractor gemonteerde sensor worden uitgevoerd of van veraf (remote sensing) met behulp van satelliet beelden, drones ed.

### 3.2.2 Nearby of proximal sensing

Er zijn VIS, NIR en chlorofylfluorescentie sensoren op de markt voor punt-metingen (meestal 'hand-held' meetinstrument) en geïntegreerde sensorsystemen (lijnscanners) om de reflectiekenmerken van een gewas in kaart te brengen (Tabel 2). Reflectie-sensoren zijn geschikt om redelijk snel en betrouwbaar een inschatting te geven van de biomassa en/of het N-gehalte in een gewas. Door gebruik te maken van gewasindexen kan tevens een betrouwbare schatting worden gegeven van de N-opname door het gewas.

De meest gangbare commerciële sensoren geven m.b.t. biomassa, gewasontwikkeling en stikstof gehalte redelijk vergelijkbare resultaten. Sensoren die meten via meerdere banden hebben als voordeel dat er meer gewasindexen kunnen worden berekend (Ros & Bussink, 2012). Echter, de relaties tussen de gewasindex en de planteigenschappen blijken gewas en sensorspecifiek te zijn. Dit betekent dat de onderliggende algoritmes niet uitwisselbaar zijn tussen de verschillende sensor-systemen (merken). Voor diverse commerciële sensoren zijn software modules (applicaties) beschikbaar die op basis van de biomassa bepaling adviezen genereren voor variabel bemesten (stikstof) in o.a. aardappels, winter koolzaad, winter- en zomer gerst, wintertarwe en maïs of voor variabel doseren van loofdoormiddel, bodemherbiciden en bestrijding van Phytophthora (Van Evert *et al.*, 2012).

De TRL-waarde van deze sensoren voor bepaling van bovengrondse biomassa, gewasontwikkeling en stikstof gehalte is redelijk hoog (8-9). De meetwaarden (indices) zijn te gebruiken voor variabel bemesten, bespuiten en opbrengstschattingen (alleen voor gras).

**Tabel 2** Overzicht van hand-held en lijnscanners voor gewasreflectiemetingen (naar Ros & Bussink, 2012).

Sensor	Specificaties					
	Banden	Ruimtelijke resolutie (m)	Sensor-gewas afstand (m)	Licht-bron	Vegetatie-index standaard	Vegetatie-index optioneel
<i>Puntmeting (hand-held)</i>						
Fieldspec (spectrofotometer)	2150	0.6	<1.5	-	Alle VI	
SPAD (spectrofotometer)	2	0.01	<0.05	LED (actief)	NDVI	
CropScan	8-16	0.6	1.6-3.0	-	WDVI	NDVI, REP, NDRE, OSAVI, TCARI
<i>Lijnscanners</i>						
Greenseeker	2	0.6	0.7-1.6	LED (actief)	NDVI	WDVI
Yara N-sensor	54	25	2-4	LED (actief)	NDRE	NDVI, WDVI, OSAVI, TCARI, DCNI
Fritzmeier ISARI (chlorofylfluorescentie)	5	0.6	0.3-1.0	Laser (actief)	REP	NDVI, WDVI, OSAVI, TCARI
Cropcircle/OptRx	3	0.6	0.3-1.8	LED (actief)	NDRE	NDVI, WDVI
Overigen: Parrot sequoia; Micasense RED edge; NDVI Sentera Single/Quad/Double 4K; Airinov Multispec 4C	4-6				NDVI, NDRE, CIR, RGB, RGB, GNDVI, GRVI	

---

### 3.2.3 Remote sensing

Er zijn diverse soorten satellieten in omloop voor o.a. navigatiedoeleinden, aardobservatie, weersatellieten, voor wetenschappelijk onderzoek, communicatie en militaire doeleinden. Satellieten verschillen van elkaar door de baan om de aarde die ze hebben, het gezichtspunt van beeldinstrumenten, de ruimtelijke resolutie, spectrale kenmerken en baanbreedte van de sensoren. Er zijn verschillende typen sensoren: optische (gereflecteerd zonlicht), thermische (warmte-uitstraling van de aarde), radar (backscatter en hoek van door sensor uitgezonden radargolven) en LiDAR (afstand en tijd van terugkaatsing van uitgezonden laserlicht). De eerste twee zijn passief, 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 (radar, laser).

Nadeel van satelliet waarnemingen is de beperkte data beschikbaarheid tijdens bewolkte situaties. Op het noordelijk halfrond is boven land gemiddeld 55% van het oppervlak bedekt door bewolking. De variatie in de tijd is groot (Hahn *et al.*, 1995).

Satellietbeelden worden in de agrarische sector o.a. toegepast voor kartering, het in kaart brengen van de ligging van gebouwen en percelen en de economische en teelt-technische registraties. Beelden van bodemeigenschappen worden o.a. gebruikt voor het geografisch zichtbaar maken van de variabiliteit binnen een perceel. De groenmonitor ([www.groenmonitor.nl](http://www.groenmonitor.nl)) geeft op basis van satellietbeelden de actuele vegetatiekaart van Nederland weer. Voor onbewolkte (gedeeltes van) satellietbeelden wordt de groenindex (NDVI index) berekend, als maat voor de hoeveelheid biomassa. De index waardes kunnen "vertaald" worden naar landbouwkundige processen of natuurontwikkeling over de seizoenen. Praktische toepassingen in de agrarische sector zijn nog beperkt o.a. door de geringe leveringszekerheid van kwalitatief hoogwaardige beelden gedurende het seizoen.

Het onderzoeksprogramma Bioscope (<http://www.projectbioscope.eu/>) richt zich op het combineren van satelliet beelden met opnames met behulp van UAS (Unmanned Aerial Systems), zoals onbemande vliegtuigen, helikopters en drones. Doelstelling is elke 10 dagen een vegetatiekaart te kunnen leveren onafhankelijk van de bewolgingsgraad (Van der Wal, 2014). Radarbeelden zouden het probleem met betrekking tot leveringszekerheid kunnen ondervangen omdat deze onafhankelijk zijn van bewolking of zonneshijn, maar toepassing hiervan staat nog in de kinderschoenen. De lancering van de Sentinel-1 radarsatelliet (2014) biedt wat dat betreft nieuwe mogelijkheden.

## 3.3 Bovengrondse biomassa (gras)

### 3.3.1 Lichtonderbreking

Systemen op basis van lichtonderbreking zijn uitgerust met meestal meerdere lichtbronnen en sensoren die het inkomende licht continue meten. Zodra een lichtstraal wordt onderbroken wordt door de sensor een signaal opgeslagen. Lichtonderbreking wordt toegepast in zogenaamde 'pasture readers' zoals de C-Dax Pasture Meter XC1 om de hoogte van een gewas te bepalen ([www.pasturemeter.co.nz](http://www.pasturemeter.co.nz)). Dit type hoogtemeters worden voornamelijk in de melkveehouderij toegepast voor het (tussentijds) bepalen van de grasopbrengst en deze te koppelen aan het perceel. Deze informatie biedt de melkveehouder mogelijkheden om te sturen op opbrengst door gerichte teeltmaatregelen (bemesting, beregening ed.). De C-Dax Pasture Meter XC1 bestaat uit een omgekeerde U-vormige behuizing waarin van beneden naar boven 20 lichtbronnen zitten op 20 mm afstand van elkaar. Daar tegenover zitten 20 detectoren die de lichtstralen opvangen. De behuizing staat op wielen en wordt door een voertuig over het gras getrokken (Figuur 8). Zodra een lichtstraal wordt onderbroken door gras wordt het signaal opgeslagen als een relatieve hoogtemaat. Het apparaat meet de hoogte in stapjes van 20 mm, en berekend op basis van seizoenafhankelijke vergelijkingen de potentiële opbrengst in kg droge stof per ha. (<http://www.c-dax.co.nz/files/resources/Manuals/2400-6640-4%20PM%20PLUS-Manual.pdf>)





**Figuur 8** C-Dax Pasture Meter XC1 ([www.pasturemeter.co.nz](http://www.pasturemeter.co.nz)).

Metingen met Pasture readers moeten gekalibreerd worden voor de lokale omstandigheden. Na metingen volgt een correctie voor gras dat meer horizontaal ligt, tussen de lichtstralen. De fabrikant geeft aan dat een standaard correctie van +10 mm een betrouwbare uitkomst oplevert (C-Dax, 2015). Nadeel is dat het gras betreden/bereden moet worden om grote delen van het perceel te meten.

De TRL waarde van gewashoogte meters voor gras is 8-9. De prijs voor een C-Dax meter inclusief GPS en software ligt rond de 5-6.000 euro ([www.pasturemeter.co.nz](http://www.pasturemeter.co.nz)).

### 3.3.2 Ultrasoon (akoestisch)

Dit type sensoren zendt ultrasone geluidsimpulsen (akoestische golven) uit en meet hoelang het duurt voor de teruggekaatste echo wordt opgevangen ('time-of-flight'). Meestal wordt hiervoor een enkele ultrasone omvormer gebruikt die zowel als zender en ontvanger fungeert. De afstand tussen de sensor en het voorwerp dat de echo genereert wordt berekend op basis van de geluidssnelheid en de gemeten looptijd. Het detectiebereik beslaat 100 mm tot 10 m. Door de relatief lage voortplantingsnelheid van geluidsgolven door de lucht (1.000.000 keer langzamer dan licht) zijn ultrasone sensoren met name over langere meetafstanden vrij traag. Bij een voorwerp op 10 m afstand bedraagt de geluidslooptijd ongeveer 60 ms., wat overigens meer dan voldoende is voor de meeste toepassingen ([www.pepperl-fuchs.be](http://www.pepperl-fuchs.be)).

In de melkveehouderij worden ultrasoon sensoren gebruikt voor grashoogte metingen en bepaling van de topografie van een perceel ten behoeve van het grasmanagement (begrazing, maaien, bemesting, opbrengst). Dit kan al lopend over het perceel waarbij 40 hoogte metingen per stap worden uitgevoerd, uitlezing via smartphone en webapplicatie ([www.grassometer.com](http://www.grassometer.com)). Het is ook mogelijk een ultrasoon sensor op de frontmaaier te monteren (Figuur 9) waaruit de grasopbrengst kan worden bepaald (Veeteelt, 2015).

De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van ultrasone sensoren is hoog: 8-9. De toepassing van de data in decision support systemen is volop in ontwikkeling (TRL 6-7).



**Figuur 9** Voorbeeld van een ultrasoon sensor op de frontmaaier.

## 3.4 Abiotische stress/Leaf stress

### 3.4.1 Infraroodthermografie

Onder invloed van droogte stress sluiten de huidmondjes om overmatige transpiratie te voorkomen. Gevolg hiervan is dat de bladtemperatuur toeneemt. Ook factoren zoals bladvorm, positie, licht absorptie, luchtvochtigheid, temperatuur, windsnelheid en andere stressoren zoals ziekten en plagen, gebrek aan voedingsstoffen hebben invloed op het openen en sluiten van de huidmondjes en daarmee de transpiratie. Het meten van plant-waterrelaties kan door middel van infraroodthermografie (Merlot *et al.*, 2002). De werking is gebaseerd op het feit dat alle objecten met een temperatuur hoger dan 0 gr. K warmte uitstralen. De infrarood sensoren meten de langgolvlige infrarood straling (10.5-12.5- $\mu\text{m}$  bandbreedte) van het blad die vervolgens wordt omgerekend naar temperatuur (Stefan-Boltzmann blackbody vergelijking). De meting is vooral afhankelijk van de 'Field of view', dat wil zeggen de hoek en de hoogte waaronder de meting wordt uitgevoerd. Sensoren voor plantkundig stress onderzoek hebben over het algemeen een FOV tussen 4 en 15° (Hatfield, 19..).

Met beeldvormende thermische camera's kan de verdeling van de bladtemperatuur over een plant gemeten worden. Deze geeft o.a. inzicht in het microklimaat in het gewas waardoor koude en vochtige gebieden te identificeren met een groter risico op kwaliteitsverlies door watergebrek of aantasting door ziekten en plagen.

## 3.5 Droge stof en Inhoudsstoffen

Nabij-infrarood spectroscopie (NIRS) is gebaseerd op diffuse reflectie van gewasmonsters en wordt in laboratoria gebruikt voor het bepalen van de concentratie aan nutriënten en voedingswaarde van gedroogde en/of verse gewasmonsters (Paul & Häusler, 2002). NIRS meet de in situ blad reflectie met een hoge spectrale en hoge ruimtelijke resolutie in het zichtbare en nabij-infrarode deel van het spectrum. In principe kunnen de opbrengst en kwaliteitsaspecten worden gemeten vanaf elk beschikbaar platform (op de grond, lucht of in de ruimte), echter de toepassing van sensoren op lucht- of ruimte gestationeerde platforms is beperkt voornamelijk als gevolg van atmosferische verstoringen.

Door middel van NIRS reflectie metingen op korte afstand boven een gewas kunnen naast biomassa en grondbedekking ook het droge stof gehalte, nutriënten (N, suikers) en voedingswaarde (vezels) van een gewas (gras) worden bepaald. De beelden kunnen ook inzicht geven in de aanwezigheid van onkruiden, ziekten en plagen, of aanwezigheid van droogte- of nutriëntenstress (Schut *et al.*, 2006).

---

Er zijn ook voorbeelden waarbij een NIRS sensor in een zelfrijdende hakselaar is bevestigd, in de flow van het geogoste product (Büscher *et al.*, 2014). In een studie in Nieuw Zeeland werd de hyperspectrale ASD FieldSpec Pro sensor gebruikt om het ruw eiwit gehalte te detecteren in graslanden (Yule *et al.*, 2014). NIRS wordt ook gebruikt voor grasland management. Uit de gegevens kan het percentage droge stof, ruw eiwit gehalte en verteerbaarheid (organic matter digestibility) worden bepaald ([www.teagasc.ie](http://www.teagasc.ie)).

De AccuHarvest (Zeltex, Maryland, USA) bestaat uit een optische NIR sensor (Zeltex ZX-50, 893 tot 1045nm) waarmee het eiwit- en vochtgehalte van graan kan worden bepaald (Thylén *et al.*, 2002). Naast de spectra worden ook de sample en omgevingstemperatuur gemeten. Uit de absorptiespectra van het graan en de temperatuur kan het eiwit- en vochtgehalte worden berekend. Het systeem bestaat uit een automatische sampler (4-5 p/m) en sensor die direct op de combine worden geïnstalleerd of in een graanelevator. De gegevens kunnen worden weergegeven op perceelskaarten voor optimalisering van de teelt in het volgende seizoen of voor sortering van graan op eiwitgehalte direct bij de oogst of bij overslag.

SCIO brengt een Near Infra-Red Spectroscopy sensor op de markt ter grootte van een aansteker. De lichtbron straalt licht aan op het te analyseren monster (o.a. voedsel, planten, medicijnen, oliën, brandstoffen) waarna de optische sensor, de spectrometer het gereflecteerde licht opvangt en spectraal analyseert. Het spectrum wordt via een smartphone doorgestuurd naar een cloud-based databank ter vergelijking. De uitkomst wordt in msec vervolgens weer teruggestuurd naar de smartphone. <https://www.consumerphysics.com/myscio/technology>.

Het proof of principle van NIRS voor het meten van opbrengst en gewaskwaliteitsparameters is aangetoond. In sommige situaties is ook een redelijk voorspellende waarde aangetoond onder praktijk omstandigheden. De meetwaarden zijn echter sterk afhankelijk van omgevingsfactoren en het kalibreren van de systemen moet nog doorontwikkeld worden. De TRL van deze NIRS systemen ligt op een 4-6.

## 3.6 Nearby detectiesystemen van onkruiden, ziekten en plagen

### 3.6.1 Onkruiddetectie en bestrijding

Onkruiden kunnen op verschillende manieren problemen veroorzaken op akkers en in grasland 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. Sommige onkruidsoorten zijn ongewenst in het te oogsten product vanwege hun giftigheid (Jacobs kruiskruid). Door plantherkenning kan de onkruidbestrijding selectief en meer plaats specifiek worden toegepast en leidt tot minder inzet van onkruidbestrijdingsmiddelen. Plantherkenning kan aan de hand van verschillen in kleur, vorm en structuur van het gewas (bijvoorbeeld regelmatige plantafstand) of een combinatie.

Onkruiden detecteren op onbeteelde grond kan door middel van VIS en NIR reflectiemetingen waaruit de bovengrondse biomassa kan worden afgeleid (Kempenaar *et al.*, 2009). Er zijn verschillende biomassasensoren praktijkrijp zoals de WeedIT-Agri (Romatron) en de WeedSeeker (Homburg; [www.weedseeker.nl](http://www.weedseeker.nl)).

MLHD (Minimum Letale Herbicide Dosering) is een techniek bedoeld voor toepassing van lage herbicide dosering (fotosyntheseremmers). Het MLHD advies geeft precies die dosering die het onkruid doet doodgaan (de letale dosering), gedifferentieerd naar gevoeligheid en stadia van onkruidsoorten (Kempenaar *et al.*, 2011). Met draagbare fotosynthesemeters (chlorofyl fluorescentietechniek) kan de werking van herbiciden kort na toediening al worden voorspeld. Dit levert informatie over nut en noodzaak van aanvullende bestrijding van het onkruid ([www.mlhd.nl](http://www.mlhd.nl)).

---

Met de H sensor van Agricon ([www.agricon.de](http://www.agricon.de)) is het mogelijk onkruidsoorten te detecteren binnen een gewas. De sensorunit is voorzien van LED licht en kan daarmee onafhankelijk functioneren van de heersende lichtcondities. De sensor meet de reflectie in het NIR en rode deel van het lichtspectrum waarmee groene planten kunnen worden onderscheiden van de ondergrond. Onkruiden worden onderscheiden van het gewas door herkenning van plant specifieke vormen en reflectie. Door sensoren gekoppeld aan een spuitboom wordt de hoeveelheid toegepast herbicide real-time afgestemd op de waarneming in het veld. ([www.sagit.com.au](http://www.sagit.com.au)).

Voor de biologische melkveehouderij in Nederland is een prototype ontwikkeld voor het detecteren en mechanisch bestrijden van ridderzuring (*Rumex obtusifolius* L.) in grasland. De detectie van de zuringplanten gebeurt door beeldanalyse, de afwijkende vorm en structuur van de planten t.o.v. van het omringende gras wordt gedetecteerd. De camera heeft een resolutie van 1600 × 1200 pixels, op maaiveldhoogte is de resolutie ca. 1.5 mm per pixel. (Van Evert *et al.*, 2011; [www.ruud.wur.nl](http://www.ruud.wur.nl)).

In het kader van het teeltmethoden en rassenonderzoek van suikerbieten is met behulp van camera's en beeldanalysetechnieken een geautomatiseerde plantteller ontwikkeld. Deze moet de handmatige planttellingen voor bepaling van het aantal opgekomen planten en de regelmaat van opkomst over het perceel gaan vervangen. De machine heeft een werkbreedte van drie meter en drie camera's (Sony HAD CC) met belichting voor het detecteren van de suikerbietenplantjes. De plantjes worden gedetecteerd op basis van vorm en de regelmatige plantafstand (Nieuwenhuizen *et al.*, 2010).

Camera's en beeldanalysetechnieken zijn ook toegepast in een zes rijen onkruidschoffelmachine voor het mechanisch bestrijden van onkruid in de rij ([www.steketee.com](http://www.steketee.com)). De cultivator werkt met hoge-resolutie camera's die de gewenste planten (het gewas) in de rij herkennen en een pneumatisch aangedreven schoffel die de grond en het onkruid rondom de gewenste plant schoffelt. Om er voor te zorgen dat er onder alle omstandigheden perfecte beelden opgenomen worden zijn de camera's in een kap gemonteerd met xenon belichting waardoor het systeem de planten al in een vroeg stadium kan herkennen. Plantafstanden tot 6 cm zijn goed te bewerken (Nieuwenhuizen *et al.*, 2011). Aan de hand van beeldanalyse is een systeem gemaakt om aardappelopslag te herkennen (Nieuwenhuizen *et al.*, 2010).

Het toepassen van sensortechnologie voor onkruiddetectie is volop in ontwikkeling. Er komen regelmatig nieuwe machines op de markt waarin deze technologie is toegepast. De TRL hiervan wordt geschat op 6-8. De koppeling van hyperspectrale camera's aan drones is nog in het ontwikkelstadium, de TRL wordt geschat op 6.

### 3.6.2 Ziekten en plagen herkenning

Voor een optimale productie is ziekteherkenning en de schatting van de intensiteit en ruimtelijke verspreiding binnen een gewas van groot belang. Traditioneel wordt het stellen van een diagnoses gedaan door middel van visuele inspectie door experts of door microscopisch en/of microbiologisch onderzoek. Microbiologisch onderzoek wordt, na monsternamen over het algemeen in een laboratorium uitgevoerd. Inmiddels zijn er ook moleculaire biotoetsen beschikbaar (LAMP) die ter plekke in het veld met behulp van een draagbaar apparaat specifiek DNA of RNA van bacterie-, virus- of schimmelziekten kunnen detecteren (viroiden, insecten en nematoden is ook mogelijk). LAMP toetsen zijn zeer specifiek en hebben een vergelijkbare gevoeligheid als moleculaire toetsen die gebruikt worden in routine laboratoria. Een monster van blad, zaad, een insect, grond, lucht of substraat wordt gehomogeniseerd in een buffer. Het monsterextract of het controlemateriaal wordt vervolgens gemengd met specifieke, toetsafhankelijke LAMP-reagentia en een eventueel aanwezige ziekteverwekker gedetecteerd ([www.wageningenur.nl/healthyplantstofeetheworld](http://www.wageningenur.nl/healthyplantstofeetheworld)).

Het herkennen van plantenziekten aan de hand van zichtbare aantastingen of kenmerken is specialistisch werk en arbeidsintensief. De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid zijn over de jaren sterk verbeterd door de ontwikkeling van protocollen en verdergaande standaardisatie. Echter, visuele inspecties zijn onderhevig aan de subjectiviteit van de beoordelaar en verschillen tussen beoordelaars onderling. Sensortechnologie kan een rol spelen bij het objectief vaststellen van de detectie, identificatie en kwantificering van plantenziekten. Veranderingen in kleur, vorm, transpiratie, gewasstructuur en plant dichtheid kunnen worden bepaald aan de hand van de reflectie, temperatuur of fluorescentie (Mahlein, 2016).

Voor de detectie van plantenziekten worden verschillende typen sensoren gebruikt zoals RGB camera's (digitale camera's, smartphones, tablets ed.), multi- en hyperspectrale sensoren en fluorescentie metingen (Tabel 3).

Leafspot (HLB) is een diagnosedienst in ontwikkeling die op afstand ziektes en gebreksverschijnselen in aardappelen identificeert met behulp van beeldherkenning ([www.hlbbv.nl/diagnose-hlb-nl/leafspot](http://www.hlbbv.nl/diagnose-hlb-nl/leafspot)). Via een webapplicatie stuurt de teler een foto met GPS-coördinaten naar een centrale database, waar het expertsysteem op basis van de beelden i.c.m. bodem- en klimaatgegevens een conceptdiagnose stelt. Na de concept-diagnose volgt een laboratorium analyse ter bevestiging. Op termijn zal de lab-analyse niet meer nodig zijn vanwege de steeds uitgebreidere database. Leafspot levert dan een automatische diagnose van ziekten in gewassen inclusief een behandelingsadvies voor de teler.

Sensortechnologie waarmee ziekten, plagen en onkruiden gemeten kunnen worden is nog niet door ontwikkeld voor gebruik in adviessystemen. De TRL van de sensortechnologie wordt geschat op 6-8.

**Tabel 3** Overzicht van type sensoren voor het detecteren van plantenziekten (Bron: Mahlein, 2016).

Sensor	Gewas	Plantenziekte	Referentie	
<b>RGB</b>	Katoen	Bacterie ( <i>Xanthomonas campestris</i> ) <i>Ascochyta</i> meeldauw ( <i>Ascochyta gossypii</i> )	Camargo and Smith (2009)	
	Suikerbiet	<i>Cercospora</i> bladvlekken ( <i>Cercospora beticola</i> ), Suikerbiet, roest ( <i>Uromyces betae</i> ), <i>Ramularia</i> Bladvlekkenziekte ( <i>Ramularia beticola</i> ), Phoma bladvlekkenziekte ( <i>Phoma betae</i> ), bacteriële bladvlekkenziekte ( <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Aptata</i> )	Neumann et al. (2014)	
	Grapefruit	Citrus kanker ( <i>X. axonopodis</i> )	Bock et al. (2008)	
	Tabak	Anthraxose ( <i>Colletotrichum destructivum</i> )	Wijekoon et al. (2008)	
	Appel	Schurft ( <i>Venturia inaequalis</i> )	Wijekoon et al. (2008)	
	Canadese guldenroede	Roest ( <i>Coleosporium asterum</i> )	Wijekoon et al. (2008)	
	<b>Spectrale sensoren</b>	Gerst	Bladvlekkenziekte ( <i>Pyrenophora teres</i> ), Bruine roest ( <i>Puccinia hordei</i> ), Echte meeldauw ( <i>Blumeria graminis hordei</i> )	Kuska et al. (2015); Wahabzada et al. (2015a)
		Tarwe	Valse meeldauw ( <i>Fusarium graminearum</i> ) Gele roest ( <i>Puccinia striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i> )	Bauriegel et al. (2011); Bravo et al. (2003); Huang et al. (2007); Moshou et al. (2004)
Suikerbiet		<i>Cercospora</i> bladvlekkenziekte ( <i>C. beticola</i> ), roest ( <i>U. betae</i> ), Echte meeldauw ( <i>Erysiphe betae</i> ), Wortelrot ( <i>Rhizoctonia solani</i> ), Rhizomania ( <i>Beet necrotic yellow vein virus</i> )	Bergsträsser et al. (2015); Hillnhütter et al. (2011); Mahlein et al. (2010, 2012, 2013); Rumpf et al. (2010); Steddom et al. (2003, 2005)	
Tomaat		Aardappelziekte ( <i>Phytophthora infestans</i> )	Wang et al. (2008)	
Appel		Schurft ( <i>V. inaequalis</i> )	Delalieux et al. (2007)	
Tulp		Tulpenmozaïekvirus (TBV)	Polder et al. (2014)	
Suikerriet		Oranje roest ( <i>Puccinia kuehnii</i> )	Apan et al. (2004)	
<b>Thermische sensoren</b>		Suikerbiet	<i>Cercospora</i> bladvlekkenziekte ( <i>C. beticola</i> )	Chaerle et al. (2004)
		Komkommer	Valse meeldauw ( <i>Pseudoperonospora cubensis</i> ), Echte meeldauw ( <i>Podosphaera xanthii</i> )	Berdugo et al. (2014); Oerke et al. (2006)
		Appel	Schurft ( <i>V. inaequalis</i> )	Oerke et al. (2011)
	Roos	Valse meeldauw ( <i>Peronospora sparsa</i> )	Gomez (2014)	
	<b>Fluorescentie</b>	Tarwe	Roest ( <i>Puccinia triticina</i> ) Echte meeldauw ( <i>Blumeria graminis</i> f. sp. <i>tritici</i> )	Bürling et al. (2011)
Suikerbiet		<i>Cercospora</i> bladvlekkenziekte ( <i>C. beticola</i> )	Chaerle et al. (2004, 2007); Konanz et al. (2014)	
Boon		Bacterie ( <i>Xanthomonas fuscans</i> subsp. <i>fuscans</i> )	Rousseau et al. (2013)	
Sla		Echte meeldauw ( <i>Bremia lactucae</i> )	Bauriegel et al. (2014); Brabant et al. (2014)	

---

## 4 Klimaatsensoren

Nauwkeurige weerinformatie is van groot belang voor de agrarische sector. Het weer bepaald niet alleen de gewasproductie (licht, lucht en water) maar ook de uitvoering van de dagelijkse werkzaamheden (begaanbaarheid, optimaal bespuitings- en oogstmoment). Er zijn veel verschillende typen sensoren op de markt voor het meten van meteorologische parameters zoals temperatuur, (fotosynthetisch actieve) straling, luchtvochtigheid, windsnelheid, windrichting, luchtdruk en neerslag. Naast individuele sensoren zijn er ook gecombineerde systemen (weerstations) beschikbaar die afhankelijk van de klantspecifieke toepassing worden samengesteld.

Nederland beschikt over een uitgebreid netwerk van weerstations waar deze parameters gemeten worden. Daarnaast hebben telers soms een eigen weerstation. Een dergelijk weerstation wordt aangeschaft om plaats specifieke informatie over de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, neerslag, windsnelheid/windrichting en zonnestraling te hebben.

Er zijn verschillende leveranciers van sensoren zoals Dacom, Adcon, Apps for agri, Eijkelkamp Soil & Water en Davis instruments. Verschillende stations zijn telemetrisch, d.w.z. via een webpagina op te vragen al of niet met adviesmodules. De jaarlijkse kosten van een lease weerstation ligt vanaf €250,-. De aanschaf van een eigen station varieert van €500,- tot €4000,-. De weerstations kunnen aanvullend geleverd worden met bodemvochtsensoren. In Figuur 10 wordt een weerstation getoond. De TRL waarden van de klimaatsensoren en meetstations liggen hoog (8-9).

Trends: onderhoudsvrij, draadloos, goedkopere telecommunicatie (LORA), teelt en irrigatie adviesmodules.



**Figuur 10** Voorbeeld van een weerstation.

### 4.1 Meteorologische data openbare platforms

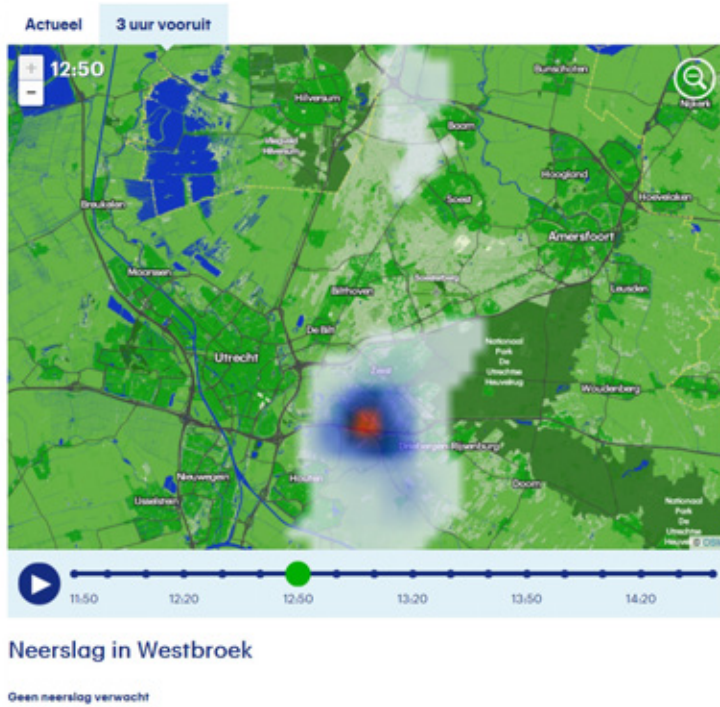
Op basis van weermodellen van bijv. KNMI of Meteogroup die gevoed worden met waarnemingen vanuit sensoren in satellieten en grondstations, worden weersvoorspellingen geleverd. Voor de lokale akkersituatie zal het altijd lastig blijven om voorspellingen goed te doen, zeker als het gaat om dagen vooruit 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 vrij beschikbare Buienradar en gebruikt kan worden om het tijdstip van spuiten, maaien en oogsten op af

te stemmen (Figuur 11 en 12) Naast Buienradar zijn er vele andere weervoorspellingen en services die te gebruiken zijn om klimaatgegevens relevant voor de teelt perceel-specifiek te verkrijgen (Figuur 13).

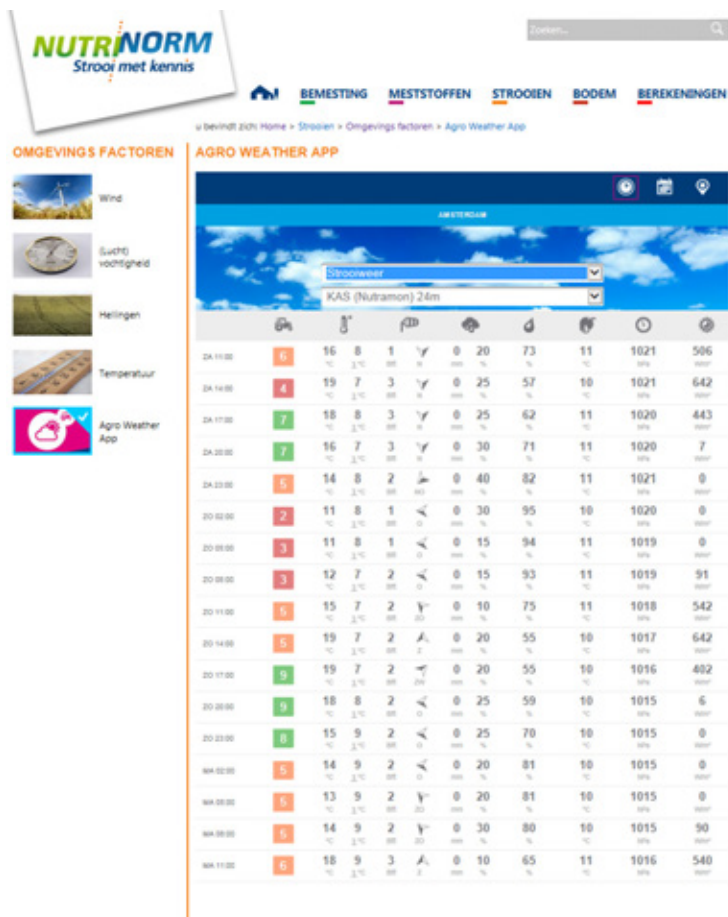


**Figuur 11** Buienradar ([www.buienradar.nl](http://www.buienradar.nl)).



**Figuur 12** Buienradar ([www.buienradar.nl](http://www.buienradar.nl)).





**Figuur 13** Strooiweert advies ([www.nutrinorm.nl/nl-nl/berekeningen/agro-weather-app](http://www.nutrinorm.nl/nl-nl/berekeningen/agro-weather-app)).

Telers hebben soms behoefte aan meteorologische metingen op perceelsniveau (micro-klimaat) ten behoeve van diverse adviesprogramma's. Daarvoor kunnen telers een eigen weerstation aanschaffen waarmee nauwkeurige informatie over o.a. de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, neerslag, windsnelheid, windrichting en zonnestraling kunnen worden gemeten. De specifieke perceelsgegevens van het weerstation worden ingelezen in een webapplicatie waarna een advies wordt gegenereerd voor bijvoorbeeld toepassing gewasbeschermingsmiddelen (optimale spuittijdstip, effectiviteit van het middel in relatie tot de weersomstandigheden en spuitintervallen) of berekening (berekeningsgift o.b.v. historische neerslaggegevens, bodemvochtstatus en microklimaat). Er zijn diverse aanbieders van weerpalen en -stations en daaraan gekoppelde adviesdiensten ([www.dacom.nl](http://www.dacom.nl); [www.agrovision.nl](http://www.agrovision.nl); [www.eijkelkamp.nl](http://www.eijkelkamp.nl); [www.sensoraide.com](http://www.sensoraide.com)).

Er worden ook adviesdiensten specifiek voor de landbouw aangeboden op basis van (algemene) weergegevens, dan is er geen weerstation nodig. ZLTO Berekeningssignaal berekent de benodigde berekeningsgift op basis van buirenradar en specifieke perceels- en bedrijfsgegevens. Voor melkveehouders berekent het programma ook het rendement van de berekening in relatie tot de aankoop van ruwvoer ([www.zlto.nl/berekeningssignaal](http://www.zlto.nl/berekeningssignaal)).

### Betrouwbaarheid

De TRL waarden van de klimaatsensoren en meetstations zijn hoog (8-9).



---

## 5 Oogstsensoren

For some properties of the potato tuber, a 3D descriptive model is needed. The size, volume, shape, and al values derived from these, can only be measured through a 3d model.

Different definitions for size are in use. One of the measures that is very common, is the square size. This size consists of the smallest square shaped hole in a flat metal plate that a potato will fit through. Another measure uses the same definition, but with a circular shaped hole.

'Length' by itself is not a clearly defined measure in a potato. Do we mean the longest possible length, or some other size?

To make clear choices about what exactly is meant by these measures, a 3D model is needed.

Starting from such a model, the square size can be determined without the slow and imprecise use of a mechanical filter. Length can be measured along the longest axis of inertia, which is also the most 'natural' definition of length of an irregular shaped body. And the volume, and from there, the density, can be derived with 'immersed in water' accuracy.

Many sensors and principles are available to measure the 3D shape of objects. Some of the most common include:

- Time of Flight (ToF) cameras measure the time light needs to travel from a light source to each pixel in the sensor. This results in an image including information about the distance (depth map). To create a full 3D reconstruction of, for instance, a potato, several cameras are needed to inspect the object from all sides. Resulting depth images must be combined using a shared coordinate frame through a process called *registration*.
- Stereo Imaging: by using two cameras, depth information can be obtained. This principle has many similarities to human vision. To obtain a full 3D model, multiple sets of stereo images are needed, involving a process much like ToF camera's.
- Laser ranging: a light source, in most cases a laser, and a camera are placed in slightly different angles towards the object. The position of the laser dot (or pattern) as seen on the sensor of the camera depends on the distance between the object and the camera. Through a proper calibration procedure, this can be translated to a depth map. Again, for a full 3d reconstruction, multiple sets are needed.
- Shape from Silhouette: Multiple cameras are placed around the object. Through dedicated lighting, only the silhouette of the object is highlighted. The combined silhouettes result in a 3D model.

Each of these principles has its own advantages and disadvantages, also depending on the application. WUR is now developing a system that aims at obtaining the previously mentioned measures of potatoes at high speed and accuracy. It uses a variation of the Shape from Silhouette principle; instead of area scan cameras, line scan cameras are used. Besides speed and accuracy, cost, size, and reliability were taken into consideration. Proof of principle is already achieved; work is now focusing on practice oriented implementation.

---

## 6 Overige sensoren

### 6.1 Radio-frequency identification (RFID)

Radio-frequency identification (identificatie met radiogolven, RFID) is een technologie om van een afstand informatie op te slaan in bijvoorbeeld producten/halffabricaten en verpakkingsmaterialen. Het systeem bestaat uit een RFID-tag (zender met 2 mm - 2 m bereik) die op of in een object zit en een 'reader' (ontvanger) die de tag-informatie uitleest en via een transponder doorstuurt naar een computer/decision support system (Dobkin & Wandinger, 2005).

In het licht van nationale en internationale ontwikkelingen zijn productkwaliteit en voedselveiligheid belangrijke aandachtspunten. Productkwaliteit heeft betrekking op de fysieke eigenschappen van voedselproducten (uiterlijk, geur, smaak en textuur). Handelspartners van de primaire sector stellen eisen met betrekking tot productkwaliteit en/of het gebruik van registratiesystemen. De primaire sector waarborgt hiermee de productkwaliteit en transparantie voor volgende schakels in de voedselproductieketen (tracking & tracing).

Toepassingen zijn legio, enkele voorbeelden:

- Producten/halffabricaten kunnen gedurende het hele productieproces en transport in de keten getraceerd worden (Tracking en tracing). Productiefouten en/of problemen kunnen gemakkelijk worden opgespoord;
- Voorkomen van foutieve afleveringen ('smart packaging'). Afwijkingen van de geplande route kunnen worden gezien en gecorrigeerd;
- De RFID-tags kunnen de temperatuur van de producten en de omgeving meten. Wanneer de temperaturen niet overeenkomen met de optimale temperatuur (bijvoorbeeld tijdens bewaren) kan de temperatuur aangepast worden naar het optimale niveau;
- In de veehouderij worden RFID tags gebruikt voor o.a. registratie van foeragegedrag van dieren ([www.isense.farm](http://www.isense.farm)).

RFID-tags zijn duurzamer dan barcodes, de techniek is uitermate geschikt voor het lokaliseren en volgen van mobiele eigendommen (TRL: 8-9). De prijs ligt momenteel rond de € 0.01.

### 6.2 Biosensoren

Een biosensor is een apparaat voor het opsporen van moleculen dat een biologische component als gevoelig element combineert met een fysicochemische uitlezing. Een biosensor bestaat uit 3 delen: een gevoelig biologisch element (biologisch materiaal (als weefsel, micro-organismen, organellen, celreceptoren, enzymen, antilichamen, DNA, ...), een doorgeeffluik (transducer) en een fysicochemische detector (gebaseerd op een natuurkundig en/of scheikundig fenomeen; optisch, elektrochemisch, thermometrisch, piezoelektrisch of magnetisch). Biosensoren kunnen uitwendig of inwendig (als implantaat) toegepast worden. Het gebruik van biosensoren in open teelten is nog geen gemeengoed, maar het gebruik hiervan komt wel dichtbij. Zo zijn er biosensoren voor detectie van stammen van pathogene schimmels.

# 7 Gewasmodellen

## 7.1 Modellen

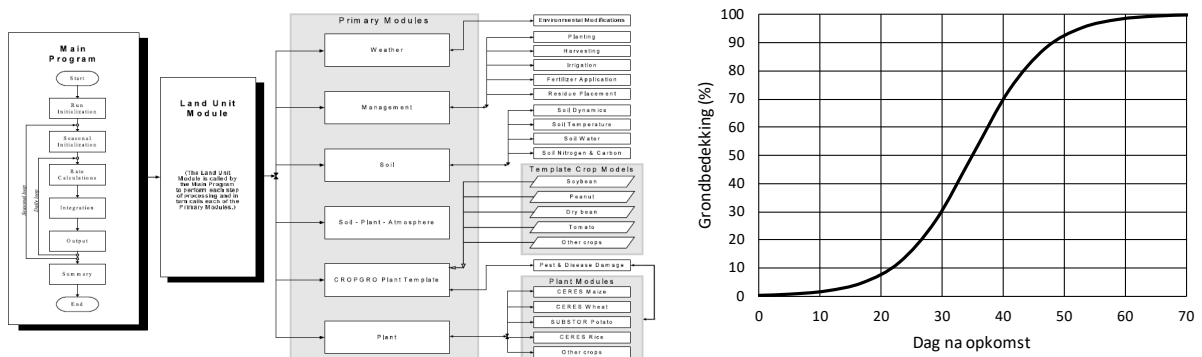
Precisielandbouw maakt in toenemende mate gebruik van modellen. In deze inventarisatie worden modellen bedoelt waarmee groei- en opbrengstvoorspellingen kunnen worden uitgevoerd. Modellen zijn meer of minder geavanceerde rekenregels waarmee relaties kunnen worden verklaard en waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan. Er bestaan grofweg twee typen:

- Mechanistische (verklarende) modellen en
- Empirische (beschrijvende) modellen.

Een mechanistisch model beschrijft relaties aan de hand van de onderliggende processen: biologische, fysische en/of chemische processen, waarmee de processen vervolgens worden verklaard. Deze modellen kenmerken zich door een toenemende complexiteit omdat onderliggende processen in steeds meer detail beschreven kunnen worden. Een empirisch model beschrijft relaties tussen de verschillende componenten en gaat daarmee voorbij aan de onderliggende processen. De onderlinge processen zijn een "black box" en de empirische relatie beschrijft het gedrag van deze black box. Mechanistische modellen hebben doorgaans ook een empirisch gedeelte omdat niet alle processen op dit moment mechanistisch beschreven kunnen worden. Uiteindelijk is er een stukje black box in mechanische modellen. Deze black boxes worden ontrafeld en mechanistisch beschreven. Zo neemt de complexiteit van een mechanisch model verder toe.

In de verdere beschrijving van modellen wordt in eerste instantie geen duidelijk onderscheidt gemaakt tussen mechanistische en empirische modellen (Figuur 14). Daar waar nodig wordt het type model genoemd. Een model beschrijft één of meerdere processen dan wel relaties. Er is sprake van een enkelvoudig model als het één proces of relatie beschrijft en sprake van samengestelde modellen als het meerdere processen of relaties beschrijft. De toename van de technische mogelijkheden van computers stimuleert het gebruik van samengestelde modellen.

In deze inventarisatie wordt in eerste instantie ingegaan op de enkelvoudige modelcomponenten van samengestelde modellen, met een focus op het gewas aardappelen. Dit is gedaan omdat in principe iedere mogelijke combinatie van enkelvoudige modellen kan worden gerealiseerd. Of deze enkelvoudige modellen nu mechanistisch of empirisch zijn maakt niet uit, ze kunnen allemaal aan elkaar gekoppeld worden.



**Figuur 14** Een schematische voorstelling van 1) een samengesteld mechanische model met verschillende enkelvoudige modellen: CROPGRO, Soil en Plant (Jones et al. 2003)(links) en 2) een empirisch model: sigmoïde curve voor grondbedekking van bladeren (rechts).

## 7.2 Basisstructuur voor modelberekeningen

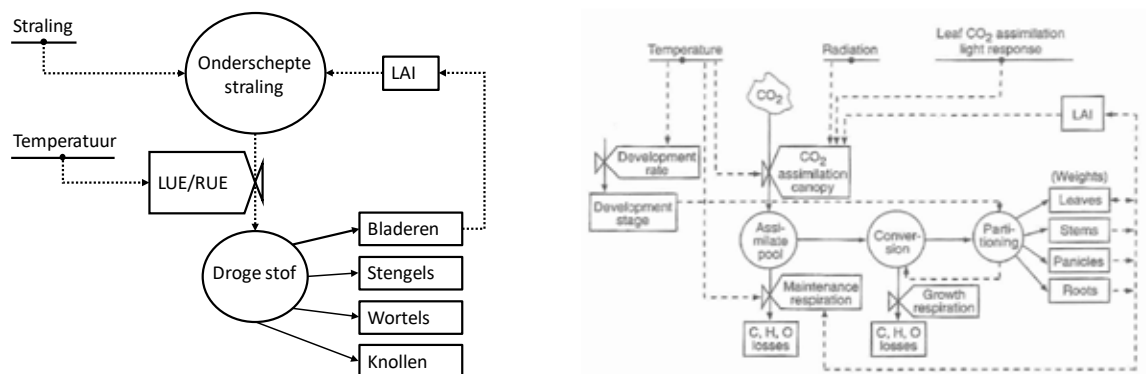
Biologische processen zijn dynamisch. Om dynamische processen hanteerbaar te maken voor modellen is er een algemene structuur ontwikkeld. De tijdschaal waarop de dynamische processen van de meeste modellen worden berekend is 1 dag. Per dag worden de veranderingen berekend en aan het einde van de dag wordt een afrekening gemaakt zodat aan het begin van de nieuwe dag de uitgangssituatie vaststaat voor de nieuwe berekeningen. Sommige dynamische processen, bijvoorbeeld voor waterbalansen, vereisen vaak kleinere tijdstappen. Deze processen worden doorgaans apart berekend en uiteindelijk meegenomen in de afrekening aan het einde van de dag.

## 7.3 Modellen voor de berekening van potentiële groei en opbrengst

### 7.3.1 Potentiële groei- en opbrengst

De potentiële groei en opbrengst van gewassen kan gedefinieerd worden als de maximale groei en opbrengst bij de beschikbare straling, de heersende temperatuur en gewaseigenschappen onder optimale voorziening van water en bij afwezigheid van groeireducerende factoren (van Ittersum & Rabbinge 1997). De meeste gewasgroeimodellen zijn ontwikkeld om in eerste instantie deze potentiële groei en bijbehorende opbrengsten via berekenen te voorspellen met behulp van de actuele temperatuur, actuele straling en gewasspecifieke parameters (Figuur 15). Zelden worden echter in de praktijk deze potentiële groei en opbrengst behaald. De actuele omstandigheden zijn vaak suboptimaal, waardoor groei en opbrengsten lager zijn dan potentieel. Modellen die groei en opbrengsten voorspellen en rekening houden met suboptimale omstandigheden, zijn veel complexer. De effecten van reducerende omstandigheden worden vaak getrapt uitgevoerd: water gelimiteerd, stikstof gelimiteerd en effect van ziekten en plagen op groei en opbrengst.

Daarnaast voorspellen modellen groei en opbrengst voor een standaard oppervlakte eenheid, hectare, via de standaard tijdstap van een dag. De variatie van straling en temperatuur is voor een hectare gering waardoor deze eenheid weinig of een beperkte invloed heeft op de nauwkeurigheid van de voorspellingen voor potentiële groei en opbrengst. Ook de tijdstap van 1 dag is een goede keuze voor voldoende nauwkeurigheid. De voorspellingen met berekeningen waarin de reducerende factoren zijn opgenomen verliezen echter aan nauwkeurigheid. Dit komt omdat vaak niet voldaan wordt aan de veronderstelde homogeniteit van de reducerende factoren. Het duidelijkste voorbeeld is de reducerende factor voor water. Waterbeschikbaarheid hangt af van de bodem en die is zelden homogeen per ha. Een andere bodemsamenstelling resulteert in een andere beschikbaarheid van water en daarmee in een andere reductiefactor met andere bijbehorende groei en opbrengst.



**Figuur 15** Een schematische voorstelling van een LINTUL-gewasgroeimodel (links) en een fotosynthese-gewasgroeimodel (Kropff et al. 1994) (rechts). (LAI= leaf area index; LUE/RUE = light/radiation use efficiency).

### 7.3.2 Beschikbare modellen voor potentiële groei en opbrengstvoorspellingen

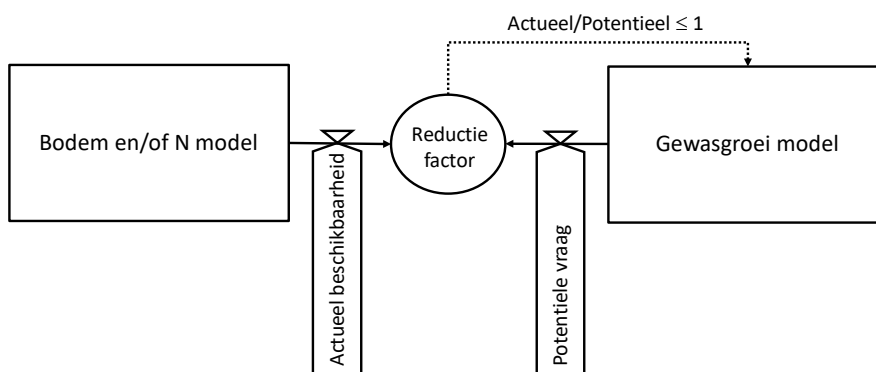
Er zijn grofweg twee modelstructuren voor de voorspelling/berekening van de potentiële groei en opbrengst. De eerste modelstructuur is relatief eenvoudig met een beperkte behoefte aan input parameters. Deze structuur is gebaseerd op de conversie van onderschepte straling of licht in drogestof, de zgn. radiation of light use efficiency (RUE/LUE, Tabel 4, Figuur 13, links). Vanuit de verdeling van drogestof over de verschillende organen wordt de potentiële opbrengst berekend. Binnen deze groep van modellen bestaan verschillende methoden voor de berekening van de bladontwikkeling van kiemen tot gesloten gewas waardoor kleine verschillen kunnen ontstaan in de potentiële opbrengstberekeningen. De belangrijkste parameters van deze groep modellen is de conversiefactor van onderschepte straling naar drogestof (gewas- en/of cultivar specifiek) en de verdeling van de drogestof over de verschillende organen. Deze parameters zijn constant binnen een groot temperatuurbereik.

De tweede modelstructuur is complexer met een grotere behoefte aan gewasspecifieke parameters en gebaseerd op de fotosynthese. Via de berekening van de fotosynthese in combinatie met onderschepte straling en de temperatuur, wordt berekend hoeveel suikers worden gevormd. Na aftrek van de suikers nodig voor de eigen onderhoudsprocessen (ademhaling) en een conversiefactor wordt berekend hoeveel drogestof uiteindelijk beschikbaar is voor verdeling over de verschillende organen (Figuur 1, rechts). In deze modelstructuur is het gebruikelijk dat de bladontwikkeling via toename en afname wordt berekend en temperatuur speelt een grotere rol bij deze meer op de fysiologie van gewassen gebaseerde berekeningen.

## 7.4 Modellen voor de berekening van reducerende factoren

### 7.4.1 Reductiefactoren

Vanuit de gewasgroeimodellen wordt de vraag naar water en/of stikstof geformuleerd, de potentiële vraag (Figuur 16). De bodemtoestand wordt getoetst op de beschikbaarheid om aan de vraag te voldoen, de actuele beschikbaarheid. Als de bodemtoestand onvoldoende is om aan de vraag te voldoen wordt een reductiefactor berekend waarmee de potentiële groei wordt gereduceerd. Daarbij wordt de grootste reductiefactor gebruikt om de groei te reduceren. De nauwkeurigheid van de voorspellingen neemt aanzienlijk af bij de introductie van deze reductiefactor(en). Het voorspellen van groei en opbrengsten met modellen onder suboptimale omstandigheden is een stuk complexer en lastiger dan voorspellen voor potentiële omstandigheden. De grootste rede hiervoor is de heterogeniteit van de reductiefactor. Deze heterogeniteit komt grotendeels voort uit de wisselende samenstelling van de bodem.



**Figuur 16** Basisschema voor de berekening van een reductiefactor.

---

## 7.4.2 De reductiefactor voor water

Modellen die berekenen hoe de waterhuishouding wordt geregeld maken grofweg gebruik van twee modelstructuren. De eerste modelstructuur is relatief eenvoudig met een beperkte behoefte aan input parameters. Deze structuur is gebaseerd op het "tipping bucket" model (Tabel 4). In deze benadering wordt de bodem ingedeeld in één of meerdere lagen die kunnen volstromen met water en overstromen als ze vol zijn. Water kan deze "Bucket" alleen verlaten via overstromen of via verdamping aan bodemoppervlak en verdamping via de plant. De onderkant van de bodemlaag is waterdicht. De bodemlagen die niet grenzen aan het grondoppervlak kunnen daardoor alleen water verliezen via de plant of via overstromen. Bij welke hoeveelheid water in deze bodemlaag overstroming optreedt en bij welke hoeveelheid water een gewas droogtestress ervaart, hangt af van de samenstelling van de bodem: van de deeltjesgrootte verdeling, van het percentage organische stof maar ook van de structuur (dichtheid) van de bodem. De afrekening van de dynamische processen verdamping en overstroming in dit type modellen is per dag.

De tweede modelstructuur is complexer met een grotere behoefte aan parameters en gebaseerd op één of meerdere wiskundige vergelijkingen (o.a. Richards vergelijking, Tabel 4). Met deze vergelijkingen wordt binnen een tijdstap een evenwichtssituatie berekend tussen vraag naar water enerzijds en de beschikbaarheid van water anderzijds met als resultaat de berekende opname van water.

Het grootste verschil tussen de twee modelstructuren is dat deze meer complexe berekeningen transport van water over de onderkant van de bodemlaag meenemen in de berekeningen, de zgn. capillaire stijging. Capillaire stijging en verdamping zijn continue processen waardoor de complexiteit van het berekenen van de evenwichtssituatie sterk toeneemt.

Een geheel andere benadering voor het berekenen van een reductiefactor voor potentiële productie door water zijn de zgn. HELP tabellen (Her-Evaluatie van LandinrichtingsPlannen), opgesteld in 1983 door de toenmalige Dienst Landelijk Gebied (DLG). De relatie tussen grondwatertrap en bodemtype is empirisch beschreven en geeft voor een bepaald gewas een reductiefactor voor de potentiële opbrengst, "een opbrengstderivingfactor". De potentiële opbrengst wordt vervolgens verminderd met deze reductiefactor. Na enkele actualiseringen, de laatste door EC-LNV in 2001, zijn de HELP-tabellen door Brouwer en Huinink (2002) aan de Nederlandse bodemkaarten met een schaal van 1 : 50.000 gekoppeld. De reductiefactor is een waarde die per gewas en grondsoort uit een tabel wordt afgelezen en nadrukkelijk rekening houdt met zowel opbrengst als kwaliteitsverlies door de te natte of droge omstandigheden (Brouwer & Huinink 2002). De tabellen zijn, aldus Brouwer en Huinink (2002) dan ook primair bedoeld voor het vaststellen van de bedrijfseconomische gevolgen van landinrichtingsprojecten.

Een belangrijk onderscheid tussen de eerste twee methoden en de derde methode voor het berekenen van de gereduceerde groei is het moment waarop de reductie op de potentiële groei wordt doorgevoerd. De eerste twee methoden zijn ontwikkeld met een reductiefactor per dag, de derde is ontwikkeld met een reductiefactor aan het einde van de teelt.

## 7.4.3 De reductiefactor voor stikstof

Modellen die berekenen hoe de stikstofhuishouding wordt geregeld bestaan uit meerdere delen. Naast het berekenen van de vraag wordt ook de beschikbaarheid berekend. Modellen voor de berekeningen van de vraag naar stikstof zijn betrekkelijk vergelijkbaar. Via de berekening van de potentiële groei wordt de potentiële vraag naar stikstof berekend. Vanuit de bodem wordt de beschikbaarheid berekend en daarna de uiteindelijke opname. Voor het berekenen van de beschikbaarheid van stikstof voor opname door het gewas worden verschillende modellen gebruikt. De eenvoudigste modellen berekenen de beschikbaarheid via de aanvoer van kunstmeststoffen. De complexere modellen houden rekening met de bodemsamenstelling en de stikstof die vrijkomt uit de afbraak van organische stof. Temperatuur heeft een grote invloed op de afbraak van organische stof en het vochtgehalte van de bodem heeft in mindere mate een invloed op de afbraak van organische stof.

---

#### 7.4.4 De reductiefactoren voor ziekten en plagen

Modellen die effecten van ziekten en plagen op de groei en opbrengst berekenen worden in het kader van deze studie niet meegenomen.

### 7.5 Informatiebehoefte modellen

Een model heeft grofweg twee soorten informatie nodig, invoergegevens en modelparameters. Invoergegevens zijn de actuele gegevens die met de actuele omstandigheden te maken hebben zoals de weersgegevens, plantdatum, oogstdatum, bodemtype en samenstelling van de bodem. De meeste gewasgroeimodellen hebben informatie nodig over de straling, temperatuur, soms ook de relatieve luchtvochtigheid en de windsnelheid maar ook gegevens over de teelt zoals plantdatum/opkomstdatum en oogstdatum. Modelparameters behoren bij het model en zijn doorgaans onafhankelijk van de actuele omstandigheden. Dit zijn bijvoorbeeld parameters voor verschillende gewassen of rassen, of parameters die de verdeling van drogestof naar organen regelen. De LUE of RUE voor aardappelen is constant voor verschillende locaties maar anders dan voor bijvoorbeeld tarwe (Sinclair & Muchow 1999). De LUE of RUE is daardoor een modelparameter en de gebruiker dient alleen het gewas aan te geven. Het model kiest de bijbehorende modelparameter(s).

### 7.6 Toepassing van groei en opbrengst voorspellende modellen

Groei en opbrengst voorspellende modellen kunnen op verschillende manieren worden gebruikt. Naast het uitvoeren van voorspellingen voorafgaande aan een teeltseizoen is het ook wenselijk om op een gegeven moment tijdens de teelt een voorspelling van de groei en opbrengst uit te voeren. Als de beginwaarden van de voorspelling gebaseerd zijn op de actuele stand van zaken neemt de nauwkeurigheid van deze voorspelling toe. Terug kijkend naar de vorige berekening(en) kan gebruikt worden om afwijkingen tussen voorspelling en actuele situatie vast te stellen en de voorspellingen te verbeteren. Deze strategie wordt "forecasting and backcasting" genoemd. Om de verschillende toepassingen mogelijk te maken moeten de modellen aan een aantal eisen voldoen. De eisen hebben betrekking op de vraag naar invoerparameters (behapbaar), de oppervlakte-eenheid (perceelniveau) en naar de mogelijkheden om de voorspellingen te verbeteren door invoer van actuele gegevens.

#### 7.6.1 De vraag naar specifieke parameters

Het is in de meeste praktijksituaties niet mogelijk om heel veel specifieke parameters vast te stellen. In een onderzoekssituatie is het mogelijk om een model te kalibreren en zo de specifieke parameters te meten, te herleiden of berekenen, waardoor het model specifiek toepasbaar wordt voor de gegeven locatie. Bij opschaling van het gebruik naar praktijksituaties is dit echter niet haalbaar. Het is daarom wenselijk om modellen te selecteren waarbij aan de vraag van de belangrijkste parameters met voldoende nauwkeurigheid kan worden voldaan.

#### 7.6.2 Perceelniveau

De meeste modellen worden in de praktijk op perceelniveau gebruikt. De heterogeniteit van de bodem per ha en op perceelniveau is een belangrijke factor en speelt een grote rol bij de nauwkeurigheid van de voorspellingen waarin de reducerende factoren worden meegenomen. In onderzoekssituaties worden daarom percelen met een zo homogeen mogelijke bodem geselecteerd. In de praktijk kan zelden aan deze voorwaarde worden voldaan en het is ondoenlijk om voldoende gedetailleerd de bodem op veranderende samenstelling via bodembemonstering te analyseren.

---

### 7.6.3 Invoer actuele gegevens in berekeningen

Om forecasting and backcasting mogelijk te maken is het noodzakelijk dat de modellen actuele gegevens kunnen gebruiken voor de start van de voorspelling. De mogelijkheid om tijdens een berekening actuele gegevens te kunnen gebruiken heet data assimilatie. Niet alle modellen zijn zo gemaakt dat dit mogelijk is.

## 7.7 Afwegingen en modelkeuze

### 7.7.1 Groei- en opbrengst voorspellende modellen

Voor het gebruik van gewasgroeimodellen is de behoefte aan parameters de belangrijkste overweging voor de keuze. Voor de meeste Nederlandse akkerbouwgewassen zijn de parameters voor potentiële groei en opbrengst bekend maar minder voor specifieke rassen per gewas. Dit zou ervoor pleiten om in eerste instantie voor een model te kiezen dat voor de gewassen een representatieve groei en opbrengstvoorspelling kan geven, de modellen die gebruik maken van de RUE of LUE.

De gewasgroeimodellen hebben nauwelijks of geen last van de oppervlakte eenheid waardoor hiervoor geen beperkingen gelden ten aanzien van de keuze. Tevens is het theoretisch mogelijk om bij beide groepen van gewasgroeimodellen berekeningen te starten tijdens de teelt met actuele gegevens maar niet alle modellen hebben deze optie ook operationeel. Van de modellen die gebruik maken van RUE of LUE is deze optie niet beschikbaar bij STICS en APSIM.

### 7.7.2 Modellen voor de berekening van reducerende factoren

#### 7.7.2.1 Water

Ook bij deze modellen is de behoefte aan parameters een belangrijke overweging voor de keuze. De behoefte aan parameters is bij tipping bucket modellen minder dan bij modellen met de Richards vergelijking. In sommige situaties is het echter nodig om rekening te kunnen houden met capillaire stijging. Op percelen waar de grondwaterstand ondiep is kan via capillaire stijging in droge perioden water vanuit het grondwater worden aangevoerd naar de bouwvoor. In een dergelijke situatie is een model dat capillaire stijging ook meeneemt een betere keuze.

#### 7.7.2.2 Stikstof

De berekeningen die alleen de kunstmestgift meenemen in de berekeningen zijn relatief eenvoudig. Ook de andere bodemmodellen hebben een beperkte behoefte aan parameters. De chemische samenstelling van de bodem verandert langzaam, eerder in termen van jaren dan van dagen, waardoor een analyse lang gebruikt kan worden. Ook is de analyse eenvoudig en valt binnen het pakket dat boeren in Nederland standaard uitvoeren.



**Tabel 4** Overzicht van meervoudige modellen op perceelniveau gebaseerd op informatie van Van Ittersum et al. (Van Ittersum et al. 2003).

Model	Beheer der	Schaal niveau	Gebruik (onderzoeker/praktijk)	Code openbaar (wel/niet)	Geschikt voor praktisch advies (ja/nee)	Productie situatie	Berekeningsmethode	Bron
WFOST	WER	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Tipping bucket	(Boogaard et al. 1998)
LINTUL-POTATO -DSS	WPR	Perceel	Onderzoek/praktijk	Niet	Nee/Ja	N-gelimiteerd	QUEFTS	(Janssen et al. 1990)
SUCROS <sup>3</sup>	WPR	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Light use efficiency Tipping bucket	(Haverkort et al. 2015)
ROTASK <sup>4</sup>	WPR	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Tipping bucket	(Van Laar et al. 1997)
TIPSTAR	WPR	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Light use efficiency Tipping bucket	(Jongschaap 1997)
NPOTATO	WPR	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	N-gelimiteerd	Dynamisch	
SWAP	WER	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Ziekten en plagen	Groireductiefactoren enkele ziekten/plagen	
WAVE	UCL	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Tipping bucket	(Jansen 2008)
DSSAT-CSM (SUBSTOR POTATO)	UF	Perceel	Onderzoek/praktijk	Wel	Nee/Ja	Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Tipping bucket	(Verberne et al. 1990)
APSIM	WER	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	N-gelimiteerd	Dynamisch	(Wolf 2002)
	UCL	Perceel	Onderzoek	Wel	Nee	Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Richards vergelijking	(Dam 2000; Feddes et al. 1988)
						Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Richards vergelijking	(Kroes et al. 2000)
						N-gelimiteerd	SOILN/LEACHN <sup>1</sup>	(Vanclooster et al. 1994)
						Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese	(Verhagen 1997)
						N-gelimiteerd	SOILN/LEACHN <sup>1</sup>	(Bergström et al. 1991)
						Potentieel water gelimiteerd	Fotosynthese Tipping bucket	(Griffin et al. 1993; Jones et al. 2003)
						N-gelimiteerd	CENTURY	(Parton 1996)
						Potentieel water gelimiteerd	Radiation use efficiency	(Wang et al. 2002)
						N-gelimiteerd	Dynamisch	
						Potentieel water gelimiteerd	Transpiration	(McCown et al. 1996)
						Potentieel water gelimiteerd	Richards vergelijking	
						Potentieel water gelimiteerd	Radiation use efficiency	(Brisson et al. 2003)
						N-gelimiteerd	Dynamisch	

---

## 8 Conclusies

De doelstelling van het E-pieper project is aantonen dat o.b.v. sensor-data en gewasgroeimodellen adviezen en inzichten kunnen worden gegenereerd op het gebied van kwaliteitsmonitoring, sturing in de aardappelteelt en bij inschuring die zinvol zijn voor telers. Ofwel 'laten zien dat het werkt' en het creëren van draagvlak bij telers en adviseurs. De werking moet worden aangetoond op verschillende pilot-bedrijven. Daarvoor moeten er keuzes worden gemaakt welke sensordata en gewasgroeimodellen nodig zijn, inrichting van de data-infrastructuur en aan welke minimale voorwaarden de pilot-bedrijven moeten voldoen. Onderstaand wordt daartoe een voorstel gedaan dat zal worden voorgelegd aan het Steering Committee van het E-pieper deelproject die hierover een beslissing zal nemen.

### *Sensoren*

In het kader van het DISAC E-pieper project is een overzicht samengesteld van de verschillende meetprincipes en bijbehorende sensoren voor het meten van bodem-, gewas-, klimaat- en oogstparameters. Uit het overzicht blijkt dat er veel verschillende sensoren en meetsystemen beschikbaar zijn maar dat de praktische toepasbaarheid kan sterk variëren, van alleen een proof-of-concept tot bewezen bruikbaar in praktijksituaties. Voor het meten van de bodemparameters wordt geadviseerd gebruik gemaakt van sensorsystemen die zich in de praktijk hebben bewezen (o.a. Veris scan, YARA N-sensor). Ter validatie en als backup wordt aanbevolen de parameters ook te bepalen door middel van laboratorium analyses van grondmonsters. Additioneel zijn twee prototype sensoren toegevoegd voor bepaling van bodemnutriënten en microbiële activiteit. De nutriënten sensor wordt ontwikkeld binnen het DISAC N-sensing deelproject. De bovengrondse biomassa en het stikstof gehalte zijn belangrijke parameters om de gewasontwikkeling gedurende het seizoen te kunnen volgen en te sturen. De gewasontwikkeling kan elke 10 dagen in beeld worden gebracht met behulp van een Bioscope-biomassakaart. Ter validatie is het aan te bevelen op verschillende momenten gedurende het groeiseizoen het N-gehalte in het gewas te bepalen d.m.v. laboratorium bepalingen ('bladsteeltjes-methode'). Gezien de doelstelling van het project 'laten zien dat het werkt' wordt voorgesteld bestaande adviesmodules te gebruiken voor het adviseren van de telers m.b.t. toepassing van bodemherbiciden, Phytophthora bestrijding, loofddoding en N-bijbemesting (geen ontwikkeling nieuwe modules). Voor het genereren van adviezen is het van belang dat er naast een lokale weervoorspelling ook een aantal meteorologische parameters op perceelsniveau worden gemeten. Hiervoor zijn diverse systemen (weerstations) beschikbaar. Opbrengstkaarten worden waar mogelijk met behulp van de oogstmachines gemaakt. Specifieke knolparameters worden batchgewijs voor inschuring met behulp van lijnscanners en een 3D model bepaald (Shape from Silhouette principle). Aanvullend worden enkele parameters als schildikte en suikergehalte 'handmatig' bepaald.

Tabel 5 geeft een overzicht van de parameters die op de betreffende percelen van de voorbeeldbedrijven minimaal verzameld zouden moeten worden en de sensorsystemen die daarvoor het meest geschikt zijn.

### *Modellen*

Uit de inventarisatie van gewasgroeimodellen blijkt dat er meer en minder geavanceerde modellen bestaan waarmee groei- en opbrengstvoorspellingen kunnen worden uitgevoerd. Voor de meeste Nederlandse akkerbouwgewassen zijn de modelparameters voor potentiële groei en opbrengst bekend. Dit pleit ervoor om voor een model te kiezen dat is gebaseerd op de conversie van onderschepte straling of licht in droge stof (RUE of LUE) en rekening houdt met suboptimale omstandigheden (water en stikstof gelimiteerd). Geadviseerd wordt om hiervoor het Tipstar model te gebruiken. Hiermee kan voor het betreffende gewas een representatieve groei en opbrengstvoorspelling worden berekend. Naast de modelparameters zijn ook invoergegevens nodig die de actuele omstandigheden karakteriseren zoals de weersgegevens, plantdatum, oogstdatum, bodemtype en samenstelling van de bodem. De meeste gewasgroeimodellen hebben informatie nodig over de straling, temperatuur, soms ook de relatieve luchtvochtigheid en de windsnelheid. De geadviseerde sensorsystemen kunnen hierin voorzien.

### Voorwaarden voorbeeldbedrijven

Om aan de projectdoelstellingen te kunnen voldoen zijn enkele minimale voorwaarden geformuleerd waaraan voorbeeldbedrijven met betrekking tot PL-technieken aan zouden moeten voldoen. Deze hebben met name betrekking op (sensor)data, beslisregels, IT-infrastructuur en mechanisatie.

Deze zijn:

- Affiniteit met PL-technologie ('early adopters') en bereid zijn hier 2 a 3 jaar aan mee te werken.
- Het hebben van een digitaal teeltregistratiesysteem (FMIS).
- Het hebben van een nauwkeurig GPS-systeem en machinesturing (RTK).
- Het hebben/kunnen werken met een datamanagement-platform (zoals Akkerweb, Crop-R, 365 Farmnet, FarmWorks of gelijkwaardig). Toegang hebben tot open data via o.a. de platforms.
- Het hebben of laten maken van bodem- en gewaskaarten die variatie binnen percelen in kaart brengen. De PL-technieken hiervoor zijn beschikbaar en betaalbaar. Het hebben van opbrengstkaarten is een pré.
- Toegang hebben tot adviesmodules horend bij PL-toepassingen in webservices (voor de geprioriteerde PL-toepassingen zijn adviesmodules beschikbaar, kan via datamanagement platforms).
- Het kunnen inzetten van machines die variabel kunnen doseren van de PL-toepassingen. Het betreft hier m.n. planters, strooiers, spuiten en oogstmachines.
- Tolsma-Grisnich bewaarstechniek.
- Voldoende connectiviteit op het bedrijf (internet, uitwisseling taakkaarten tussen computer en machines).

**Tabel 5** Overzicht van de parameters die op de betreffende percelen van de pilot-bedrijven minimaal verzameld zouden moeten worden en de sensorsystemen die daarvoor het meest geschikt worden geacht (detail informatie beschikbaar).

Bodemparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Geleidbaarheid (EC)	perceelsscan	Veris MSP3, EM38	
	puntmeting		Eijkelkamp; On-line
Lutum-gehalte	perceelsscan	Veris MSP3, EM38	
Organische stof	perceelsscan	Veris MSP3, EM38	
pH	perceelsscan	Veris MSP3, EM38	
Bodemvocht	Puntmeting	diverse	Schokbelasting; CO2
	Puntmeting		Eijkelkamp
Bodemtemperatuur	Puntmeting	diverse	Schokbelasting; CO2
	Puntmeting		Eijkelkamp
Lutum-gehalte; organische stof; pH	Puntmeting (grondmonster)	Lab-bepaling	
NPK	puntmeting		Eurofins, Eijkelkamp
Nutriënten	puntmeting	prototype	DISAC N-sensing deelproject
Bodemactiviteit	puntmeting	prototype	Eijkelkamp; Microbiële activiteit
Gewasparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Biomassa	perceelsscan	Bioscope	Elke 10 dagen biomassa kaart beschikbaar
N status	puntmeting	Lab-bepaling	Bladsteeltjes-methode
Gewasgroei	modelmatig	Tipstar gewasgroeimodel	water en N gelimiteerd, geschikt voor de betreffende locatie; weervoorspelling en bodemvocht parameters
Toepassing bodemherbiciden; Phytophthora bestrijding; loofdoding; N-bijbemesting	Advies-modellen	webservices	
Klimaatparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Temperatuur	Puntmeting	weerstation	
RV	Puntmeting	weerstation	
Neerslag	Puntmeting	weerstation	
Windsnelheid	Puntmeting	weerstation	
Windrichting	Puntmeting	weerstation	
Straling	Puntmeting	weerstation	
Lokale weervoorspelling		webservices	

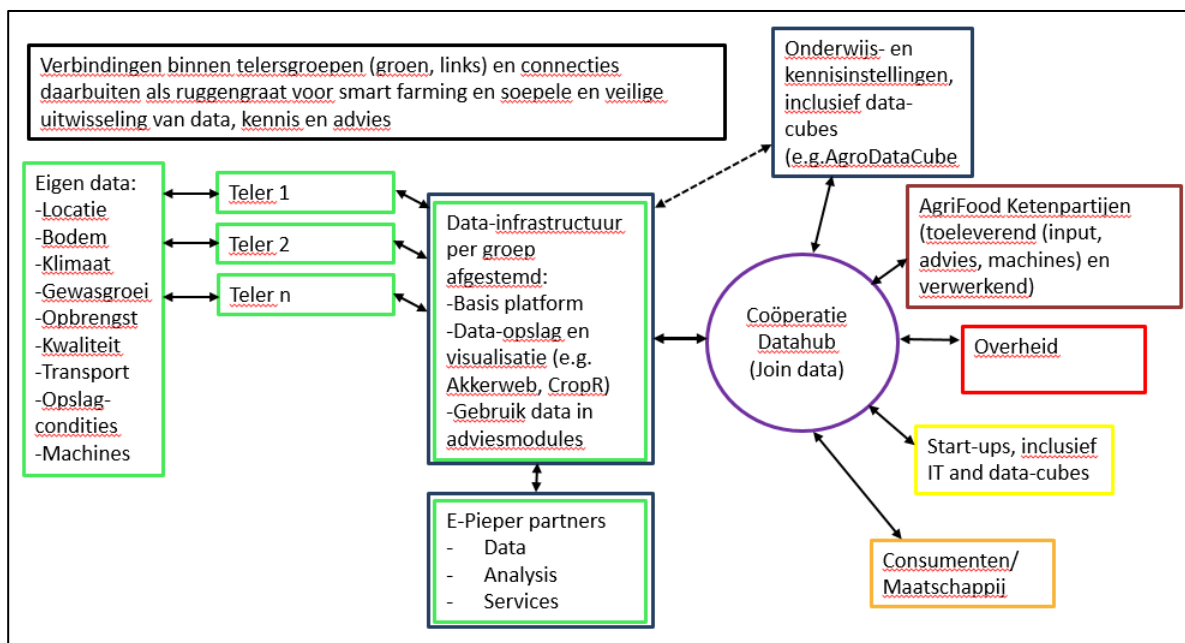
Oogstparameter	Meting	Sensorsysteem	Opmerkingen
Opbrengst	perceelscan	Load-cell	opbrengstkaarten via oogstmachines
Knolmaat	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks
Knolvolume	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks
Onderwatergewicht	Per knol	3D Model	Batchgewijs, 50 stuks i.c.m. weegsensor
Schildikte	Per knol	handmatig	Batchgewijs
Suikergehalte	Per knol	Lab-bepaling	Batchgewijs

### Data infrastructuur

Naast het onderzoek naar de beschikbaarheid van sensoren en modellen zoals beschreven in dit rapport heeft TNO onderzoek gedaan welke data-architectuur, -infrastructuur en -analytics het beste toegepast kunnen worden in een E-Pieper systeem (Figuur 15). Omdat de beoogde data-infrastructuur door verschillende stakeholders/(eind)gebruikers gebruikt moet kunnen worden, zal er een IT-architectuur op hoofdlijnen worden opgezet voor verwerking van alle ruimtelijke en temporele data die tijdens de teelt (in het gewas, onder en bovengronds), bij opslag en transport, tot aan de verwerking beschikbaar komt.

De infrastructuur is bedoeld voor onderzoek, analyse en modelontwikkeling door zowel de industriële als kennispartners en voor operationele inzet van visualisatie middelen en modellen ter ondersteuning van de beoogde gebruikers zoals telers, teeltadviseurs, opslag, aardappelverwerkende bedrijven, etc. De uitwerking van de IT architectuur is beschreven in een Programma van Eisen voor E-pieper (Vonder & Helmholt, 2018).

Voor een succesvolle introductie van smart farming technieken op de verschillende pilot-bedrijven is een soepele en veilige uitwisseling van data, kennis en advies belangrijk. Hiervoor worden verbindingen gelegd binnen telersgroepen en connecties gemaakt met de partijen daarbuiten. Een schematische weergave van deze informatiestromen is weergegeven in Figuur 17.



**Figuur 17** Schematische weergave van verbindingen tussen telersgroepen (groen, links) en de connecties daarbuiten.

---

# Literatuur

- Adamchuk V.I., Hummel J.W., Morgan M.T. & Upadhyaya S.K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *44*, 71-91.
- Bergström L., H. Johnsson and G. Torstensson, 1991. Simulation of soil nitrogen dynamics using the SOILN model. *Fertilizer research* 27, 181-188.
- Boogaard H.L., C.A.v. Diepen, R.P. Rotter, J.M.C.A. Cabrera and H.H.v. Laar, 1998. WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5, SC-DLO, Wageningen.
- Brisson N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussièrè, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin and H. Sinoquet, 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Brouwer F. and J.T.M. Huinink, 2002. Opbrengstdervingpercentages voor combinaties van bodemtypen en grondwatertrappen; geactualiseerde help-tabellen en opbrengstdepressiekaarten, Alterra, Wageningen.
- 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 B.G., 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.
- Dam J.C.v., 2000. Field-scale water flow and solute transport : SWAP model concepts, parameter estimation and case studies = [Waterstroming en transport van opgeloste stoffen op veldschaal] Thesis, [s.n.], S.I.
- Dobkin D.M., Wandinger, T. (2005). A radio-oriented introduction to RFID-protocols, tags and applications. *High Freq. Electron.* 4: 32-46.
- Feddes R.A., P. Kabat, P.J.T. van Bakel, J.J.B. Bronswijk and J. Halbertsma, 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone- state of the art. *Journal of Hydrology* 100, 69-111.
- Griffin T.S., B.S. Johnson and J.T. Ritchie, 1993. A simulation model for potato growth and development: Substor-potato Version 2.0. Michigan State University, Department of Crop and Soil Sciences.
- Hahn, C.J., Warren, S.G. and London, J. (1995). The effect of moonlight on observation of cloud cover at night, and application to cloud climatology. *Journal of Climate* 8.5 1429-1446.
- Haverkort A.J., A.C. Franke, J.M. Steyn, A.A. Pronk, D.O. Caldiz and P.L. Kooman, 2015. A Robust Potato Model: LINTUL-POTATO-DSS. *Potato Research*, 1-15.
- Hendriks, P.H.G.M., J. Limburg & R.J. de Meijer, 2001. Full-spectrum analysis of natural  $\gamma$ -ray spectra. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53-3: 365-380.
- Hoving, I.E., C. Kempenaar, S. Heijting, T.H. Been, A.P. Philipsen, H.C.A. Vlemminx, G.J. Roerink & G.J.F.M. Hermans, 2014. GrasMaïs-Signaal; adviessysteem precisielandbouw melkveehouderij. Haalbaarheidsstudie naar het genereren van opbrengst en voederwaarde kengetallen met sensoren en modellen voor gras en snijmaïs. Wageningen Livestock Research.
- Jansen D.M., 2008. Beschrijving van TIPSTAR : hét simulatiemodel voor groei en productie van zetmeelaardappelen, Plant Research International, Wageningen.
- Janssen B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf and H. van Reuler, 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* 46, 299-318.
- Jones J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman and J.T. Ritchie, 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235-265.
- Jongschaap R.E.E., 1997. ROTASK 1.0. In *Rotation models for ecological farming: CAMASE/PE workshop report*. Quantitative Approaches in Systems Analysis No 10, Eds M. Plentinger and F.P. de Vries. pp 81-86. AB-DLO, Wageningen.

- Kempenaar C., Lotz L.A.P., Snel J.F.H., Smutny V. & Zhang H.J. (2011). Predicting herbicidal plant mortality with mobile photosynthesis meters. 51, 12-22.
- Kempenaar C., Weide R.Y.v.d., Been T.H., Zande J.C.v.d. & Lotz L.A.P. (2009). Precisielandbouw en gewasbescherming: kansen, witte vlekken en kennisvragen. Plant research International, Nota 588, Wageningen.
- Kikkert A. (2009). Sensingsystemen voor bodem en gewas ten behoeve van precisielandbouw. Rapport 655. HLB, Wijster.
- Kroes J.G., J.G. Wesseling and J.C.v. Dam, 2000. Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application. Hydrological Processes 14, 1993-2002.
- Kropff M.J., H.H.v. Laar and R.B. Matthews, 1994. ORYZA 1 : an ecophysiological model for irrigated rice production. DLO-Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility, Wageningen [etc.].
- Mahlein, A.K., 2015. Plant Disease Detection by Imaging Sensors - Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. The American Phytopathological Society, pp 1-11.
- McCown R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth and D.M. Freebairn, 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. Agricultural Systems 50, 255-271.
- Nieuwenhuizen, Ard, Jochen Hemming en Laurens Struik, 2011. Automatisch onkruid bestrijden in de rij. Plant Research International, Wageningen UR, rapport 425.
- Nieuwenhuizen A.T., Hofstee J.W., Zande J.C.v.d., Meuleman J. & Henten E.J.v. (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.
- Parton W.J., 1996. The CENTURY model. In Evaluation of soil organic matter models, Eds D.S. Powlson, P. Smith and J.U. Smith. pp. 283-291 Springer-Verlag, Berlin.
- Paul, C. & Häusler, A. (2002). Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation, La Rochelle, France, 27-30 May 2002 pp. 464-465.
- Rawlins SL (1976). Measurement of Water Content and the State of Water in Soils. In: Water Deficits and Plant Growth. 4, 1976, S. 1-47.
- Roberts D.F., Adamchuk V.I., Shanahan J.F., Ferguson R.B. & Schepers J.S. (2011). Estimation of surface soil organic matter using a ground-based active sensor and aerial imagery. Precision Agriculture 12, 82-102.
- Ros G.W. & Bussink D.W. (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.
- Schut A.G.T., Van Der Heijden G.W.A.M., Hoving I. *et al.* (2006). Imaging spectroscopy for on-farm measurement of grassland yield and quality. 98, 1318-1325.
- Sinclair T.R. and R.C. Muchow, 1999. Radiation use efficiency. Advances in Agronomy 65, 215-265.
- Thylén, L., M. Gilbertsson, T. Rosenthal, and S. Wrenn (2002). An on-line proteinsensor – from research to product. [http://cie-eic.com/Zeltex/PDF/online\\_proteinsensor.pdf](http://cie-eic.com/Zeltex/PDF/online_proteinsensor.pdf).
- Van Der Klooster, E., Van Egmond, F.M. and Sonneveld, M.P.W. (2011). Mapping soil clay contents in Dutch marine districts using gamma-ray spectrometry. European Journal of Soil Science, 62: 743-753.
- Van der Schans, D.A. & Van der Berg W., 2013. Testen, Validatie en Toepassing van het Veris-sensorplatform Veldanalyse van twee percelen op veenkoloniale grond (47. PPO-AGV, Lelystad.
- Van Evert F.K., 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 Ittersum M.K., P.A. Leffelaar, H. Van Keulen, M.J. Kropff, L. Bastiaans and J. Goudriaan, 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy 18, 201-234.
- Van Ittersum M.K. and R. Rabbinge, 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. Field Crops Research 52, 197-208.
- Van Laar H.H., J. Goudriaan and H. Van Keulen, 1997. SUCROS97: simulation of crop growth for potential and water-limited production situations: as applied to spring wheat. 14, AB-DLO [etc.], Wageningen, 52 pp.

- 
- Vanclooster M., P. Viaene, J. Diels and K. Christiaens, 1994. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual, release 2.
- Veeteelt (2015). Hightech gras- en maisteelt. pp 42-45.
- Verberne E.L.J., J. Hassink, P.d. Willigen, J.J.R. Groot and J.A.v. Veen, 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38, 221-238.
- Verhagen J., 1997. Spatial soil variability as a guiding principle in nitrogen management Thesis, Verhagen, S.I.
- Viscarra-Rossella, R.A., T. Behrens, E. Ben-Dor, D.J. Brown, J.A.M. Demattêe, K.D. Shepherd, Z. Shi, B. Stenberg, A. Stevens, V. Adamchuk, H. Aichi, B.G. Barthès, H.M. Bartholomeus, A.D. Bayer, M. Bernoux, K. Böttcher, L. Brodský, C.W. Du, W. Ji, 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews* 155: 198-230.
- Vonder, M.R. & K.A. Helmholt, 2018. E-pieper Programma van Eisen (PvE). TNO Rapport ..., 29 pp.
- Wang E., M.J. Robertson, G.L. Hammer, P.S. Carberry, D. Holzworth, H. Meinke, S.C. Chapman, J.N.G. Hargreaves, N.I. Huth and G. McLean, 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121-140.
- Wolf J., 2002. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research* 21, 173-186.
- 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.
- Zwart K.B., Akker J.J.H.v.d., Bussink D.W. *et al.* (2011). *Waterkwaliteit bij de wortel aangepakt* (92. Alterra, Wageningen).

---

Correspondentie adres voor dit rapport:

Postbus 16  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research)

Rapport 758

---

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research 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.







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



---

Correspondentie adres voor dit rapport:  
Postbus 16  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research)

Rapport WPR-758

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research 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.

