

TEORIEN BAG SENSORMÅLINGER OG VEGETATIONSINDEKS

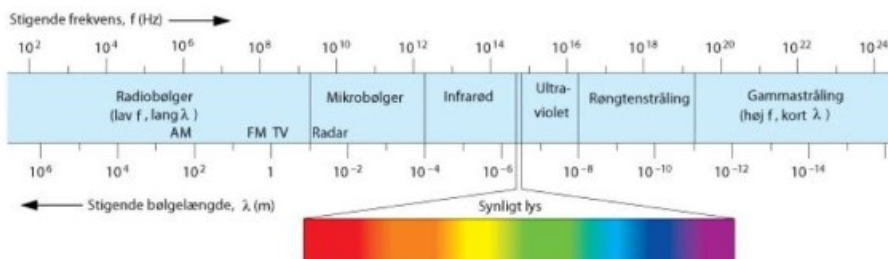
STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Beskriver teorien bag sensormålinger, afgrødens spektrale signatur og vegetationsindeks. Derudover gengives hvilke vegetationsindeks udvalgte sensorer, satellitter samt CropSAT anvender i planteproduktionen.

SÅDAN VIRKER SENSORER

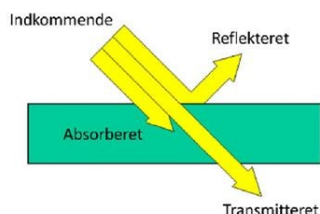
Jordbundne sensorer, droner og satellitter anvender sensormålinger indenfor det elektromagnetiske spektrum. Lys/stråling betragtes som bølgelængder i det elektromagnetiske spektrum, hvor det er frekvensen og bølgelængden som afgør det spektrum som observeres. Det er kun en lille del af det elektromagnetiske spektrum, som vi mennesker kan se (det synlige spektrum. VIS: 400-700 nm), men sensorer anvender også andre spektre som fx mikrobølger eller infrarødstråling (figur 1).



Figur 1: Det elektromagnetiske spektrum som er udgangspunktet for sensorteknologien.

Sensorer anvender ofte lys indenfor det synlige spektrum samt det infrarøde spektrum (NIR: 700-2500 nm), hvor det er fordelingen mellem absorption, refleksion og transmission som giver den spektrale signatur (Erdle et al., 2011; Jones & Vaughan, 2010). Når sollysets stråling

rammer en overflade, vil energien fra den indkomne stråling opdeles i de tre processer: absorption, transmission og refleksion (figur 2). Fordeling mellem de tre processer afhænger af overfladen og bølgelængden af den indkomne stråling. Når solens lys rammer et blad, vil noget af strålingen (energien) absorberes i overfladen, mens en del vil passere gennem bladet, hvilket kaldes transmission. For os vises blade grønnest om sommeren, når der er et højt klorofylindhold. Klorofyl absorbere rødt og blå lys, hvorimod grønne bølgelængder reflekteres fra bladene, hvilket får dem til at fremstå grønne. Refleksionen fra et blad afhænger af specifikke forhold ved overfladen, og kendes overfladens absorption, transmission og refleksion under forskellige forhold er det muligt at udnytte dette til kortlægning.



Figur 2: Sollysets fordeling mellem absorberet, transmitteret og reflekteret lys når fotonenergi rammer afgrøden.

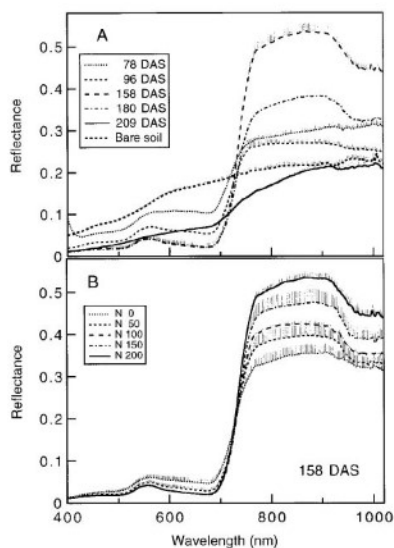
Sensorer virker enten aktivt eller passivt, hvor passive sensorsystemer afhænger af sollys eller andre lyskilder, mens aktive sensorer udsender stråling i specifikke bølgelængder, og derfor er uafhængig af ændringer i bestrålingen. Begge typer af sensorer måler mængden af lys som reflekteres fra afgrøden ved, at konverterer signalerne til elektriske output (Erdle et al., 2011).

AFGRØDENS SPEKTRALE SIGNATUR

Planters evne til at reflektere stråling afhænger af deres evne til at absorbere og transmittere, og påvirkes dermed af fysiologiske egenskaber samt vækstegenskaber (figur 3A). Derfor varierer den spektrale signatur med afgrødetype, udviklingsstadiet, vækstsæson mm. Refleksion af VIS afhænger for det meste af palisadelagenes klorofylindhold, og er negativt korreleret med kvælstofindholdet i bladene. Jo mere N afgrøden tager op jo mere grøn og frodig bliver den, så der er en stærk lineær sammenhæng mellem klorofylindholdet og N koncentrationen i bladene. Planter udnytter fotonenergien i det synlige spektrum til opbygning af biomasse så der reflekteres ikke mere end 5-10 % af lyset, hvilket gør det svært at skelne mellem variationer i lyset (figur 3). I det infrarøde område er der derimod en højere forskel i målbar refleksion fra afgrøden som er uafhængig af klorofylindholdet (figur 3). Dette er en realitet fordi, energien i NIR spektret er for lav til, at afgrøden kan drage nytte af det, så for at komme af med varmen reflektere bladenes cellestruktur mere af dette lys uafhængig af afgrødens tilstand og klorofylindhold. Refleksionen af NIR afhænger af mesofylcellernes struktur, og er korreleret med blad N og biomasse (Sixtensson, 2015; Erdle et al., 2011).

Ændringer i afgrøderefleksion er altså størst i de tæt-infrarøde bølgelængder gennem vækstsæsonen på grund af stigningen i biomasse. Det synlige spektrum viser mindre men signifikante sæsonvariationer som relaterer til fotosyntetiske pigmenters absorption af lys. Når en grøn hvedemark bliver gul i takt med modning kan dette altså registreres i det synlige

spektrum (Hatfield et al., 2008; Rasmussen et al., 2016). Indenfor sensorteknologien anvendes der derfor forskellige bølgelængder samt intervaller til at komme frem til diverse agronomiske parameter.



Figur 3: (A) Den spektrale signatur for Vinterhvede (ved 200 kg N/ha) ved forskellige vækststadier (DAS = dage efter såning) og på bar jord (bare soil). (B) Den spektrale signatur for vinterhvede ved 5 kvælstofbehandlinger (0, 50, 100, 150, 200 kg N/ha) 158 dage efter såning. Refleksionsmønstret i vinterhvede tilført forskellige mængder kvælstof viser en lille variation i det synlige spektrum (VIS: 400-700 nm) mens forskellen i refleksion er større i det infrarøde spektrum (NIR: 700-2500 nm).

VEGETATIONSINDEKSER

Ud fra reflektansen ved forskellige bølgelængder kan der beregnes en række indekser. Vegetationsindekser fremhæver diverse vegetationsparameter, og variere i forhold til anvendte bølgelængder, bredden af bølgelængdeintervallerne og formelen anvendt. Der er udviklet et utal af vegetationsindekser til at karakterisere adskillig agronomiske parameter som grøn biomasse, kerneudbytte, nærringstofmangel, det fotosyntetiske område af afgrøden, mængden af fotosyntetisk aktiv stråling (PAR) som absorberes af afgrøden, det fotosyntetiske potentiale og diverse stressfaktorer (tabel 1 og tabel 2). Kerneudbyttet kan fx estimeres ved at udregne indekser ved afgrødens forskellige udviklingsstadier. Nærringstofmangel og andre miljømæssige stressfaktorer kan ligeledes estimeres ud fra klorofyl og carotenoide koncentrationer samt vandindholdet (Pask et al., 2012; Hatfield et al., 2008).

Indekser som SR (the simple ratio) og NDVI (normalized difference vegetation index) udregnes begge ud fra målinger fra det røde spektrum samt fra NIR spektret, og har længe været brugt som et indirekte mål for biomasse og afgrødeudbytter. Ved beregning af NDVI fås en værdi mellem -1 og 1. Jo tættere værdien er på 1, desto større biomasse er etableret på arealet, mens negative værdier afspejler vand og vådområder. NDVI og lignende indekser bliver dog ofte mættet når bladarealindekset (LAI = bladareal/grundareal) overstiger 2-3. De nyeste

indekser afhænger mere af NIR spektret, hvilket skulle være mere immun over for høje bladarealindekser. Derfor har "red edge" spektret (680-750 nm) og flere NIR/NIR indekser vist sig, at tilbyde mere pålidelige signaler i områder med en høj biomasseproduktion som i f.eks. Europa (Erdle et al., 2011, Serrano et al., 2000). "Red edge" er dog mere følsom overfor bar jord og områder med vand, og er derfor ikke så anvendelig i de tidlige vækststadier (erfaringer fra SEGES). Grænserne mellem de forskellige bølgelængdeintervaller der bruges i diverse indekser varierer fra artikel til artikel, hvilket gør det svært at sammenligne indekserne (Pask et al., 2012; Erdle et al., 2011; Hatfield et al., 2008).

Tabel 1. Opsummering af udvalgte vegetationsindekser, bølgelængdeområder samt applikations muligheder (Hatfield et al., 2008).

Index	Wavebands	Application	Reference
	R_{800}/R_{680}	biomass	Jordan, 1969
	R_{800}/R_{550}	biomass	Bushman and Nagel, 1993
	R_{550}	chlorophyll	Carter, 1994
	R_{700}^{-1}		Gitelson et al., 1999
	$\log(1/R_{733})$	chlorophyll	Yoder and Pettigrew-Croby, 1995
Simple ratio	$R = R_{NIR}/R_{red}$	biomass, LAI, cover	Birth and McVey, 1968; Jordan, 1969
Photochemical Reflectance Index	$PRI = (R_{550} - R_{435})/(R_{550} + R_{435})$	light capture efficiency	Gamon et al., 1992
Pigment-specific normalized difference	$(R_{800} - R_{435})/(R_{800} + R_{435})$	LAI	Blackburn, 1998
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + R_{red})$	intercepted PAR, vegetation cover	Deering, 1978
Perpendicular Vegetative Index	$PVI = (R_{NIR} - aR_{red})/b/(1 + a^2)^{1/2}$	LAI	Richardson and Wiegand, 1977
Wide Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = (0.1R_{800} - R_{red})/(0.1R_{NIR} + R_{red})$	LAI, vegetation cover, biomass	Gitelson, 2004
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = (R_{NIR} - R_{red})/(1 + L)/(R_{NIR} + R_{red} + L)$	LAI	Huete, 1988
Transformed Soil Adjusted Vegetative Index	$TSAVI = a(R_{NIR} - R_{red}) - b/(R_{red} + aR_{NIR} - ab)$	LAI, biomass	Barot et al., 1989
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5(R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1)$	LAI, biomass	Huete et al., 2002
Green NDVI	$(R_{NIR} - R_{green})/(R_{NIR} + R_{green})$	intercepted PAR, vegetation cover	Bushman and Nagel, 1993; Gitelson and Merzlyak, 1994; Gitelson et al., 1996
Red Edge NDVI	$(R_{NIR} - R_{red\ edge})/(R_{NIR} + R_{red\ edge})$	intercepted PAR, vegetation cover	Gitelson and Merzlyak, 1994
Visible Atmospherically Resistant Indices	$VAR_{green} = (R_{green} - R_{red})/(R_{green} + R_{red})$	green vegetation fraction	Gitelson et al., 2002b
	$VAR_{red\ edge} = (R_{red\ edge} - R_{red})/(R_{red\ edge} + R_{red})$	green vegetation fraction	Gitelson et al., 2002b
Chlorophyll indices	$C_{green} = (R_{NIR}/R_{green}) - 1$	LAI, GPP, chlorophyll	Gitelson et al., 2003b, 2005
	$C_{red\ edge} = (R_{NIR}/R_{red\ edge}) - 1$	LAI, GPP, chlorophyll	Gitelson et al., 2003b, 2005

† LAI, leaf area index; GPP, gross primary productivity.

Tabel 2. Spektrale refleksionsindekser som ofte bruges til at analysere hvedemarker, hvor indeks typerne er inddelt i: vegetations indeks (VI), pigment relateret indeks (PI) eller vand indeks (WI) (Past et al., 2012).

Index	Name	Physiological process	Type	Calculation
NDVI	Normalized difference vegetation index	Green area, photosynthetic capacity, N status	VI	$[R_{800}/R_{680}]$ and $[R_{800}/R_{680}]$
R-NDVI	Red normalized difference vegetation index	Green area, photosynthetic capacity, N status	VI	$[R_{780}/R_{670}]$ and $[R_{780}/R_{670}]$
G-NDVI	Green normalized difference vegetation index	Green area, photosynthetic capacity, N status	VI	$[R_{780}/R_{550}]$ and $[R_{780}/R_{550}]$
SRa	Simple Ratio	Green biomass	VI	$[R_{800}/R_{680}]$ and $[R_{800}/R_{680}]$
RARS _a	Ratio analysis of reflectance spectra chlorophyll a	Chlorophyll a content	PI	$[R_{675}/R_{720}]$
RARS _b	Ratio analysis of reflectance spectra chlorophyll b	Chlorophyll b content	PI	$R_{675}/[R_{675} \times R_{720}]$
RARS _c	Ratio analysis of reflectance spectra carotenoid	Carotenoid content	PI	$[R_{750}/R_{550}]$
NPQI	Normalized pheophytinization index	Normal chlorophyll degradation; can be used to estimate phenology, pest and diseases	PI	$[R_{415} - R_{435}]/[R_{415} + R_{435}]$
SIPI	Structural independent pigment index	Senescence related to stress	PI	$[R_{800} - R_{435}]/[R_{415} + R_{435}]$
PRI	Photochemical reflectance index	Dissipation of excess radiation	PI	$[R_{811} - R_{435}]/[R_{811} + R_{435}]$
WI	Water index	Plant water status	WI	$[R_{970}/R_{900}]$
NWI-1	Normalized water index 1	Plant water status	WI	$[R_{970}/R_{900}]/[R_{970} + R_{900}]$
NWI-2	Normalized water index 2	Plant water status	WI	$[R_{970} - R_{950}]/[R_{970} + R_{950}]$

NWI-3	Normalized water index 3	Plant water status	WI	$[(R_{970}-R_{980})/(R_{970}+R_{980})]$
NWI-4	Normalized water index 4	Plant water status	WI	$[(R_{970}-R_{920})/(R_{970}+R_{920})]$

HVILKE INDEKS BRUGER SENSORER, SATELLITTER OG CROPSAT?

For at kunne beregne vegetationsindeks kræves særlige kameraer som kan opfange lys indenfor udvalgte områder af det elektromagnetiske spektrum. Udvalgte sensorer på markedet bruger følgende indekser/spektrum:

Trimble' GreenSeeker er en kommerciel sensor som registrerer refleksionen i VIS og NIR spektret (Rød: 660 nm og NIR: 780 nm) og bruger NDVI indekset.

AGLeader's Optx anvender NDVI og NDRE-indekset (Rød: 630 nm, Red Egde: 730 nm og NIR: 780 nm).

Yara N-sensoren benytter 35 forskellige bølglængder mellem 550-900 nm (i 10 nm trin).

Claas Crop sensoren bygger på Fritzmeiers Isaria som registrerer data fra fire bølglængdeområder inden for intervallet 630-1100 nm. Her benyttes vegetationsindekset IRMI (tæt korreleret med NDVI) og biomasse indekset IBI.

Crop circle sensoren anvender to smalle intervaller i henholdsvis VIS (650 nm) og i NIR (880 nm) spektret, hvorefter NDVI og SAVI benyttes.

(Fitzgerald, 2010; Sixtensson, 2015; Erdle et al., 2011)

Sentinel 2 satellitter (Sentinel 2A og Sentinel 2B) bærer et multispektralt kamera med 13 spektrale kanaler i det synlige spektre, NIR spektret samt i det kortbølgede infrarøde spektre (SWIR). Tabel 3 til 5 viser de målte spektre samt båndbredden hos Sentinel 2A og 2B (Esa, 2017).

Tabel 3. Bånd med 10 meters rumlig opløsning (Esa, 2017).

Band number	S2A		S2B		L _{ref} (reference radiance) (W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹)	SNR @ L _{ref}
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
2	496,6	98	492,1	98	128	154
3	560,0	45	559	46	128	168
4	664,5	38	665	39	108	142
8	835,1	145	833	133	103	174

Tabel 4. Bånd med 20 meters rumlige opløsning (Esa, 2017).

	S2A	S2B	L _{ref}	
--	-----	-----	------------------	--

Band number	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	(reference radiance) ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	SNR @ L_{ref}
5	703.9	19	703.8	20	74.5	117
6	740.2	18	739.1	18	68	89
7	782.5	28	779.7	28	67	105
8a	864.8	33	864	32	52.5	72
11	1613.7	143	1610.4	141	4	100
12	2202.4	242	2185.7	238	1.5	100

Tabel 5. Bånd med 60 meters rumlig opløsning (Esa, 2017).

Band number	S2A		S2B		L_{ref} (reference radiance) ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	SNR @ L_{ref}
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
1	443.9	27	442.3	45	129	129
9	945.0	26	943.2	27	9	114
10	1373.5	75	1376.9	76	6	50

CropSAT er et online-system der kan levere satellitdata og hvor tildelingsfiler, kan downloades og anvendes til styring af gødningstildeling. I den svenske version af CropSAT anvendes vegetationsindekset MSAVI mens den danske udgave anvender NDVI. Svenskerne begrundet valget af indeks med, at dette indeks kan måle kvælstofoptagelsen i afgrøden ved en større biomasse, end det traditionelle NDVI indeks, hvor kvælstofoptagelsen kun kan måles op til en given biomasse, hvorefter der nås et mætningspunkt. I DK anvendes NDVI-indekset fordi omfordeling af kvælstof sker på et tidspunkt, hvor mætningspunktet ikke er nået. Valg af indeks vil dog blive vurderet løbende. Four LEDs emit light in specific wavelengths within the red and near-infrared range of the light spectrum.

REFERENCER:

Erdle, K., Mistele, B., Schmidhalter, U. (2011). "Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars". Field crops research (0378-4290), 124 (1), p. 74.

Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S. and Walthall C. L. (2008). "Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions". Agronomy journal (0002-1962), 100 (supplement_3), p. S117.

Jones, H. G. and Vaughan, R. A. (2010). "Remote sensing of vegetation". 1. Udgave ed.

Dundee: Oxford University Press.

Sixtensson , O. (2015). "Grödanalys från luften med drönare". Hushållningssällskapet Skåne, Borgeby Slottsväg 11, 237 91 Bjärred.

Pask, A.J.D., Pietragalla, J., Mullan, D.M. and Reynolds, M.P. (Eds.) (2012). *Physiological Breeding II: A Field Guide to Wheat Phenotyping*. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Fitzgerald, G. J. (2010). Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors, *International Journal of Remote Sensing*, 31:16, 4335-4348, DOI:10.1080/01431160903258217.

Rasmussen, J., Ntakos, G., Nielsen, J., Svensgaard, J., Poulsen, R. N. and Christensen, S. (2016). Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*. Vol 74; p. 75-92.

Serrano, L., Filella, L. and Peñuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*. 40:723-731.

Esa Sentinel Online, 2017. Radiometric resolutions. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>