

## Inledning

Detta projekt består av 2 delar. I: Mätning av reflektans i fält och II: Hyperspektrala analysmetoder. I del I undersöktes hur mätningar av reflektans av jordbruksgrödor i fält påverkades av mätteknik och meteorologiska faktorer. I denna del ingick optik och kalibrering för irradiansmätning, påverkan av solhöjd och molnighet. I del II av projektet utvecklades metoder för analys av reflektansspektra i syfte att kunna mäta egenskaper i grödor. Genom att utnyttja hela reflektansspektrat istället för enstaka våglängdsband borde bättre mätmetoder kunna utvecklas och man torde även kunna förstå hur olika egenskaper påverkar reflektansspektra.

## Material och metoder

För mätning av hyperspektral reflektans i projektet användes spektrometer och metodik som utvecklats i tidigare SLFprojekt. Denna metodik har publicerats i *Biosystems Engineering* (Larsolle, 2003). Med denna spektrometer mättes simultant irradians  $I_{Irr}$ , dvs. solinstrålning uppifrån med en uppåtriktad sensor och radians  $I_{Rad}$ , dvs. reflekterat ljus från grödan med en nedåtriktad sensor. Spektra med mer än 10 våglängdsband brukar definieras som hyperspektralt medan mätningar under 10 band benämns multispektrala. I detta fall mättes 160 våglängdsband från 360 nm till 900 nm. Det synliga spektrat går någonstans från 400 nm upp till 750 nm (blått till rött) medan området från ca 750 upp till ca 1300 nm kallas nära infrarött (IR).

Reflektansen  $R$  fås sedan genom kvoten:

$$R = \frac{I_{Rad}}{I_{Irr}} \quad [1]$$

## I: Mätning av reflektans i fält

### Fältförsök

2002 gjordes kontinuerliga mätningar av reflektans i fält i Uppsala under 9 dygn i korn och 12 dygn i klövervall. Systemet utrustades här med mobil dataöverföring.

Under 2003 utfördes en fältstudie i korn i Uppsala där reflektans i mättes i block om 20 ytor (3 upprepningar) vid olika tidpunkter under dagen: 27/6 (11 tidpunkter), 30/6 (11 tidpunkter), 1/7 (11 tidpunkter), 4/7 (9 tidpunkter).

En motsvarande fältstudie gjordes 2004 i korn i Uppsala där reflektans mättes i block om 15 ytor vid olika tidpunkter under dagen: 23/6 (8 tidpunkter), 25/6 (2 block: 7 resp. 6 tidpunkter), 15/7 (5 tidpunkter), 16/7 (4 tidpunkter), 17/7 (6 tidpunkter),

### Resultat och diskussion

När man studerade instrålningen (se figur 1) kunde man se att instrålningen i molnfria fall följde en kurva där irradiansen kontinuerligt ökade med solhöjd (störst värde mitt på dagen). Denna solkurva över dagen bör följa Lamberts lag:

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad [2]$$

där  $\theta$  är solvinkeln från zenit (rakt upp) och  $I_0$  är strålningsintensiteten mot solen ( $\theta = 0^\circ$ ). Med andra ord, irradiansen som kommer in i den uppriktade optiken minskar med solvinkeln med faktorn  $\cos \theta$ . Variationer från den beskrivna solkurvan under dagens lopp berodde främst på förekomst av moln. När solen täcktes av moln gick irradiansen ner och när en molnkant närmade sig solen läge ökade irradiansen pga. att instrålning från solen reflekteras via moln.

Men man konstaterade att den solkurva som irradiansen beskrev inte följde Lamberts lag tillräckligt väl. Därför byttes den uppriktade irradiansoptiken ut inför 2003 mot en s.k. cosinusreceptor med integrerande sfär som per definition skulle ge en signal som bättre följer Lamberts lag (se figur 2).

I analysen av 2003 års mätningar undersöktes möjligheterna att använda en reflektansmodell (Kuusk, 1995). Reflektansmodellen kunde inte anpassas till fältmätningarna varifrån man kunde konstatera att irradiansmätningarna fortfarande inte följde förväntade samband enligt Lamberts lag. Därför utvecklades en algoritm för att beräkna korrigerad irradians  $I_{irr}$  (som används för att beräkna reflektans i ekv [1]) utifrån rådata från uppsensorn  $I_{irr}^*$  enligt:

$$I_{irr} = I_{irr}^* \left[ \frac{D_\lambda}{Q_\lambda} + \left( 1 - \frac{D_\lambda}{Q_\lambda} \right) \frac{h(\theta_w)}{h[b(2\theta_s^*, \varphi_w)]} \right] \quad [3]$$

$$h(b) = 1 - \frac{1-p}{1 + \left( \frac{b}{c} \right)^d} \quad [4]$$

$$b(\theta_s, \varphi_w) = \arccos \left( 1 - \frac{1}{2} \left[ 2 + \cos(\theta_s + \theta_w)(\cos \varphi_w - 1) - \cos(\theta_s - \theta_w)(\cos \varphi_w + 1) \right] \right) \quad [5]$$

Där kvoten  $D_\lambda/Q_\lambda$  beskriver andelen diffus solinstrålning (enligt McCartney, 1978 och McCartney & Unsworth, 1978),  $b$  är vinkel (bågen) mellan den optiska utgången och läget för solens projektion på den integrerande sfären (se figur 2),  $\theta_s = 2\theta_s^*$  ( $\theta_s^*$  är här solens zenitvinkel). Vinklarna  $\theta_w$  och  $\varphi_w$  beskriver läget för sfärens optiska utgång relativt solens läge.  $h$  är en responsfunktion som beror av  $b$ ,  $\{\theta_w; p; c; d\}$  är konstanter.

Med hjälp av en testtrigg kunde mätningar av rådata från uppsensorn  $I_{irr}^*$  mot solen göras med olika zenitvinklar  $\theta$  och azimutvinklar  $\varphi$  mellan irradiansoptiken och solen. Numerisk anpassning av konstanterna  $\{\theta_w; p; c; d\}$  gjordes sedan till uppmätta data.

Denna korrigering av irradians för zenit- och azimutvinkel ( $\theta, \varphi$ ) enligt ovan fungerade tillfredsställande, speciellt med tanke på att endast fyra parametrar per våglängdsband behövde bestämmas. En konstruktionsmässig nackdel med den beskrivna optiken för uppsensorn är just att uppmätt irradians är beroende av azimutvinkel (solens horisontella vinkel) i förhållande till solen. I praktiken innebär detta att kompassriktning för varje mätning måste vara känd för att kunna beräkna reflektansen. Optiken för uppsensorn bör således vara symmetrisk kring den optiska axeln. Även en sådan konstruktion måste sannolikt korrigeras, men endast för solens zenitvinkel, vilket gör proceduren enklare.

För att beräkna solens läge på himlen, beskrivet som zenit- och azimutvinkel ( $\theta, \varphi$ ), utifrån datum och tid för varje enskild mätning användes formler enligt Kaplan m.fl. (1989). Programkod för beräkning av solvinklar fanns tillgänglig i programmeringsspråket C vid "the Astronomical Applications Department" vid "U.S. Naval Observatory". Denna översattes för ändamålet till analysverktyget som användes i detta projekt, Matlab®.

Inverkan av solens läge på reflektans undersöktes med avseende på solens zenitvinkel ( $\theta$ ). Reflektansen från en gröda påverkas inte bara av zenitvinkel utan även av andelen diffus instrålning pga. t.ex. molnighet (se t.ex. Gilabert & Meliá, 1993). För att ta fram reflektansvärden ur mätdata som kunde användas för att analysera inverkan av  $\theta$  sållades mätningar med låg solinstrålning bort. Den totala irradiansen uppskattades genom att summera alla uppsensorns irradiansmätningar över hela våglängdsområdet. Genom att ange ett minsta tröskelvärde kunde sedan molnfria mätningar tas fram.

Reflektansen i 650 nm  $R_{650}$  (rött) över dagen tillsammans med solens zenitvinkel kan ses för mätningar 25/6 2004 i figur 4a. Tiden är angiven som "Greenwich Mean Time" (GMT) vilket i detta fall innebär att solen står som högst vid ungefär kl. 11 GMT. Högst reflektans kan ses mitt på dagen och  $R_{650}$  avtar sedan med ökande zenitvinkel. Sambandet mellan solens zenitvinkel och reflektansen beror av våglängd. I figur 4b-c visas det linjära sambandet mellan variationen i reflektans och zenitvinkel för hela våglängdsområdet (400 - 900 nm). Det visar sig att sambandet varierar från nära 0 inklusive negativa värden (som var fallet för  $R_{650}$ ) inom synligt, fotosyntetiskt aktivt, våglängdsområde till positivt samband inom det nära infraröda området.

Korrelationen, dvs. hur starkt sambandet är mellan solens zenitvinkel och reflektans varierar med mätdatum. Tidiga mätningar gav relativt hög korrelation, medan korrelationen avtog vid senare datum. Man kan se att korrelationen vid enskilda mätdatum lokalt ger skarpa negativa spikar. Detta beror främst på att koefficienten som beskriver sambandet mellan zenitvinkel och reflektans är noll vid aktuell våglängd.

Vidare kan man säga att sambandet mellan reflektans och zenitvinkel, visat som koefficienten på höger y-axel i figur 4b-c har samma form som ett generellt reflektansspektra från vegetation. Detta kan bero på att stråsädesgrödan har ett vertikalt växtsätt, och ju högre solen står på himlen, dvs. låga värden för solens zenitvinkel, desto mer exponeras marken mellan stråsädesgrödans skott. När sedan solhöjden minskar och zenitvinkeln därmed ökar belyses upprättstående blad i högre grad medan instrålning på mark minskar. Med andra ord, instrålningen träffar och reflekteras från grödans blad i högre utsträckning ju lägre solen står. Detta kan göra att den uppmätta reflektansen övergår från ett högre till ett lägre inslag av reflektans från jord. Inverkan av reflektans från yttjord kan ses i figur 5, högra figuren.

## II: Hyperspektrala analysmetoder

Arbetet med att ta fram nya hyperspektrala analysmetoder gjordes i ett samarbete med Hamid Hamed Muhammed (PhD vid Centrum för Bildanalys, Uppsala univ./SLU, 2004). Resultatet är publicerat som vetenskapliga artiklar i *Biosystems Engineering* (Hamid Muhammed & Larsolle, 2003) och *Precision Agriculture* (Larsolle & Hamid Muhammed, 2007). En muntlig och skriftlig presentation har även gjorts vid "5th European Conference on Precision Agriculture", 9-12 juni 2005 i Uppsala (Larsolle, Hamid Muhammed, 2005).

Metodiken som användes var i princip att objektivt analysera hela reflektansspektrat och inte i första läget begränsa analysen till enskilda våglängdsband. I den första studien användes försöksdata med olika svampinfektionsgrad i vårveete från tidigare SLFprojekt (se figur 5 TV). Här utvecklades en metod för s.k. "Feature vector based analysis" (FVBA). Metoden går ut på att hitta komponenter i multispektrala data, med hjälp av PCA (principalkomponentanalys) eller ICA (independent component analysis), som är korrelerade till referensdata, i detta fall svampangrepp. Först normaliserades datasetet genom att subtrahera medelvärdet och dividera med standardavvikelsen. Resultatet av detta är en datamängd med medelvärdet 0 och standardavvikelsen ett. Genom detta blir t.ex. de olika spektrala våglängdsbanden mer jämförbara. Normaliseringen gjordes på två sätt antingen för varje våglängdsband för sig (bandvis) eller för varje observation för sig (spektral). Därefter togs linjära komponenter fram ur normaliserat data med hjälp av

principalkomponentanalys (PCA) och s.k. oberoende komponentanalys (ICA). Dessa komponenter kombinerades sedan på ett optimalt sätt. Resultatet varierade beroende på hur normaliseringen gjordes. En bandvis normalisering resulterade i högre  $R^2$  än en spektral normalisering (se tabell 1). Om sedan data först normaliserades spektralt och sedan bandvist och vice versa erhöles högre korrelationskoefficienter där en spektral följt av en bandvis normalisering var bäst.

I en följande studie utvecklades analysmetoden ytterligare. I det första steget normaliserades data i en procedur där spektrala data omväxlande normaliserades bandvist och spektralt tills dess att resultatet av normaliseringen gick mot ett konstant värde. De två normaliseringsprocedurer som jämfördes var en med en indelade spektral normalisering respektive bandvis normalisering: "BSB...BS" och SNS...BS". Den sista normaliseringen var alltid spektral. I det följande steget användes ett urval av fälldata för att skapa ett referensdataset. Resten av fältdat klassificerades sedan efter referensdata. Undersökningen gjordes dels på tidigare dataset och på fältmätningar gjorda på plantmassa i korn (se figur 5 TH). Resultatet av analysmetod 2 presenteras i tabell 2. Trots att endast 12 % av datasetet användes som referensdata var korrelationskoefficienten 94 och 97 % för analysen av svampinfektionsgrad respektive plantmassa.

*Tabell 1. Resultat av analysmetod 1. Korrelationskoefficient  $R^2$  mellan spektralanalys och fältmätningar av svampinfektionsgrad.*

<b>Normalisering</b>	<b><math>R^2</math>, %</b>
Spektral + Bandvis	95.7
Bandvis + Spektral	94.4
Bandvis	93.5
Spektral	88.4

*Tabell 2. Resultat av analysmetod 2. Korrelationskoefficient  $R^2$  mellan spektralanalys och fältmätningar av svampinfektionsgrad och plantmassa.*

<b>Dataset</b>	<b>Normalisering</b>	<b><math>R^2</math>, %</b>
Svampinfektion	'SBS...BS'	94.3
	'BSB...BS'	93.6
Plantmassa	'SBS...BS'	96.9
	'BSB...BS'	91.9

De spektrala profilerna i analysresultatet av svampinfektionsgrad och plantmassa presenteras i figur 6 och 7. Här kan man se två olika resultat. Profilen till vänster i figurerna liknar en reflektansprofil för vegetation, vilket är rimligt dels med tanke på att mängden grön vegetation faktiskt varierar i data med plantmassa. Vad gäller svampinfektionsdata så minskar de facto andelen grön bladyta när svampangreppen (död bladvävnad) breder ut sig, vilket resulterar i en omvänd vegetationsprofil i figur 6 till vänster. Till höger i figurerna ser profilerna något annorlunda ut. Det mest slående är ett område med negativa och ett med positiva vikter inom det nära infraröda våglängdsområdet. Denna typ av profil är känslig för lutningen inom det nära infraröda reflektansspektrat. Med minskande plantmassa och ökande infektionsgrad i figur 5 kan man se att reflektansspektrat går mot en relativt konstant ökande reflektans med ökande våglängd. Denna effekt är speciellt märkbar inom den närainfraröda platån där reflektansen i stort sett är konstant för en frisk marktäckande vegetation.

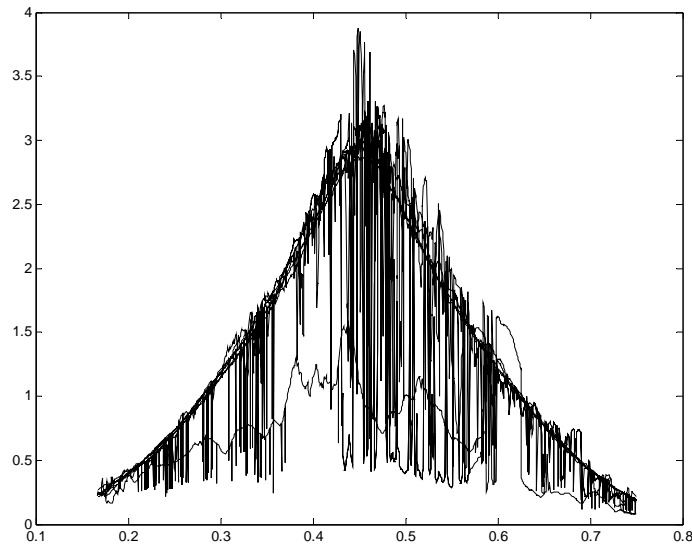
## Slutsatser

Mätningar av solinstrålningen kan påverkas av solens läge relativt sensorn, både solens zenitvinkel ( $90^\circ$  minus solhöjd) och azimutvinkel ("kompassriktning"). I möjligaste mån är det viktigt att minimera sådan inverkan.

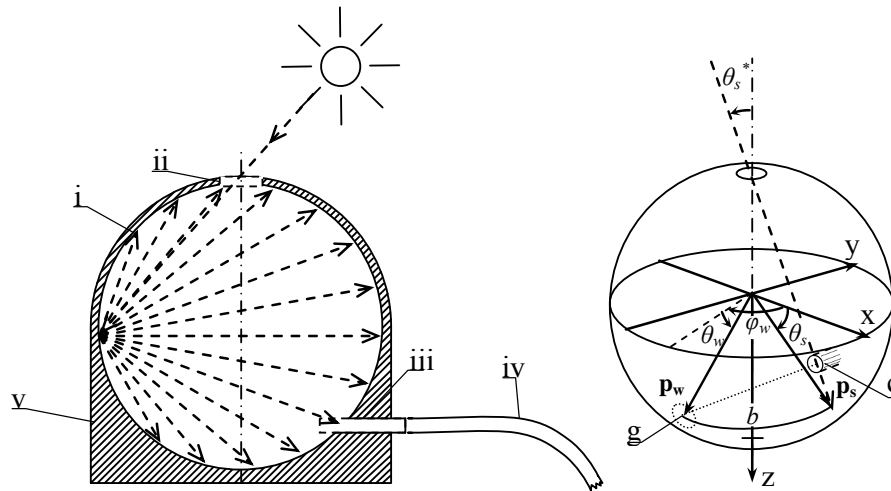
Även reflektans från grödan påverkas av solvinklar. Så länge det inte är frågan om en uttalad radodlad gröda påverkar zenitvinkeln mest. För hantera sådan inverkan bör möjligheterna till att använda en reflektansmodell undersökas.

De multivariata analysmetoder som utvecklades visade hög korrelation mot uppmätta fältdata, både svampinfektionsgrad och plantmassa. Metoden bör kunna användas som sensor i precisionsväxtskyddsinsatser.

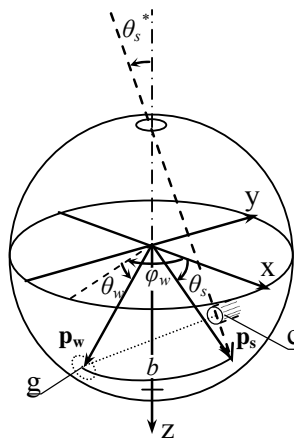
Analysen gav även ökad förståelse för hur reflektansen påverkas av stress och mängd fotosyntetiskt aktiv vegetation.



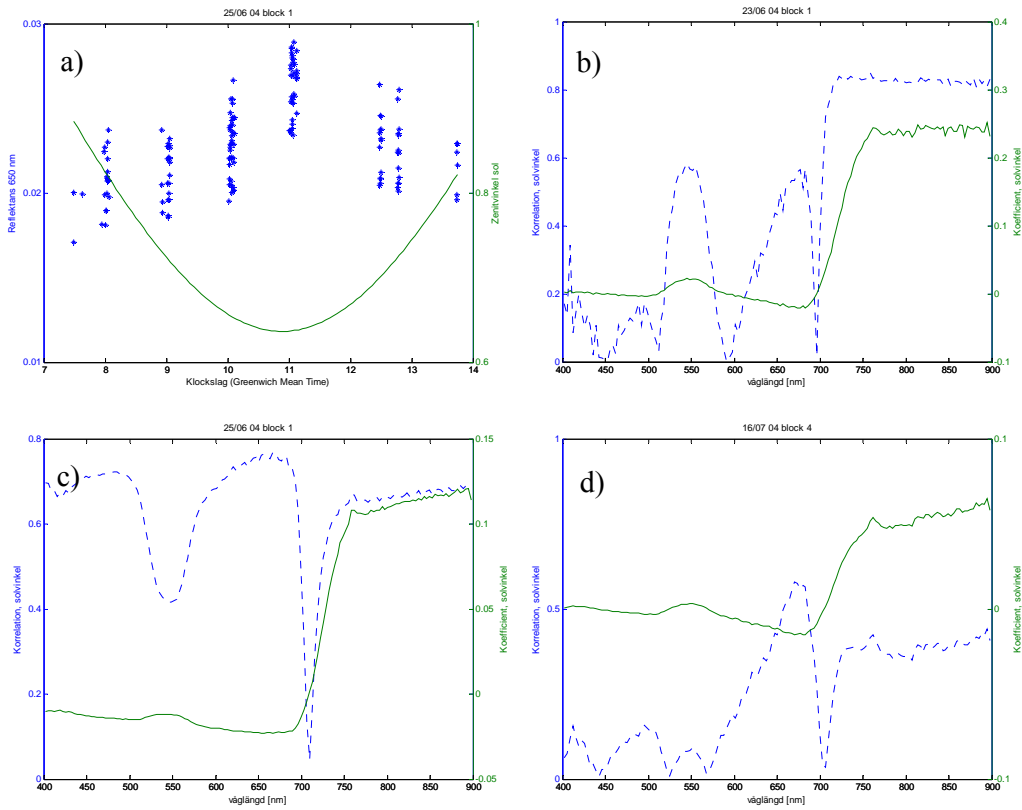
*Figur 1. Kontinuerliga reflektansmätningar på korn i 9 dygn.*



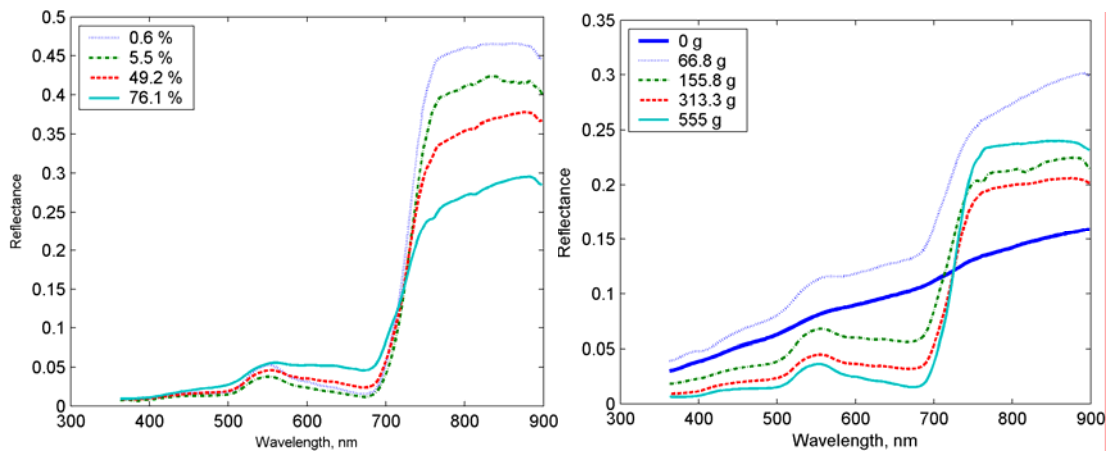
Figur 2. T.V: Schematisk bild av irradiansoptik med integrerande sfär (i miniatyrformat). Ljuset går in genom ett fönster (ii) av diffust glas längst upp. Sfären (i), infattad i en kapsling (v), är belagd med högrelekterande vitt ytskikt. Ljuset som sedan mäts, leds genom en optisk utgång (iii) till en spektrometermodul via optisk fiberkabel (iv). T.H: Definition av parametrar som beskriver irradiansoptikens läge relativt solen.



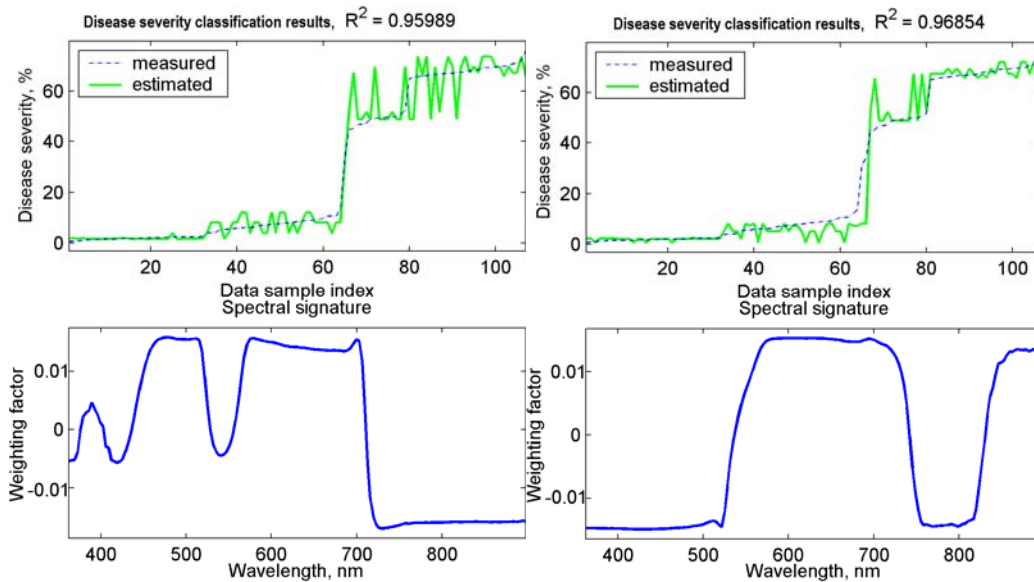
Figur 3. Definition av parametrar för som beskriver irradiansoptikens läge relativt solen.



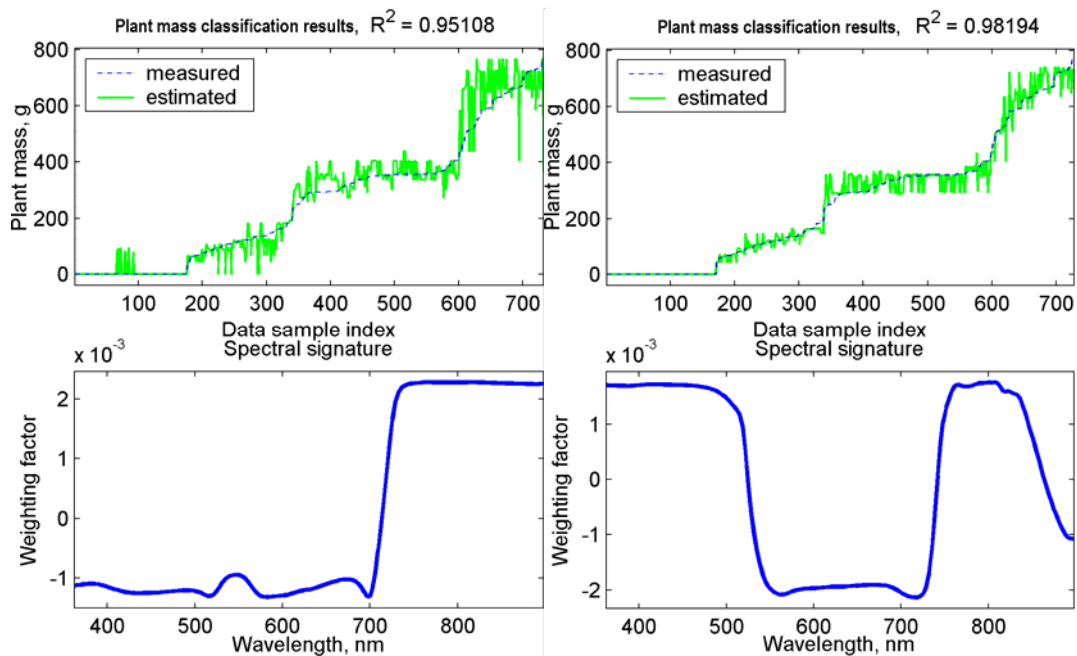
Figur 4. Variation i reflektans över dagen. a) Reflektans i 650 nm (rött)(\*) över dagen och solen zenitvinkel (-), b-d) Samband mellan solens zenitvinkel: korrelation (--) och koefficient (-).



Figur 5. Fältdata i studie med hyperspektrala analysmetoder. T.V. Svampinfectionsgrad i vårvete. T.H. Plantmassa i vårvete. I figuren visas en översikt med olika grader av bladangrepp och nivåer av plantmassa.



Figur 6. Det bästa resultatet för analysen av svampinfektionsgrad. Inledande bandvis normalisering (till vänster) respektive bandvis normalisering (till höger)



Figur 7. Det bästa resultatet för analysen av plantmassa i korn. Inledande bandvis normalisering (till vänster) respektive bandvis normalisering (till höger)

## Referenser

- Gilabert, MA., Meliá, J. 1993. Solar angle and sky light effects on ground reflectance measurements in a citrus canopy. *Remote sensing of environment*, 45 281-293.
- Hamid Muhammed, H and Larsolle, A. 2003. Feature vector based analysis of hyperspectral crop reflectance data for discrimination and quantification of fungal disease severity in wheat. *Biosystems Engineering*, 86, 125-134



Kaplan, GH., Hughes, JA., Seidelmann, PK., Smith, CA. 1989. Mean and Apparent Place Computations in the New IAU System. III. Apparent, Topocentric, and Astrometric Places of Planets and Stars. *Astronomical Journal*, Vol. 97, pp. 1197-1210.

Kuusik A. 1995. A Markov Chain Model of Canopy Reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 221-236

Larsolle, A. 2003. Instantaneous measurement of reflectance spectra in the open field using diode array spectrometers. *Biosystems Engineering*, 86, 1-8

Larsolle, A. Hamid Muhammed, H. 2007. Measuring crop status using multivariate analysis of hyperspectral field reflectance with application to disease severity and plant density. *Precision Agriculture*, 8 (1-2) 37-47.

McCartney, H.A. 1978. Spectral distribution of solar radiation. II. Global and diffuse. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 104:911–926.

McCartney HA, Unsworth MH. 1978. Spectral distribution of solar radiation. I. Direct radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104, 699-718.