

Slutrapport: Handhållen NIR-sensor mäter grovfodrets kvalité direkt på gården

Projektperiod: 2024–2025

Projektledare och projektdeltagare: Carl Andås och Johanna Forss, växtodlingsrådgivare
Växa Sverige

Sammanfattning

Projektet *Handhållen NIR-sensor mäter grovfodrets kvalité direkt på gården* syftade till att ge en överblick av samt testa modern och mobil NIR-teknik (Nära Infraröd Reflektans) för användning i praktiskt lantbruk. På senare tid har samma NIR-teknik som används på labb för att mäta kvalitet i grovfoder (främst ensilage av vall och majs) börjat nå marknaden i handhållen form. Det öppnar upp för att den ekonomiskt mycket viktiga näringsmässiga kvaliteten i grovfoder kan mätas oftare och betydligt snabbare än förut.

Efter en kort marknadsöversikt valdes NIR-sensorn *TrinaMix PAL 2* ut som testobjekt då den, framför allt genom löpande uppdatering av modellkalibreringar från analysföretaget Eurofins, bedömdes ha störst potential att ge användbara resultat utan krav på att användaren själv skapar kalibreringsmodeller. *PAL 2* mäter flera av viktigaste näringsparametrarna (ex. råprotein, smältbarhet, NDF o.s.v., dock ej mineraler) i flertalet grovfodertyper och testades i projektet huvudsakligen på vallensilage. Mjukvaran fungerar utmärkt tillsammans med tillhörande app och webbtjänst. Batteritiden är fullgod och hårdvaran är praktiskt designad med ett fåtal punkter där önskemål framförs i rapporten för bättre hållbarhet och förbättrad precision. För en användare kostade sensorn 64 000 SEK per enhet + 24 000 SEK per år för abonnemang, vilket möjligen gör den bäst lämpad för större företag. Mätnoggrannheten bedömdes av projektgruppen som en avgörande fråga för handhållna NIR-sensorers relevans i praktiskt lantbruk. Inom projektet jämfördes en liten mängd mätdata med labbanalyser (torr-NIR), enligt vilka sensorns överensstämmelse med labbanalyserna var mycket god för TS-halt, felmarginalen var acceptabel för råprotein och smältbarhet/omsättbar energi men något för ojämn för övriga parametrar såsom exempelvis fiberhalt. Det bedömdes dock finnas stor potential för förbättrad mätnoggrannhet genom mer enhetligt handhavande, modellförbättringar och smärre justeringar i sensorns mjukvara. Helhetsintrycket var gott och den stora potentialen med handhållna sensor bör tillåta visst tålamod med modellkalibreringar. Tills vidare bör dock resultaten från sådana sensorer användas med viss eftertanke och efter samråd med kalibreringsansvarigt företag och experter.



Bakgrund

Foder är vanligen den största kostnadsposten i företag med nötboskap och särskilt företag med mjölkproduktion. Mjölkproduktionen som verksamhetsgren stod för ett produktionsvärde om 18,8 miljarder kronor – eller en dryg fjärdedel av lantbrukets totala produktionsvärde under året 2023.

Basen i svenska mjölkors foderstat utgörs av vallensilage, vars innehållsmässiga kvalitet, närings- och energiinnehåll i mångt och mycket bestämmer hur kornas foderstat kan utformas. Med andra ord är vallens innehållsmässiga kvalitet en viktig faktor med bäring på en stor del av det svenska lantbrukets lönsamhet både i det enskilda företagets perspektiv och i nationalekonomiskt hänseende.

Idag mäts närings- och energiinnehåll i vallensilage på labb främst med s.k. torr NIR-teknik. Med det menas att fodret inte genomgår kemisk analys i första hand, utan först torkas i ugn och sedan analyseras med NIR-kamera (Nära Infraröd Reflektans). Det sker genom att materialets reflektansmönster jämförs med referensvärden från kemisk analys och innehållet av energi, protein, fibrer o.s.v. beräknas efter en kalibreringsmodell.

På senare tid har NIR-tekniken blivit både billigare och mer kompakt, och sedan ett par år finns handhållna, mobila NIR-sensorer på marknaden. Handhållna NIR-sensorer har potential att öka precisionen i utfodring och växtodling genom att mätningar kan göras oftare, snabbare och på sikt möjligen billigare. En integrering av handhållna NIR-sensorer i lantbruket förutsätter dock att förtroende för och förtroelighet med tekniken skapas inom lantbrukar- och rådgivarkåren, samt att tekniken är tillräckligt användarvänlig och exakt i förhållande till priset.

Termer och begrepp

Aktiv/passiv sensor

Sensor som mäter reflektans av ljus från egen ljuskälla (aktiv) resp. naturligt (ex. sol-)ljus (passiv).

Multi-/hyperspektral sensor

Sensorer som mäter reflektans i många korta (multi-) respektive få men breda (hyper-) våglängdsband.

Reflektans

Reflekterat ljus

Spektrofotometer

En sensor som mäter intensitetens hos ett spektrum av reflekterat ljus (reflektans).

Spektrum/spektra (pl.)

Alla de våglängdsband som mäts av en sensor.

Våglängdsband

Ett spann av våglängder hos ljus, uttryckt i nanometer. Ex ljus i bandet 500-599 nm uppfattar vi som grönt.

Metod och syfte

Projektets mål var att efter en enklare marknadsöversikt införskaffa och genomföra praktiska tester av handhållna NIR-sensorer för grovfoder. Syftet bestod i att genom testningen sprida kunskap om handhållna NIR-sensorers funktion och potential, samt att ge ett omdöme om den valda produktens lämplighet för användning i praktiskt lantbruk.

Växa Sverige har tidigare varit samarbetspartner i projekt där NIR-teknik testats för grovfoder under nordiska förhållanden. Vidare har Växa Sverige lång erfarenhet av att läsa och tolka analyser, samt att arbeta nära tillsammans med laboratorier. I projektgruppen har främst personal från Växa Sveriges Rådgivnings- samt Kunskap- och utvecklings-avdelningar deltagit.

Den valda NIR-sensorn testades främst under sensommaren och hösten 2025, i huvudsak på vallensilage med < 50% baljväxter, men även i mindre utsträckning på majsensilage och grönmassa av helsädesmajs. Dataunderlaget bestod i lika delar av foder från södra västkusten och östra Svealand, av olika hackelselängd, från skördeåren 2024 och 2025. Bredden i materialets urval var avsiktlig för att spegla hur användningen torde se ut i praktiken – där förutsättningarna varierar i lämplighet för mätning. Totalt gjordes ca 60 mätningar, varav drygt 30 kompletterades med efterföljande labbanalys (torr-NIR) hos Eurofins. Av det totala antalet mätningar som gjordes var 36 på vallensilage varav 20 även analyserades på labb, 21 var på färsk majs, 4 var på majsensilage och resterande på samma foderslag men andra foderkoder, ex vallensilage med >50 % baljväxter.



Vall ett komplext, sammansatt material där kvaliteten har stor påverkan på lönsamheten i produktionen.

Resultat

Vid valet av NIR-sensor inhämtades av forskare, lantbrukare, tryckt material och egna erfarenheter att känsliga faktorer vid mätning med våt-NIR är **kalibrering** och **mätutförande/provpreparering**. Här avses med kalibrering både instrumentkalibrering (att den enskilda sensorn mäter ljus korrekt) och modellkalibrering (att den uppmätta reflektansen översätts till svar om det undersökta materialets kemiska sammansättning med hjälp av korrekta samband). Med andra ord är det avgörande att sensorn löpande kan instrumentkalibreras så att ex. smuts på linsen inte ger felaktiga mätvärden, att mätvärdena översätts till den information man vill ha enligt korrekta prediktionsmodeller för det specifika materialet samt att mätningarna kan utföras likadant varje gång och på ett sådant sätt att man får bra mätdata från enbart det material man önskar mäta.

De sensorer som förekom i marknadsöversikten var CI 710s (CID Bio-science), PSR+ (Spectral Evolution), N-sensor (Yara), X-NIR (Dinamica Generale), NeoSpectra (Si-Ware Systems) och PAL-2 (TrinaMix). Parallellt med föreliggande projekt, har institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap på SLU drivit projektet VallOptimal. Detta projekt fokuserar på Yara N-sensor och har uppnått goda resultat gällande modellkalibrering för vall med den sensorn. Dock valde man på SLU att använda en äldre, passiv modell av Yara N-sensor där kameran mätte flertalet våglängdsband, för vilken tillverkningen har upphört. Forskningsresultaten var heller inte översättbara till den moderna Yara N-sensorn, då dess kamera förenklats för att enbart mäta de våglängdsband som är relevanta för att beskriva kväveupptag/klorofyll i spannmål. Därav föll projektgruppens val på sensorn PAL-2 från tyska TrinaMix, ett företag avknoppat från BASF. Valet motiverades i första hand av att analysföretaget Eurofins samarbetar med TrinaMix för att skapa modellkalibreringar för grovfoder i Nordeuropa, och därmed bedömdes PAL-2 ha bäst chanser att kunna ge korrekta mätsvar för prover i Norden. Flertalet av de övriga sensorerna som förekom i marknadsöversikten saknade helt medföljande modellkalibrering för nordiskt grovfoder, eller erbjöd inte betryggande uppdateringar av detsamma.

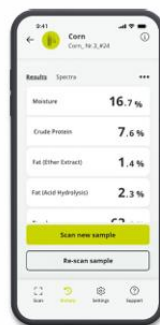


PAL Two

trinamiX Mobile NIR Spectrometer



Rotator



Guide App

TrinaMix PAL-2

Den valda sensorn är en aktiv multispektral sensor som mäter reflektans i ca 50 nanometer (nm) breda våglängdsband i spektrumet 1300-2350 nm. Sensorn består av en IP65-klassad skruvdragar-liknande handenhet (vikt 0,7 kg) på vilken en rotator/provberedare (0,88 kg) med en roterande provburk monteras vid mätning av grovfoder-material. Rotatorn har ett spår för handenhetens fästdel på sin undersida, samt en mindre plastklack som handenheten låses fast med. Både handenhet och provberedare har eget inbyggt batteri (uppgiven kapacitet enligt återförsäljare är 4,9 Ah för handenheten resp. 3,5 Ah för provberedaren), och laddas med medföljande USB-C-kabel. Handenheten kopplats med Bluetooth till mobiltelefonen, och kontrolleras genom en app. Vid start krävs alltid en instrumentkalibrering som tar ca två minuter. Handenheten har en magnetfäst liten platta med en vit (helt reflekterande) yta som kameran kalibreras mot. Plattan sitter på handenhetens ovansida och lossas med ett enkelt handgrepp.

För att kunna använda sensorn krävs ett grundabonnemang från tillverkaren, vilket kostade 7 700 SEK per år för en användare. Därutöver får ett modellkalibreringsabonnemang för grovfoder köpas från Eurofins som ansvarar för grovfoder-applikationerna till mätaren, vilket kostade strax under 16 000 SEK per år för en användare. För övriga priser, se tabell nedan.

Hårdvara och handhavande

Handenheten och provberedaren/rotatorn levereras i en gedigen koffert. Provberederaren/rotatorn består dels av en droppformad ram som häktas fast vid sensorn – dels i en provburk med glasbotten som läggs ned i ramens mitt. I provburken placeras provet som ska skannas, och vid en knapptryckning på ramen börjar provburken rotera. Handenhetens kamera sitter under provburken, riktad uppåt, och scanning sker således igenom provburkens glasbotten. Utförandet är praktiskt då kamerans lins löper mindre risk att bli nedsmutsad av provmaterialet vid mätning än om handenheten skulle hållas på frihand mot materialet som mäts. En nackdel torde dock vara utförandet på den lilla låsklack i plast som håller fast provberedaren i sitt spår på handenheten, den hade börjat bli nött och spröd på den ena av de enheter som testades i projektet och förefaller inte utbytbar.

Priser 2024 (SEK)

Sensor	~56 000
Rotator	~7 600
Abonnemang, mjukvara	~7 700
Kalibreringspaket, grovfoder	~15 700
Summa	~64 000/enhet + 24 000 /år

Tillverkarens rekommendation för fullgod mätnoggrannhet är att rengöra provburkens insida med etanol vid jämna mellanrum. Vid testning användes vanlig handsprit och fiberduk/hushållspapper till rengöring inför varje mätsession eller vid var 5-6:e nytt prov. Framför allt blöt majs lämnar spår av stärkelse efter sig på glaset i provburkens botten (som på en kökskniv efter att man skurit potatis). Vid leverans ingår två provburkar per sensor-paket.

Sensorn utsattes under testerna för sporadiska regnstänk vilket elektroniken tålde, om än misstänkts mätvärdena från sådana tillfällen vara mindre säkra. Tillverkaren uppmanar att lyfta upp provburken ur provberedar-ramen vid påfyllning av provburken, för att inte material ska ramla ned i provberedarramen och på kameranlinsen, men trots det upplevdes vid testningen att små mängder material lätt hamnade där under långa mätsessioner. En tänkbar och billig åtgärd vore att förse provburkens övre kant med en liten gummiflens som täcker glipan mellan provburk och rotator-ramen.



Mätning med TrinaMix PAL 2

Mätning går enligt följande:

1. Ta ut ett prov ur en öppen plansilo genom att ta ensilage ur snittytan i formen av ett W, från ena väggen till den andra, ömsom högt upp, ömsom lågt.
2. Blanda ensilaget väl i en hink.
3. Fyll provburken (som rymmer en dryg liter, motsvarande en "näve" löspackat ensilage).
4. Starta skanningen i appen
5. Töm provburken och upprepa steg 3-4 ytterligare sex gånger.

För balar togs i projektet prov med borrhorisontellt genom mitten av balen, från tre till fem balar per skörd.

Totalt behöver alltså sju skanningar göras vid för att mätningen ska ge ett resultat. När varje skanning är klar behöver man stanna rotatorn med ett knapptryck, plocka ur och tömma provburken. För vallensilage åtgår totalt ungefär lika mycket material som skickas in vid en vanlig foderanalys till labb. Hela proceduren med mätning kräver sålunda en del handpåläggning, och tar ca 5-10 minuter beroende på förberedelser. Man får samtidigt ha respekt för att kravet på sju skanningar per mättillfälle syftar till att öka mätnoggrannheten. Sensor tillåter en inte att göra mätningar av grovfoder utan att provberedaren/rotatorn är monterad på handenheten, och vid några tillfällen behövde mätproceduren startas om då handenheten uppgav sig ha tappat kontakten med provberederaren. Problemen uppstod inte varje gång men tillräckligt ofta för att utgöra ett visst irritationsmoment. En tänkbar lösning vore att ändra i programvaran så att de redan genomförda skanningarna inte raderas vid tappad kontakt mellan handenhet och provberedare, utan att enbart den pågående skanningen behöver göras om.

Handenheten styrs som ovan nämnt av en app. Uppkoppling och kommunikationen mellan app och handenhet upplevdes under testning som utmärkt. Sensorn och telefonen hittar varandra snabbt och appen krånglade aldrig. Efter en skanning visas mätsvaren både i appen och på en liten skärm på handenheten. Ytterligare bearbetning av resultaten sker med fördel i tillverkarens webbtjänst istället för i appen. Där kan äldre mätningar överblickas, hanteras och delas med andra. Från hemsidan finns också en föredömlig funktion som tillåter en att skriva ut rapporter i PDF-format från en eller flera mätningar, och välja vilka parametrar som ska ingå i rapporten.



Mätnoggrannhet och parametrar

De parametrar som sensorn mäter för vallensilage står listade i tabellen till höger. De färglagda raderna är de parametrar som kunnat jämföras med labbanalys (obs. torr-NIR) i testningen. Omsättbar energi visas i skrivande stund (dec 2025) inte bland mätsvaren men lär enligt tillverkaren tillkomma inom en snar framtid. Tills vidare kan OE beräknas separat utifrån OMD-smältbarhet och aska, vilket också gjorts i testningen. Avsaknaden av främst mineraler (ex. K, P, Ca) i sensorns parameterlista gör att sensorn inte helt kan ersätta labbanalys, dock bör mineraler med hänsyn till mätnoggrannheten sannolikt inte mätas med våt-NIR.

Eurofins – som förestår grovfoderapplikationerna hos TrinaMix-sensorn – har i skrivande stund inte gått ut med några närmare uppgifter om mätnoggrannheten för de olika parametrarna. Enligt utsago är dock mätosäkerheten ca 1,5-2 gånger högre med våt-NIR jämfört med torr-NIR, och Eurofins har uttryckt att de i sina egna tester dragit slutsatsen att TrinaMix-sensorns mätosäkerhet är i samma storleksordning. Med andra ord, sensorn är ungefär så bra som sättet att mäta på tillåter. Därtill sker löpande förbättring och korrigering av modellen för hur uppmätt reflektans över spektrumet ska översättas till respektive kvalitetsparameter. Inför lanseringen av produkten gjordes tester på ca 140 000 gräsensilageprover i norra Europa.

Inom ramen för den testning som redovisas här jämfördes sensormätning och labbanalys för 20 prover vallensilage. Att utvärdera sensorns mätnoggrannhet var inte det huvudsakliga syftet med projektet, men nedan följer en enkel uppställning för de parametrar som – utöver att de mäts av TrinaMix-sensorn – också ingår som standard i Eurofins analyspaket för vallensilage (foderkod 6-165, utan mineraler). Vid läsning av siffrorna ska man bära med sig att dataunderlaget är alldeles för litet för att utgöra underlag för seriösare kalibrering och att mätningarna gjorts på mycket skiftande material i termer av TS-halt, botanisk sammansättning och hackselälgd. Ensilaget som analyserats har också varit lagrat på olika sätt (bal resp.

Parametrar	Enhet
ADF	g/kg TS
ADL	g/kg TS
Råska	g/kg TS
Råfiber	g/kg TS
OMD	%
TS	g/kg
Råfett	g/kg TS
NDF	g/kg TS
Råprotein	g/kg TS
Socker	g/kg TS
pH	-



plansilo), samt är från olika delskördar, från både år 2024 och 2025, från både Hallands och Uppsala län. Proverna är dock i övrigt analyserade på det sätt som tillverkaren rekommenderat.

n = 20	R ²	Medelvärde enl. labb	*RMSE
ADF (g/kg TS)	0,50	283	22
OMD (%)	0,40	74	4
TS (%)	0,89	42	5
NDF (g/kg TS)	0,46	455	48
Råprotein (g/kg TS)	0,42	138	16
Socket (g/kg TS)	0,54	61	29
pH	0,39	4,6	0,54
Aska (g/kg TS)	0,17	80	37
**OE (MJ/kg TS)	0,59	10,7	0,51

$$* \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right)^2}$$

** Beräknad omsättbar energi (OE) från sensormätt OMD och aska, jämfört med OE enligt labb.

R²-värdena i tabellen ovan ska tolkas som korrelationen mellan sensors mätvärde och svaret från labb, utan s.k. bias – alltså sensors eventuella tendens att kategoriskt över- eller underskatta varje parameter. Ett högt R²-värde indikerar en hög överensstämmelse mellan sensors mätvärde och svaret från labb, det vill säga ett R²-värde närmare 1 är bättre än ett lägre värde. RMSE (root mean squared error) – i relation till medelvärdet kan tolkas som ett mått på ”hur fel” sensorn brukar ha. RMSE kan därmed inte jämföras rakt av mellan olika näringsparametrar, men ett lägre värde i förhållande till medelvärdet är att föredra. Sensors felmarginal är för de flesta parametrar acceptabel och i linje vad som förväntats, men korrelationen är för flertalet parametrar något lägre. Sett enbart till de prover som togs i Halland (n = 14) är R²-värdena genomgående högre, R² > 0,9 för både TS-halt, OMD och OE respektive 0,57 med RMSE om 7,5 g för råprotein – vilket tillsammans de tidigare nämnda parametrarna torde vara de viktigaste för användarna. Vari skillnaden mellan proverna som togs i Halland och Uppsala skulle bestå är osäkert.

Slutomdöme

För många lantbrukare, foder- och växtodlingsrådgivares behov uppfyller TrinaMix PAL 2 väl de krav som ställs på hårdvara och användarvänlighet. Batteritiden är fullt tillräcklig, instrumentkalibrering och hopkoppling till telefonen går snabbt och smidigt. Tio minuters arbete på ett ladugårdskontor är i vårt tycke heller inte för lång tid för att få ett svar på ett ensilages viktigaste kemiska kvalitetsparametrar. En foderanalys skickad till labb går ytterst sällan fortare än två dygn från postning till svar, och i jämförelse med det erbjuder TrinaMix PAL 2 en mycket eftertraktad tidsvinst. Även enbart för kontroll av TS-halt, vilket med torkning sällan går fortare än på en eftermiddag, är sensorn ett lyft. Priset gör möjligen sensorn mer relevant för större gårdar, gårdssamarbeten, maskinstationer eller rådgivningsföretag.

Mätnoggrannheten är en avgörande fråga åtminstone för en rådgivares behov, där absolutvärden snarare än relativa värden mellan partier för ensilagets kvalité behövs. Att TrinaMix i samarbete med Eurofins levererar en handhållen produkt som kommer med programvara för att översätta de mätta reflektansmönstren till svar i ex. råprotein och OMD-smältbarhet är sällsynt bland NIR-sensorer på marknaden. De flesta ger enbart svar i reflektans-kurvor för olika våglängdsband, men sannolikt är kalibrering och tolkning ett krav för att en NIR-sensor ska kunna användas av andra än forskare. Föresatsen från PAL 2:s tillverkare och labb är behjärtansvärda men inger samtidigt ödmjukhet eftersom grovfoder är komplicerade, heterogena material som sannolikt är mycket svåra att skapa robusta och exakta kalibreringsmodeller för.

Resultaten om mätnoggrannhet som redovisas ovan i rapporten bör inte ses som ett bra underlag för kalibrering utan snarare som ett tufft stresstest. Att dra slutsatser från så små datamängder är inte tillrådligt, särskilt som överensstämmelse på delar av mätningarna blev tämligen olika, men för att i nuläget kunna rekommendera sensorn på bred front anser projektgruppen att det behövs något jämnare resultat avseende mätnoggrannheten för ensilage. Det är fullt möjligt att detta kan uppnås enbart genom en mer noggrann provhygien och metodik vid mätning, och enligt de signaler vi fått från kalibreringsföretaget arbetas det ständigt med förbättringar av kalibreringsmodellerna. Likväl är vår uppfattning att handhållna NIR-sensorer – vid användning i praktiskt lantbruk – inte kommer att få labbliknande, jämna och goda förutsättningar utan behöver kunna hantera både ”väder och vind” samt variation i materialets beskaffenhet. Sensorn har i sitt grundutförande en funktion för att varna om mätningen inte bör ses som tillförlitlig utan göras om. Det är för oss inte känt vad som avgör om den varningsfunktionen aktiveras, men måhända kunde arbete med den funktionens känslighet underlätta för att minska risken för att användarna reagerar på och använder felaktiga mätresultat.



Sammanfattningsvis ser projektgruppen här inte skäl att förkasta TrinaMix PAL 2 som alternativ för praktiskt lantbruk för mätnoggrannhetens skull. Däremot bör man som användare vara försiktig med hur mätdata används i den mån tillverkare och labb inte kan ge egna rekommendationer eller visa på uppdateringar av kalibreringsmodeller. Exempelvis mätte sensorn TS-halt med fullt acceptabel noggrannhet, och som användare bör man också kunna testa sig fram – företrädesvis i kontakt med företrädare för labbföretaget. Potentialen hos handhållna NIR-sensorer är så pass stor att det torde motivera visst tålamod med kalibreringsmodellernas exakthet i extrema lägen, särskilt om företaget bakom kalibreringen är transparent och samarbetsvilligt gentemot användarna. Helhetsintrycket av TrinaMix PAL 2 är gott, och sannolikt bör man förvänta sig att se mer av sådana produkter i lantbruket.

Förslag till förbättringar

- Gummiflens runt överkanten av provburken för att förhindra att material faller ned i rotatorn och kontaminerar linsen
- Förbättrad låsklack i rotatorn/provberedarens infästning till handenheten – förslagsvis genom ersättning till utbytbart metallclips.
- Ändring i programvaran så att samtliga scanningar inte behöver göras om vid tillfälligt tappad kontakt mellan handenhet och rotator.
- Ökad känslighet hos varningsfunktionen för "mätningens kvalitet" så att en mätning rekommenderas att göras om vid tvivelaktiga mätsvar.
- Inkludering av rengörings-kit och -instruktioner i kofferten för att säkra mätnoggrannhet.
- Utökade möjligheter till sortering/kategorisering av gjorda mätningar i webbtjänsten.
- Möjlighet att överblicka tidigare mätningars resultat direkt i appen