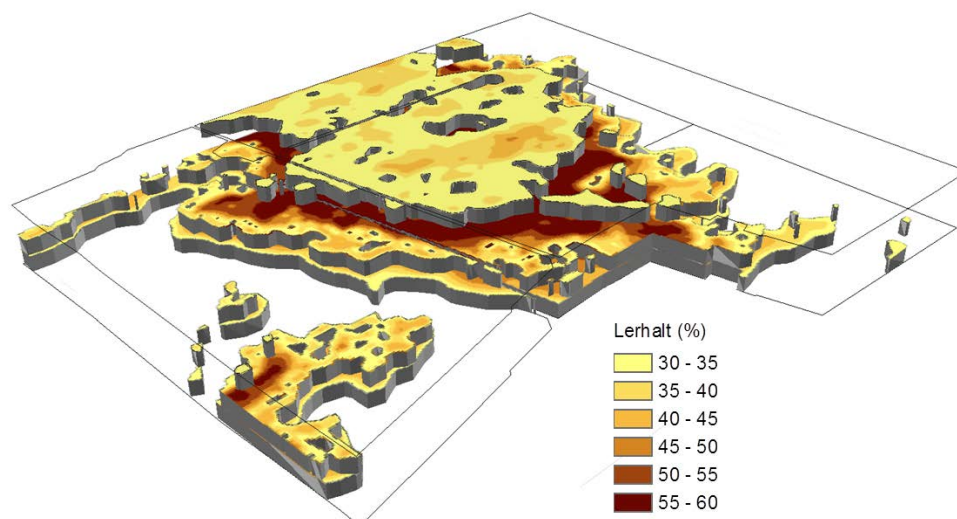




Jordartskartering av matjord och alv direkt i fält



Piikki K., Wetterlind J., Söderström M. & Stenberg B.

Förord

I och med att lantbrukaren börjar kunna använda markkartan och agera efter den variation som återges är markkarteringen på väg in i en ny era. Det finns behov av en större detaljrikedom än vad brukliga ett prov per ha, eller för jordart ner till ett prov vart tredje ha, kan ge. Mot bakgrund av att det finns allt större behov av detaljerade markkartor för olika tillämpningar i jordbruket finansierade Stiftelsen Lantbruksforskning projektet *Jordartskartering av matjord och alv direkt i fält* (H1033303), som pågick 2010-2012, Den övergripande målsättningen med projektet var att utveckla metoder för detaljerad jordartskartering av matjord och alv med ett minimum av arbetskrävande och dyra provtagningar, transporter och övrig hantering av jordprover. Istället analyseras marken direkt i fält. Tätare provtagning kräver ökad effektivitet och billigare analyser, vilket analys direkt i fält kan åstadkomma. Analys av alven närmast förutsätter analys direkt i fält för att kunna bli tillräckligt rationell. I projektet har vi använt ett antal s.k. proximala sensorer (d v s markburna sensorer där mätavståndet är högst några meter) som registrerat olika egenskaper hos både matjord och alv. Vi har också använt Lantmäteriets nya digitala höjddatabas (NNH). Strategierna för att producera högupplösta kartor över matjord och alv baseras på geostatistiska tekniker och olika multivariata beräkningsmetoder, s.k. *data mining*.

Författarna 2013

Omslagsbild. Tredimensionell karta över lerhalten på ett 55 hektar stort område. Kartan är framtagen med sensormätningar samt jordanalyser i 20 platser \times 3 djup och visar lerhalter mellan 30 % (gult) och 60 % (brunt). Transparenta områden har en lerhalt som är under 30 %. De tre djupintervallen är 0-0,2 m, 0,4-0,6 m och 0,6-0,8 m.

Sammanfattning

En metod för jordartskartering av matjord och alv utvecklades och utvärderades på tre gårdar i Skaraborg. Metoden baseras på täta mätningar med proximala (markburna) sensorer för elektrisk ledningsförmåga (ECa), gammastrålning, penetrationsmotstånd (F) och reflektans i det synliga och nära infraröda våglängdsområdet (vis-NIR). Dessutom användes Lantmäteriets nya digitala höjdmodell (NNH). Jordprover togs för laboratorieanalys av textur och mullhalt på 20 platser \times 2 eller 3 djup på varje gård. Detta referensdataset utökades till 100 platser \times 2 eller 3 djup genom profilmätningar med ett probsensor-system (vis-NIR, F och ECa).

ECa-profiler från prob-sensorn kombinerades med djupintegrerade ECa-värden från en sensor baserad på elektromagnetisk induktion (EM38 MK2) för att ta fram en tredimensionell ECa-modell. Denna användes tillsammans med data från gammaspectrometern och den digitala höjdmodellen som indata till prediktionsmodeller för ler-, sand- och mullhalt för tre djupintervall (0-0,2 m, 0,4 m-0,6 m och 0,6 m-0,8 m) på två av gårdarna. Efter korsvalidering tillämpades prediktionsmodellerna på ett punktgitter med interpolerade sensor- och höjddata. För fraktionerna av ler och sand gav modellerna bättre kartor än rumslig interpolation av referensdata ($n = 100$). Kartor över mullhalten i matjorden blev dock bättre genom att enbart interpolera referensdata. I de två alvlagren var mullhalten mycket låg och kunde inte karteras. Resultaten visar också att det i de två alv-lagren var det bättre att basera ler- och sandmodellerna på den tredimensionella ECa-modellen än på ECa-data från EMI-sensorn direkt.

Innehållsförteckning

<i>Förord</i>	2
<i>Sammanfattning</i>	3
<i>Innehållsförteckning</i>	4
<i>Bakgrund</i>	5
Jordartens betydelse	5
Proximala marksensorer	5
Höjddata	6
<i>Syfte</i>	6
<i>Material och metoder</i>	7
Fältmätningar	7
Mätningar med proximala sensorer	7
Referensdataset	9
Dataanalys delstudie 1 -en tredimensionell ECa-modell	9
Dataanalys delstudie 2- att kombinera mätprobens sensorer	10
Dataanalys delstudie 3 –en tredimensionell markkarta	11
<i>Resultat</i>	11
Textur och mullhalt på Entorp och Brogården.....	11
Delstudie 1 Genom att kombinera flera mätningar kan man ta fram en 3D-karta över ECa...13	
Delstudie 2 Att kombinera flera sensorer ger bättre bestämmningar	14
Delstudie 3 Tredimensionella markkartor över mullhalt och textur	14
<i>Diskussion</i>	21
<i>Slutsatser</i>	22
<i>Tack</i>	22
<i>Referenser</i>	23

Bakgrund

Jordartens betydelse

En aktuell jordartskarta är ett mycket bra hjälpmedel för lantbrukaren att kunna anpassa sina insatser i växtodlingen. Att relativt exakt känna till hur jordarten fördelar sig inom fält och dessutom ned till dräneringsdjup blir allt viktigare i och med möjligheterna ökar att platsspecifikt anpassa insatser i produktionen efter det lokala behovet. Jordarten påverkar lokalt både kväveleverans och markvattendynamik och därigenom grödans skördepotential, växnäringsbehov, vattenförsörjning och torkkänslighet. Att utveckla markkarteringen och lyfta fram jordartskarteringen även i alv är nödvändigt för att motsvara de krav som ett mer precist jordbruk som bättre utnyttjar tillgängliga resurser och minimerar påverkan på omgivande miljö ställer.

I flera studier har det visats att bestämningen av jordartsp parametrar kan förbättras genom att man använder en kombination av sensorer som mäter olika egenskaper istället för att bara använda en. Kitchen et al. (2010) fann att plogsulan kunde beskrivas betydligt bättre med en kombination av olika typer av sensorer för elektrisk ledningsförmåga (ECa) än med bara en. Likaså fann Taylor et al. (2010) att lerhalten i matjord och alv kunde bestämmas bättre genom en kombination av ECa, markens naturliga gammastrålning och digitala höjdm modeller (DEM). Hedley et al. (2010) kunde via jordarten bestämma den vattenhållande förmågan i markprofilen genom att kombinera ECa med NIR-spektrum. Över ett avrinningsområde i Australien modellerade Malone et al. (2009) mullhalt och vattenhållande förmåga i markprofilen med hjälp av satellitbilder i sju bandbredder i det synliga och infraröda området (vis-NIR), gammastrålning och DEM. Ett viktigt motiv att kombinera sensorer för jordartsbestämning av både matjord och alv är att flera av dem enbart påverkas av markytan eller det allra översta jordlagret medan andra, t ex ECa, kan påverkas av markens egenskaper ner till ett par meters djup beroende på instrument och hur man mäter (Sudduth et al., 2000). Spektroskopiska metoder mäter reflektans från ytan på ett jordprov eller på marken, men utrustningar finns där en prob förs ner i marken (Ben-Dor et al., 2008; Mouazen och Ramon, 2006; Stenberg et al., 2007) för analys på olika djup.

Proximala marksensorer

Gammastrålning avges naturligt från marken och med tillgängliga instrument kan man bestämma förekomsten av de radioaktiva isotoperna ^{40}K , ^{238}U och ^{232}Th . Den sammanlagda registrerade strålningen (*total counts*), men framförallt ^{232}Th har visat sig fungera mycket bra för att prediktera lerhalt (Söderström et al., 2008; van Egmond et al., 2010). Gammastrålning kan mätas både från flygplan och med markburna (proximala) instrument.

ECa mäts med en teknik baserad på elektromagnetisk induktion. Instrumentet har en sändande och en eller flera mottagande induktionsspolar. Signalen är beroende av den elektriska ledningsförmågan i mediet. I mark har vatten en hög ledningsförmåga. Ofta relaterar ledningsförmågan i icke-salina jordar till lerhalt eftersom lerjord håller mer vatten än sand vid en given tidpunkt. Mullhalten kan också påverkas av samma anledning (Hossain et al., 2010; McBratney och Minasny, 2005). Eftersom vattenhalten är avgörande skall mätvärdena uppfattas som relativa varandra vid ett givet mättillfälle. Djupet som påverkar mätresultatet bestäms av avståndet mellan spolarna samt om de används vertikalt eller horisontellt. Det finns dessutom instrument för punktmätning av ECa som sitter i en kon och mäter bara några cm ut från spetsen medan den förs nedåt i markprofilen (Myers et al., 2010).

Reflektans i det synliga och nära infraröda (NIR) våglängdsområdet mäts som den andel av infallande ljus från en ljuskälla som reflekteras av jorden. Energi, d.v.s. ljus, med olika våglängder absorberas av bindningar i främst vatten och organiska molekyler, men även i lermineral. Reflekterad energi ger därmed ett tolkningsbart spektrum. Förutom vatten hör jordart och då framförallt ler- och mullhalt till de parametrar som predikteras bäst av NIR beroende på att dessa parametrar är de som påverkar spektrumet mest och att de har väldefinierade spektroskopiska egenskaper (Stenberg et al., 2010). Kemiska bindningar i humusämnen har tydliga absorptionsband i NIR-området (Rossel och Behrens, 2010; Stenberg et al., 2010). Likaså absorberar hydroxidjoners bindning till de laddade lermineralens ytor och Al- och Fe-OH bindningar i lermineralen starkt (Clark, 1999). Penetrationsmotståndet mäts av en lastcell i en kon som förs nedåt i markprofilen varvid motståndet avläses. Markpackning, lerhalt och vattenhalt är faktorer som påverkar penetrationsmotståndet (Arvidsson et al., 2004).

Höjddata

Det finns ofta ett samband lokalt mellan jorddjup, jordart och relativ topografi (Malone et al., 2009). Därför kan terrängattribut, som höjd, lutning och landform bidra med användbar information för digital markkartering. Exempelvis fann Odeh et al. (1994) att lerhalten i alven kunde karteras bättre genom regressionskriging baserad på landform än genom enbart rumslig interpolation. Lantmäteriet arbetar sedan 2009 med att ta fram en ny nationell höjdmodell (NNH) genom laserskanning av terrängen från flygplan. Insamlade höjddata i punktform bearbetas och finns sedan att tillgå bland annat i form av ett raster med $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ upplösning (Grid 2+). Detta raster anges ha ett medelfel i höjddled som är mindre än 0,5 m. Noggrannheten för plana hårda ytor kan vara betydligt bättre. När det gäller åkermark kan dock noggrannheten försämrans om laserskanningen görs när grödan växer tät på fälten. Om laserstrålarna reflekteras och sprids av grödan riskerar höjdmodellen att hamna ovanför den faktiska marknivån.

Syfte

Projektet delades upp i tre delstudier med syfte att:

1. Ta fram en tredimensionell ECa-modell baserad på en kombination av två olika ECa-sensorer.
2. Hitta den bästa kombinationen av de tre sensorerna i mätsystemet Veris P4000 EC-Force-NIR prob, för prediktion av ler-, sand-, silt- respektive mullhalt.
3. Utvärdera en metod att ta fram tredimensionella markkartor för ler-, sand- och mullhalt. Metoden använder lagerspecifika ECa-värden från delstudie 1 och ett utökat referensdataset som tagits fram med den bästa kombinationen av Verisprobens sensorer (delstudie 2).

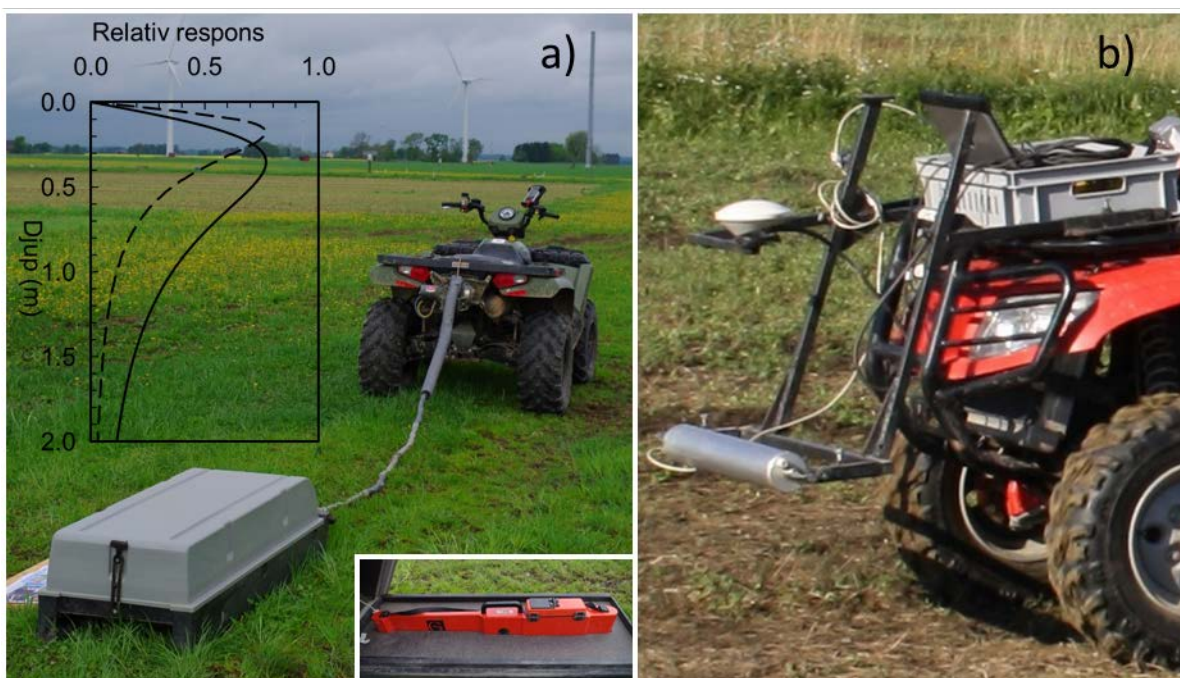
Material och metoder

Fältmätningar

Mätningar utfördes på tre gårdar i Skaraborg: Entorp (N 58° 22,6', E 13° 18,1'; 55 hektar), Brogården (N 58° 23,8', E 13° 26,3'; 37 hektar) och Bjertorp (N 58° 15,6', E 13° 7,9'; 35 hektar). De fält som valdes ut för mätning på respektive gård förväntades ha en uttalad jordartsvariation både horisontellt och vertikalt.

Mätningar med proximala sensorer

Markens djupintegrerade ECa mättes med en EM38 MK2-sensor (*Geonics Ltd*, Mississauga, Kanada) som placerats i en släde helt i plast och drogs av en fyrhjulning i transekter över fältet (Figur 1a). Två mätvärden med olika djupresponser loggades varje sekund och positionerades med DGPS (TDS Nomad GPS, Tripod Data Systems, Corvallis, OR, USA, 3-5 m positionsnoggrannhet).



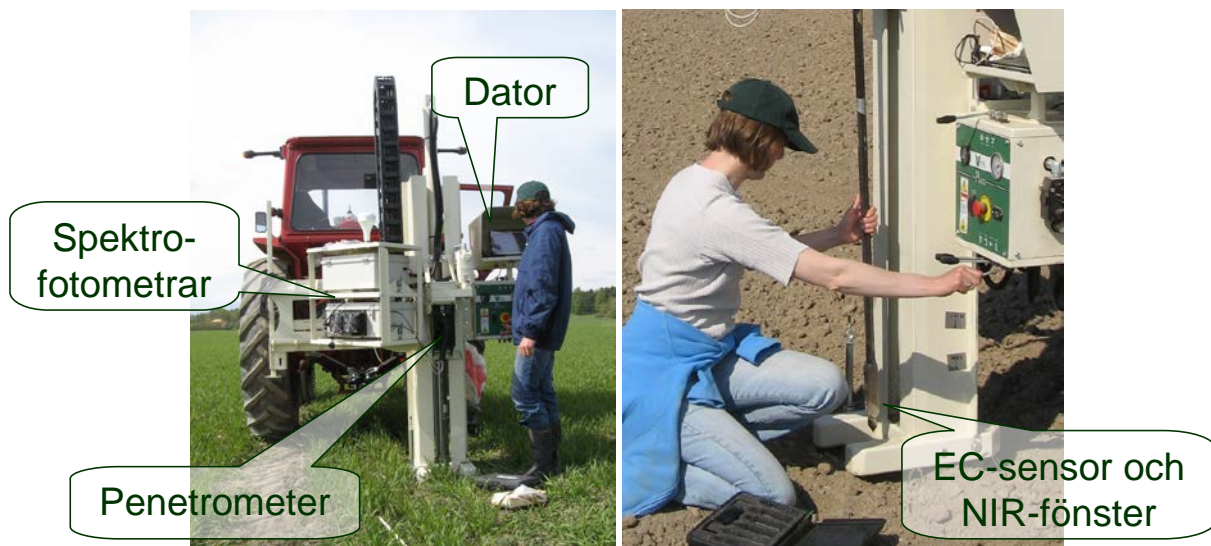
Figur 1. De proximala sensorer som användes för mätning av olika markegenskaper under pågående körning. a) EM38 MK2 som registrerar markens elektriska ledningsförmåga och b) Mullvaden som registrerar gammastrålningsspektra. Figur a visar även de två djupresponsskurvorna hos EM38 MK2.

De två djupresponserna innebär att 70 % av signalen härrörde från de översta 0,8 m respektive 1,5 m av marken (Figur 1a). På Bjertorp och Entorp gjordes mätningarna med 24 m mellan transekterna och en körhastighet som gav ett mätvärde var fjärde meter längs transekterna. På Brogården gjordes tätare mätningar med 12 m mellan transekterna och 3 m mellan värdena längs transekterna.

Över Bjertorp fanns data från en mätning med gammastrålningsspektrometer (*The Mole, The Soil Company*, Holland) från i april 2009 att tillgå. Nya mätningar gjordes på Entorp i november 2011 och på Brogården i september 2012. Instrumentet monterades på en fyrhjulning och mätningarna positionerades med RTK-GPS (AgGPS 332, *Trimble Navigation Ltd*, CA, USA med SWEPOS nätverks-RTK-tjänst, 2 cm positionsnoggrannhet) under pågående körning (Figur 1b). Det var 12 m mellan transekterna och knappt två meter mellan mätvärden

längs transekterna. Mätningar med samma system gjordes på Entorp i november 2011 och på Brogården i september 2012. På Entorp var avståndet mellan transekterna 24 m och på Brogården var det 12 m. På båda gårdarna var avstånden mellan mätpunkterna längs transekterna knappt 2 m. Radioaktiviteten hos de naturligt förekommande isotoperna ^{232}Th , ^{40}K och ^{238}U bestämdes från insamlade spektra med en fullspektrumanalys (Hendriks et al., 2001) som utfördes av *The Soil Company* i Holland. Även kvoterna mellan de tre isotoperna ($^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ och $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$) och det totala antalet sönderfall per sekund (*total counts*, TC) användes i dataanalysen.

En Veris P4000 EC-Force-NIR prob (*Veris technologies Inc.*, Salina, Kansas, USA) användes för att göra täta mätningar i djupled av ECa, penetrationsmotstånd och vis-NIR-spektrum (synligt och nära infrarött ljus; 350-2200 nm, med 8 nm upplösning). Mätssystemet var monterat på en traktor och proben fördes ner genom markprofilen med kraft från traktorns hydrauluttag (Figur 2). Mätningar gjordes ner till 0,8 m djup på Entorp och Brogården men till 0,6 m djup på Bjertorp för att inte skada grunda dräneringsrör. Mätvärden loggades med cirka 1,5 cm mellanrum i djupled. Mätningar gjordes på 100 platser per gård och på varje plats gjordes två profilmätningar. De 100 provplatserna bestämdes genom s k stratifierad slumpning. Efter att områden nära fältgränser (20 m på Brogården och 30 m på Entorp och Bjertorp) och inom en buffertzona från nedgrävda ledningar för el, tele och vatten (10 m på Entorp och 20 m på Brogården) tagits bort, delades fälten in i rutnät med 100 lika stora rutor och mätplatserna placerades ut slumpvis inom varje ruta. Rutstorleken blev $70 \times 70 \text{ m}^2$ på Entorp och $60 \times 60 \text{ m}^2$ på Bjertorp och Brogården. Medelvärden för mätdata beräknades för tre djupintervall, 0-0,2 m, 0,4-0,6 m och 0,6 m-0,8 m (0-0,2 m och 0,4-0,6 m på Bjertorp). Intervallet kring den förmodade kompaktionszonen i plogsulan (0,2-0,4 m) utelämnades.



Figur 2. Mätningar med Prob-sensorn Veris P4000 EC-Force-NIR.

Höjddata

Höjddata från NNH (Grid 2+) erhöles från Lantmäteriet för de tre gårdarna. På Entorp fanns brus i data som troligen orsakats av att grödan varit tät under mätningen. I ett första steg interpolerades höjdvärdena från den ursprungliga spatiala upplösningen på $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ till en reducerad upplösning på $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, vilket minskade bruset. För varje $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ rastercell beräknades lutning och relativ topografi (form). Det sistnämnda anger om en cell ligger på en höjd eller i en sänka lokalt sett, och beräknades som höjden i förhållande till medelhöjden i ett cirkulärt närområde med 50 m radie.

Jordprover

Tjugo av de 100 platserna där profilmätning gjorts med Verisproben valdes ut som referensplatser där jordprover togs för analys. De 20 platserna valdes ut för att både täcka in varje kartområde geografiskt och för att täcka in variationen i markegenskaper. För att göra detta användes vid tidpunkten tillgängliga mätdata som bakgrundsinformation. Det var grund och djup ECa, ^{232}Th , ^{40}K samt höjd på Entorp, grund och djup ECa samt höjd på Brogården och djup ECa, skillnaden mellan djup och grund ECa samt ^{232}Th på Bjertorp. Bakgrundsinformation klassindelades genom *fuzzy-k-means*-klassificering med den fritt tillgängliga mjukvaran FuzME, version 3,5b (Minasny och McBratney, 2002) och klasserna ritades ut på en karta, som användes för att manuellt välja ut provplatser. Vid de 20 referensplatserna togs jordprov ut för analys. Först togs tre stick ut i nära anslutning till probmätningarna med matjordsprovtagare (0-0,2 m djup) och lades i en plastpåse. Sedan togs djupare stick, ner till 0,6 m eller 0,8 m, ut i samma håll med Ultuna-borr. Från dessa lades jorden från 0,4-0,6 m och 0,6-0,8 m i varsin plastpåse. Proverna fick lufttorka innan de skickades till Markfysiklaboratoriet vid Institutionen för mark- och miljö på SLU. Texturen bestämdes genom sedimentation (Gee och Bauder, 1986) och mullhalten bestämdes från glödförlust. Från texturanalysen användes fraktioner för ler ($< 2\ \mu\text{m}$), silt ($2\ \mu\text{m}$ -0,6 mm) och sand (0,6 mm – 2 mm). Värdena skalades så att alla fraktioner är uttryckta som procent av hela jordprovet, d v s både finjord ($< 2\text{ mm}$) och grus.

Referensdataset

Olika referensdataset (data för kalibrering och validering av modeller) har använts i de olika delstudierna. I delstudie 1 användes ECa-värden från 80 av de 100 provplatserna för kalibrering och resterande 20 provplatserna användes för validering. I delstudie 2 användes de laboratoriebestämda värdena för ler-, sand-, silt- och mullhalt från de 20 jordprovs-platserna och tre djup för kalibrering. Modellerna korsvaliderades. I delstudie 3, användes värden för ler-, sand- och mullhalt som bestämts genom laboratorieanalys av jordprover (20 platser) plus de mätta med Verisproben (80 platser), totalt 100 platser, för kalibrering. Modellerna korsvaliderades genom att undanhålla de 20 laboratoriebestämda proverna ett i taget.

Dataanalys delstudie 1 -en tredimensionell ECa-modell

ECa mättes på två olika sätt, dels med prob-sensorn, som mäter en liten jordvolym och ger ECa-värden för specifika djup, och dels med EMI-sensorn som ger djupintegrerade ECa värden för hela markprofilen (två värden med olika djuprespons, d v s med olika stor påverkan från olika djup; Figur 1a). Fördelen med prob-sensorn är att man får en upplösning i djupled och fördelen med EMI-sensorn är att man på ett effektivt sätt kan mäta på många platser på fältet och få en hög upplösning i horisontalplanet.

I den här delstudien provades en metod att kombinera de två olika typerna av ECa-data för att ta fram en tredimensionell ECa-modell för fältet, en karta som både har hög upplösning i horisontalplanet och som har separat information för olika djup. Metoden provades på de tre gårdarna för att bestämma ECa i djuplagren 0-0,2 m och 0,4-0,6 m och 0,4-0,8 m. Absolut medelfel (*Mean Absolute Error*, MAE, ekvation 1) och förklaringsgrad (R^2 , ekvation 2) beräknades för de 20 referensplatserna som undanhölls från kalibreringen. Som en jämförelse togs motsvarande kartor fram genom spatial interpolation (*ordinary kriging*) av ECa mätt med Verisproben på de 80 kalibreringsplatserna.

$$MAE = \frac{\sum |\text{predikterat värde} - \text{observerat värde}|}{n} \quad \text{Ekvation 1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\text{observerat värde} - \text{predikterat värde})^2}{\sum (\text{observerat värde} - \text{observerat medelvärde})^2} \quad \text{Ekvation 2}$$

Den prediktionsmetod som användes kallas *k-nearest neighbor prediction* (kNN). Man har ett antal prediktorer (här de två värdena från EMI-sensorn) och en responsvariabel (här ECa i ett specifikt djuplager bestämd med prob-sensorn, t ex 0,6-0,8 m). Man behöver två olika dataset: ett referensdataset som har värden både för prediktorerna och för responsvariabeln (80 av de 100 platserna med värden från prob-sensorn) och ett dataset som bara har värden för prediktorerna och för vilket responsvariabeln ska predikteras (10 m × 10 m punktgifter för kartproduktion eller de 20 probplatserna för validering). Man kan använda olika avståndsmått för att beskriva hur lika två objekt är med avseende på flera egenskaper samtidigt. I det här fallet användes Manhattan-avståndet, men det skulle troligen fungera lika bra med euklidiskt avstånd. En avståndsmatrix mellan alla punkter i gittret och alla referensplatser beräknas. För varje punkt i gittret väljs de fem mest lika referensplatserna ut (de med kortast avstånd i datarymden -*the nearest neighbors*) och prediktionen görs som ett avståndsviktat medelvärde av de utvalda referensplatsernas värden. Metoden är analog med *inverse distance weighting* (IDW) som är en vanlig metod för spatial interpolation. Skillnaden är att man istället för att basera prediktionerna på närhet till olika referensplatser i geografien, baserar dem på hur lika referensplatserna är med avseende på prediktorvärdena. Beräkningarna gjordes i statistikprogrammet Statistica 10 (Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

Dataanalys delstudie 2- att kombinera mätprobens sensorer

Kalibreringsmodeller för de olika markparametrarna gjordes med mätningar från de enskilda sensorerna hos Verisproben (ECa, penetrationsmotstånd och vis-NIR-spektrum) och med kombinationer av sensorerna genom enkel linjär regression eller den multipla linjära regressionsmetoden *partial least squares regression* (PLSR). I kalibreringarna användes jordproven från de tre djupen i de 20 referensplatserna tillsammans. Kalibreringarna med NIR-spektrum gjordes både inkluderande synliga våglängder (400-2200 nm, våglängder <400 nm togs inte med på grund av för mycket brus) samt enbart med våglängder i NIR-området (780-2200 nm). Kalibreringsmodellerna validerades genom korsvalidering där prov från de tre djupen i samma provtagningsplats undanhölls samtidigt. Modellernas förklaringsgrad (R^2 , ekvation 2) och felet hos prediktionerna (*root mean squared error*, RMSE, ekvation 3) beräknades.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{observerat värde} - \text{predikterat värde})^2}{n}} \quad \text{Ekvation 3.}$$

Dataanalys delstudie 3 –en tredimensionell markkarta

Den tilltänkta tredimensionella markkartan består av rasterkartor över de olika kartattributen (fraktioner av ler, sand och mull) för tre intervall i markprofilen. För att ta fram sådana kartor från insamlade data användes en multivariat prediktionsmodell, *multivariate adaptive regression splines* (MARSplines). En MARSplines-modell består av flera univariata linjära regressioner (*basis functions*) som summeras till ett prediktionsvärde. Basfunktionerna kan ha positiv eller negativ lutning och definieras i ett slutet obegränsat intervall över eller under ett tröskelvärde för X-variabeln i fråga. Modellen kan också inkludera parvisa produkter av basfunktioner (interaktioner). MARSplines-modeller parametreras genom att basfunktioner läggs till en efter en tills ett förutbestämt antal basfunktioner i modellen har uppnåtts. Det är dock inte säkert att detta är den bästa modellen. Det gäller att hitta en robust modell som förklarar så mycket som möjligt av generella empiriska samband mellan prediktorerna och responsvariabeln och så lite som möjligt av slumpmässiga samvariationer som bara förekommer i det aktuella referensdatasetet. För att undvika så kallad överanpassning (*overfitting*) beskärs den färdiga modellen (s k *pruning*) genom att de basfunktioner som bidrar minst till modellens förklaringsgrad tas bort. Förfarandet beskrivs mer utförligt av Hastie et al. (2009). I det här projektet användes den fria statistik-mjukvaran R (R-project.org, package Earth) för att parameterisera, validera och tillämpa MARSplines-modeller. Samtliga modeller parameteriserades utan interaktioner.

Två dataset används för karteringen, ett referensdataset som består av 100 provplatser med kända värden både för prediktorerna (X-variablerna, d v s gammastrålnings-, ECa- och höjdvariabler) och för responsvariablerna (Y-variablerna, d v s ler-, sand- och mullhalt), som används för kalibrering och validering av MARSplinesmodeller, samt ett nät av punkter (ett punktgitter) med kända värden enbart för prediktorerna, som används för att producera kartor. Modellerna kalibrerades med data från de 100 kalibreringsplatserna (20 laboratorieanalyser + 80 probprediktioner), korsvaliderades genom att göra 20 nya modeller där de 20 jordprovsplatserna undanhölls en i taget. Dessa modeller blir då något olika men ger tillsammans en samlad bild av hur väl den aktuella metoden fungerar på det aktuella datasetet. En slutlig modell parameteriserades sedan för varje responsvariabel och djupintervall utan att något prov undanhölls och tillämpades på punktgitret. Tre varianter av den tredimensionella markkarteringen testades:

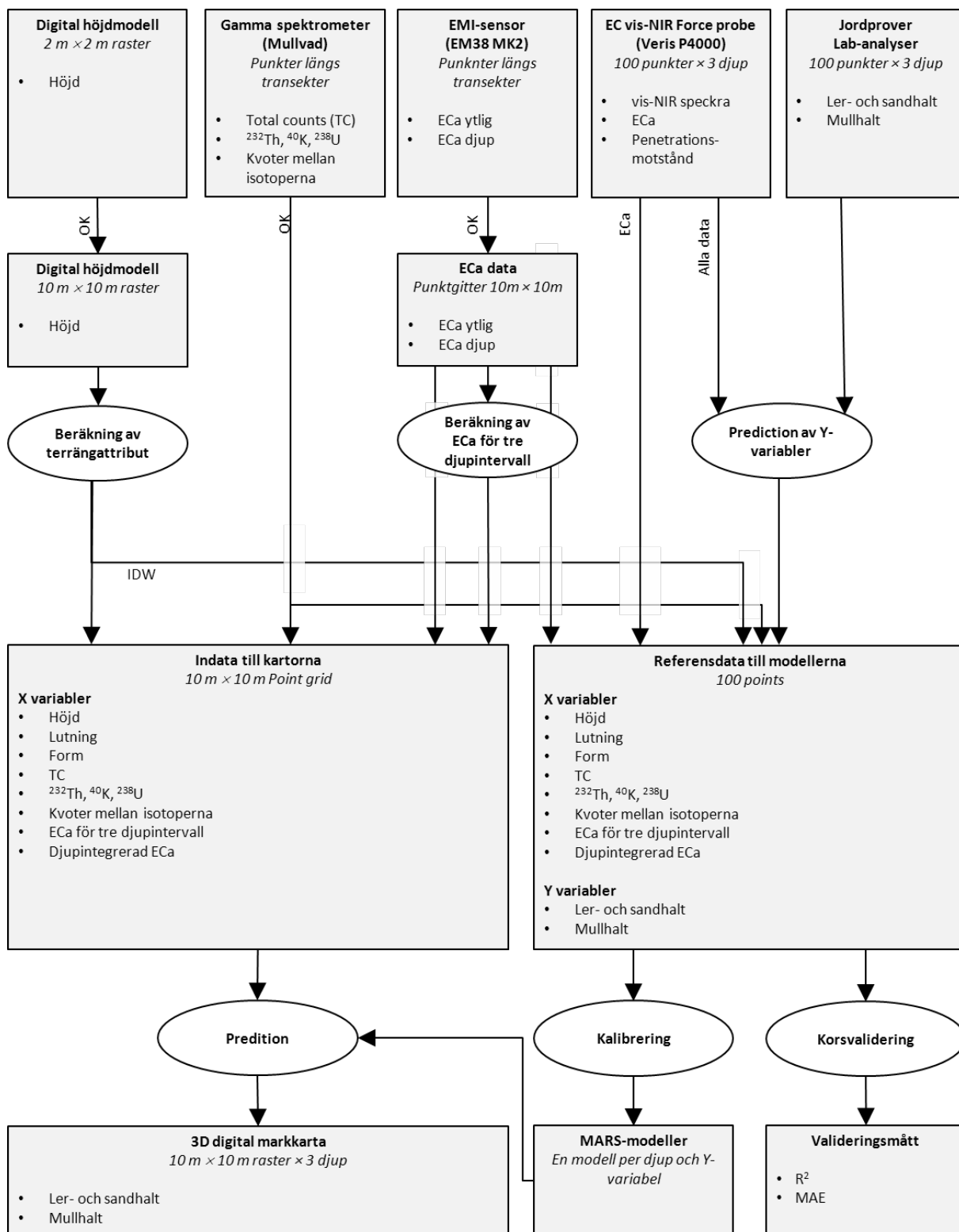
- 1) Att interpolera de 100 värdena för responsvariablerna i referensdatasetet med *ordinary kriging*.
- 2) Att kalibrera MARSplines-modeller där de två djupintegrerade ECa-värdena från EM38-sensorn samt differensen dem emellan ingick i prediktordatasetet tillsammans med gammastrålnings- och höjdvariablerna.
- 3) Att kalibrera MARSplines-modeller som i variant 2 men med ECa för specifika djuplager, framtagna i delstudie 1 istället för djupintegrerade ECa-data. En schematisk översikt över arbetsgången i variant 3 visas i Figur 3.

Resultat

Textur och mullhalt på Entorp och Brogården

På både Entorp och Brogården var variationen i både ler- och sandhalt relativt stor i alla djuplager. Lerhalten ökade med djupet på båda gårdarna (Tabell 1). Mullhalten på Entorp hade ett medelvärde på 2,1 % och var relativt jämn. I de två alvlagren var mullhalten mycket låg och jämn. På Brogården var mullhalten i matjorden i medeltal något högre än på Entorp och

variationen var större. Det berodde till stor del på att tre valideringsplatser låg på en del av fältet som tidigare varit skogsmark och odlats relativt nyligen (1982-1983). Här var mullhalten avsevärt högre än i resten av fältet.



Figur 3. Arbetsgång för variant 3 av den tredimensionella markkarteringen. MARS = multivariate adaptive regression splines, ECa = elektrisk ledningsförmåga, IDW = inverse distance weighting, OK = ordinary kriging, R^2 = kartans förklaringsgrad, MAE = medelfel.

Tabell 1, Beskrivande statistik för textur och mullhalt på de 20 jordprovsplatserna på Entorp och Brogården. Medelvärde ± standardavvikelse.

Gård	Djup	Ler (%)	Sand (%)	Mull (%)
Entorp	0-0,2 m	17±14	65±27	2,1±0,4
Entorp	0,4-0,6 m	28±26	50±43	0,3±0,3
Entorp	0,6-0,8 m	34±23	41±40	0,2±0,3
Brogården	0-0,2 m	23±5	35±11	3,6±2,6
Brogården	0,4-0,6 m	34±13	26±17	0,3±0,5
Brogården	0,6-0,8 m	38±13	22±18	0,1±0,2

Delstudie 1 Genom att kombinera flera mätningar kan man ta fram en 3D-karta över ECa

På två av de undersökta fälten (Entorp och Brogården) fungerade det relativt bra att ta fram kartor över ECa för två olika djupintervall med en kombination av EMI- och prob-sensordata (Tabell 2). På det tredje fältet fungerade det bättre att bara interpolera probdata (högre R^2 och lägre MAE). I matjorden på Brogården var dock ECa mycket låg och jämn och ett medelvärde av probdata var bättre än både kNN-prediktion och spatial interpolation.

Tabell 2. Validering av predikterad elektrisk ledningsförmåga (ECa) i två djuplager. Prediktionerna har gjorts med k-nearest neighbor. Värdet inom parentes gäller spatial interpolation av referensdata. $R^2 < 0$ markeras med - och innebär att ett medelvärde av referensdata skulle vara mer korrekt. R^2 = modellens förklaringsgrad. MAE = absolut medelfel (Mean Absolute Error).

Gård	Djup	R^2	MAE (mS m^{-1})
Entorp	0-0,2 m	0,76 (0,48)	1,4 (2,0)
Entorp	0,4-0,8 m	0,80 (0,60)	3,6 (5,8)
Brogården	0-0,2 m	- (-)	1,1 (1,1)
Brogården	0,4-0,8 m	0,49 (0,33)	3,8 (4,4)
Bjertorp	0-0,2 m	- (0,29)	1,4 (1,0)
Bjertorp	0,4-0,6 m	0,18 (0,25)	3,8 (3,4)

Delstudie 2 Att kombinera flera sensorer ger bättre bestämningar

NIR-sensorn på Verisinstrumentet var den enskilda sensor som bestämde markparametrarna med störst förklaringsgrad (R^2) och minst fel (*RMSE of cross validation*; RMSECV; Tabell 3). Detta gällde för alla markparametrar och på båda gårdarna. Det synliga tillsammans med det nära infraröda våglängdsområdet (vis-NIR) gav bäst mullhaltsbestämningar medan enbart det nära infraröda våglängdsområdet (NIR) gav bäst ler-, silt- och sandbestämningar. En kombination av flera sensorer gav i de allra flesta fall något bättre prediktioner. Generellt gav NIR tillsammans med ECa bäst ler-, silt- och sandbestämningar medan vis-NIR tillsammans med penetrationsmotståndet gav bäst mullhaltsbestämningar.

Tabell 3. Kalibreringsresultat för den bästa enskilda sensorn, NIR-sensorn, och de bästa kombinationerna av sensorer. RMSECV = Root mean squared error av korsvalidering; vis-NIR = reflektansspektrum för 400-2200 nm; NIR = reflektansspektrum för 780-2200 nm. ECa = elektrisk ledningsförmåga; F = penetrationsmotstånd.

		Bästa enskilda sensor			Bästa kombination av sensorer		
		våglängder	R^2	RMSECV	sensorer	R^2	RMSECV
Entorp	Ler	NIR	0.94	5.5	NIR+ECa	0.94	5.8
	Sand	NIR	0.91	11.6	NIR+ECa+F	0.93	10.3
	Silt	NIR	0.84	6.6	NIR+ECa	0.88	5.7
	Mull	vis-NIR**	0.90	0.31	vis-NIR+ECa+F	0.93	0.26
Brogården	Ler	NIR	0.76	6.4	NIR+ECa	0.81	5.6
	Sand	NIR	0.64	10.4	NIR+ECa	0.73	8.9
	Silt	NIR	0.37	6.2	NIR+ECa	0.40	6.0
	Mull	vis-NIR	0.89	0.74	vis-NIR+F	0.93	0.60

Delstudie 3 Tredimensionella markkartor över mullhalt och textur

MARSplines-modeller för ler-, sand- och mullhalt parameteriserades för de tre djuplagren på Entorp och på Brogården. På båda dessa gårdar var mullhalten i de två djupa marklagren låg och homogen (Tabell 1) och därför svår att prediktera (Tabell 4). För det översta djuplaget fungerade det bättre att interpolera det utökade referensdatasetet jämfört med att göra prediktioner baserade på EMI, gammaspektrometri och höjd. Det höga R^2 -värdet på Brogården beror på de tre valideringsplatser med hög mullhalt som låg på en del av fältet som upplades först 1982-1983 från att tidigare ha varit skogsmark. Eftersom modellen klarade att prediktera dessa höga mullhalter blev R^2 -värdet högt.

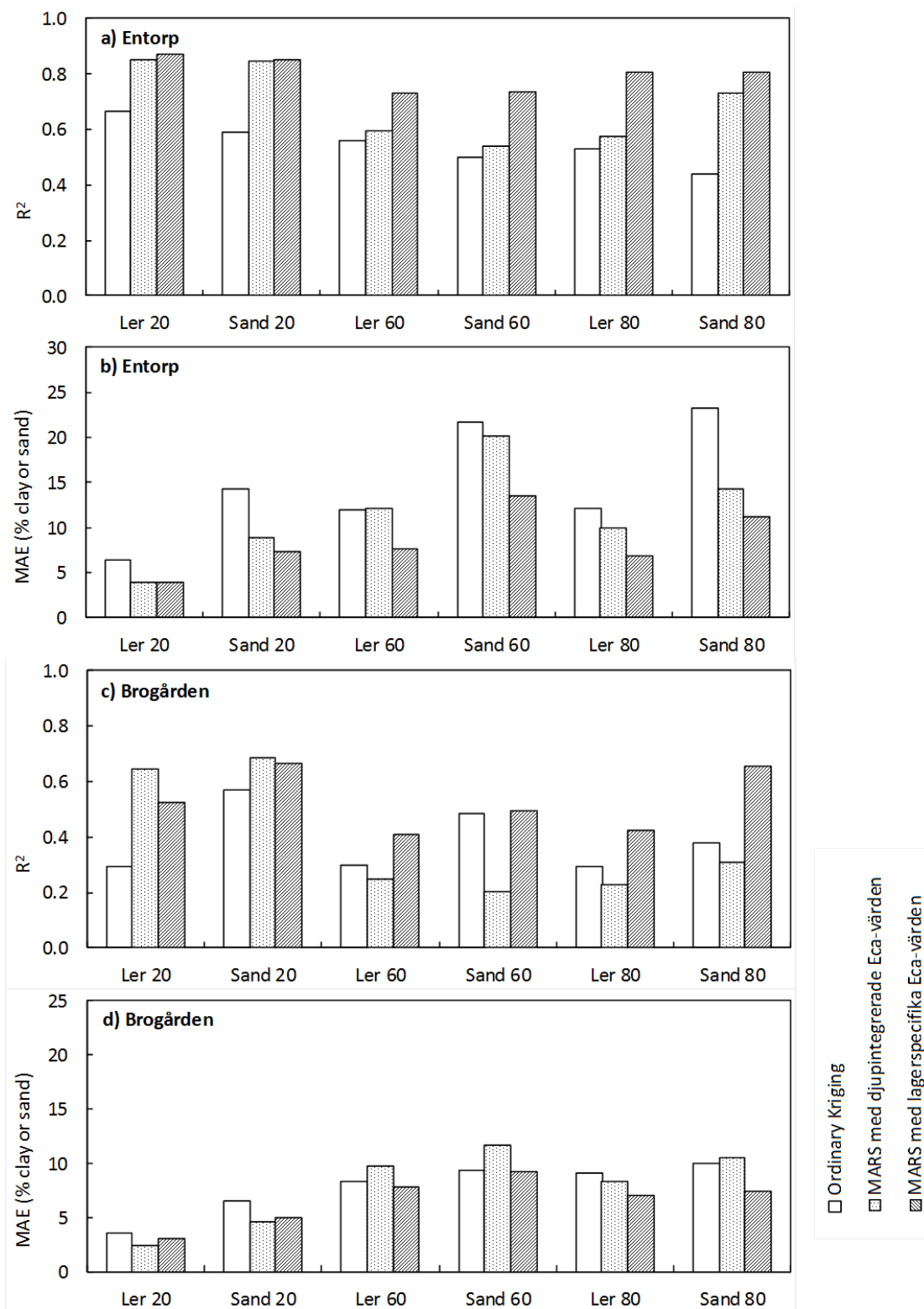
På Bjertorp har inte några tredimensionella kartor tagits fram på grund av flera problem med sensormätningarna. Dels blev det nödvändigt att göra om prob-mätningarna på grund av problem med instrumentet. Att dela upp ECa i flera lager fungerade dåligt på den här gården, troligen på grund av att ECa inte mättes samtidigt med de båda sensorerna, vilket inte är bra då värdena påverkas av vattenhalten. Det var heller inte möjligt att gå djupare än 0.6 m med proben på grund av risken att förstöra täckdickningsrören på fältet. Det var mycket stenigt, vilket gjorde att lastcellen som används för att mäta penetrationsmotstånd gick sönder. På grund av dessa avvikelser valde vi att begränsa den här delen av projektet till två fält och utesluta Bjertorp.

Tabell 4, Förklaringsgrad (R^2) och absolut medelfel (MAE) för mullhaltsprediktioner på Entorp och Brogården. Prediktionerna har gjorts enligt variant 3 (MARSplines modeller med lagerspecifika ECa värden, som visas i Figur 3). Värden inom parentes gäller prediktioner enligt variant 1 (interpolerade värden från de 100 utökade referenspunkterna), $R^2 < 0$ markeras med - och innebär att ett medelvärde av referensdata skulle vara mer korrekt.

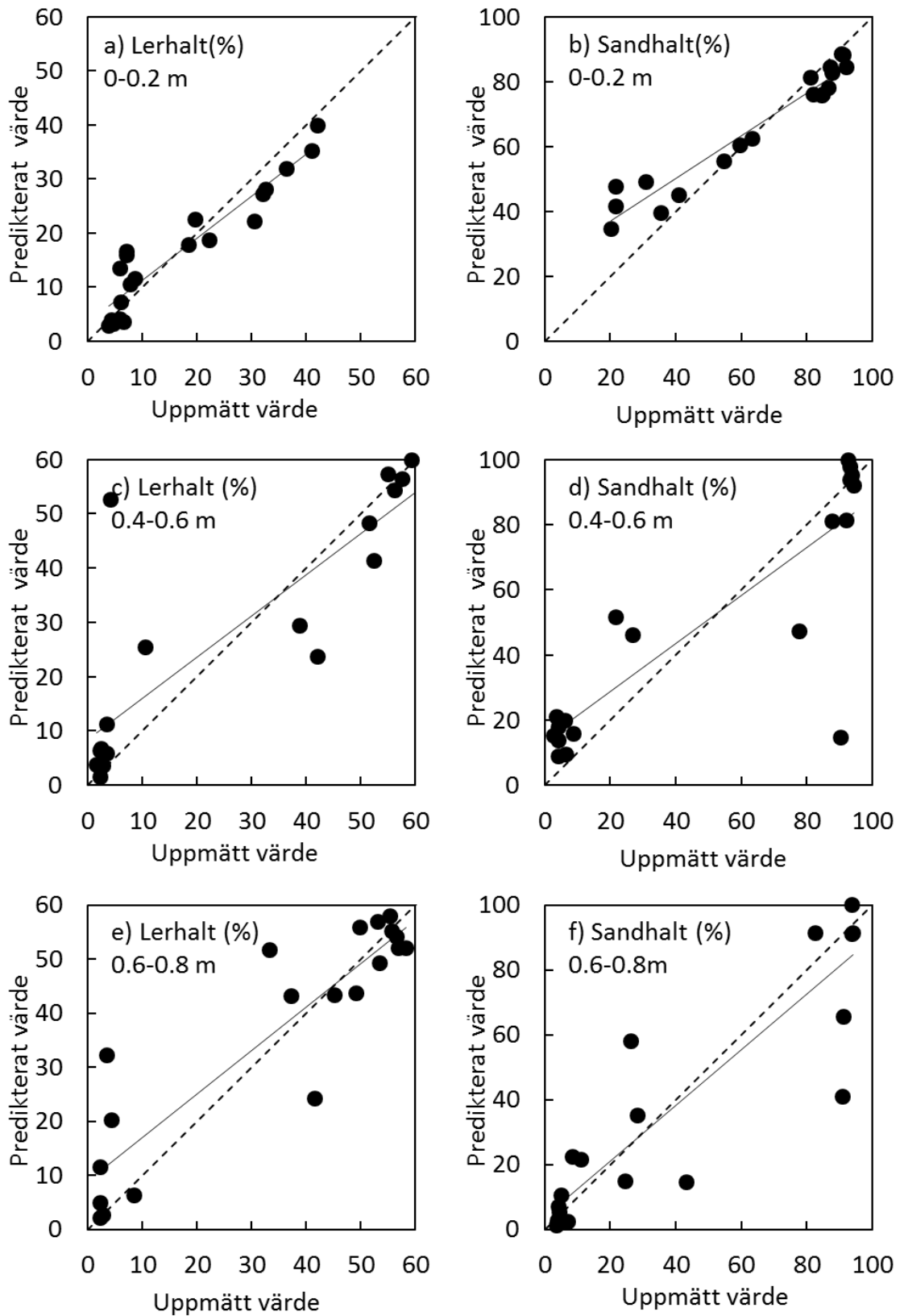
Gård	Djup	R^2	MAE (% mull)
Entorp	0-0,2 m	0,05 (0,28)	0,3 (0,3)
Entorp	0,4-0,6 m	- (-)	0,2 (0,2)
Entorp	0,6-0,8 m	- (-)	0,2 (0,2)
Brogården	0-0,2 m	0,82 (0,87)	0,8 (0,7)
Brogården	0,4-0,6 m	- (-)	0,8 (0,4)
Brogården	0,6-0,8 m	- (-)	0,4 (0,3)

Resultat från valideringen av modellerna för halterna av ler och sand visas i Figur 4. Att kombinera de båda typerna av ECa-data och ta fram lagerspecifika värden för ECa som indata till MARSplines-modellerna gav högre R^2 och lägre MAE för samtliga modeller i de två djupa marklagren jämfört med när djupintegrerade ECa-data används. I matjorden blev modellerna inte alltid bättre med lagerspecifika ECa-värden. R^2 och MAE för modellerna med lagervis ECa var alltid bättre än rumslig interpolation av referensdata. Dock förekommer problem med outliers, d v s enstaka stora felprediktioner, se t ex figur 5 c-d.

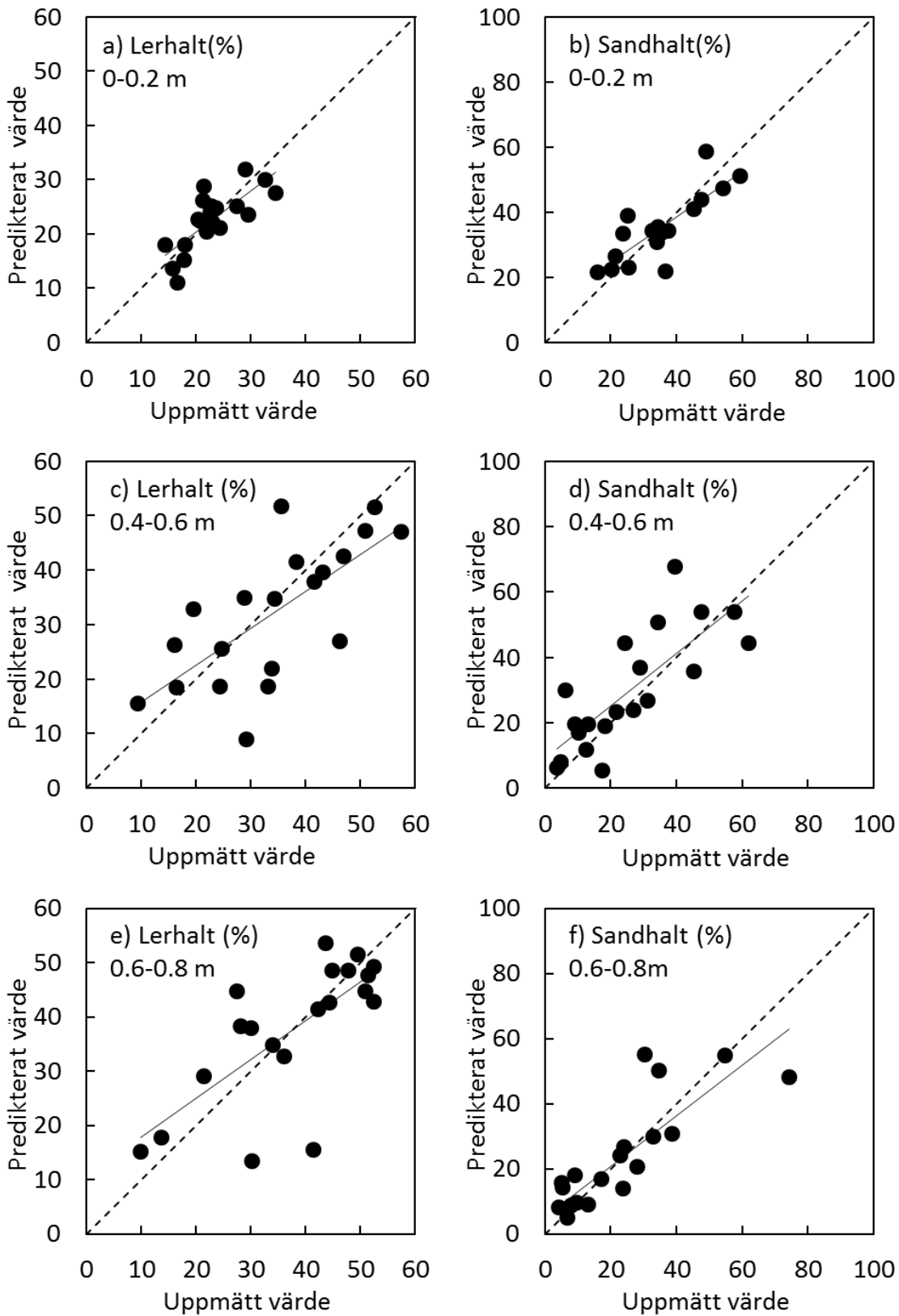
Plottar av predikterade mot mätta värden från korsvalideringarna av metod 3 visas i Figur 5 och Figur 6. Motsvarande kartor för fraktioner av ler och sand visas i Figur 7 för Entorp och i Figur 8 för Brogården.



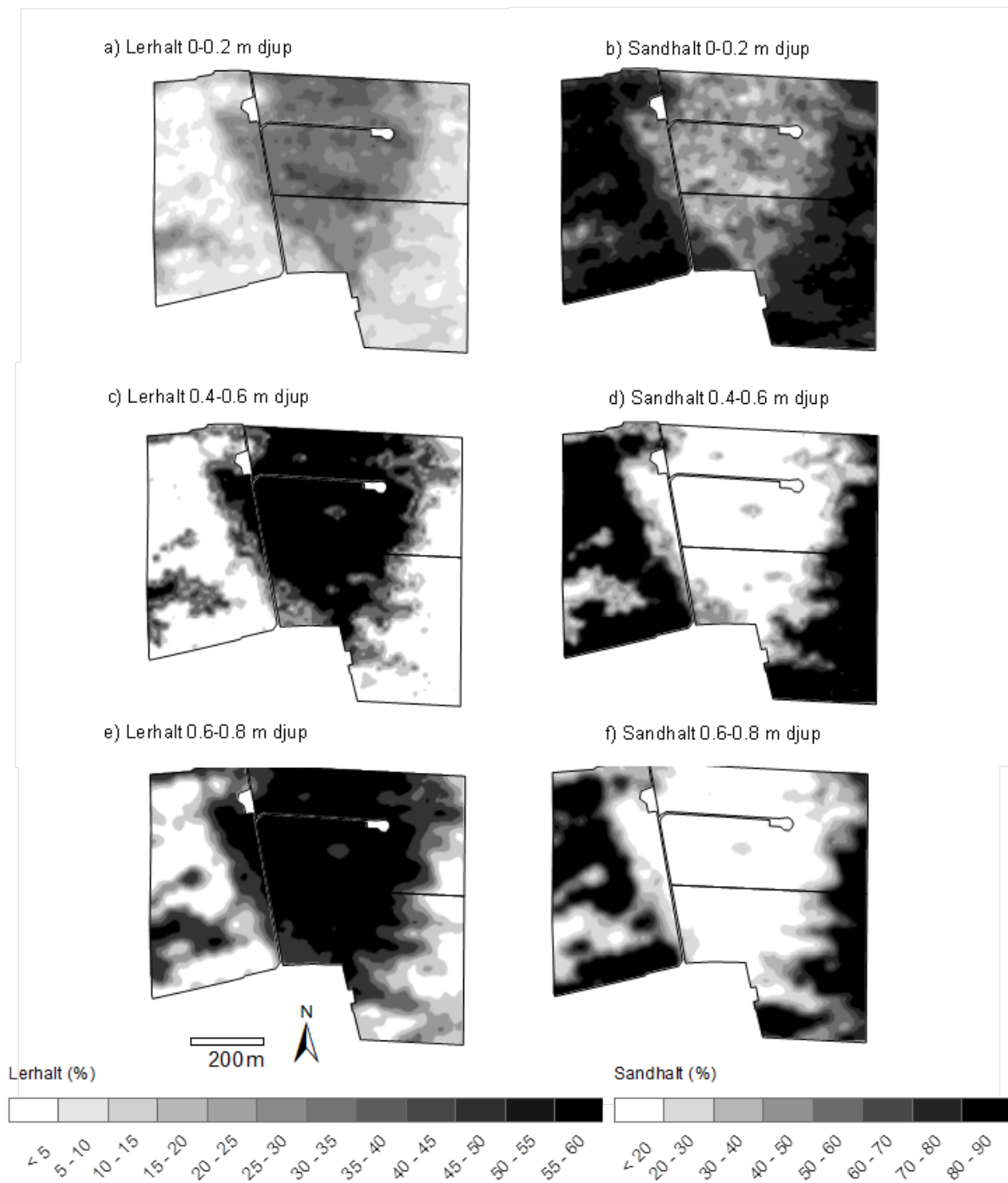
Figur 4, Korsvalidering av prediktioner av ler-, sand- och mullhalt på två gårdar, Entorp (a-b) och Brogården (c-d), och tre djup, 0-0,2 m djup (20), 0,4-0,6 m djup (60) och 0,6-0,8 m djup (80). Prediktionerna är gjorda med tre olika metoder. MARS= multivariate adaptive regression splines, R^2 = förklaringsgrad; MAE= absolut medelfel.



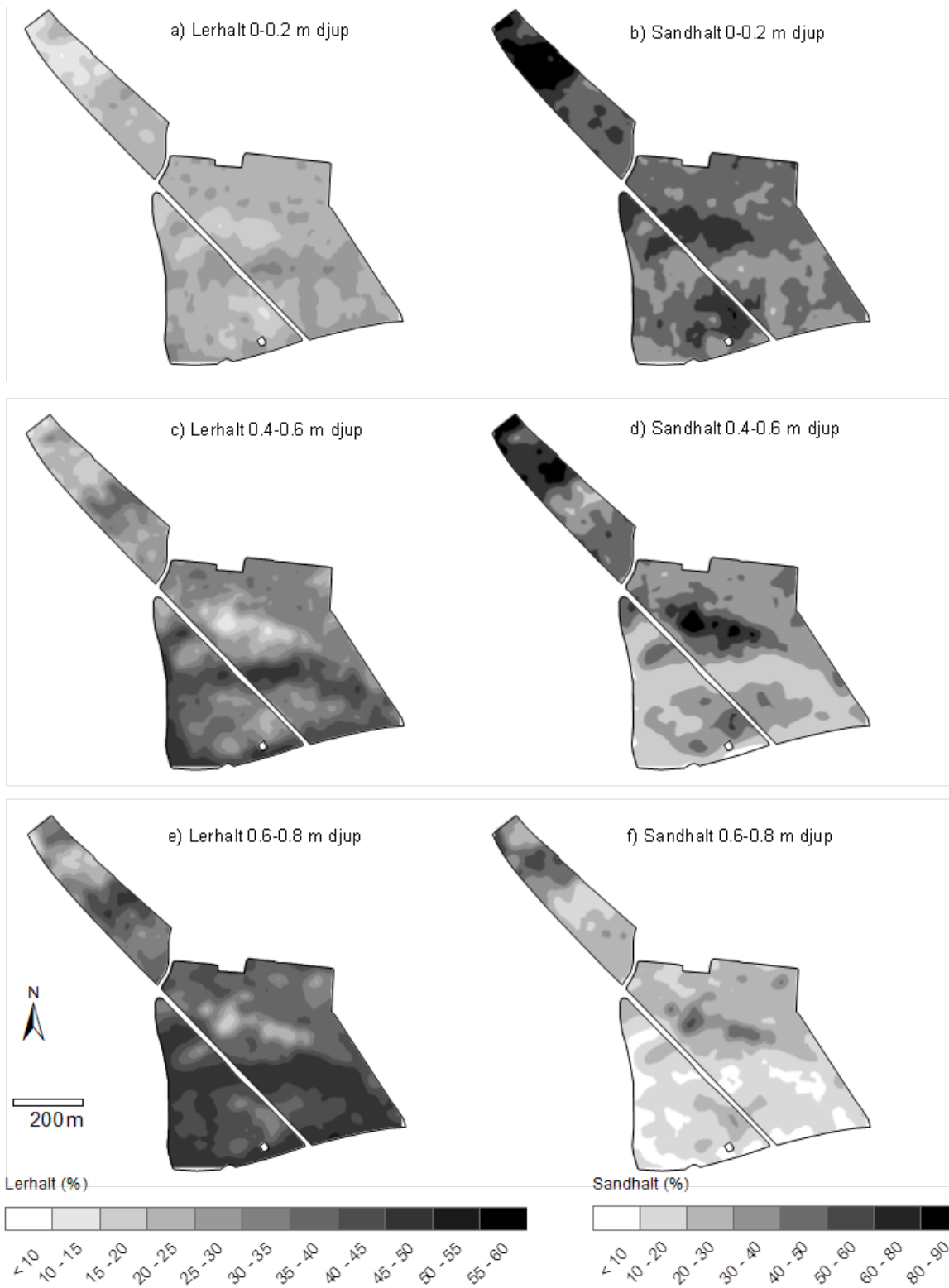
Figur 5., Resultat från korsvalideringen av metod 3 på Entorp, d v s prediktioner med multivariate adaptive regression splines med utökat referensdataset och lagarspecifika ECa-värden.



Figur 6. Resultat från korsvalideringen av metod 3 på Brogården, d v s prediktioner med multivariata adaptive regressionsplines med utökat referensdataset och lagerspecifika ECa-värden. I figur f finns det en outlier utanför y-axelns intervall (koordinater 6, -6).



Figur 7. Kartor över fraktioner av ler och sand på tre olika djup på Entorp. Kartorna är framtagna med Multivariate adaptive regression splines med utökat referensdataset (100 platser) och lagervis ECa. Teckenförklaringen för ler gäller a, c och e och teckenförklaringen för sand gäller för b, d, och f. En 3D-vy av a, c och e, visas på rapportens omslag.



Figur 8. Kartor över fraktioner av ler och sand på tre olika djup på Brogården. Kartorna är framtagna med Multivariate adaptive regression splines med utökat referensdataset (100 platser) och lagervis ECa. Teckenförklaringen för ler gäller a, c och e och teckenförklaringen för sand gäller b,d, och f.

Diskussion

Det går alltid att parameterisera multivariata modeller och använda dem för att ta fram kartor. Det är dock viktigt att validera modellerna innan man tillämpar dem, helst med ett oberoende dataset som undanhållits från kalibreringen. Valideringen kan visa att det hade varit bättre att hoppa över den multivariata modelleringen och nöja sig med spatial interpolation, som för mullhalten i matjorden, eller till och med ett medelvärde av referensdata, som för mullhalten i alven. Man kan också upptäcka att det finns problem med outliers, som i vissa fall för lerhalten på 0,6-0,8 m djup. Om det finns tid och resurser kan man eventuellt komma tillrätta med outliers genom att ta fler referensprover på strategiska platser så att modellen som parameteriseras blir anpassad för alla förhållanden på fältet. Förutom den provtagningsstrategi som användes här finns flera alternativ beskrivna i den vetenskapliga litteraturen, som baserar provtagningen på täta mätningar av relevanta bakgrundsdata, exempelvis data från proximala sensorer (Hengl et al., 2003; Minasny och McBratney, 2006).

Nu har vi visat att det går att ta fram detaljerade kartor över alvens textur med hjälp av modern sensorteknik, vilket öppnar för nya tillämpningar, bland annat inom precisionsodling och precisionsbevattnings. Metoden används redan nu i två forskningsprojekt där sådana markkartor ska användas i olika modellberäkningar. Någon egentlig utvärdering av hur kostnadseffektivt det är att ta fram tredimensionella markkartor för ler-, sand- och mullhalt på det sätt som presenterats här har inte gjorts. Mätarbetet tog cirka en vecka per gård och därtill kom arbetet med att ta fram kartorna. Eftersom projektet inkluderade utveckling av metoden finns utrymme för effektivisering både vid provtagning och vid dataanalys.

Den digitala höjdmodellen och de täta sensormätningarna (EMI-sensor och gammastrålningspektrometer) förbättrade inte mullhaltsprediktionerna i matjorden jämfört med rumslig interpolation av det utökade referensdatasetet. Gammastrålning härrör från mineral i marken och påverkas mycket lite av de relativt låga mullhalter som finns representerade på gårdarna i studien. ECa är en kombination av flera markegenskaper där mullhalt är en faktor som påverkar, men med de relativt låga mullhalterna (om än relativt representativa för svensk jordbruksmark) och den lilla variationen kommer markens textur i kombination med markfukt att vara klart dominerande. Det kan finnas andra högupplösta data som skulle kunna bidra med mer relevant information. Ett möjligt exempel är satellitbilder med information i olika band i NIR-området. Till skillnad från många sensorer som resulterar i ett mätvärde där alla markegenskaper som påverkar mätningen vägs in, har markparametrar som lermineral och organiska molekyler mer eller mindre väldefinierade avtryck i ett NIR-spektrum (Adamchuk et al., 2004; Mahmood et al., 2012; Stenberg et al., 2010). Detta kan förklara varför NIR-sensorn var den enskilda sensor som gav bäst ler-, silt-, sand- och mullhaltsbestämningar. De andra sensorerna ger dessutom integrerade mätvärden för en jordvolym som inte direkt sammanfaller med referensproverna,

Generellt fungerade MARSplines-modellerna bäst för matjorden, förmodligen beroende på att gammastrålningspektrometern bidrar med viktig information om matjordens egenskaper. Den påverkas av markens egenskaper ner till cirka 0,3 m djup. EMI-sensorn kan däremot bidra med information om alvens egenskaper. Man har störst nytta av EMI-instrumentet om man kombinerar det med probmätningar av ECa och tar fram lagerspecifika ECa-värden.

I de predikterade kartorna kan man i vissa fall se att spatiala mönster från enskilda prediktorer avspeglas i kartorna. Exempelvis liknar den småskaliga variationen i matjorden på Entorp (Figur 7 a-b) variationsstrukturen för ^{40}K som är med i båda dessa modeller. Om det faktiskt är så att fraktionerna av ler och sand ser ut på detta sätt eller om det är felkomponenten i

prediktionen som har det här spatiala mönstret går dock inte att veta. Samma tendens till att spatiala variationsmönster hos prediktorerna lyser igenom observerades av Piikki et al. (2013). När man tittar på kartorna för de tre djuplagren (Figur 7-8) kan man se att texturvariation är betydligt mer utpräglad i alven, även om samma spatiala variationsmönster kan skönjas även i matjorden. Alvens egenskaper är viktiga för grödan, inte minst genom att påverka vattentillgången och detaljerad kartering av både matjord och alv bör ge en bättre bild av hur odlingsförutsättningarna varierar inom ett fält än vad enbart matjordskartering kan ge.

Slutsatser

- Att kombinera ECa-mätningar från en EMI-sensor och en prob-sensor och ta fram lagerspecifika ECa-värden som indata till MARSplines-modellerna gav konsekvent högre förklaringsgrad och lägre absolut medelfel för ler- och sandhalt i de två djupa marklagren. I matjorden var inte alltid lagerspecifika ECa-data bättre.
- Att kombinera de tre sensorerna på Verisproben som mätte ECa, penetrationsmotstånd och reflekterat ljus i det synliga och infraröda våglängdsområdet gav bättre ler-, silt-, sand- och mullhaltsbestämningar på Entorp och Brogården jämfört med att använda de enskilda sensorerna var för sig.
- På Entorp och Bjertorp kunde lerhalten predikteras med ett medelfel $< 4\%$ ler i matjorden och $< 8\%$ ler i de två alvlagren. Förekomsten av sand var i viss grad omvänt proportionell med förekomsten av ler och kunde predikteras med likvärdig eller något högre förklaringsgrad.
- För mullhalten i matjorden fungerade det bättre eller ungefär lika bra med rumslig interpolation av det utökade datasetet som bygger på att man mäter med Verisproben, som att använda multivariata modeller baserade på data från en EMI-sensor, en gammastrålningspektrometer och en digital höjdmödel.

Tack

Projektet finansierades av Stiftelsen lantbruksforskning (kontrakt: H1033303). Tack riktas till dem som upplåtit mark för mätningarna.

Referenser

- Adamchuk, V.I., J.W. Hummel, M.T. Morgan, och S.K. Upadhyaya. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 44: 71-91.
- Arvidsson, J., T. Keller, och K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil & Tillage Research* 79: 221-231.
- Ben-Dor, E., D. Heller, och A. Chudnovsky. 2008. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. *Soil Science Society of America Journal* 72: 1113-1123.
- Clark, R.N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy, p. 3-58, *In* A. N. Rencz, ed. *Remote sensing for the earth sciences*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Gee, G.W., och J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis, p. 383-411, *In* A. Klute, ed. *Physical and mineralogical methods*. Soil science society of America, Madison. Wisconsin, USA.
- Hastie, T., R. Tibshirani, R., och Friedman J. 2009. *The elements of statistical learning: data mining Inference and prediction*. 2 ed. Springer Science+Business Media, New York.
- Hedley, C.B., I.J. Yule, M.P. Tuohy, och B.H. Kusumo. 2010. Proximal Sensing Methods for Mapping Soil Water Status in an Irrigated Maize Field. *In* R.A. Viscarra Rossel et al. (eds) *Proximal Soil Sensing, Progress in Soil Science 1*. Springer Science + Business Media, pp. 375-385.
- Hendriks, P.H.G.M., J. Limburg, och R.J. de Meijer. 2001. Full-spectrum analysis of natural gamma-ray spectra. *Journal of Environmental Radioactivity* 53: 365-380.
- Hengl, T., D.G. Rossiter, och A. Stein. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Australian Journal of Soil Research* 41: 1403-1422.
- Hossain, M.B., D.W. Lamb, P.V. Lockwood, och P. Frazier. 2010. Field Determination of Soil Moisture in the Root Zone of Deep Vertosols Using EM38 Measurements: Calibration and Application Issues. *In* R.A. Viscarra Rossel et al. (eds) *Proximal Soil Sensing, Progress in Soil Science 1*. Springer Science + Business Media, pp. 255-263.
- Kitchen, N.R., K.A. Sudduth, R.J. Kremer, och D.B. Myers. 2010. Sensor-Based Mapping of Soil Quality on Degraded Claypan Landscapes of the Central United States, p. 363-373, *In* R. A. Viscarra Rossel, et al., eds. *Proximal Soil Sensing, Vol. 1*. Springer Netherlands.
- Mahmood, H.S., W.B. Hoogmoed, och E.J. van Henten. 2012. Sensor data fusion to predict multiple soil properties. *Precision Agriculture* 13: 628-645.
- Malone, B.P., A.B. McBratney, B. Minasny, och G.M. Laslett. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* 154: 138-152.
- McBratney, A.B., och B. Minasny. 2005. Obtaining 'useful' high-resolution soil data from proximally-sensed electrical conductivity/resistivity (PSEC/R) surveys, p. 503-510, *In* J. V. Stafford, ed. *Precision agriculture '05. Papers presented at the 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

- Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia. 2002. FuzME version 3.5. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia.
- Minasny, B., och A.B. McBratney. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences* 32: 1378-1388.
- Mouazen, A.M., och H. Ramon. 2006. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content. *Soil & Tillage Research* 86: 218-229.
- Myers, D.B., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S. Grunwald, R.J. Miles, E.J. Sadler, och R.P. Udawatta. 2010. Combining Proximal and Penetrating Soil Electrical Conductivity Sensors for High-Resolution Digital Soil Mapping. *In* R.A. Viscarra Rossel et al. (eds) *Proximal Soil Sensing, Progress in Soil Science 1*. Springer Science + Business Media, pp. 233-243.
- Odeh, I.O.A., A.B. Mcbratney, och D.J. Chittleborough. 1994. Spatial Prediction of Soil Properties from Landform Attributes Derived from a Digital Elevation Model. *Geoderma* 63: 197-214.
- Piikki, K., M. Söderström, och B. Stenberg. 2013. Sensor data fusion for topsoil clay mapping. *Geoderma* 199: 106-116.
- Rossel, R.A.V., och T. Behrens. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158: 46-54.
- Söderström, M., I. Gruvaeus, och L. Wijkmark. 2008. Gammastrålningsmätning för detaljerad kartering av jordarter inom fält. POS Teknisk rapport 11.
- Stenberg, B., G. Rogstrand, E. Bölenius, och J. Arvidsson. 2007. On-line soil NIR spectroscopy: identification and treatment of spectra influenced by variable probe distance and residue contamination, p. 125-131, *In* J. V. Stafford, ed. ECPA 2007. Wageningen Academic Publishers, Skiathos, Greece.
- Stenberg, B., R.A.V. Rossel, A.M. Mouazen, och J. Wetterlind. 2010. Visible and near Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy* 107: 163-215.
- Sudduth, K.A., J.W. Hummel, N.R. Kitchen, och S.T. Drummond. 2000. Evaluation of a soil conductivity sensing penetrometer, pp. 1-8 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA.
- Taylor, J., B. Short, A.B. McBratney, och J. Wilson. 2010. Comparing the ability of multiple soil sensors to predict soil properties in a scottish potato production system, p. 387-396, *In* R. A. Viscarra Rossel, et al., eds. *Proximal soil sensing, progress in soil science*, 1 ed. Springer science + Business Media B. V., Dordrecht
- van Egmond, F.M., E. Loonstra, och J. Limburg. 2010. Gamma ray sensor for topsoil mapping: The mole, p. 323-332, *In* R. A. Viscarra Rossel, et al., eds. *Proximal soil sensing, progress in soil science*, 1 ed. Springer science + Business Media B. V., Dordrecht

**Förteckning över rapporter utgivna av Avdelningen för precisionsodling i serien
*Precisionsodling Sverige, Tekniska rapporter:***

- 29 Krijger, A-K. 2013. CTF – en förstudie.
- 28 Ståhl, P., Söderström, M. & Adolfsson, N. 2013. Gradering av roto­gräs i ekologisk odling med hjälp av fotografering från obemannat flygplan (UAV)
- 27 Lundström, C. 2013. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2012
- 26 Söderström, M. & Nyberg, A. 2013. Nyckeltal för bedömning av ekonomiska och miljömässiga effekter vid tillämpning av precisionsodling
- 25 Piikki, K., Söderström, M., Stenberg, M. & Roland, J. 2012. Variation i marken inom fältförsök.
- 24 Lundström, C (red). 2012. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2011.
- 23 Lundström, C (red). 2011. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2010.
- 22 Lundström, C (red). 2010. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2009.
- 21 Söderström, M. 2009. Interpolerade markkartor – några riktlinjer.
- 20 Söderström, M., Börjesson, T., Pettersson, C.G., Nissen, K. & Hagner, O. 2009. Prognoser för malkornskvalitet med fjärranalys.
- 19 Börjesson, T. & Söderström, M. 2009. Bedömning av kvalitetskillnader över tid i vallar avsedda för hösilage med Yara N-sensor.
- 18 Lundström, C (red). 2009. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2008.
- 17 Jacobsen, A. & Söderström, M. 2008. Regional analyse af samspillet mellem satellitdata og jordbundsvariation. Delrapport 2 i SLF-projektet (dnr SLF 297/02): "Kostnadseffektiv markkartering genom stratifierad datainsamling baserad på fjärranalys"
- 16 Jacobsen, A. & Söderström, M. 2008. Anvendelse af geostatistik og remote sensing data til kortlægning af jordens lerindhold.
- 15 Söderström, M. 2008. Den traditionella markkarteringens användbarhet för precisionsodling.
- 14 Lundström, C. (red); 2008. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2007.
- 13 Börjesson, T., Lorén, N., Larsolle, A., Söderström, M., Nilsson, J. och Nissen, K. 2008. Bildanalys som redskap för platsspecifik ogräsbekämpning.
- 12 Söderström, M., 2008. PrecisionWizard 3 – hantera precisionsodlingsdata och gör egna styrfiler till Farm Site Mate och Yara N-Sensor.
- 11 Söderström, M., Gruvaeus, I. och Wijkmark, L., 2008. Gammastrålningsmätning för detaljerad kartering av jordarter inom fält.
- 10 Söderström, M., Wijkmark, L., Martinsson, J. och Nissen, K., 2008. Avstånd mellan körspår – en jämförelse mellan traditionell spårmarkör och autostyrning med GPS.
- 9 Delin, S.(red.), 2007. Verksamhet i AGROVÄST-projektet Precisionsodling Sverige, POS, 2006
- 8 Engström, L., Börjesson, T och Lindén, B. 2007. Beståndstäthet tidigt på våren i höstvetete – samband med skörd, topografi, förrådskalium och biomassa (Yara N-

sensor- och NIR-mätningar)

- 7 Söderström, M., och Nissen, K., 2006. Insamling av GIS-data och navigering med GPS.
- 6 Söderström, M., 2006. PrecisionWizard - Gör styrfiler till FarmSiteMate och Yara N-sensor.
- 5 Delin, S.(red.), 2006. Dokumentation från seminariet ”Precisionsodling - avstämning av verksamhet och vision hos olika aktörer”, Skara den 19 april 2006.
- 4 Delin, S.(red.), 2006. Verksamhetsberättelse för Precisionsodling Sverige, POS, 2005.
- 3 Delin, S. 2005. Verksamhetsberättelse för Precisionsodling Sverige (POS) 2003-2004.
- 2 Börjesson, T., Åstrand, B., Engström, L. och Lindén, B., 2005. Bildanalys för att beskriva beståndstatus i höstraps och höstvetete och ogräsförekomst i vårsäd.
- 1 Nyberg, A., Börjesson, T. och Gustavsson, A-M., 2004. Bildanalys för bedömning av klöverandel i vallar – Utvärdering av TrefoilAnalysis.

Förteckning över rapporter utgivna av Institutionen för jordbruksvetenskap Skara i serien *Precisionsodling Sverige, Tekniska rapporter* (ISSN:1651-2804):

1. Börjesson, T, Ivarsson, K., Engquist, A., Wikström, L. 2002. Kvalitetsprognoser för brödvete och malkorn med reflektansmätning i växande gröda.
2. Börjesson, T., Nyberg, A., Stenberg, M. och Wetterlind, J. 2002. Handburen Hydro sensor i vall -prediktering av torrsubstansavkastning och kvalitetsegenskaper.
3. Söderström. M. (red.). 2003. Precisionsodling Sverige 2002, Verksamhetsberättelse från arbetsgrupperna.
4. Jonsson, A. och Söderström. M. 2003. Precisionsodling - vad är det?
5. Nyberg, A., Lindén, B., Wetterlind, J. och Börjesson, T. 2003. Precisionsodling av vall: Mätningar med en handburensensor i vallförsök med nötflytgödsel på Tubbetorp i Västergötland, 2002.
6. Nyberg, A., Stenberg, M., Börjesson, T. och Stenberg, B. 2003. Precisionsodling av vall: Mätningar i växande vall med ett bärbart NIR-instrument – en pilotstudie.

Förteckning över rapporter utgivna av Institutionen för jordbruksvetenskap Skara i serien *Precisionsodling i Väst, Tekniska rapporter*:

1. Rapport från en studieresa till norra Tyskland.
2. Thylén, L & Algerbo, P-A. Teknik för växtplatsanpassad odling.
3. Seminarium och utställning i Skara den 10 mars 1998.
4. Delin, S. 2000. Hantering av geografiska data inom ett jordbruksfält.
5. Lundström, C. Delin, S. och Nissen, K. 2000. Precisionsodling - teknik och möjligheter.

AGROVÄST-projektet *Precisionsodling Sverige* syftar till att utveckla och tillämpa användbara metoder inom precisionsodlingen till nytta för det praktiska jordbruket.

I projektet arbetas med precisionsodling i form av utvärdering och tolkning av samt teknik för markkartering, kalkning, gödsling, bestämning av mark- och grödegenskaper, växtskydd samt miljöeffekter av precisionsodling.

Projektet genomförs i ett samarbete mellan bl.a. Svenska Lantmännen, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), SW Seed, Yara AB, hushållningssällskap, Greppa Näringen och Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI).

Distribution:

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för mark och miljö
Box 234
532 23 Skara
Tel. 0511-670 00

Internet: www.slu.se/mark
www.agrovast.se/precision
www.Precisionskolan.se