



Test av portabel röntgenfluorescens (PXRF) för bestämning av jordart, näringssämnen och tungmetaller direkt i fält – en pilotstudie



Mats Söderström & Henrik Stadig

Foto framsidan: Mats Söderström & Sarah Stadig

Sammanfattning

Vid markkartering tas matjordsprov som analyseras i laboratorium. Ett stort antal markvariabler kan vara aktuella att analysera. I det här projektet utvärderades möjligheten att använda ett handburet instrument som mäter röntgenfluorescens (PXRF – *portable x-ray fluorescence*) för att snabbt uppskatta flera sådana variabler direkt i fält. Ett stort antal mätningar med PXRF utfördes på gårdar i Västergötland, där även jordprovtagning med tillhörande kemiska jordanalyser utfördes. De markkarteringsvariabler som undersöktes var ler-, sand- och mullhalt, fosfor (P-AL), kalium (K-AL), calcium (Ca-AL), koppar (Cu-HCl), magnesium (Mg-AL), molybden (Mo-HNO₃) och kadmium (Cd-HNO₃). Jämförelser mellan insamlade PXRF-data – som gjordes både i fält på markytan och på upptagna jordprover, både före och efter torkning – visade att flera element som bestäms med PXRF var väl korrelerade till flera av markkarteringsvariablerna. Särskilt väl samvarierar textur, Cu, Ca, Mg och Cd med olika ämnen som bestäms med PXRF. Även vid mätning direkt i fält med PXRF finns möjlighet att få fram användbara data. Tekniken kan minska behovet av jordprovtagning och/eller fungera som en snabb metod för kompletterande datainsamling som kan göra det möjligt att kostnadseffektivt ta fram detaljkartor för aktuella markegenskaper.

Erkännanden

Projektet utfördes med finansiellt stöd från Stiftelsen Svensk växtnäringforskning, Kungl. Skogs- och Lantbruksakademien (KSLA) (projekt nr H122-0052-SVX) och Agroväst Livsmedel, AB via Precisionsodling Sverige (POS). PXRF-utrustning tillhandahölls av firma Holger Andreasen AB, Örebro. Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) bidrog genom insamlande av jordprover i matjord och alv i Kvänumområdet.

Innehållsförteckning

<i>Sammanfattning</i>	3
<i>Erkännanden</i>	3
<i>Bakgrund</i>	5
<i>Material och metoder</i>	7
<i>Resultat</i>	11
Mätning med PXRF i fält och i laboratorium.....	11
Korrelation mellan markkarteringsvärden och PXRF-data	15
Multivariata modeller för markkartering direkt i fält med PXRF – ett exempel	22
<i>Slutsatser</i>	24
<i>Referenser</i>	25

Bakgrund

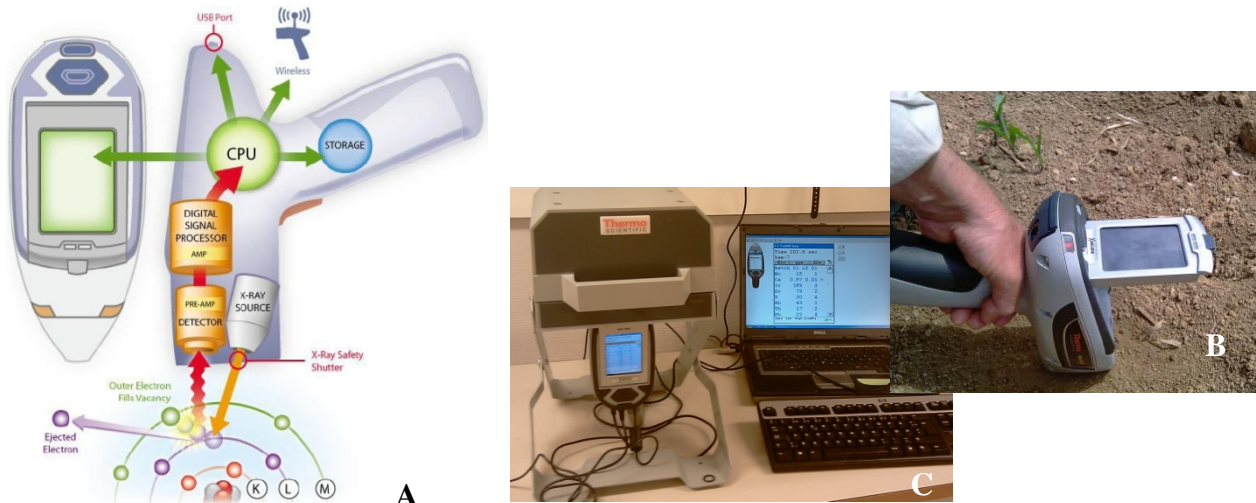
I Sverige har markkartering av åkermark pågått åtminstone sedan 40-talet. Jordprovtagning görs i regel genom att ett jordprov per hektar samlas in, provplatsen positionsbestäms numera med satellitpositionering och provet analyseras sedan i laboratorium. Kartor tas fram av analysresultaten, varefter dessa ligger till grund för beslut om t ex gödsling och kalkning. Ofta görs endast analys av pH, P, K, Ca och Mg (i AL-extrakt), och ibland även Cu- och K-HCl samt mull- och lerhalt. I vissa fall finns också behov av specialanalyser, som t ex tungmetaller. Det kan t ex gälla:

- På platser med risk för högt innehåll av kadmium (Cd) som gör att grödorna riskerar att hamna över gällande gränsvärden (Söderström & Eriksson, 2013).
- Gårdar där för låg eller för hög halt av molybden (Mo) leder till att tillgängligheten av koppar medför förgiftning eller bristsymptom hos betesdjur (Axelson et al., 2010).
- I samband med slamspridning där det finns gränsvärden för flera tungmetaller (SNFS, 1994).

Det vore i många fall en stor fördel att snabbt och billigt kunna bestämma tillståndet i marken direkt i fält. På så sätt skulle man kunna undvika provtagning och kostnader i laboratorium, alternativt åtminstone kunna minska antalet prover och styra provtagningen till de mest relevanta delarna av fältet.

Utvecklingen av tillämpningar med olika typer av marksensorer och analysmetoder har tagit fart under de senaste 10-15 åren. Scanning i fält med sensorer (monterade på fyrhjuliga motorcyklar) som mäter markens elektriska konduktivitet och dess naturliga gammastrålning har visat sig ge en bra bild av t ex jordartskillnader (t ex Piikki et al., 2013). Genom att kalibrera sådana sensorkartor med ett antal jordprover kan man ibland hitta bra korrelationer med olika näringsämnen och spårelement. Med nära infraröd spektroskopi kan man, hittills främst i laboratorium, prediktera åtminstone jordart och organiskt material, ibland även olika näringsämnen (Stenberg et al., 2010).

En typ av analysinstrument som funnits i upp emot 50 år bygger på röntgenfluorescens (XRF). På senare år denna typ av utrustning tagit steget ut i fält via portabla XRF-instrument (PXRF) (Potts & West, 2008). Under senare år har dessa förbättrats avsevärt vad gäller detektionsgränser och användbarhet (Zhu et al., 2011). Instrumentet, som är litet och lätt att hantera i fält (Figur 1B), tar emot och analyserar den fluorescerande strålning som sänds ut av provmaterialet efter det att det utsatts för energi från röntgenstrålning som instrumentet emitterat, Figur 1A. Den fluorescerande strålningen genererar ett energispektrum med olika toppar för olika grundämnen, så att koncentrationen av de olika ämnena snabbt kan bestämmas i provmaterialet. Element som kan mätas är framförallt tyngre element, t ex: Ba, Mn, Ca, Mn, Fe, Sr, Pb, Ni, Zn, Rb, Co, Cr, V, Cl, K, Cu, Nb, Zr. Nya PXRF-instrument kan även användas för detektion av lättare element som Mg, Al, Si, P och S. Bäst fungerar PXRF-tekniken på kompakta material med homogen struktur, t ex metaller eller eventuellt fast berg. Vid mätning i jord påverkas resultatet av en rad faktorer, t ex vattenhalt, struktur och aggregatstorlek. Olika element kan påverkas olika mycket.



Figur 1. A) Principen för PXRF (bild: Thermo Scientific, UK); B) Mätning i fält (foto: Mats Söderström, SLU); C) Mätning i lab med PXRF (foto: Mats Söderström, SLU).

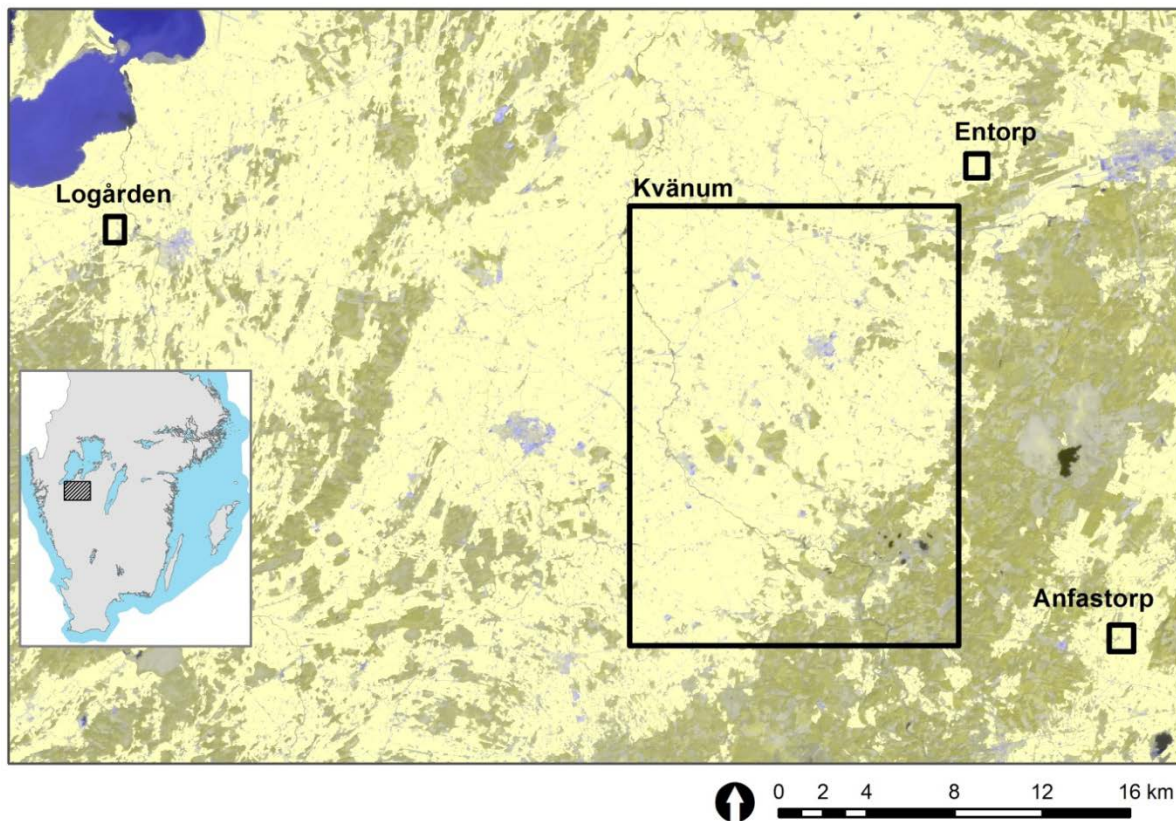
Även om det man egentligen är ute efter att mäta inte går att detektera direkt, finns det många exempel på att det är möjligt att skapa prediktionsmodeller för olika markvariabler med hjälp av indirekta samband. Sambandet mellan Rb uppmätt med röntgenfluorescens och lerhalt har beskrivits av Schnug & Haneklaus (1996) och Zhu et al. (2011). Torium uppmätt med hjälp av gammastrålningsmätning används vid kartering av lerhalt (Söderström et al., 2008; Van der Klooster et al., 2011). Zink är geokemiskt ofta kopplat till Cd (Rosenbaum & Söderström, 1996) och också uranmätning med sensorer har visat sig användbart som substitut för kartläggning av Cd i marken (Söderström & Eriksson, 2013). I en studie i tropiska jordar (Söderström et al., 2014) har flera element bestämda med PXRF visat sig väl korrelerade med innehållet av flera ämnen som analyseras i matjordsprover, t ex katjonbyteskapacitet (CEC) och kolhalt (SOC; som kan omräknas till mullhalt).

I en studie av Almqvist (2010) rörande förorenad jord var det redovisade sambandet mellan Cu, Zn och Pb uppmätt med PXRF i fält och laboratorieanalyser ganska svagt, och PXRF-värdena var generellt lägre. Potts & West (2008) rapporterar att om jordens vattenhalt >20% påverkas mätningar med PXRF påtagligt. Dessutom är det en mycket liten jordvolym som utrustningen mäter på. Diametern på instrumentets mätyta är i storleksordningen 1 cm². Penetrationsdjupet varierar för de olika grundämnena, men det rör sig om från några mm till <1 cm djup. Det betyder att man behöver utvärdera olika strategier för att få fram den lämpligaste metodiken vid fältmätning.

Syftet med detta arbete var att utvärdera möjligheten att använda PXRF-tekniken för snabb kartläggning av flera variabler i matjorden som man vanligen analyserar i laboratorium med kemisk analys. Tanken var att prova tekniken både direkt i fält och på upptagna jordprover. Jämförelser gjordes mellan element bestämda med PXRF och analysvärden från laboratorium. De markkarteringsvariabler som undersöktes var ler-, sand- och mullhalt, fosfor (P-AL), kalium (K-AL), calcium (Ca-AL), koppar (Cu-HCl), magnesium (Mg-AL), molybden (Mo-HNO₃) och kadmium (Cd-HNO₃). Projektet genomfördes med jordprover från olika gårdar i Västergötland med stor variation i olika markegenskaper.

Material och metoder

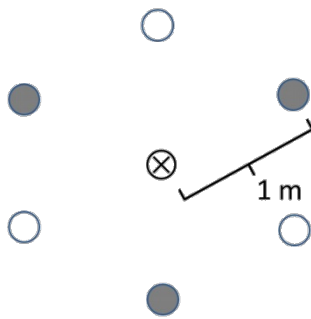
Fältmätning och jordprovtagning utfördes i Västergötland under 2013 (Figur 2). För att kunna utvärdera projektets breda frågeställning valdes tre gårdar med olika förutsättningar ut för jordprovtagning och mätning i fält. På Logården (Figur 3A), som tidigare var en gård med grisuppfödning, är det stora skillnader i fosfortal (Stenberg et al., 2012). Anfastorp ligger sydväst om Billingenområdet och jordarna där är påverkade av alunskiffer vilket t ex innebär relativt höga halter av molybden (Figur 3B), men även av kadmium (Axelsson et al., 2010). På Entorp är det stora skillnader i textur – allt från svagt lerig jord till styv lera förekommer (Figur 3C). I tillägg till de lokala undersökningarna gjordes även en mer regional undersökning i samarbete med Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) som under 2013 utförde ordinarie fältarbete i samband med en kvartärgeologisk kartläggning av Kvänumsområdet. Även för Kvänumsområdet var det framförallt skillnader i textur som var huvudfokus (Figur 3D). I vissa fall har befintliga jordanalyser använts, men nya analyser har också gjorts – på Logården, Kvänumsområdet (även ett tjugotal alvprover) och delvis på Anfastorp.



Figur 2. Mätning med PXRF utfördes på tre gårdar i Västergötland: Logården, Entorp och Anfastorp. Dessutom utfördes mätningar på jordprover som togs i samband med Sveriges Geologiska Undersöknings (SGUs) jordartskartering av Kvänumsområdet. Jordbruksmark är gult på kartan.

SGUs jordprover togs under maj 2013. På de tre gårdarna gjordes PXRF-mätningar och jordprovtagning under perioden 5–13 juni 2013. Vattenhalten i jordproverna bestämdes genom vägning före och efter torkning i torkskåp i 105° under 24 h.

Vid PXRF-mätningen användes instrumentet Niton XL3t GOLDD+ (Thermo Scientific, Billerica, MA, USA) (Figur 1) med *Test-All-Geo*-kalibreringen, som är specifik för Thermo Scientific och som medför att instrumentet väljer mest lämpliga kalibreringsinställningar (*Soil* eller *Mining* – den förstnämnda är en s k *Compton Normalization Calibration* och den andra *Fundamental Parameters Calibration*) för snabb analys av olika element i jordprover. Som användare vet man inte vilken kalibrering som väljs, men höga koncentrationer av ett element resulterar i att *Mining* används. Vissa element är endast med i den ena av kalibreringarna, t ex finns Al och P endast med i *Mining* medan Th och U bara är med i *Soil*. En minut per filter användes vilket gav en total mättid på fyra minuter per PXRF-mätning. I fält gjordes tre PXRF-mätningar per jordprovspunkt, utom i var sjätte jordprovspunkt då sex PXRF-mätningar gjordes. Anledningen till detta var att få en uppfattning om hur antalet mätningar per plats påverkar eventuella korrelationer mellan PXRF-data och jordanalysvärden. PXRF-mätningarna gjordes 1 m från en centrumkoordinat som mättes in med RTK-GPS (Topcon GRS-1, Topcon Positioning Systems, Inc., Livermore, CA, USA) enligt Figur 4.



Figur 4. Mätning med PXRF-instrumentet gjordes på tre platser (ofyllda ringar – benämnda delprov a-c) kring den med RTK-GPS inmätta centrumpunkten (ring med krysset) i en provpunkt. I var sjätte provpunkt gjordes mätning i på sex platser (även fyllda ringar – benämnda delprov d-f). Tre jordprover togs ut per PXRF-plats för PXRF-mätning i laboratorium, både före och efter torkning.

Matjord samlades in med jordborr; tre delstick 0 – 20 cm djup togs ut per PXRF-mätning (inom 1 dm från PXRF-mätningsspunkten) för bestämning av vattenhalt och PXRF-mätning i laboratorium i jord, både före och efter torkning. Anledningen till detta var att kunna undersöka skillnader i mätresultat mellan mätning direkt i fält, mätning i omblandat jordprov med aktuell vattenhalt och mätning i torrt, finfördelat prov.

På laboratorium (Eurofins, Kristianstad) analyserades pH samt P, K, Ca, Mg, Fe och Al i AL-extrakt (Logården och Kvänum) samt Cd, Hg, Pb, Zn, Cr, Mo, Ni i HNO₃-extrakt (Anfastorp). I Kvänumsproverna analyserades ler-, sand, och mullhalt samt K-AL, P-AL och Cu-HCl. För Entorp användes befintliga jordanalyser.

I den här rapporten har vi fokuserat på sambanden mellan PXRF-data och markkarteringsvariablerna P-AL, K-AL, Ca-AL, Mg-AL, Cu-HCl, Mo-HNO₃, Cd-HNO₃, lerhalt, sandhalt och mullhalt. Jordanalysresultat redovisas i Tabell 1.

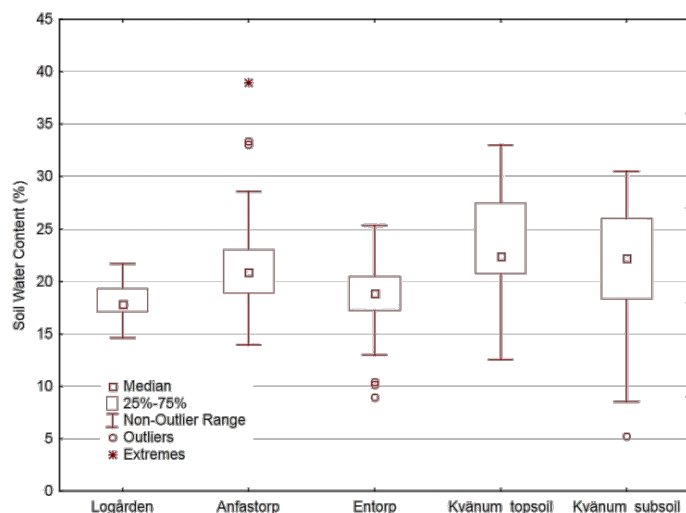
Tabell 1. Sammanställning över jordanalyser i prover där PXRF-mätning utfördes.

	P-AL	K-AL	Ca-AL	Mg-AL	Cu-HCl	Mo-HNO3	Cd-HNO3	Ler	Sand	Mull
	mg 100 g ⁻¹				mg kg ⁻¹			%		
<u>Alla data</u>										
n:	87	87	87	87	103	30	30	91	84	99
Mean	7.7	12	260	25	16	8.1	0.64	29	40	2.9
Stdev	5.3	4.8	204	24	14	13	0.53	18	29	2.3
Min	1.0	1.0	23	0.5	1.0	1.1	0.12	2	1	0
Median	6.3	12	230	18	12	2.9	0.47	28	33	2.4
Max	31	27	1400	100	66	58	1.6	73	91	11
<u>Logården</u>										
n:	15	15	15	15	15	0	0	7	0	15
Mean	14	16	240	30	15			42	0	2.5
Stdev	7.5	4.4	58	9.5	2.9			7.7	0	0.57
Min	4.2	10	180	13	11			27	0	1.7
Median	13	14	220	32	14			43	0	2.4
Max	31	27	430	44	22			50	0	3.6
<u>Anfastorp</u>										
n:	14	14	14	14	30	30	30	14	14	14
Mean	4.1	11	582	8.7	33	8.1	0.64	23	39	7.3
Stdev	2.7	2.9	315	2.3	15	13	0.53	4.0	8.9	1.9
Min	2.0	6.6	170	5.7	17	1.1	0.12	17	26	4.9
Median	3.2	10	570	8.6	26	2.9	0.47	22	40	7.2
Max	12	16	1400	13	66	58	1.6	28	49	11
<u>Entorp</u>										
n:	13	13	13	13	13	0	0	25	25	25
Mean	8.1	9.9	188	14	6.5			22	52	2.0
Stdev	4.0	4.2	70	9.3	2.1			15	29	0.40
Min	2.6	2.8	75	1.0	2.1			4	14	1.4
Median	6.2	11	210	14	6.8			20	55	2.0
Max	16	16	300	30	10			42	91	2.7
<u>Kvänum matjord</u>										
n:	24	24	24	24	24	0	0	24	24	24
Mean	6.7	12	184	18	7.5			26	37	3.7
Stdev	2.8	4.2	82	13	2.6			15	27	1.1
Min	3.4	3.0	50	2.2	3.0			6	7	2.0
Median	6.2	12	195	18	7.8			32	28	3.3
Max	15	23	300	40	12			46	81	7.3
<u>Kvänum alv</u>										
n:	21	21	21	21	21	0	0	21	21	21
Mean	6.2	11	191	45	9.3			40	29	0.3
Stdev	4.2	5.9	114	38	4.5			26	35	0.6
Min	1.0	1.0	23	0.5	1.0			2	1	0.0
Median	5.7	12	240	42	10			50	10	0.0
Max	13	21	340	100	20			73	90	2.1

Resultat

Mätning med PXRF i fält och i laboratorium

Halten för 43 element rapporterades i utdatafilen från PXRF-instrumentet. Av dessa var det relativt många som nära nog alltid hade värden under detektionsgränsen t ex Cd, Mg och Se. De ämnen (27 element) som i ganska många fall hade rapporterade värden och som därför kunde vara av intresse för användning i det här projektet redovisas i Tabell 2. Man kan se att graden av registrerade mätvärden (avser alla delmätningar – d v s tre eller sex per jordprovspunkt) för olika ämnen skiljer sig åt mellan olika platser och typ av mätning, d v s om det är mätning i fält, på obehandlade prover i laboratorium, eller torkade och finfördelade prover. På Entorp var en stor del av Cu-värdena under detektionsgränsen vid mätning i ej torkade prover. Mo-värden registrerades bäst i prover från Anfastorp och Entorp, och Bi kunde mätas i de flesta jordproverna från Logården, men sällan på övriga platser. I torkade och finfördelade jordprover minskar normalt andelen mätvärden under detektionsgränsen. Vid mätning i fält var drygt 10% av Th-värdena på Anfastorp och Entorp under detektionsgränsen, medan det i torkade och finfördelade jordprover i princip alltid gick att mäta Th. För tio element (Ca, Fe, K, Nb, Rb, Si, Sr, Ti, V och Zr) fanns alltid registrerade värden över detektionsgränsen. Att ett ämne har ett registrerat värde över detektionsgränsen betyder dock inte nödvändigtvis att värdet är korrekt. Ett antal faktorer påverkar mätningar med PXRF i jord. Viktiga faktorer är t ex vattenhalten, kornstolek, aggregatstruktur och kompaktion. Låg vattenhalt och finfördelad jord ger mindre osäkra mätvärden. Potts & West (2008) anger att vattenhalter över 20% i jord ger mycket osäkra värden. Vattenhalten i jordproverna i denna undersökning var omkring just 20% - Anfastorp något över, Logården och Entorp något under (Figur 5). Proverna från Kvänumsområdet togs ut tidigare på året och hade en något högre vattenhalt i genomsnitt, och spridningen av värden var också stor bland de proverna (Figur 5).



Figur 5. Vattenhalt (%) i jordprover från de olika områdena.

Det var vanligare att PXRF-värden från obehandlade prover i laboratorium hamnade under detektionsgränsen än de som uppmättes direkt i fält (20% fler värden under detektionsgränsen). Mätning i laboratorium på opreparerade jordprover gav ingen tydlig fördel jämfört med mätning direkt i fält, snarare var mätresultaten mer instabila och skiljde sig än mer från mätning på torkade och finfördelade prover. Anledning till detta kan vara att man i plöjd jord även i mätning på ytan med ett antal delmätningar kan få fram representativa

mätvärden med PXRF, och att vattenhalten vid lämplig väderlek är lägre i den ytligaste jorden än vad den blir vid mätning i jordprov som tagits i markens översta 2 dm. I rapportredovisningen fokuserades därför i huvudsak på resultat från mätning i fält och som jämförelse med mätning på torkade och finfördelade prover.

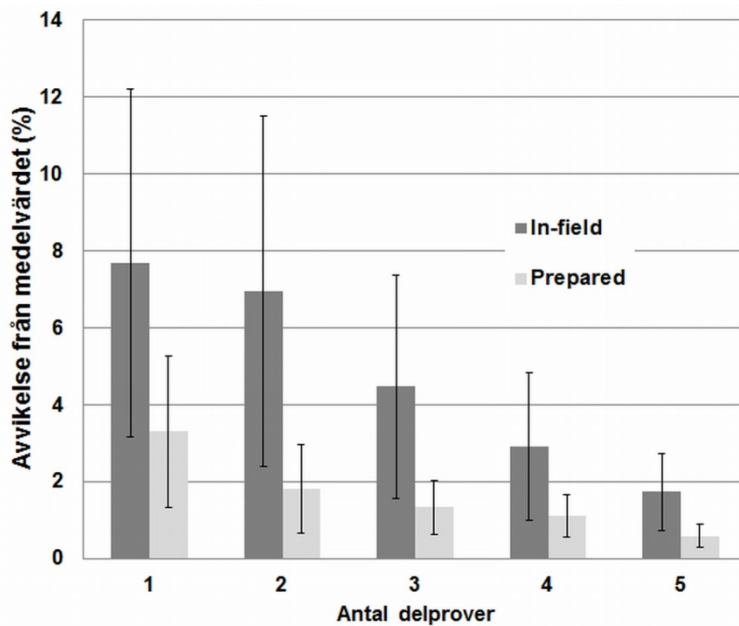
Tabell 2. Andelen mätvärden (%) (avser alla delmätningar) under detektionsgräsen för ett urval element som rapporterats i PXRF-mätningarna. För vissa element (*) var alla delmätningar över detektionsgräsen. In-field = mätning i fält; Sample = mätning i lab. på obearbetade prover; Prepared = mätning i i lab. på torkade och finfördelade prover. A = Anfastorp; E = Entorp; L = Logården; Kt = Kvänum matjord; Ks = Kvänum alv

	<u>In-field</u>			<u>Sample</u>					<u>Prepared</u>				
	A	E	L	A	E	L	Kt	Ks	A	E	L	Kt	Ks
<i>n:</i>	105	84	54	105	82	52	31	31	105	83	54	31	31
Al	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	0	15	7	1	16	8	10	10	0	6	4	0	3
Ba	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bi	25	51	0	73	56	2	32	26	27	41	0	32	26
Cr	30	94	83	18	99	65	74	55	0	51	0	23	23
Cs	14	2	7	45	35	4	6	0	10	7	0	26	0
Cu	6	57	13	0	83	12	13	13	0	29	0	23	26
Mn	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	4	6	52	17	13	81	71	61	2	2	31	6	23
Ni	17	32	4	3	46	6	10	0	0	2	0	6	3
P	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	22	29	78	23	29	90	68	87	13	42	93	48	81
Sn	15	7	13	50	35	6	10	0	11	6	2	29	0
Th	11	14	0	0	16	0	0	0	0	1	0	0	0
U	28	31	20	0	10	10	6	10	0	10	11	3	3
Zn	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

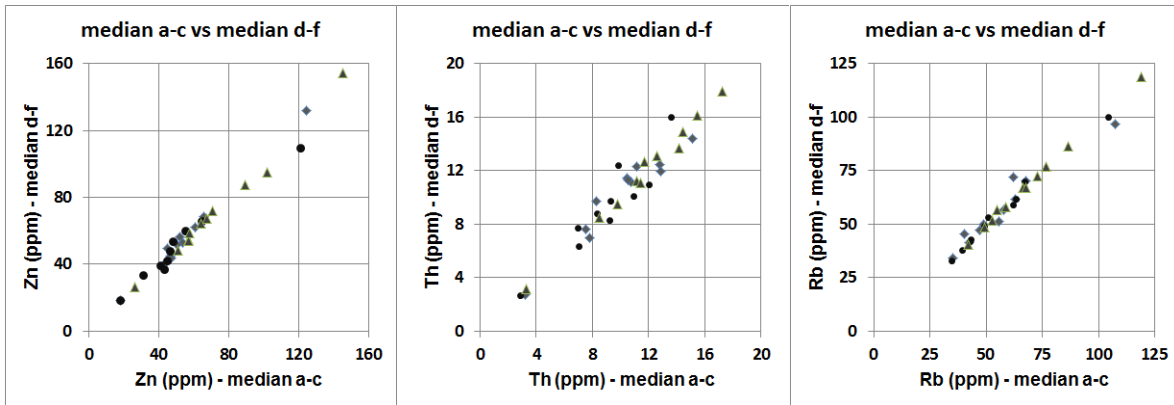
* För Ca, Fe, K, Nb, Rb, Si, Sr, Ti, V och Zr var alla mätvärden över detektionsgräsen

På alla platser där jordprov togs gjordes tre delmätningar med PXRF-instrumentet i fält och medianvärdet (och som jämförelse även medelvärde – skillnaderna mellan median- och medelvärde befanns vara obetydliga) för respektive element beräknades för att få ett samlat PXRF-värde att jämföra med jordprovsanalyser av näringsinnehåll och textur. På tio jordprovspunkter (fem på Anfastorp, tre på Entorp och två på Logården) gjordes sex delmätningar för att möjliggöra en bedömning av hur antalet delmätningar påverkar det slutliga mätvärdet. I Figur 6 visas avvikelser från medelvärde vid 1-5 delmätningar, jämfört med om man gjorde sex delmätningar. Figuren är en sammanvägning av värden för sju element (Zn, Th, Rb, Pb, Ca, Fe, Al), både vid mätning i fält och mätning i torkade och

finfördelade prover. Vid torkade och finfördelade prover var mätvärdena ganska stabila. Vid mätning i fält var antalet delprover viktigare och man kan se att fem delmätningar i fält gav liknande stabilitet som två delmätningar i laboratorium på preparerade prover. För att få en uppfattning om repeterbarheten vid tre delmätningar gjordes en jämförelse i de fall då två olika uppsättningar av tre delmätningar (d v s sex delmätningar totalt) utfördes på samma jordprovspunkt. I figur 7 redovisas denna jämförelse för nio element. Likadana mätningar gjordes även på obehandlade jordprover i laboratorium samt på prover som finfördelats och torkats, vilket också redovisas i figur 7. För vissa element visade det sig att mätresultaten är mycket stabila, t ex för Zn, Rb och Fe (Figur 7: A, C och F). För andra element som t ex Cu, Ca och Al (Figur 7: E, G, och H) var spridningen större vid mätning i fält och även i obearbetade prover i laboratorium. Om proverna torkats och finfördelats gav tre delmätningar ett stabilt och repeterbart värde för alla dessa element.



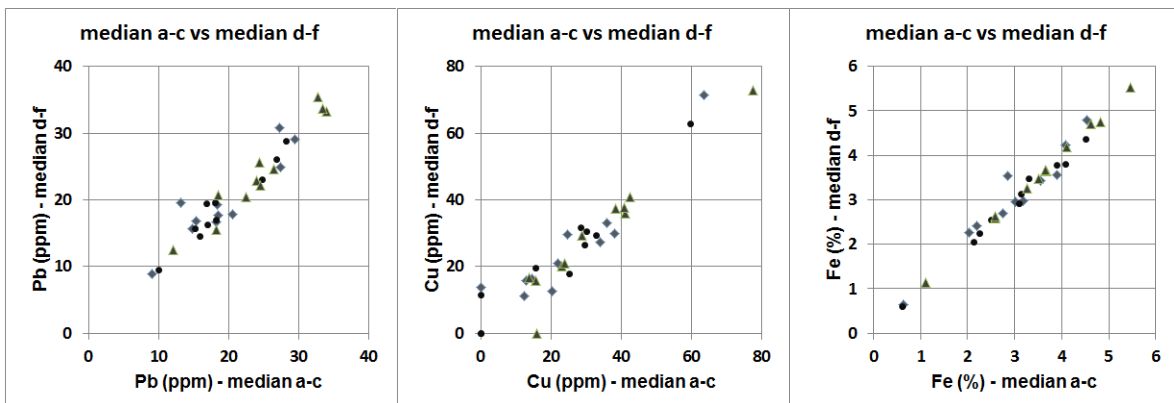
Figur 6. Avvikelse från medelvärdet av sex delprover vid olika antal delprover. Sammanvägning av sju element (Zn, Th, Rb, Pb, Ca, Fe, Al) på tio jordprovspunkter (fem på Anfastorp, tre på Entorp och två på Logården). Felstaplarna avser standardavvikelsen. In-field = mätning i fält; Prepared = mätning på torkade och finfördelade prover i lab.



A

B

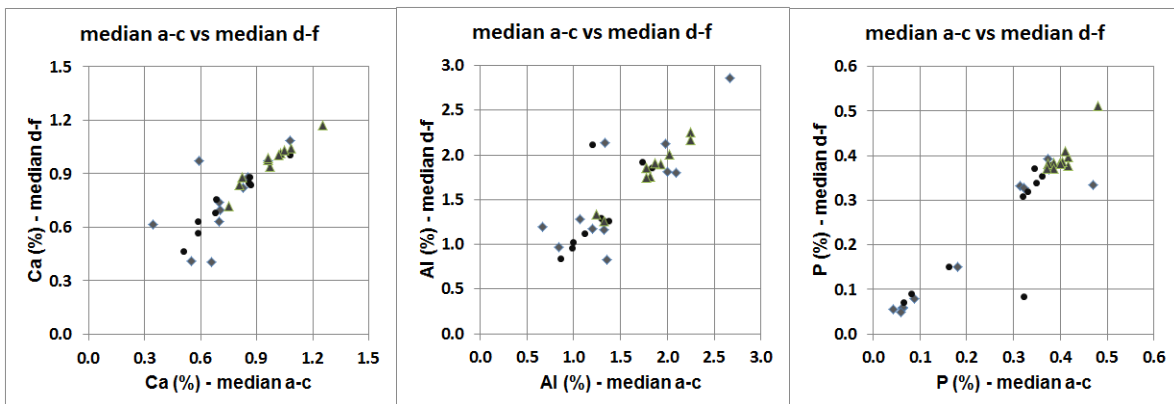
C



D

E

F



G

H

I

Figur 7. Jämförelse mellan PXRF-mätningar utförda på samma jordprovspunkt. Varje PXRF-mätning bestod av medianvärdet av tre delmätningar (a, b, c resp. d, e, f; se även Figur x). Grå romb = mätning i fält; svart punkt = mätning på obehandlat jordprov i lab.; grå triangel = mätning på torkade och finfördelade prover i lab.

Korrelation mellan markkarteringsvärden och PXRF-data

I tabellerna 3-5 redovisas de *linjära* sambanden mellan ett antal PXRF-element och undersökta markkarteringsvariabler (Tabell 3 torkade och finfördelade prover; Tabell 4 obehandlade prover i lab.; Tabell 5 mätning direkt i fält). Värden på R^2 större eller lika med 0,50 är markerade med fet stil. I linje med vad som redovisats ovan vad gäller stabiliteten i mätvärden mellan PXRF-mätning i fält, på obehandlade prover och på torkade och finfördelade prover så var korrelationen med markkarteringsvariablerna uttryckt som R^2 ofta bättre i det sistnämnda fallet.

Tabell 3. Linjärt samband (R^2) mellan element bestämda med PXRF i torkade, finfördelade jordprover och markkarteringsanalyser. Kursiva PXRF-element togs inte med i Tabell 4 och 5 eftersom värden för dessa element relativt ofta då var under detektionsgränsen.

	P-AL mg 100 g ⁻¹	K-AL mg 100 g ⁻¹	Ca-AL mg 100 g ⁻¹	Mg-AL mg 100 g ⁻¹	Cu-HCl mg kg ⁻¹	Mo-HNO3 mg kg ⁻¹	Cd-HNO3 mg kg ⁻¹	Ler %	Sand %	Mull %
<i>n:</i>	87	87	87	87	103	30	30	91	84	99
Al	0.02	0.51	0.04	0.57	0.01	0.02	0.16	0.86	0.81	0.04
Ba	0.04	0.27	0.00	0.56	0.02	0.19	0.30	0.66	0.52	0.17
Ca	0.03	0.09	0.55	0.00	0.38	0.06	0.49	0.09	0.15	0.22
Cr	0.00	0.21	0.18	0.23	0.33	0.02	0.12	0.32	0.27	0.04
Cu	0.03	0.00	0.56	0.01	0.92	0.41	0.86	0.01	0.04	0.45
Fe	0.00	0.35	0.34	0.35	0.40	0.31	0.51	0.60	0.61	0.03
K	0.06	0.44	0.05	0.52	0.04	0.21	0.61	0.78	0.77	0.03
Mn	0.03	0.01	0.21	0.02	0.18	0.13	0.57	0.00	0.01	0.21
Mo	0.04	0.01	0.35	0.04	0.76	0.56	0.79	0.01	0.00	0.34
Nb	0.01	0.47	0.06	0.55	0.03	0.24	0.73	0.84	0.88	0.02
Ni	0.01	0.09	0.38	0.08	0.56	0.24	0.12	0.19	0.20	0.08
P	0.08	0.07	0.07	0.21	0.01	0.00	0.07	0.40	0.43	0.02
Pb	0.00	0.25	0.36	0.04	0.56	0.01	0.09	0.24	0.36	0.28
Rb	0.03	0.41	0.16	0.44	0.16	0.06	0.39	0.62	0.53	0.00
Si	0.02	0.10	0.33	0.13	0.37	0.15	0.54	0.25	0.28	0.15
Sr	0.16	0.13	0.16	0.27	0.34	0.12	0.32	0.30	0.20	0.37
Th	0.03	0.52	0.04	0.76	0.00	0.06	0.50	0.95	0.82	0.06
Ti	0.00	0.45	0.16	0.35	0.08	0.02	0.14	0.68	0.78	0.02
U	0.03	0.01	0.32	0.00	0.70	0.58	0.77	0.05	0.12	0.25
V	0.02	0.01	0.52	0.00	0.84	0.37	0.93	0.05	0.11	0.35
Zn	0.04	0.29	0.35	0.21	0.57	0.22	0.86	0.38	0.41	0.09
Zr	0.00	0.01	0.06	0.04	0.10	0.21	0.62	0.02	0.00	0.02

Tabell 4. Linjärt samband (R^2) mellan element bestämda med PXRF i opreparerade matjordsprover i laboratorium och markkarteringsanalyser. Endast PXRF-element med mycket få värden under detektionsgränsen redovisas.

	P-AL mg 100 g ⁻¹	K-AL	Ca-AL	Mg-AL	Cu-HCl mg kg ⁻¹	Mo-HNO ₃	Cd-HNO ₃	Ler %	Sand	Mull
<i>n:</i>	87	87	87	87	103	30	30	91	84	99
Al	0.02	0.14	0.00	0.21	0.01	0.03	0.22	0.41	0.34	0.16
Ba	0.03	0.18	0.02	0.47	0.11	0.13	0.04	0.51	0.44	0.24
Ca	0.02	0.23	0.39	0.15	0.28	0.07	0.49	0.29	0.39	0.08
Cu	0.02	0.00	0.54	0.01	0.87	0.36	0.81	0.00	0.00	0.31
Fe	0.00	0.33	0.36	0.31	0.42	0.24	0.40	0.56	0.58	0.03
K	0.06	0.37	0.04	0.51	0.03	0.20	0.57	0.74	0.70	0.05
Mn	0.02	0.00	0.18	0.01	0.16	0.13	0.53	0.00	0.00	0.17
Mo	0.06	0.00	0.31	0.05	0.76	0.59	0.73	0.00	0.02	0.45
Nb	0.03	0.42	0.06	0.54	0.04	0.27	0.73	0.83	0.85	0.03
Pb	0.00	0.15	0.30	0.02	0.56	0.05	0.15	0.15	0.25	0.25
Rb	0.09	0.21	0.06	0.24	0.10	0.06	0.34	0.29	0.22	0.00
Si	0.02	0.00	0.06	0.02	0.13	0.02	0.31	0.01	0.00	0.28
Sr	0.19	0.08	0.15	0.18	0.33	0.06	0.13	0.19	0.10	0.41
Th	0.03	0.48	0.03	0.70	0.00	0.04	0.39	0.93	0.82	0.08
Ti	0.00	0.39	0.07	0.52	0.03	0.02	0.22	0.70	0.77	0.00
V	0.03	0.04	0.49	0.04	0.79	0.33	0.94	0.13	0.20	0.26
Zn	0.06	0.23	0.28	0.16	0.53	0.28	0.81	0.31	0.35	0.07
Zr	0.00	0.04	0.11	0.07	0.13	0.22	0.61	0.06	0.01	0.06

För P-AL och mullhalt finns inga R^2 -värden över 0,50 i Tabell 3 och 4. Inte heller om man bryter ner datasetet i olika gårdar hittar man några entydiga enkla samband mellan PXRF-data och dessa markvariabler. Det finns dock ett antal höga R^2 värden för mullhalt i Tabell 5. Det beror på att det i denna Tabell endast är värden från de tre gårdarna, och att nära nog samtliga höga mullhalter uppmättes på Anfastorp, där geologin är annorlunda med generellt höga tungmetallhalter vilka mäts relativt bra med PXRF-instrumentet.

Emellertid finns flera mycket höga R^2 -värden för Cu-HCl, Cd-HNO₃, ler- och sandhalt i alla tabellerna 3-5. Särskilt höga R^2 -värden (>0,90) finner vi mellan PXRF-Th och lerhalt, PXRF-Cu och Cu-HCl samt mellan PXRF-V och Cd-HNO₃. Även vid mätning i fält är dessa samband starka.

En jämförelse mellan Tabell 4 och 5 antyder som också nämnts tidigare i texten att det inte tycks vara någon fördel att mäta med PXRF på upptagna, obehandlade jordprover jämfört med att mäta direkt på markytan i fält, åtminstone inte när det som här gäller plöjd jord.

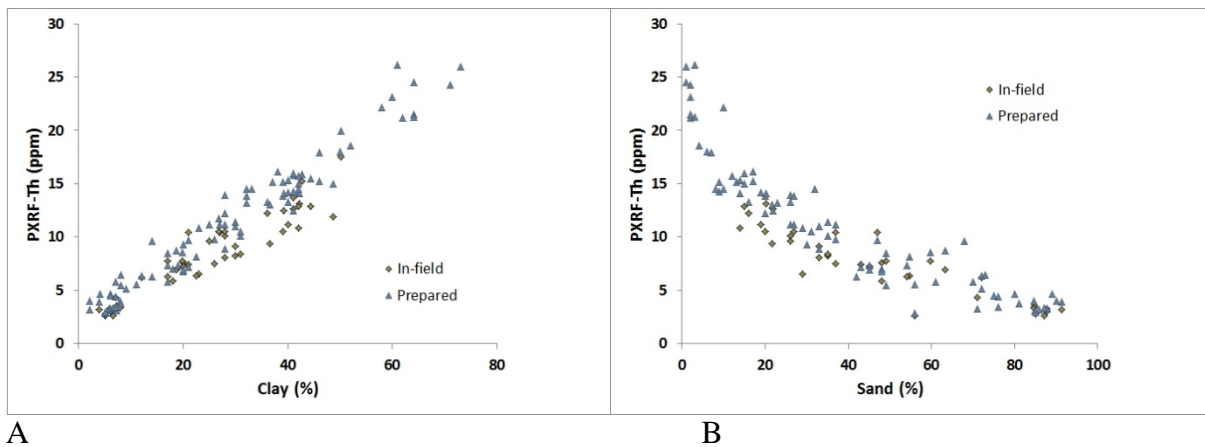
Tabell 5. Linjärt samband (R^2) mellan element bestämda med PXRF i fält och markkarteringsanalyser. Endast PXRF-element med mycket få värden under detektionsgränsen redovisas. Data är endast från Anfastorp, Entorp och Logården.

	P-AL mg 100 g ⁻¹	K-AL	Ca-AL	Mg-AL	Cu-HCl mg kg ⁻¹	Mo-HNO ₃	Cd-HNO ₃	Ler %	Sand	Mull
<i>n</i> :	42	42	42	42	58	30	30	36	29	54
Al	0.29	0.47	0.13	0.75	0.18	0.01	0.04	0.44	0.12	0.26
Ba	0.13	0.30	0.10	0.53	0.11	0.02	0.14	0.55	0.33	0.16
Ca	0.03	0.04	0.60	0.00	0.49	0.09	0.36	0.02	0.14	0.48
Cu	0.13	0.03	0.56	0.14	0.90	0.34	0.78	0.00	0.12	0.74
Fe	0.13	0.10	0.37	0.00	0.59	0.26	0.30	0.28	0.46	0.41
K	0.15	0.44	0.02	0.57	0.09	0.22	0.62	0.65	0.52	0.00
Mn	0.17	0.01	0.16	0.16	0.05	0.11	0.48	0.01	0.03	0.32
Mo	0.08	0.04	0.32	0.10	0.78	0.55	0.78	0.00	0.05	0.46
Nb	0.04	0.40	0.02	0.48	0.13	0.43	0.82	0.75	0.74	0.02
Pb	0.05	0.06	0.20	0.00	0.44	0.03	0.04	0.12	0.26	0.44
Rb	0.07	0.26	0.13	0.26	0.21	0.09	0.45	0.25	0.20	0.09
Si	0.32	0.12	0.39	0.40	0.46	0.05	0.20	0.00	0.18	0.69
Sr	0.27	0.16	0.30	0.52	0.34	0.07	0.06	0.24	0.02	0.60
Th	0.10	0.60	0.00	0.73	0.01	0.08	0.48	0.88	0.81	0.00
Ti	0.01	0.20	0.22	0.07	0.31	0.08	0.27	0.30	0.46	0.26
V	0.11	0.00	0.49	0.05	0.86	0.33	0.89	0.02	0.16	0.60
Zn	0.01	0.12	0.30	0.05	0.67	0.31	0.88	0.17	0.31	0.42
Zr	0.08	0.01	0.20	0.11	0.24	0.12	0.36	0.00	0.04	0.22

Nedan diskuteras sambanden mellan PXRF-data och textur, K-AL, Ca-AL, och Mg-AL, Cu-HCl, Mo-HNO₃ och Cd-HNO₃ mer i detalj.

Ler- och sandhalt

PXRF-Th var bäst korrelerat med ler- och sandhalten i matjordsproverna (Tabell 3-5). Sambandet med lerhalt var linjärt medan en logaritmisk modell bäst beskrev sambandet med sandhalten (figur 8). Värden från PXRF-instrumentet var vid mätning i fält generellt lägre än då mätning gjordes på torkade, finfördelade prover, särskilt vid högre lerhalter tycktes skillnaden öka. En ökad vattenhalt och andra matrixeffekter kan vara orsaken. Man kan notera att det var ett starkt samband mellan PXRF-Th och textur även om man lägger samman alla jordprover som här härrörde från något olika geologiska miljöer och även inbegrep alvprover.



Figur 8. Lerhalt (A) och sandhalt (B) i samtliga jordprov plottat mot Th uppmätt med PXRF både i fält (In-field) och i torkade och finfördelade prover (Prepared).

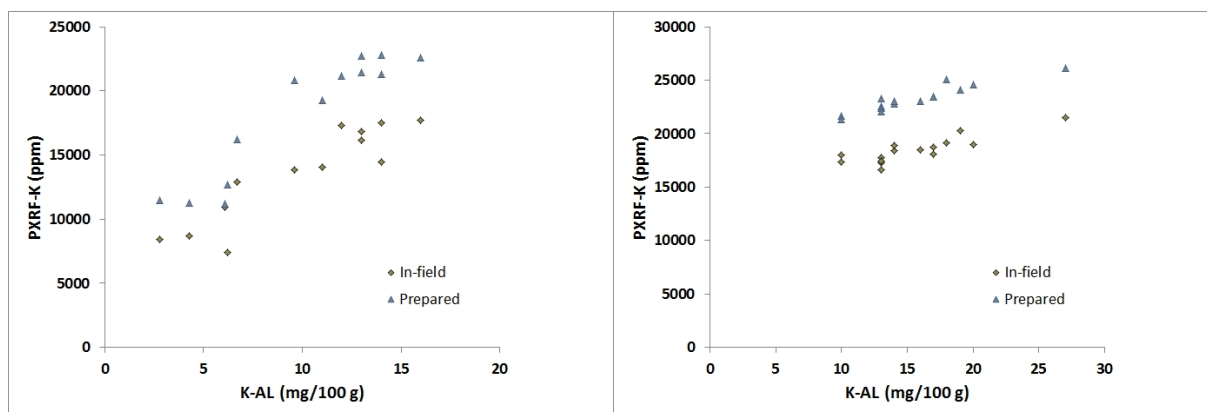
Även andra element uppmätta med PXRF var väl korrelerade med textur. I tidigare undersökningar (Schnug & Haneklaus, 1996; Zhu et al., 2011) rapporteras om samband mellan PXRF-Rb samt även PXRF-Fe och textur. Vad gäller PXRF-Rb fanns här ett starkt samband med lerhalt vid lerhalter >10%. Jordprover från Anfastorp med en annan geologi avvek också från det generella sambandet mellan Rb och lerhalt.

K-AL

Även för K-AL var det PXRF-Th som var bäst korrelerat (Tabell 3-5). Dock var sambandet inte särskilt starkt eftersom det var en stor spridning i data och det var först när man delade upp datasetet i enskilda gårdar eller i alv jämfört med matjord som sambanden mellan PXRF-data och K-AL var starka. Dessutom var då PXRF-K en väl så bra indikator på K-AL som PXRF-Th. För Entorp var R^2 mellan PXRF-K och K-AL 0,89 i torkade prover och 0,73 i fält. Motsvarande siffror för Logården var 0,89 respektive 0,75 (se figur 9). För det regionala Kvänumdatasetet fanns en distinkt skillnad mellan alvproverna och matjordsproverna. I torkade alvprover uppgick sambandet R^2 med PXRF-K till 0,84 medan det i matjorden var 0,47. Skillnaden kan bero på att alven är mindre påverkad av kaliumgödsling som påverkar K-AL men knappast PXRF-K, som ger en bild av det totala innehållet av kalium som är ett av de vanligare grundämnena i marken.

Ca-AL

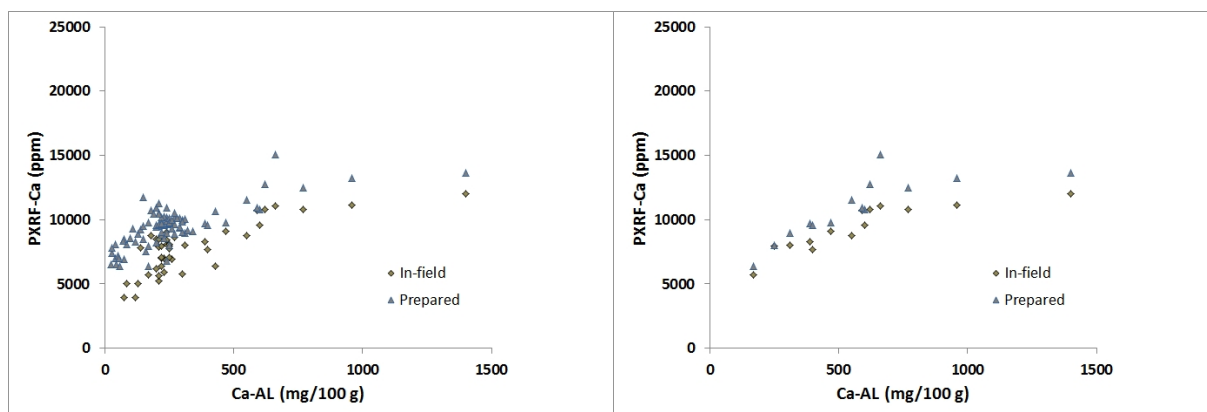
PXRF-Ca var enskilt det bäst korrelerade PXRF-elementet vad gäller Ca-AL (Tabell 3-5). Ca-AL-värdena på Anfastorp var betydligt högre än övriga (figur 10B). Ca-AL från Entorp var betydligt lägre (figur 10C) och PXRF-Ca uppmätt i fält skiljde sig ganska mycket från värdena som erhöles vid mätning på torkade, finfördelade prover. Det verifierar det som redovisades i Figur 7G där man kan se att mätningar av PXRF-Ca i fält som baseras på tre delmätningar gav ganska instabila resultat särskilt vid låga Ca-halter. Detta indikerar att det vid låga halter kan vara svårt att göra en tillförlitlig prediktionsmodell enbart baserad på PXRF-Ca om Ca-AL värdena är låga.



A

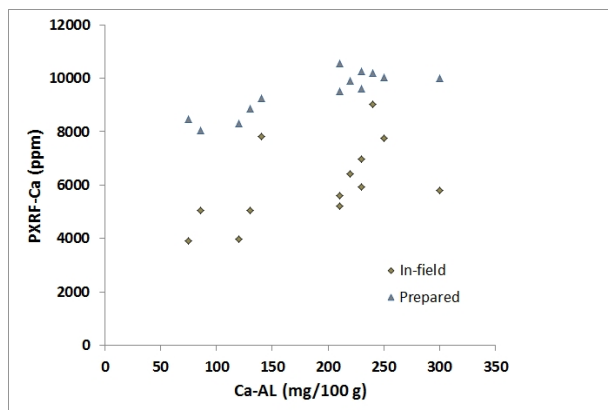
B

Figur 9. Samband mellan K-AL och PXRF-K på A) Entorp och B) Logården. In-field = mätning i fält, och Prepared = mätning i torkade och finfördelade prover.



A

B



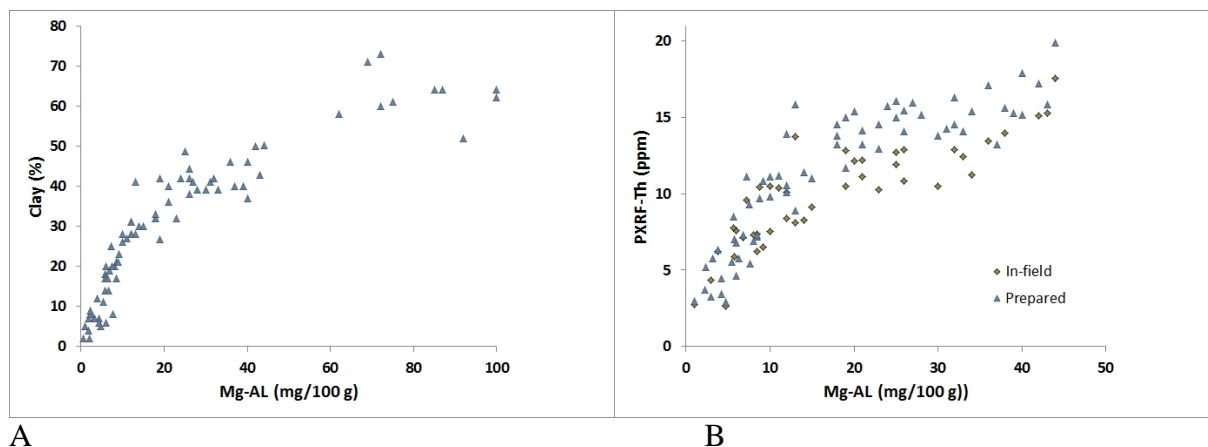
C

Figur 10. Ca-AL plottat mot PXRF-Ca. A) Alla prover, B) Anfastorp och C) Entorp. In-field = mätning i fält, och Prepared = mätning i torkade och finfördelade prover.

Mg-AL

I de jordprover som ingick i denna undersökning följde Mg-AL i stora drag lerhalten enligt en logaritmisk funktion (Figur 11A). De allra högsta Mg-AL-värdena fanns i alvprover med hög lerhalt. Således följde PXRF-Th, som var väldigt väl korrelerat med lerhalten, på motsvarande sätt Mg-AL-värdena (Figur 11B). Om man bortsåg från alvproverna, förklarade en logaritmisk

modell av PXRF-Th 85% av variationen i Mg-AL i torkade, finfördelade jordprov och 78% i fält. Stor tillförsel av t ex Mg-haltig kalk kan sannolikt medföra att det starka sambandet mellan lerhalt (och därmed PXRF-Th) och Mg-AL inte alltid gäller.



Figur 11. A) Mg-AL plottat mot lerhalt i alla jordprover, och B) Mg-AL mot PXRF-Th i alla jordprov utom alvproverna, där alla Mg-AL-värden över 60 fanns. In-field = mätning i fält, och Prepared = mätning i torkade och finfördelade prover.

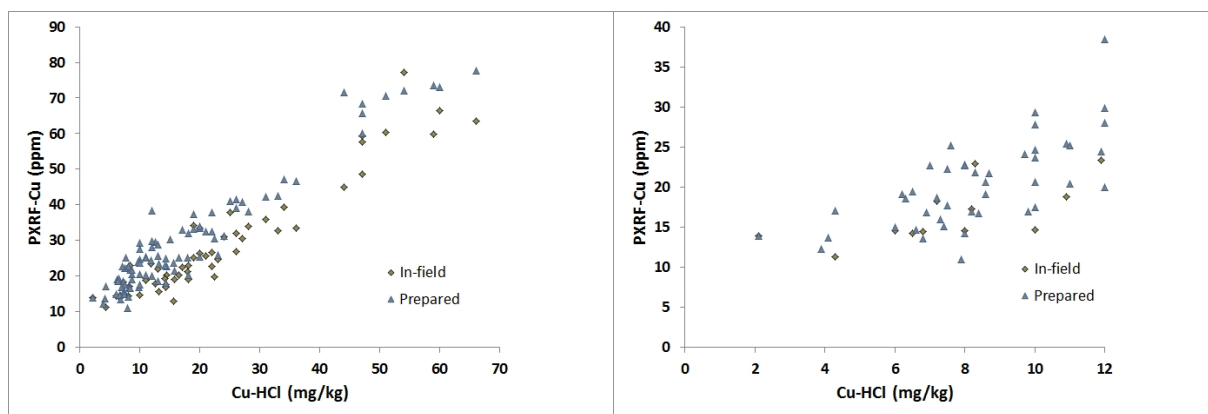
Cu-HCl

Det var mycket stor spridning bland Cu-HCl-värdena i denna undersökning, med många för svenska lantbruksjordar ovanligt höga värden. I lantbrukssammanhang är det värden under 10 mg kg⁻¹ som är av störst intresse, men för bedömning av lämpligheten i att använda slam som gödselmedel är även höga värden av relevans (SNFS, 1994). Med PXRF-instrumentet gick det ofta bra att mäta Cu-värden som motsvarade Cu-HCl (figur 12). I Figur 12B visas Cu-HCl-värden <12 mg kg⁻¹, jämfört med PXRF-Cu. Att spridningen i PXRF-Cu var stor vid låga Cu-HCl-värden kan även utläsas i Tabell 2 och Figur 7E som visar att vi ofta hamnade under detektionsgränsen för PXRF-Cu och att värdena vid mätning i fält och vid låga halter var instabila. Sålunda kan det vara en fördel om det går att ta fram modeller för Cu-HCl som bygger även på andra element än PXRF-Cu. I tabell 3-5 kan man se att det även fanns andra PXRF-element som var väl korrelerade med Cu-HCl, åtminstone i det här datasetet.

Mo och Cd

Mo och Cd analyserades endast på gården Anfastorp där variationen i dessa element var stor och halter förekommer som är så höga att det kan resultera i problem med förhöjda halter i grödor. I Tabell 2 visas att PXRF-Mo ofta var under detektionsgränsen i jordar utan förhöjda Mo-halter. På Anfastorp var sambandet mellan PXRF-Mo och Mo-HNO₃ i stora drag linjärt, bortsett från att en grupp värden med låga värden enligt den vanliga laboratorieanalysen hade höga PXRF-Mo-värden (Figur 13A). Orsaken till detta är inte fastställd ännu.

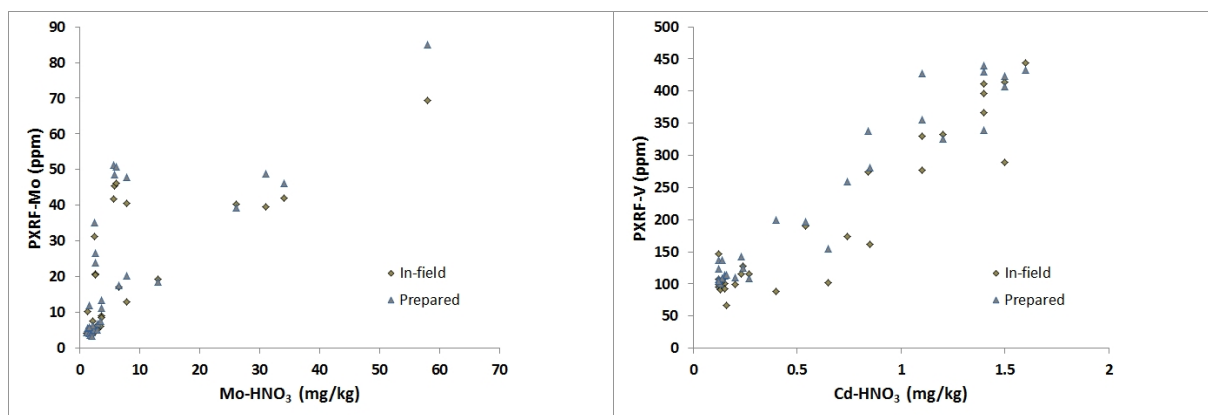
PXRF-Cd var nära nog alltid under detektionsgränsen (Cd redovisas därför inte i Tabell 2). Dock fanns andra element som var mycket bra korrelerade med Cd i jord, t ex PXRF-V (Figur 13B).



A

B

Figur 12. Cu-HCl i jordprov plottat mot Cu uppmätt med PXRF både i fält (In-field) och i torkade och finfördelade prover (Prepared). A) är alla prover och B) visar prover med Cu-HCl < 12 mg/kg.



A

B

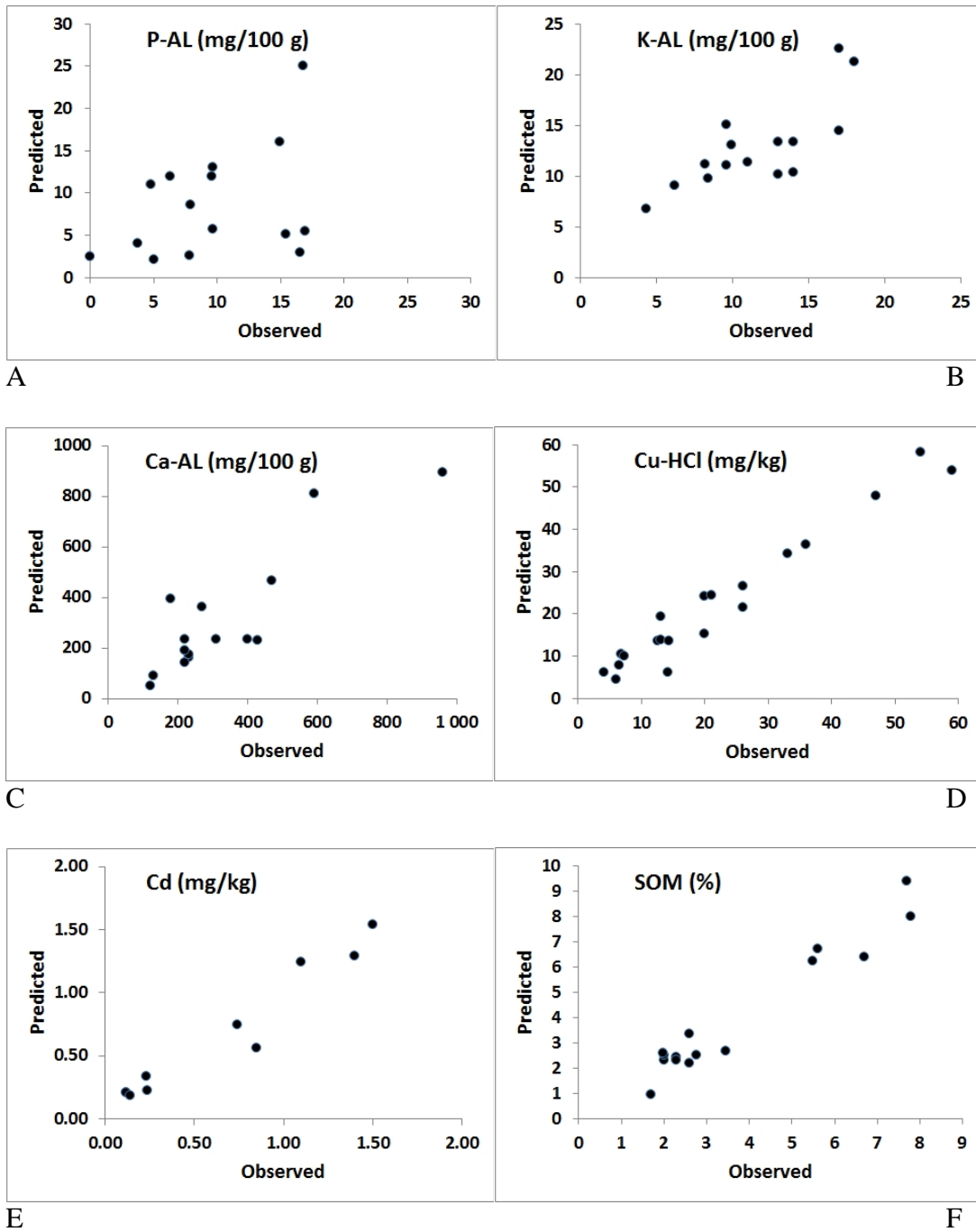
Figur 13. Proverna endast från gården Anfastorp: A) PXRF-Mo plottat mot Mo-HNO₃ – en mindre grupp av prover avviker från det linjära sambandet som kan ses i diagrammet, B) PXRF-V var starkt korrelerat med Cd-HNO₃. In-field = mätning i fält, och Prepared = mätning i torkade och finfördelade prover.

Multivariata modeller för markkartering direkt i fält med PXRF – ett exempel

Som redovisats ovan var det många PXRF-element som i olika grad var linjärt korrelerade med flera av markkarteringsvariablerna, men för några var det endast svaga samband. Ibland kan det dock finnas icke-linjära samband, och kombinationer av olika element kan också vara korrelerade med markanalyserna. En annan aspekt att ha i åtanke om man vill mäta direkt i fält med PXRF och kunna göra uppskattningar av olika markkarteringsvärden är att vissa PXRF-värden ofta hamnar under detektionsgränsen. Normalt bör man ha många observationer som grund när man ska skapa mer komplexa modeller som är applicerbara generellt. Trots det begränsade antalet prover gjordes några kalibreringsmodeller baserade på data från de tre gårdarna med tanken att de skulle kunna användas för fältbruk. Här valdes endast de PXRF-värden som nära nog alltid var över detektionsgränsen vid mätning i fält. Dessa modeller är förstås applicerbara endast för dessa gårdar och inte generellt. Metoden som användes var *multivariate adaptive regression splines* (MARSplines), en typ av icke-parametrisk *data mining*-metod (Hill & Lewicki, 2007) vilken används för att leta fram samband – även ej linjära – mellan variabler i ett stort dataset. Ingående PXRF-data var: Zr, Sr, Rb, Pb, Zn, Fe, Mn, V, Ti, Ca, K, Ba, Nb, Al, Si – man kan notera att varken Cu och Th användes i detta exempel trots att båda var bäst korrelerat med vissa markkarteringsanalyser eftersom de ofta hamnade under detektionsgränsen. Fem jordanalyser från vardera gård (från Anfastorp tio analyser för vissa element som endast fanns analyserade där) undanhölls från kalibreringen och användes endast för validering. Resultaten redovisas i tabell 6 och Figur 14. För Ca-AL, Cu-HCl, Cd och SOM fungerade modellerna bra och indikerar att PXRF-mätning skulle kunna användas för kartläggning av dessa gårdar. Dock är det på den stora datavariationen svårbedömt om man till exempel kan fånga upp variationen i låga Cu- och särskilt mullhalter. Modellerna för K-AL, Mg-AL, Mo och P-AL fungerade mindre bra.

Tabell 6. Valideringsstatistik för skattning av markkarteringsvariabler direkt i fält med PXRF-mätning. Min, max och medel avser uppmätta jordanalyser i valideringsdatasetet som bestod av 5 slumpmässigt utvalda prover från respektive gård (dock för Cd och Mo är alla prover (10 st) från samma gård, Anfastorp). Summeringsstatistiken avser jämförelse mellan uppmätta och prediktera värden: MAE = medelfel (absolutvärden); RMSEP = root mean square error of predictions; R² = determinationskoefficienten.

	Antal	Min	Max	Medel	MAE	RMSEP	R ²
P-AL	15	2.1	25	8.5	3.6	6.5	0.14
K-AL	15	4.3	18	11.6	1.9	3.0	0.60
Mg-AL	15	3	42	17	5.8	9.9	0.46
Ca-AL	15	120	960	332	69	115	0.77
Cu-HCl	15	4.1	59	17	12	3.2	0.93
Mo-HNO ₃	10	1.1	34	7.6	3.0	8.2	0.33
Cd-HNO ₃	10	0.12	1.5	0.64	0.05	0.12	0.95
Mullhalt	15	1.7	7.8	3.8	0.43	0.71	0.94



Figur 14. Uppmätta och predikterade värden för ett antal markkarteringsparametrar. Modellerna som användes var multivariata modeller baserade på mätning i fält med PXRF.

Både kalibreringsdata och valideringsdata är från de tre gårdarna Anfastorp, Logården och Entorp. Man ska se detta som ett exempel på att både modeller och validering baserades på ett litet antal observationer.

Slutsatser

Antalet delmätningar som görs på en jordprovspunkt har betydelse för hur representativa PXRF-värden man kan erhålla. För vissa PXRF-element hamnade man relativt ofta under detektionsgränsen och då kanske endast värden från en eller två delmätningar får representera provplatsen. Särskilt i fält var det många element som hamnade under detektionsgränsen. Ett exempel är PXRF-Th som kan användas för att beräkna lerhalten i matjorden. Vid mätning i torkade och finfördelade prover fick vi nära nog alltid mätvärden, medan detektionsgränsen underskreds i drygt 10% av delmätningarna i fält. Detta betyder att man för en fältapplikation kanske även måste ta fram en beräkningsmodell som inte innefattar Th om man alltid vill få fram predikterade värden på lerhalt. Minst tre, men gärna upp till fem delmätningar kring en jordprovspunkt rekommenderas för fältmätningar. Vi använde en mättid på 4 minuter per delmätning, alltså mätning under 12 minuter på en plats i fält med tre delmätningar. Man kan utreda vidare om mättiden kan kortas något utan att mätvärdenas stabilitet påverkas. För vissa variabler där man ibland hamnade under detektionsgränsen kan en ökad mättid vara fördelaktig. I mätning på torkade och finfördelade prover torde mätning på två delprov vara tillräckligt.

Det gick att se att flera för jordbruket viktiga parametrar var väl korrelerade med ett eller flera element som mäts med PXRF-instrumentet. Särskilt i torkade och finfördelade jordprover. Även i fält, under de förhållanden som rådde vid mätningar i denna studie – där jordens vattenhalt i snitt var omkring 20% i matjorden men sannolikt lite torrare på markytan där PXRF-mätningen i fält utfördes, gick det att få fram relativt starka samband mellan PXRF-data och undersökta markkarteringsvariabler.

Denna studie var begränsad till ett mindre antal jordprover från i huvudsak tre gårdar i Västergötland och ett större antal jordprover och mer omfattande fältmätningar rekommenderas om man vill få fram säkrare prediktionsmodeller för olika markkarteringsvariabler. För t ex K-AL, Mg-AL, Ca-AL, Cu-HCl, kadmium och ler- och sandhalt var sambanden så starka att det borde fungera bra att få fram användbara värden direkt i fält med PXRF, även om det fortfarande saknas underlag för att bedöma hur tillförlitliga värden man kan få fram vid låga halter av t ex Cu och K, och hur många lokala kalibreringsprover som kan komma att behövas för de olika variablerna. I det datamaterial som togs fram i denna studie gick det något oväntat att även göra en relativt väl fungerande prediktionsmodell för mullhalt i fält (RMSE 0,7%), men då ska man ha i åtanke att mullhalterna var betydligt högre på den ena av gårdarna som låg i en annan geologisk miljö. Beträffande P-AL var sambanden med olika PXRF-data generellt svaga, både i fält och i mätningar i preparerade jordprover i lab. Vad gäller Mo fanns en tendens till ett starkt samband mellan PXRF-Mo och Mo uppmätt i jordprov med hjälp av kemisk analys. Dock stördes detta av ett antal jordprover som avvek från mönstret. Orsaken till detta återstår att utreda.

Referenser

- Almqvist, H. 2010. The legacy of the mill – a metal polluted forest soil in Gusum. Master's Thesis in Soil Science. Examensarbeten 2010:11. Institutionen för mark och miljö. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Axelsson, U., Stadig, H., Söderström, M. & Jonsson, A. 2010. Estimation of molybdenum content in topsoil using gamma ray sensing. NJF Seminar 438: Sensors for soil and plant mapping and terrain analysis, Skara, Sweden, 27-28 October 2010. NJF Report, 6, 7, 20-22
- Hill, T. & Lewicki, P. 2007. STATISTICS: Methods and Applications. StatSoft, Tulsa, USA.
- Piikki, K., Söderström, M., & Stenberg, B. 2013. Sensor data fusion for topsoil clay mapping. *Geoderma* 199:106–116.
- Potts, P. J. & West, M. 2008. Portable X-ray fluorescence spectrometry – capabilities for in situ analysis. Cambridge, UK: RSC Publishing.
- Rosenbaum, M.S., & Söderström, M., 1996. Cokriging of heavy metals as an aid to biogeochemical mapping. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 46, 1–8.
- Schnug, E. & Haneklaus, S. 1996. A rapid method for the indirect determination of the clay content by X-Ray fluorescence spectroscopic analysis of rubidium in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 27:1707-1719.
- SNFS, 1994. Kungörelse med föreskrifter om skydd för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket. Statens naturvårdsverks författningssamling, SNFS 1994:2, MS 72.
- Stenberg, B., ViscarraRossel, R.A., Mouazen, A.M., & Wetterlind, J., 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Adv. Agron.* 107, 163-215.
- Stenberg, M., Ulén, B., Söderström, M., Roland, B., Delin, K., & Helander, C-A. 2012. Tile drain losses of nitrogen and phosphorus from fields under integrated and organic crop rotations. A four-year study on a clay soil in southwest Sweden. *Science of the Total Environment*, 434:79–89.
- Söderström, M., Araújo, S.R., Eriksson, J., Isendahl, C., & Stenberg, P. 2014. Sensors for efficient field mapping of Amazonian Dark Earths. Proceedings of SALSA 2014 (IX Sesquianual Conference of the Society for the Anthropology of Lowland South America), Gothenburg, Sweden, June 26-29, 2014
- Söderström, M., & Eriksson, J. 2013. Gamma-ray spectrometry and geological maps as tools for cadmium risk assessment in arable soils. *Geoderma* 192:323–334.
- Söderström, M., Gruvaeus, I. & Wijkmark, L., 2008. Gammastrålningsmätning för detaljerad kartering av jordarter inom fält. *Precisionsodling Sverige, POS Teknisk rapport* 11. Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Van der Klooster, E., Van Egmond, F.M., & Sonneveld, M.P.W., 2011. Mapping soil clay contents in Dutch marine districts using gamma-ray spectrometry. *European Journal of Soil Science* 62:743–753.
- Zhu, Y., Weindorf, D.C. & Zhang, W. 2011. Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. *Geoderma* 167–168:167–177.

Förteckning över rapporter utgivna i serien *Precisionsodling Sverige, Tekniska rapporter*:

- 33 Söderström, M & Stadig, H. 2015. Test av portable röntgenfluorescens (PXRF) för bestämning av jordart, näringsämnen och tungmetaller direkt i fält – en pilotstudie
- 32 Lundström, C (red). 2015. Verksamhet i AGROVÄST-projektet *Precisionsodling Sverige, POS, 2014*.
- 31 Lundström, C (red). 2014. Verksamhet i AGROVÄST-projektet *Precisionsodling Sverige, POS, 2013*.
- 30 Piikki, K., Wetterlind, J., Söderström, M. & Stenberg, B. 2013. Jordartskartering av matjord och alv direkt i fält.
- 29 Krijger, A-K. 2013. Kontrollerad trafik (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 (red). 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 kvalitetsskillnader 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 beståndsstatus 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. Lantmännen AB, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Yara AB, hushållningssällskap, Greppa Näringen och Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI).

Distribution:

Sveriges lantbruksuniversitet
Precisionsodling och pedometri

Box 234

532 23 Skara

Tel. 0511-670 00

Internet: <http://www.slu.se/>
<http://www.agrovast.se/precision>
<http://www.precisionsskolan.se>