

Observationsfält med lerjord - markkaraktisering av sorption och fosfortillgänglighet

Barbro Ulén och Ann Kristin Eriksson, Mark och Miljö, SLU

Inledning

En av de främst bidragande faktorerna till övergödning av Östersjön är de diffusa utsläppen av fosfor från jordbruksmark (Helsinki Commission, 2009). Sambandet mellan fosforläckaget och jordens egenskaper är dock komplicerat. Fosfor kan t ex både adsorberas och desorberas från jordpartiklarna varvid bl. a. jordens innehåll av kalcium, leraggregatens och mineralernas innehåll aluminium och järn, samt läckagevattnets pH och saltsammansättning har betydelse.

För att kunna extrapolera läckagesiffrorna från observationsfälten till olika typer av andra fält bör därför jordens förmåga att frigöra och att adsorbera fosfor kvantifieras på flera sätt. Syftet med denna studie har varit att jämföra olika extraktionsmetoder för fosfor, hur dessa överensstämmer med desorptionen av fosfor till markvattenlösningen och vilka andra parametrar som påverkar adsorptionen av fosfor i marken. Några utvalda observationsfält med stora fosforförluster och lerjord valdes ut. Detta gjordes dels för att bättre förstå dessa jordars egenskaper att frigöra och binda fosfor dels att ge underlag för den utveckling av fosformodellering som pågår på institutionen för Mark och Miljö, SLU.

Tabell 1: Innehåll, jonstyrka, pH, förhållandet jord till extrakt och extraktionstid som använts i undersökningen: kalciumklorid (CaCl_2), vatten, "Olsen-metoden" ammonium laktat (AL), saltsyra (HCl), och oxalat. Proveredningen med salpetersyra (HNO_3) skedde genom autoklavering i 120°C och innebar en uppslutning

Metod	CaCl_2	Vatten	Olsen	AL	HCl	Oxalat	HNO_3
Innehåll	CaCl_2	H_2O	NaHCO_3 , (NaOH för att justera pH)	$\text{NH}_4\text{CH}_3\text{H}$ (OH)COO, CH_3COOH	HCl	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$	HNO_3 (vid 120°C)
Jonstyrka	0,01M	-	0,50M	0,01M/0,40 M	4M	0,2M	7M
pH	-	-	8,50	3,75		3,0	
Jord: extrakt (g:ml)	1:3	1:3	1:20	1:20	1:20	1:60	1:4
Extraktions- tid (timmar)	20	20	0,5	1,5	1,5	4	0,5

En svag kalciumkloridlösning användes för att efterlikna saltförhållanden i marklösning medan jonsvagt vatten användes för att efterlikna regnvatten. Olsen-P med bikarbonat utnyttjas för jordtester i många europeiska länder medan extraktion med surt laktat är den gängse svenska metoden för att bedöma mängden västtillgänglig fosfor. P-HCl används av tradition i Sverige för att bedöma förråden av växttillgänglig fosfor medan en uppslutning med salpetersyra kan innebära att också organiska föreningar i jorden löses upp i mer eller mindre grad.

Material och metoder

Totalt 110 prov från matjorden från de fem observationsfälten 1D, 2M, 4O, 7E och 20E, samtliga med lerjord undersöktes. Alla observationsfält provtogs under hösten 2005 och proverna har sedan dess förvarats i torrt tillstånd. Fosforinnehållet i jordarna har tidigare analyserats med ICP efter extraktion med ammoniumlaktat (P-AL; Egnér et. al., 1960), saltsyra "Förrådsfosfor" (P-HCl) samt genom uppslutning med salpetersyra (P-HNO₃; SIS 1997). Mängden fosfor analyserades nu efter extraktion i svag kalciumkloridlösning (CaCl₂; Börling et. al., 2004; Djodjic & Bergström, 2005), vatten (H₂O; modifierad van der Paauw, 1969) och i bikarbonatextrakt (Olsen et. al., 1954). Proceduren för extraktionerna återfinns i tabell 1. Dessutom bestämdes fosfors adsorptionsförmåga till den aktuella jorden i CaCl₂-lösningen med hjälp av ett index (PSI) (Börling et. al., 2001). För att indikera i vilken grad de här analyserade markegenskaper kan antas påverka fosforadsorptionen beräknades deras samband med PSI-bestämningarna genom stegvis regression.

Jordarnas förmåga att adsorbera fosfor indikerades också genom att mäta mängden aluminium (Al) och järn (Fe). Dessa bestämdes dels i lättlösligt form i AL-extraktet (Al-AL, Fe-AL) (Ulén, 2006) del i mera amorf form efter extraktion i ammoniumoxalat (Al-ox, Fe-ox) (Schwertzmann, 1964; Jackson et. al., 1986). I AL-extraktet mättes även mängden kalcium (Ca-AL). Proceduren för extraktionerna återfinns i tabell 1. Mängden organiskt material i form av totalt organiskt kol (TOC) i jordarna enligt LECO (2003) och pH i vattenlösning (5ml jord:25 ml vatten) enligt ISO 10390:2005 har bestämts tidigare. Fosfor analyserades i oxalatextraktet (Wolf & Baker, 1990) men detta gav instabila och höga värden för de här undersökta lerjordarna och resultaten har lämnats åsido. Värden från extraktion med saltsyra (HCl) är preliminära. Jordarna som kommer att analyseras om och resultatet att kvalitetsgranskas. Även lerhalterna håller på att analyseras (hösten 2009).

Tabell 2: Kod för de undersökta observationsfälten, antal prov (n) och medelvärden av mängden extraherad fosfor med de olika metoderna för fem observationsfält (mg P/100 g jord)

Kod	n	CaCl ₂ -P	P-vatten	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
1D	15	0,030	0,74	2,9	5,7	48	62
2M	40	0,031	0,33	2,4	7,0	30	42
4O	20	0,014	0,12	1,9	3,2	30	50
7E	25	0,031	0,20	3,2	5,7	34	48
20E	10	0,022	0,21	3,3	6,9	33	55

Tabell 3: Kod för de undersökta observationsfälten, medelvärdet för pH, kalcium i ammoniumlaktat (Ca-AL) (mmol kg^{-1}) och för extraherad fosfor (mg P/100g) med de olika extraktionsmetoderna i procent av det fosforvärde som erhållits genom uppslutning med salpetersyra (P-HNO₃). De två nedersta raderna visar medelvärde (X) resp. varians (CV) för dessa relativa fosforvärden

Kod	pH	Ca-AL	CaCl ₂ -P	P-vatten	Olsen-P	P-AL	P-HCl
1D	5,7	40	0,048	1,2	4,7	9,2	77
2M	6,9	125	0,073	0,87	5,7	17	71
4O	6,8	45	0,028	0,24	3,8	6,4	60
7E	6,5	86	0,042	0,20	6,7	12	70
20E	6,9	106	0,040	0,38	6,0	13	60
X	6,6	80	0,046	0,58	5,4	12	68
CV	8	46	36	76	21	35	11

Resultat och diskussion

Fosforkoncentrationer i jorden med olika extraktionsmetod

Alla analyserade data finns i bilagorna 1 och 3. Medelvärdet för fosforinnehållet baserat på de olika extraktionsmetoderna återfinns i tabell 2. De olika procedurerna gav en fosforhalt i följande ordning; P-CaCl₂ < P-vatten < Olsen-P < P-AL < P-HCl < P-HNO₃.

Vattenextraherad mängd fosfor var 10 ggr större än mängden fosfor som extraherades med CaCl₂. Detta beror på att kloridlösningen får en högre elektropotential än rent vatten som gör att desorptionen av fosfatjoner blir lägre (Börling, 2001). Denna effekt är tydlig i kolloidrika lerjordar med hög katjonkapacitet och lågt pH och har gjort att man ifrågasatt CaCl₂ som ett lämpligt extraktionsmedel för att bestämma växttillgänglig fosfor (Hylander et al., 1996).

Medelvärdet för pH, Ca-AL och extraherad mängd fosfor i förhållande till den med HNO₃ uppslutna totalmängden återges i tabell 3. Som väntat var koncentrationen P-AL hög i förhållande till totalfosfor för fält (2M, 20E och 7E) med hög halt extraherbart kalcium (Ca-AL). Kalciumbunden fosfor löses upp i den sura laktatlösningen vilket kan ge en över-skattning av mängden växttillgänglig fosfor i sådana jordar (t ex Börling, 2001). De flesta fosformetoder gav ganska likartade resultat för fält 7E och 20E relativt sett trots en högre lerhalt och högre pH för det senare fältet.

Korrelationskoefficienter mellan de olika metoderna för samtliga fält presenteras i tabell 4. Det tydligaste sambandet återfanns mellan fosfor som extraherats med CaCl₂-P och Olsen-P. I bilaga 2 har motsvarande samband redovisats för varje fält för sig. För fältet 1D var alla metoderna väl korrelerade med varandra medan fälten 4O och 20E kännetecknades av att de olika metoderna gav olika resultat. Speciellt det sistnämnda fältet hade mycket olika resultat med de olika metoderna. Fältet karakteriseras av ung marin lerjord med hög salthalt i dräneringsvatten och har förmodligen en komplicerad markkemi när det gäller fosfor.

Tabell 4: Korrelationskoefficienter (Pearson) för samtliga jordprov med de olika extraktionsmetoderna. Ett värde nära 1 visar på ett bra samband

Metod	CaCl ₂ -P	P-vatten	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P	-	0,435	0,730	0,660	0,476	0,383
Vatten-P		-	0,388	0,243	0,616	0,424
Olsen-P			-	0,786	0,653	0,593
P-AL				-	0,483	0,379
P-HCl					-	0,745
P-HNO ₃						-

Linjär regression mellan P-AL och Olsen-P tillsammans med andra relevanta parametrar indikerade att förutom Ca och pH påverkas mängden extraherad fosfor också av den organiska halten i jorden mätt som TOC.

$$Olsen-P = 2,94 + 0,297P-AL - 0,000821Ca-AL + 0,488TOC - 0,400pH \quad R^2_{adj} = 78,5 \%$$

Otabbong *et. al.* (2009) beräknade ett direkt samband mellan Olsen-P och P-AL för matjordsprover som framför allt var från södra Sverige. Detta samband gav dock en ganska dålig prediktion av Olsen-P utifrån de här jordarnas P-AL-tal ($r=0,40$). Den bästa prediktionen för Olsen-P från uppmätta värden för P-AL med hjälp av sambandet erhöles för fälten 1D ($r=0,80$) och 20E ($r=0,74$).

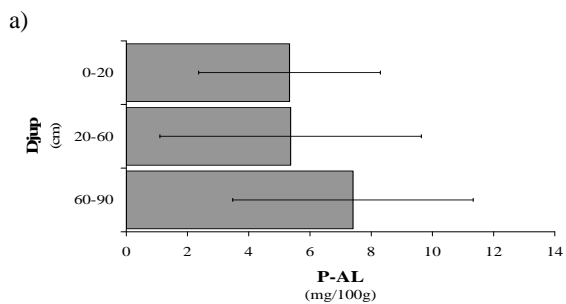
Sambandet mellan P-AL och Olsen-P varierade med de olika observationsfälternas jordegenskaper enligt tabell 5. För enskilda fält var det oftast antingen pH eller Ca-AL som påverkade sambandet mellan Olsen-P och P-AL. Delar av fältet med lägre pH eller Ca-halt hade ett relativt sätt högre värde för Olsen-P än P-AL (Tabell 5). För fält 2M och 4O indikerades också en påverkan av jordens innehåll av organiskt material.

Börling *et. al.* (2004) observerade att P-AL talet kunde minska med djupet i profilen för att åter öka på större djup. Det förklarades med att det sura P-AL extraktet frigör kalciumbundna fosfater från de mera ovittrade jordarna på större djup. I all här undersökta observationsfält ökade också mängden P-AL i den djupare alven. Totalfosfor mätt som P-HNO₃ ökade inte på samma sätt eller minskade (Figur 2).

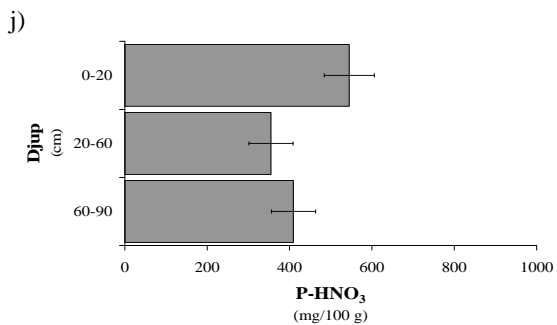
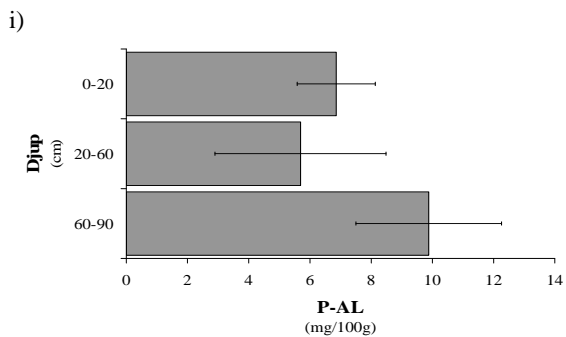
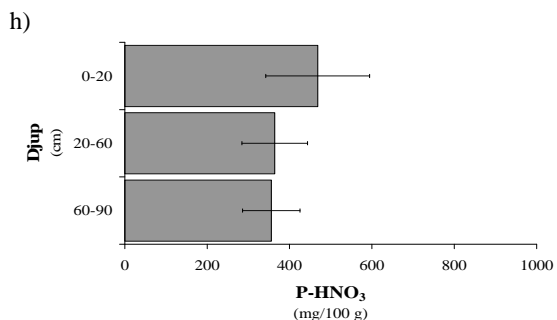
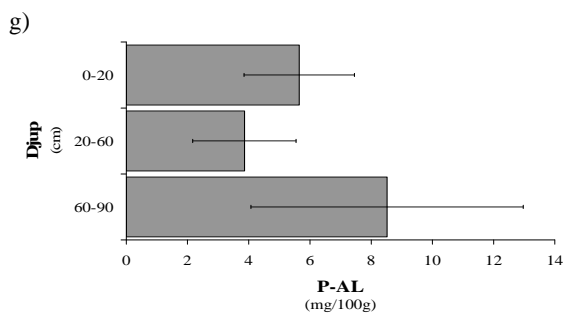
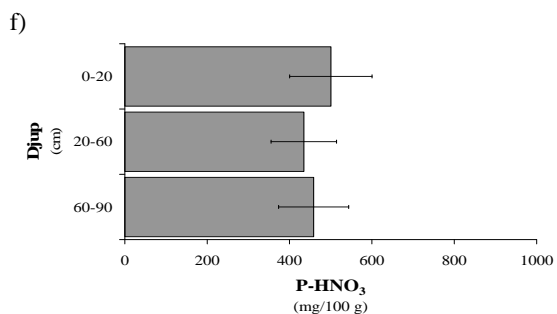
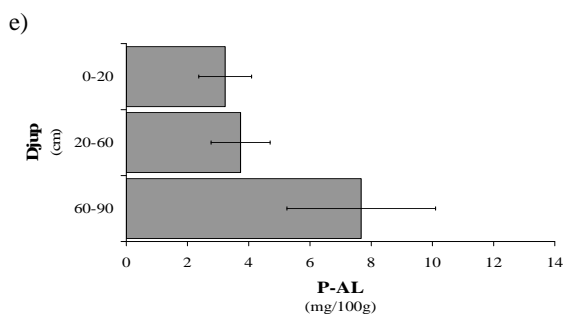
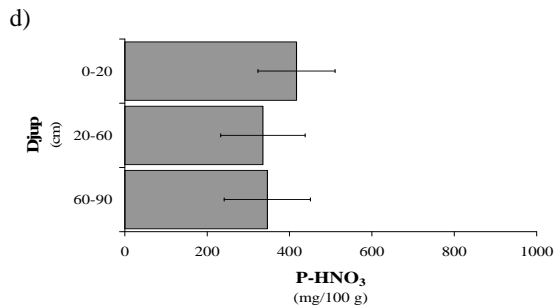
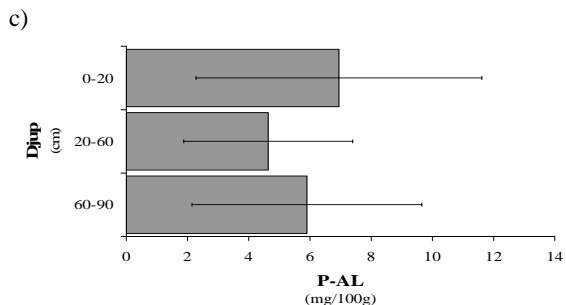
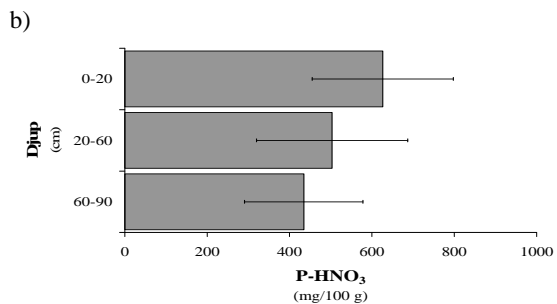
Tabell 5: Kod för observationsfält antal prov (n) och ekvationer beräknade med regressionsanalys för att uppskattning av Olsen-P utifrån uppmätta värden av P-AL för de olika observationsfälten (mg P/100g jord).

Kod	n	Regressions ekvation	R ² _{adj}
1D	15	$Olsen-P = -0,61 + 0,410P-AL$	94,0%
2M	40	$Olsen-P = 6,37 + 0,263P-AL - 0,859pH - 0,000407Ca-AL + 0,252TOC$	91,6%
4O	20	$Olsen-P = 9,70 + 0,462P-AL - 0,0431Al-AL - 1,39pH + 0,657TOC$	84,0%
7E	25	$Olsen-P = 1,19 + 0,431P-AL - 0,00282Ca-AL + 0,0199Fe-AL$	71,2%
20E	10	$Olsen-P = 3,10 + 0,420P-AL - 0,00627Ca-AL$	83,9%

Fosfor i laktatextrakt



Fosfor uppsluten med salpetersyra

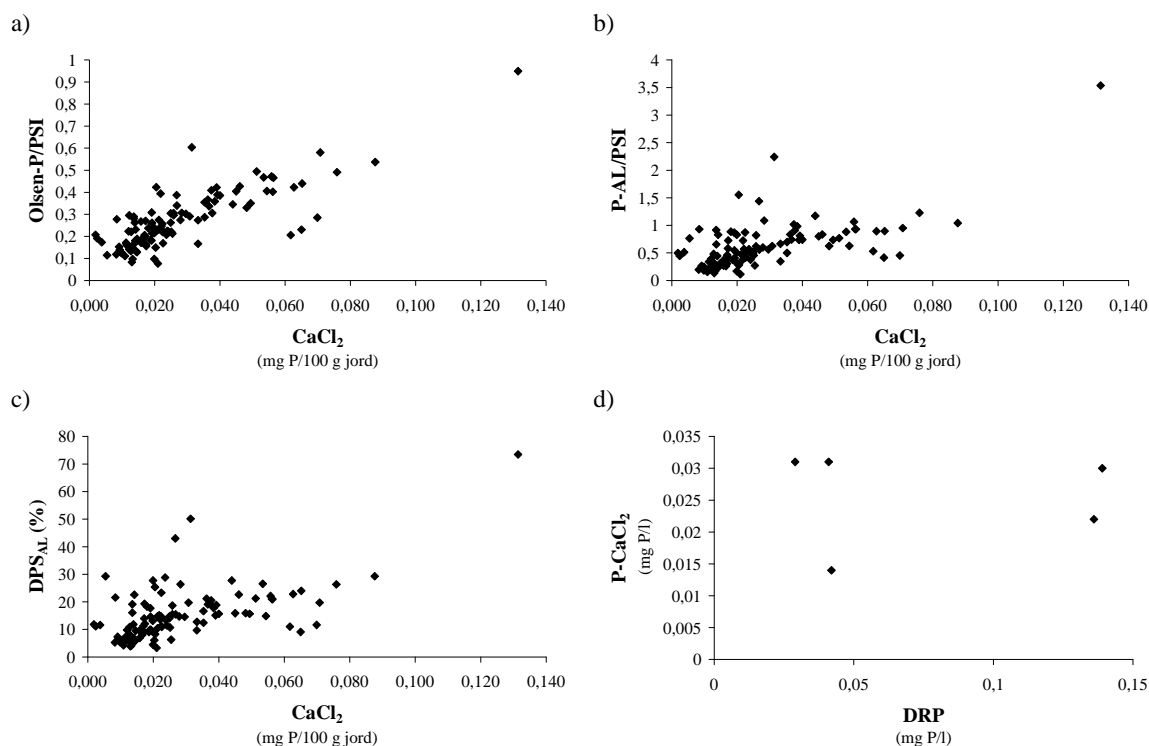


Figur 2: Extraherade mängden fosfor i P-AL extrakt resp. efter HNO₃-uppslutning med djupet i jordprofilen för a-b) fält 1D, c-d) fält 2M, e-f) fält 4O, g-h) fält 7E och i-j) fält 20E.

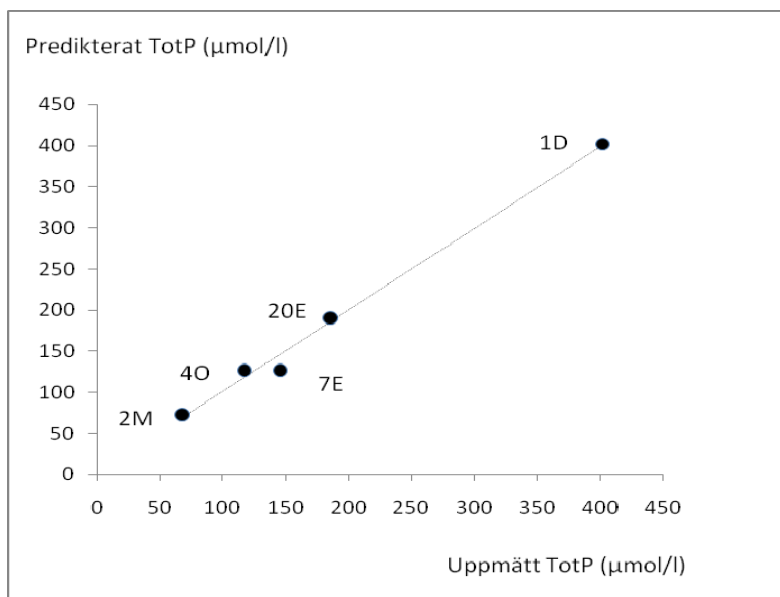
Fosforläckage och fosforindex

Genom att mäta PSI (P sorption index) bestäms jordarnas förmåga att adsorbera P med en förenklad enpunktsmetod (Börling, 2003). Den fosfor som redan finns bunden i jorden påverkar också hur mycket som inte adsorberas utan riskerar att läcka ut. Börling et al. (2001) använde kvoterna Olsen-P/PSI samt P-AL/PSI som index för att indikera fosforläckage som i sin tur antogs predikteras med halten P-CaCl₂ i jorden. Kvoten med Olsen-P gav ett bättre samband än P-AL. I denna undersökning från ett begränsat antal fält, gav också kvoten Olsen-P/PSI ($r=0,81$) ett bättre samband med P-CaCl₂ än kvoten P-AL/PSI ($r=0,64$). Ulén (2006) använde fosformättnadsgraden i extraktet (DPS-AL) för att indikera läckaget från dräneringsrör från en rad jordar. Samband med långtidsmedelvärdet av löst reaktiv fosfor DRP i dräneringsvattnet och ovan nämnda index var dock svaga för de här undersökta lerjordarna. Även sambandet med P-CaCl₂ var svagt (Figur 2d).

Regnvatten har en förmåga att effektivt slamma upp lerkolloiderna på markytan på en låg salthalt (Ulen, 2003, 2004) och regnvattnet kan sedan infiltrera mycket snabbt i en lerjord (Djordjic, 2001). Extraktion med vatten skulle därför kunna ge en bättre bild av fosforläckage med ett saltfattigt regnvatten än med CaCl₂. I den här undersökningen återfanns ett mycket starkt samband mellan långtidsvärdet för totalfosforhalten i dräneringssystemets utlopp från observationsfälten, P-vatten och jordens förmåga att adsorbera fosfor uttryckt som ett inverterat värde av PSI (figur 3). Detta samband skulle dock behöva undersökas för fler områden.



Figur 2: Samband ($r =$ korrelationskoefficienten) mellan P-CaCl₂, som antas ge ett mått på mängden fosfor som frigörs till markvattnet, och olika fosforindex hämtade från Börling m.fl. (2001) a) Olsen-P/PSI ($r=0,81$) b) P-AL/PSI ($r=0,64$) c) DPS_{AL} ($r=0,60$). Figur d) visar sambandet mellan de dem fältens medelvärde av P-CaCl₂ och långtidsmedelvärdet för löst reaktiv fosfor DRP i dräneringsvattnet ($r=0,57$)



Figur 3: Samband mellan långtidsmedelvärdet för uppmätt totalfosfor (TotP) från observationsfälternas dräneringssystem och predikterat värden från det empiriska sambandet $TotP = 303 + 1523 * (P\text{-vatten}) - 979/PSI$. P-vatten och PSI är uttryckta i mmol/kg och regressionskoefficienten (R^2 adj) = 99,3%.

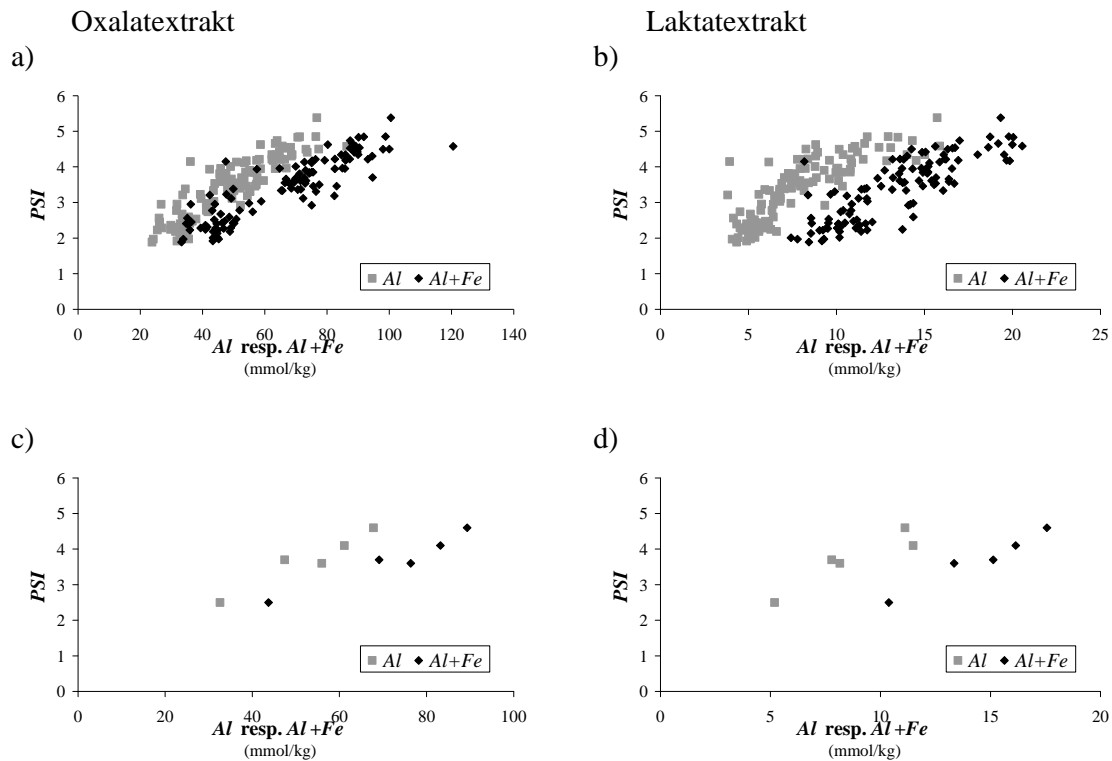
Desorption/adsorption av fosfor

De ämnen som främst anses bidra till P-adsorptionen i jorden är aluminium (Al), järn (Fe) men även andra ämnen som kalcium (Ca), mängden organisk material (TOC) och pH kan påverka. Halterna av dessa ämnen, som de analyserades här, återfinns i bilaga 3 tillsammans med PSI. och är sammanfattade i tabell 6.

För samtliga här undersökta fält utgjorde lättlösligt Al från AL-extraktet 17 % av Al i oxalat-extraktet. Motsvarande andel för Fe var 30%. Den mesta av det amorft bundna aluminiumet och järnet förelåg alltså i en mer svårslöslig form som det behövdes en effektiv komplexbindare för att lösa upp. Mängden av Fe och Al extraherade såväl med laktat som oxalat visade sig överlag vara bra indikatorer på jordarnas förmåga att adsorbera fosfor. För samtliga jordar från de analyserade försöksfälten var Al-ox ensamt bäst korrelera med PSI (figur 4a), men vid jämförelse med medelvärdena för de 5 fälten var såväl (Al+Fe)-ox som (Al+Fe)-AL en god prediktor för PSI (figur 4b).

Tabell 6: Kod för observationsfält, antal prov (n) och medelvärden för uppmätt mängd Al, och Fe i oxalatextrakt, (Fe-ox resp Al-ox) och ammoniumextrakt (Al, Fe och Ca i AL-extraktet) (mg P/100g jord), total kolhalt (TOC), pH samt sorption index (PSI), (mmol/kg) för de olika observationsfälten.

Kod	n	Al-ox	Fe-ox	Al-AL	Fe-AL	Ca-AL	TOC	pH	PSI
1D	15	128	121	21	41	161	1,8	5,7	3,7
2M	40	88	62	14	29	501	1,5	6,9	2,5
4O	20	165	123	31	26	181	1,9	6,6	4,1
7E	25	151	114	22	29	347	2,4	6,5	3,6
20E	10	183	120	30	36	424	2,8	6,9	4,6



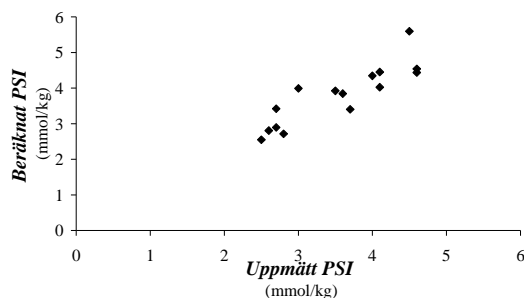
Figur 4: Samband (r = korrelationskoefficienten) mellan PSI och a) Al -ox ($r=0,90$) resp. $(Al+Fe)$ -ox ($r=0,87$) och b) med Al -AL ($r=0,83$) resp. $(Al+Fe)$ -AL ($r=0,71$) för de individuella proverna. Samband mellan PSI och a) Al -ox ($r=0,98$) resp. $(Al+Fe)$ -ox ($r=0,97$) b) Al -AL ($r=0,93$) resp. $(Al+Fe)$ -AL ($r=0,96$) för medelvärden från 5 observationsfält.

Linjär regression för samtliga jordar mellan PSI samt Al och Fe i oxalatextraktet och TOC respektive Al , Fe och Ca i AL- extraktet samt TOC gav följande ekvationer.

$$(1) \quad PSI = 0,735 + 0,0163Al\text{-ox} + 0,143TOC + 0,00266Fe\text{-ox} \quad R^2_{\text{adj}}=81,7 \%$$

$$(2) \quad PSI = 0,235 + 0,0836Al\text{-AL} + 0,402TOC + 0,0173Fe\text{-AL} + 0,000167Ca\text{-AL} \quad R^2_{\text{adj}}=85,8 \%$$

För enstaka fält, speciellt 1D, var det dock svårt att relatera PSI till några markkemiska parametrar över huvud taget (tabell 7). När PSI beräknades enligt ekvation med data från de svenska långliggande bördighetsförsöken analyserade av Börling et. al. (2001) (Bilaga 5) tillsammans med data från denna undersökning och jämfördes med uppmätta värden (figur 5) blev resultatet ett starkt samband med korrelationskoefficienten ($r=0,87$). Det här beräknade sambandet kan därmed sägas vara mera allmängiltigt än bara för observationsfälten.



Figur 5: Sambandet mellan beräknat och uppmätt värde för PSI i de undersökta observationsfälten samt ytterligare 10 fält ($r=0,87$).

Samband mellan PSI och markparametrar för enskilda fält gav dock en splittrad bild. Kalcium verkar ha betydelse för fält 2M och 7E. För fält 2M, som är det fält som har det största inslaget av sand i matjorden, tycks dessutom det organiska materialet bidra till sorptionen av fosfor (Tabell 7). För fält 1D observerades inga signifikanta korrelationer. Ofta ökade PSI med den totala mängden organiskt kol (TOC).

Tabell 7: Kod för observationsfält antal prov (n) och regressionsekvationer för fosforadsorption (PSI; mmol/kg) av organiskt material, (TOC) (%) och pH tillsammans med Al-ox, Fe-ox respektive med Al-AL, Fe-AL och Ca-AL (mg/100g jord) för 5 observationsfält

Kod	n	Regressionsekvation	R^2_{adj}
<i>Al och Fe i oxalatextrakt</i>			
1D	15	$PSI = 3,00 + 0,0055 \text{ Al-ox} - 0,763 \text{ pH}$	22,9%
2M	40	$PSI = 1,66 + 0,0032 \text{ Al-ox} + 0,358 \text{ TOC}$	45,0%
4O	20	$PSI = 3,03 + 0,0222 \text{ Al-ox} - 0,149 \text{ pH}$	79,0%
7E	25	$PSI = 6,61 + 0,0214 \text{ Al-ox} - 0,950 \text{ pH}$	77,1%
20E	10	$PSI = 2,70 + 0,0273 \text{ Al-ox}$	43,9%
<i>Al, Fe och Ca i laktatextrakt</i>			
1D	15	$PSI = 3,05 + 0,0313 \text{ Al-AL}$	9,2%
2M	40	$PSI = 0,471 + 0,0971 \text{ Al-AL} + 0,292 \text{ TOC} + 0,000376 \text{ Ca-AL}$	71,4%
4O	20	$PSI = 1,79 + 0,0509 \text{ Al-AL} + 0,402 \text{ TOC} - 0,910 \text{ pH}$	63,4%
7E	25	$PSI = 0,397 + 0,0827 \text{ Al-AL} + 0,00263 \text{ Ca-AL} + 0,0169 \text{ Fe-AL}$	69,8%
20E	10	$PSI = 3,34 + 0,108 \text{ Al-AL}$	41,4%

Sammanfattning

För fem observationsfält med lerjord ökade fosfor med olika extraktionsmetoder i följande ordning; P-CaCl₂ < P-vatten < Olsen-P < P-AL < P-HCl. Av totalfosfor mätt efter uppslutning med salpetersyra P-HNO₃ var det bara omkring en procent som extraherades med vatten. P-vatten var trots detta den parameter som varierade mest mellan fälten och var också den parameter som var tydligast relaterad till fosforhalten i fältens dräneringssystem.

Den fosforadsorberande förmågan mättes med en förenklad adsorptionsmetod (PSI). Denna var framför allt relaterad till aluminiumhalten extraherad i ammoniumlaktat (AL) eller oxalat. Detta speglar dessa ämnen i löst form resp. totala utfällda amorfa former. Efter subtraktion av uttryck för PSI-värdet förstärkte sambandet mellan P-vatten och fosforhalten i fältets dräneringssystem ännu mer. Ett tydligt empiriskt samband upprättades som dock bara är baserat på fem fält.

Referenser

Börling, K., Otabbong, E. & Barberis, E. (2001) Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **59**, 39-46

Börling, K., Barberis, E. & Otabbong, E. (2004) Impact of long-term inorganic phosphorus fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **69**, 11-21

Djodjic, F. (2001) *Displacement of phosphorus in structured soils*. Agraria 283. SLU. 30 pp.

Djodjic, F & Bergström, L. (2005) *Conditional phosphorus index as an educational tool for risk assessment and phosphorus management*. *Ambio* **34**, 296-305.

Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W. R. (1960) Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. *Kungliga Lantbrukshögskolans annaler* **26**, 199-215.

Helsinki Commission (2009) *Baltic Sea Environment Proceedings No 115A, Eutrophication in the Baltic Sea, An integrated thematic assessment of the effect of nutrient enrichment in the Baltic Sea regions, Executive Summary*, Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, Finland

Hylander, L., Svensson, H-I. & Simán, G. (1996) Different methods for determination of plant available soil phosphorus. *Communication Soil Plant Analysis* **27**, pp. 1501-1512.

ISO (2005) *Soil quality - Determination of pH*. International Organization for Standardization. ISO10390:2005

Jackson, M. L. Lim, C. H. Zelazny, L. W. (1986) Oxides, hydroxides, and aluminosilicates. IN: Klute A (ed) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, Wisconsin, ASA and SSSA, pp 101-150.
pp.101-150

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. (1954) *Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate*. USDA Circular No. 939. 19 pp. Washington, D.C., U.S.

Otabbong, E., Börling, K., Kätker, T. & Mattsson, L. (2009) Compatibility of the ammonium lactate (AL) and sodium bicarbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* **59**, 373 - 378.

SIS (1997) Swedish Standard Determinations of soils - *Determinations of metals in soils by extraction with nitric acids*. Swedish Standard Institution, SS028311.

Schwertmann, U. (1964) Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch photochemische Extraktion mit saurer Ammoniumoxalatelösung. *Zeitschrift für Pflanz und Bodenkunde* **105**, 194-202.

Ulén, B. (2003) Concentration and transport of different forms of phosphorus during snowmelt runoff from an illite clay soil. *Hydrological Processes* **17**, 747-758.

Ulén, B. (2004) Size and settling velocities of phosphorus-containing particles in water from agricultural drains. *Water Air and Soil Pollution* **157**, 331-343.

Van der Paauw, F. (1969) Development and utility of a new technique of water extraction for determining plant-available phosphorus. *Sonderheft Landwirtschaftliche Forschung* **23**, 102-109

Wolf, A.M. & Baker, D.E. 1990. Colorimetric method for phosphorus measurement in ammonium oxalate soil extracts. *Communication Soil Plant Analysis* **21**, pp. 2257-2263.

Bilaga 1

Prov ID		CaCl ₂ -P (mg/ 100g)	Vatten-P (mg/ 100g)	Olsen-P (mg/ 100g)	P-AL (mg/ 100g)	P-HCl (mg/ 100g)	P-HNO ₃ (mg/ 100g)
Fält	Prov						
1D	A3	0,020	0,30	1,2	2,1	25	42
1D	A4	0,021	0,28	0,9	1,4	21	38
1D	B3	0,013	0,26	0,9	1,4	21	28
1D	B4	0,013	0,52	1,8	2,7	29	40
1D	C2	0,025	0,36	2,5	5,1	55	68
1D	C3	0,012	0,44	1,9	2,6	35	53
1D	C4	0,012	0,55	2,6	4,6	41	69
1D	D1	0,016	0,79	3,4	4,7	52	51
1D	D2	0,063	1,15	4,4	9,3	73	72
1D	D3	0,056	1,12	4,9	11,0	64	90
1D	E1	0,056	1,15	4,4	10,2	70	85
1D	E2	0,022	0,94	3,0	7,0	67	73
1D	E3	0,040	1,24	4,2	8,1	57	77
1D	F2	0,056	1,28	5,1	10,1	72	71
1D	F3	0,065	0,70	2,6	4,6	45	71
Fält	Prov						
2M	A1	0,076	0,54	3,3	8,3	30	70
2M	A2	0,070	0,55	2,5	3,9	20	31
2M	A3	0,017	0,26	1,9	4,0	22	35
2M	A4	0,039	0,69	3,0	5,2	23	51
2M	A5	0,035	0,46	2,5	4,9	26	42
2M	B1	0,065	0,42	3,7	7,6	35	54
2M	B2	0,020	0,07	2,2	8,3	28	50
2M	B3	0,014	0,45	2,1	3,5	21	32
2M	B4	0,024	0,05	2,7	7,3	37	47
2M	B5	0,026	0,22	2,0	4,1	27	46
2M	B6	0,046	0,52	2,7	5,2	32	45
2M	B7	0,045	0,58	2,5	5,0	24	43
2M	B8	0,028	0,12	2,2	7,7	24	44
2M	B9	0,131	0,45	8,7	32,3	51	71
2M	C1	0,014	0,08	2,1	7,6	28	46
2M	C2	0,014	0,09	2,1	6,7	27	38
2M	C3	0,005	0,08	1,1	7,6	36	51
2M	C4	0,002	0,16	1,6	3,7	24	29
2M	C5	0,002	0,19	1,5	3,7	22	34
2M	C6	0,008	0,10	2,1	7,0	26	51
2M	C7	0,004	0,08	1,4	4,0	21	35
2M	C8	0,049	0,48	2,1	4,5	27	34
2M	D2	0,031	0,25	3,5	13,1	40	42
2M	D3	0,027	0,15	3,1	11,4	37	48
2M	D4	0,044	0,13	2,6	8,7	33	36
2M	D5	0,022	0,61	2,3	4,3	33	39
2M	D6	0,014	0,56	1,9	4,5	30	30
2M	D7	0,013	0,43	1,7	3,7	25	36
2M	D8	0,062	0,15	1,9	4,9	28	36
2M	E3	0,021	0,20	2,9	10,8	34	35
2M	E4	0,018	0,14	1,8	6,6	33	28

Forts. Bilaga 1

	Prov kod	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
Fält	Prov	(mg/ 100g)	(mg/ 100g)	(mg/ 100g)	(mg/ 100g)	(mg/ 100g)	(mg/ 100g)
2M	E5	0,033	0,64	1,9	4,5	29	35
2M	E6	0,022	0,13	1,9	7,5	36	41
2M	E7	0,017	0,07	1,6	7,0	27	39
2M	E8	0,038	0,68	2,9	7,9	31	45
2M	F3	0,037	1,10	2,8	7,0	34	45
2M	F4	0,019	0,25	2,3	6,6	30	35
2M	F5	0,036	0,27	2,2	5,1	34	38
2M	F6	0,026	0,61	2,1	5,8	33	39
2M	F7	0,038	0,37	2,2	6,5	30	41
Fält	Prov						
4O	A1	0,017	0,12	2,1	3,1	32	47
4O	B1	0,017	0,12	2,5	3,5	29	60
4O	B2	0,016	0,08	2,0	3,2	26	46
4O	B3	0,014	0,09	1,5	2,7	31	47
4O	B4	0,014	0,10	2,0	2,9	22	46
4O	C2	0,021	0,14	3,2	4,0	40	88
4O	C3	0,011	0,09	2,0	2,3	32	43
4O	C4	0,009	0,08	1,8	3,2	28	46
4O	D2	0,013	0,20	1,6	2,5	33	48
4O	D3	0,010	0,08	1,7	2,5	30	46
4O	D4	0,013	0,08	1,7	3,7	25	45
4O	E2	0,012	0,08	1,7	3,0	30	42
4O	E3	0,011	0,07	1,6	2,2	30	49
4O	F2	0,008	0,08	1,5	2,5	32	48
4O	F3	0,010	0,08	1,8	3,5	32	57
4O	G2	0,015	0,14	1,7	3,6	35	55
4O	G3	0,013	0,12	1,3	2,3	29	49
4O	H3	0,011	0,24	2,1	4,4	31	51
4O	L3	0,033	0,17	2,8	5,8	34	49
4O	M3	0,020	0,16	1,9	3,7	27	40
Fält	Prov						
7E	A1	0,078	0,24	4,0	7,8	49	66
7E	A2	0,071	0,31	5,3	8,6	61	60
7E	A3	0,053	0,32	4,6	8,7	46	58
7E	B1	0,054	0,26	4,7	7,2	42	49
7E	B2	0,027	0,20	3,6	6,0	38	56
7E	B3	0,051	0,29	4,8	7,4	47	55
7E	C1	0,022	0,29	2,6	4,5	27	41
7E	C2	0,030	0,11	2,8	5,3	30	38
7E	C3	0,037	0,18	3,7	8,2	36	51
7E	D1	0,017	0,04	2,5	3,7	22	31
7E	D2	0,022	0,22	2,6	5,7	29	40
7E	D3	0,017	0,24	1,8	4,6	30	40
7E	D4	0,039	0,22	4,2	8,7	38	59
7E	D5	0,021	0,17	3,6	6,2	34	57
7E	E1	0,014	0,33	2,4	3,6	26	46
7E	E2	0,025	0,25	3,1	3,9	30	42
7E	E3	0,015	0,18	2,5	3,9	37	48
7E	E4	0,019	0,18	3,2	6,7	33	60
7E	E5	0,025	0,14	3,2	5,2	26	48

Forts. Bilaga 1

Fält	Prov	CaCl₂-P (mg/ 100g)	Vatten-P (mg/ 100g)	Olsen-P (mg/ 100g)	P-AL (mg/ 100g)	P-HCl (mg/ 100g)	P-HNO₃ (mg/ 100g)
7E	F1	0,009	0,18	2,1	3,7	31	56
7E	F2	0,021	0,08	3,2	4,8	28	46
7E	F3	0,024	0,09	2,9	4,9	33	46
7E	G2	0,023	0,12	1,9	4,6	24	40
7E	G3	0,012	0,26	3,1	2,7	22	36
7E	G4	0,048	0,19	2,5	4,7	25	36
Fält	Prov						
20E	A1	0,019	0,18	2,7	5,4	32	63
20E	A2	0,035	0,21	3,7	6,5	35	53
20E	B1	0,024	0,16	2,9	6,7	33	48
20E	B2	0,025	0,15	3,5	7,0	37	55
20E	C1	0,017	0,20	2,8	6,5	30	57
20E	C2	0,019	0,20	2,5	5,1	30	58
20E	D1	0,019	0,21	3,2	6,1	34	44
20E	D2	0,020	0,25	3,6	7,6	30	49
20E	E1	0,028	0,27	4,1	9,0	32	56
20E	E2	0,031	0,23	4,1	8,7	37	62

Bilaga 2

Koefficienter (r) vid korrelation (Pearson) mellan de olika metoderna för att bestämma fosforkoncentration i jorden för varje av de fem observationsfält. Svaga samband anges som streck

1D	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P		0,732	0,727	0,770	0,688	0,708
Vatten-P			0,955	0,934	0,886	0,788
Olsen-P				0,969	0,927	0,849
P-AL					0,937	0,889
P-HCl						0,863
P-HNO ₃						

2M	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P		0,381	0,810	0,619	0,440	0,565
Vatten-P			-	-	-	-
Olsen-P				0,897	0,661	0,656
P-AL					0,765	0,618
P-HCl						0,480
P-HNO ₃						

4O	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P		-	0,503	0,717	-	-
Vatten-P			-	-	-	-
Olsen-P				0,624	-	-
P-AL					-	-
P-HCl						0,702
P-HNO ₃						

7E	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P		-	0,767	0,768	0,794	0,506
Vatten-P			0,430	-	0,467	-
Olsen-P				0,823	0,827	0,666
P-AL					0,796	0,727
P-HCl						0,767
P-HNO ₃						

20E	CaCl ₂ -P	Vatten-P	Olsen-P	P-AL	P-HCl	P-HNO ₃
CaCl ₂ -P		-	0,742	-	0,695	-
Vatten-P			-	-	-	-
Olsen-P				0,891	-	-
P-AL					-	-
P-HCl						-
P-HNO ₃						

Bilaga 3

Fält	Prov	Al-ox	Fe-ox	Al-AL (mg/ 100g jord)	Fe-AL	Ca-AL	TOC (%)	pH	PSI (mmol/kg)
1D	A3	132	117	23,7	35,9	133	1,7	5,6	4,0
1D	A4	124	106	22,2	30,7	103	1,8	5,5	4,0
1D	B3	93	86	19,0	25,4	81	1,5	5,6	3,4
1D	B4	114	85	29,1	24,0	84	1,7	5,5	3,9
1D	C2	125	128	20,1	44,4	197	1,9	5,8	3,6
1D	C3	123	143	20,6	33,1	117	1,7	5,6	3,8
1D	C4	128	150	19,6	44,1	140	1,7	5,8	3,8
1D	D1	137	122	16,6	54,2	221	2,0	6,0	4,1
1D	D2	130	126	16,0	40,4	204	1,9	6,1	3,4
1D	D3	117	124	16,7	55,1	176	1,8	5,8	3,3
1D	E1	132	135	18,6	48,8	191	2,0	5,8	3,5
1D	E2	171	125	21,4	48,2	244	2,2	5,8	4,0
1D	E3	119	134	21,7	48,3	171	1,6	5,8	3,5
1D	F2	155	113	21,5	42,3	205	2,0	5,8	3,5
1D	F3	123	120	23,4	43,1	149	2,0	5,7	3,6
Fält	Prov								
2M	A1	94	78	17,8	20,0	179	1,4	6,6	2,2
2M	A2	85	64	17,1	25,1	282	0,6	6,6	2,8
2M	A3	95	54	15,1	20,3	201	1,3	6,0	2,2
2M	A4	88	65	15,8	29,3	198	1,1	6,3	2,3
2M	A5	92	70	12,7	26,8	213	1,3	6,6	2,3
2M	B1	113	81	12,2	31,9	394	3,1	6,7	2,7
2M	B2	106	47	15,1	22,7	964	1,9	7,4	3,2
2M	B3	102	72	13,9	24,6	209	1,1	6,7	2,5
2M	B4	97	63	10,6	23,7	2250	5,8	7,3	4,2
2M	B5	91	62	13,5	19,8	253	1,5	6,6	2,1
2M	B6	88	59	11,9	16,8	166	1,2	6,7	2,0
2M	B7	89	67	14,5	26,8	211	1,3	6,6	2,0
2M	B8	95	77	13,6	24,5	431	1,5	7,3	2,3
2M	B9	72	53	17,3	43,5	916	1,7	7,3	2,9
2M	C1	86	68	15,5	28,6	537	1,0	7,3	3,0
2M	C2	80	62	14,6	33,0	358	1,3	7,2	2,4
2M	C3	91	48	10,3	25,5	3394	2,3	7,3	3,2
2M	C4	90	69	13,8	31,4	304	1,2	7,0	2,7
2M	C5	89	66	13,2	29,1	314	1,2	6,8	2,4
2M	C6	93	66	14,7	28,1	342	1,4	6,9	2,4
2M	C7	90	58	14,4	32,5	238	1,3	6,9	2,5
2M	C8	96	54	13,8	23,3	211	1,5	6,6	2,0
2M	D2	64	53	11,7	22,9	728	1,1	7,4	1,9
2M	D3	70	51	11,2	24,6	1518	1,4	7,5	2,6
2M	D4	71	51	11,7	32,3	807	1,4	7,5	2,4
2M	D5	86	64	13,2	23,9	176	1,3	6,6	1,9
2M	D6	88	65	12,5	24,6	217	1,4	6,8	2,2
2M	D7	99	58	16,1	27,9	229	1,4	6,7	2,5
2M	D8	111	77	20,0	38,8	317	1,4	6,7	3,0
2M	E3	80	63	16,9	41,8	378	1,3	6,8	2,2
2M	E4	71	48	16,6	30,7	382	1,2	7,1	2,4

Forts. Bilaga 3

Fält	Prov	Al-ox	Fe-ox	Al-AL (mg/ 100g jord)	Fe-AL	Ca-AL	TOC (%)	pH	PSI (mmol/kg)
2M	E5	85	68	15,1	32,4	266	1,2	6,4	2,2
2M	E6	111	59	15,4	26,1	401	1,7	7,3	2,8
2M	E7	107	54	18,4	27,4	573	1,4	7,6	3,1
2M	E8	96	73	17,3	44,4	243	1,2	6,7	2,6
2M	F3	69	58	14,3	36,0	216	0,9	6,9	2,2
2M	F4	71	57	14,4	37,4	266	1,0	7,1	2,5
2M	F5	65	54	11,0	20,7	207	1,3	6,9	2,0
2M	F6	73	69	12,2	30,8	242	1,2	6,7	2,3
2M	F7	84	59	13,1	30,0	294	1,6	6,8	2,3
Fält	Prov								
4O	A1	140	93	20,1	23,8	179	1,9	6,8	3,4
4O	B1	185	145	23,8	29,0	196	2,2	6,7	4,3
4O	B2	153	98	26,9	27,6	185	2,2	6,7	3,8
4O	B3	143	103	27,3	25,5	171	1,8	6,8	3,6
4O	B4	137	88	22,7	29,9	168	2,0	6,7	3,6
4O	C2	233	191	29,8	25,5	243	2,9	6,6	4,6
4O	C3	142	112	23,9	24,3	155	1,8	6,6	3,7
4O	C4	157	101	31,1	26,2	145	1,9	6,6	4,2
4O	D2	158	133	27,0	24,1	163	1,7	6,6	3,9
4O	D3	175	140	30,2	21,6	154	1,7	6,5	4,4
4O	D4	145	119	29,1	24,7	182	1,8	6,6	3,9
4O	E2	148	115	27,8	27,0	207	1,8	6,7	3,8
4O	E3	178	136	35,3	20,4	173	1,8	6,3	4,5
4O	F2	144	121	29,3	24,7	181	1,6	6,6	4,1
4O	F3	177	132	42,8	26,2	181	1,9	6,6	4,6
4O	G2	186	118	40,5	25,2	216	2,2	6,6	4,3
4O	G3	172	125	37,8	22,4	176	2,0	6,5	4,3
4O	H3	146	118	34,7	39,0	192	1,3	6,6	4,2
4O	L3	207	133	42,4	20,2	189	2,2	6,6	5,4
4O	M3	169	130	39,2	28,7	160	1,9	6,5	4,2
Fält	Prov								
7E	A1	97	79	14,4	18,2	216	2,0	6,6	2,4
7E	A2	141	127	25,2	26,5	277	2,1	6,5	2,9
7E	A3	147	156	17,5	22,9	309	2,3	6,6	3,2
7E	B1	155	207	19,0	48,1	316	2,4	6,5	3,7
7E	B2	146	120	21,5	25,5	324	1,9	6,6	3,5
7E	B3	133	128	18,0	25,6	301	2,2	6,6	3,1
7E	C1	149	118	18,3	17,4	269	2,0	6,5	3,3
7E	C2	118	85	18,3	27,8	337	2,1	6,6	3,0
7E	C3	142	94	20,3	35,4	416	2,5	6,6	3,6
7E	D1	149	100	25,1	19,2	272	1,5	6,6	3,9
7E	D2	133	98	25,9	37,9	413	2,5	6,3	3,7
7E	D3	144	92	19,9	27,7	432	2,7	6,5	3,7
7E	D4	153	146	27,9	25,5	371	2,9	6,7	3,5
7E	D5	176	124	22,6	29,2	392	2,4	6,6	4,2
7E	E1	173	131	38,6	15,0	232	2,1	6,5	4,7
7E	E2	158	121	23,8	62,4	355	3,0	6,4	4,6
7E	E3	175	157	21,9	28,3	462	3,5	6,6	4,2
7E	E4	181	101	27,2	26,5	379	2,0	6,7	4,0
7E	E5	148	93	18,3	25,9	357	2,4	6,6	3,4
7E	F1	198	138	27,4	34,4	321	2,0	6,5	4,5

Forts. Bilaga 3

Fält	Prov	Al-ox	Fe-ox	Al-AL (mg/ 100g jord)	Fe-AL	Ca-AL	TOC (%)	pH	PSI (mmol/kg)
7E	F2	199	84	24,1	33,1	534	3,8	6,4	4,4
7E	F3	179	110	21,0	33,7	524	4,1	6,5	4,2
7E	G2	161	76	21,4	31,6	391	2,4	6,5	3,6
7E	G3	135	85	22,0	32,4	250	1,6	6,5	3,3
7E	G4	95	81	15,7	20,8	234	2,3	6,3	2,4
Fält	Prov								
20E	A1	171	138	31,3	42,4	415	2,3	6,9	4,7
20E	A2	155	122	25,9	40,9	369	2,4	6,9	4,2
20E	B1	168	113	29,2	29,8	409	2,8	6,9	4,2
20E	B2	168	124	28,0	31,9	419	2,6	6,9	4,3
20E	C1	184	110	33,5	34,7	468	2,8	7,1	4,6
20E	C2	181	113	29,4	31,8	420	3,0	6,9	4,5
20E	D1	191	109	36,4	36,6	443	3,0	6,9	4,8
20E	D2	192	115	31,7	39,0	433	2,9	7,0	4,8
20E	E1	206	125	34,9	38,3	444	3,0	7,0	4,9
20E	E2	209	127	22,3	33,5	420	2,9	6,8	4,5

Bilaga 4

Kod för observationsfält antal prov (n) och korrelationskoefficienter (Pearson) mellan PSI och uppmätt mängd Al, och Fe i oxalatextrakt, (Fe_{ox} resp. Al_{ox}) och i ammoniumlaktatextrakt (AL-AL, Fe-AL), för de olika observationsfälten. Svaga samband anges som streck

Kod	N	Al-ox	(Al+Fe)-ox	Al-AL	(Al+Fe)-AL
1D	15	-	-	-	-
2M	40	0,871	0,781	0,676	0,769
4O	20	0,814	0,786	0,765	0,673
7E	25	0,708	0,688	0,683	0,723
20E	10	0,408	0,331	-	-

Bilaga 5

Textur, aluminium och järn i oxalatextrakt (Al-ox, Fe-ox), organiskt material (TOC) och fosforsorptionindex (PSI) uppmätt från de långsliggande bördighetsförsöken (Börling, 2001) och från fem observationsfält. I kolumnen längst till höger har PSI beräknats från ett genomsnittligt samband från de fem observationsfälten i denna undersökning (ekvation 1)

Plats	Textur	Al-ox	Fe-ox	TOC	Uppmätt PSI	Beräknat PSI
		(mmol/kg)	(mmol/kg)	(%)	(mmol/kg)	(mmol/kg)
Orup	Moränmo	156	369	1,9	4,6	4,5
Ugglarp	Moränmo	111	251	1,5	2,7	3,4
Ekebo	Moränmo	156	279	2,2	4,0	4,3
Fjädringslöv	Moränlättilera	81	223	1,1	2,6	2,8
Örja	Moränlättilera	78	274	1,1	2,7	2,9
Högåsa	Lerig mo	165	307	1,5	4,1	4,4
Fors	Mjälälättilera	84	173	1,1	2,8	2,7
Bjertorp	Mellanlera	116	380	2	3,5	3,9
Vreta Kloster	Mellanlera/styv lera	154	179	1,9	3,0	4,0
Kungsängen	Mycket styv lera	140	843	2,3	4,5	5,6
Fält iD	Mellanlera/styv lera	128	121	1,8	3,7	3,4
Fält 2M	Sandig lättilera	88	62	1,5	2,5	2,5
Fält 4O	Mellanlera	165	123	1,9	4,1	4,0
Fält 7E	Mellanlera	151	114	2,4	3,6	3,8
Fält 20E	Styv lera	183	120	2,8	4,6	4,4