

Effekter av strukturkalkning på fosforläckaget från lerjordar

Barbro Ulén och Ararso Etana

Mark och Miljö, SLU Box 7014 750 07 Uppsala Epost barbro.ulen@slu.se

Sammanfattning och slutsatser

Två fältförsök med dränerade rutor på lerjordar (25 och 60 % lera) har båda visat statistiskt säkra minskningar av läckaget av fosfor efter strukturkalkning. Aggregatstabilitetstester med jordar tagna från fälten 2 respektive 3 år efter strukturkalkningen visade på säkra förbättringar för jordaggregats stabilitet. Försöksplatserna, som representerade hög (140 mg kg⁻¹) och låg (50 mg kg⁻¹) nivå av extraherbar fosfor med sur ammoniumlaktat (P-AL), uppvisade olika effekter vad gäller läckaget av löst reaktiv fosfor. Denna form av fosfor var endast signifikant mindre jämfört med kontrollen ($p_{r>F} < 0,002$) i fältförsöket med hög fosforstatus i matjorden och relativt hög (17-18%) grad av fosformättnad (DPS-AL) i alven. I laborieförsök med regnsimulering på matjordslysimetrar från Wiad demonstrerades också en signifikant reduktion ($p < 0,05$) i läckaget av löst reaktiv fosfor. Dessa resultat visar att strukturkalkning kan vara den effektivaste åtgärden på lerjordar som både har en hög lerhalt och en hög fosforstatus i jorden.

Det har inte förelegat några tydliga skördeeffekter vid Wiad där skörden överlag har varit liten båda undersökningsåren och denna aspekt diskuteras därför inte i rapporten.

BAKGRUND

Fosforläckage från lerjordar är ett av huvudproblemen för vattenkvaliteten i Sverige (Ulén m fl al., 2007). Strukturkalkning rekommenderas som en åtgärd för att förbättra lerjordarnas struktur och därmed minska fosforläckaget (Jordbruksverket, 2013). Strukturkalk finns antingen i form av aktiv bränd kalk (kalciumoxid, CaO), eller hydratiserad som släckt kalk (Ca(OH)₂). När dessa kalkformer blandas med jorden inträffar flera olika reaktioner på aggregatnivå. En omedelbar förbättring av jordens stabilitet, porositet och aggregatstyrka har rapporterats (Choquette m fl., 1987). Dessa reaktioner inbegriper katjonbyte, flockulering (dvs. utflockning av partiklar som är bundna med så liten energi att de lätt kan separeras igen), och agglomeration (dvs. de kolloidala partiklarna klumpar ihop sig) tillsammans med en långsammare cementerande s.k. pozzolanreaktion (Kavak & Baykal, 2012). Dessutom borde det kunna ske en mera direkt kemisk bindning mellan kalciumjoner (Ca²⁺) och orthofosfater till fällningar eller kalciumkomplex om fosforkoncentrationen i markvattnet är hög.

Det finns bara två kontrollerade fältförsök där effekten av strukturkalkning på fosforläckaget från svenska lerjordar har studerats. Effekten av återfyllnad med aska från snäckskal från Estland i samband med dränering av lerjord studeras för närvarande i Litauen (Šaulys, & Bastienė, 2007) men detta är enligt vad vi vet det enda pågående långvariga försöket där man studerar dräneringsvatten. Avsikten med den här studien är att kombinera och diskutera erfarenheterna från de två svenska läckageförsöken i Sverige och att göra det i kombination med laborieförsök.

Tabell 1. Fältförsökens upplägg inklusive antalet år som övervakats före och efter strukturkalkningen. Varje led är representerat av 4 dränerade rutor

	Wiad ^a	Bornsjön ^b
Rutstorlek (m)	55x60	24x20
Avstånd mellan ledningar (m)	14	8
Aktiv form av strukturkalk	Ca(OH) ₂	CaO
Tid för applicering	13 september 2011	26 september 2007
Giva motsvarande CaO (t ha ⁻¹)	2	5
Kontrollerad utan kalk	Ingen kalk, ingen P gödsel	Ingen kalk, ingen P gödsel
För-period	Ingen kalk men P gödsel	-
Övervakning före kalkning	3 år (2006/2009)	1 år (2006/2007)
Övervakning efter kalkning	2 år (2011/2013)	6 år (2007/2013)

^a Försöksplatsen beskriven av Gustafson och Torstensson (1988)

^b Försöksplatsen och resultat beskriven av Svanbäck m fl. (2014)

MATERIAL OCH METODER

Fältförsök med dränerade rutor

Två fältförsök med dränerade rutor har använts (Tabell 1) som båda ligger i östra Sverige 20-30 km söder om Stockholm. Försöksplatsen Wiad ligger dock i själva kustområdet av Östersjön. Matjordens lerinnehåll är 22-29% vilket är betydligt lägre än i försöket vid Bornsjön (57-61% ler). I motsats är den extraerbara fosfor (enligt Egnér m. fl.) i matjorden mer än tre gånger högre (11-17 mg P-AL 100 g jord⁻¹) vid Wiad i jämförelse med Bornsjöjorden (3,0-4,3 mg P-AL 100 jord⁻¹). Beroende på detta, och på ett högt innehåll av aluminium i Bornsjöjorden är graden av fosformättnad (DPS-AL) enligt Ulén (2006) mycket låg på denna plats men däremot relativt hög vid Wiad (Tabell 2). I båda fältförsöken var jorden förbättrad med strukturkalk; vid Wiad i form av en kommersiellt tillgängliga produkt med aktiv kalk i hydratiserad form (Ca(OH)₂); vid Bornsjön i form av bränd kalk (CaO). Applicerad mängd omräknad till aktiv CaO var 2 t ha⁻¹ vid Wiad och 5 t ha⁻¹ vid Bornsjön. På båda platserna strukturkalkade man under torra förhållanden under september (år 2007 resp. 2011) och strukturkalken bearbetades omedelbart och omsorgsfullt ner i matjorden i flera riktningar med en bra kultivator. Växtföljden efter strukturkalkningen var vårkorn och havre (Wiad) och vårkorn, vårkorn, havre, ärt och vårkorn (Bornsjön). Under perioden innan kalkningen odlades vall som plöjdes ner följt av höstvetete vid Wiad.

Vid Wiad mättes vattenflödet med vippkärl och vattnet samlades manuellt varje vecka när det var avrinning under de två agrohydrologiska åren 2011/2013 (1:a juli - 30 juni). Vattenproven skickades omedelbart till Vattenlaboratoriet vid Institutionen för Mark och Miljö, SLU. Vid Bornsjön gjordes vattenprovtagningen flödesproportionellt under 6 agrohydrologiska år. Ett samlingsprov från varje ruta lagrades maximum en vecka i en mätbunker (10-15°C) innan de skickades till laboratoriet.

Läckageförsök med matjord (0-20 cm)

Från vardera av de 8 försöksrutorna på Wiad togs en ostörd jordkolonn, 20 cm i diameter och 20 cm hög genom att trycka ner plaströr med en skarptandad järnkant i matjorden. Provtagningen gjordes 17 oktober 2013, drygt två år efter strukturkalkningen. Jordkolonnerna togs upp med hjälp av traktor vid fuktig väderlek för att proverna skulle vara så ostörda som möjligt och lagrades i kyla (+4°C) innan regnsimuleringen började 3 månader efter provtagningen. Botten på jordproverna preparerades och en specialjord botten passades in

Tabell 2. Medelvärde av kornstorlek, organisk substans, fosfor extraherad i sur ammoniumlaktat (P-AL), aluminium, Al-AL, järn (Fe-AL) samt graden av fosformättnad i samma extrakt (DPS-AL) för försöksrutorna vid Wiad och Bornsjön

Nivå	Wiad			Bornsjön		
	0-23	23-60	60-90	0-23	23-60	60-90
Lera (%)	26	37	53	59	61	61
Mjäla (%)	43	39	36	40	38	39
Sand (%)	32	24	12	1	1	0
Organisk substans (%)	2,0	1,2	0	3,9	1,1	0
P-AL (mg 100 mg jord ⁻¹)	14,3	9,2	9,3	4,9	2,4	1,6
AL-AL (mmol kg jord ⁻¹)	6	9	9	16	13	14
Fe-AL (mmol kg jord ⁻¹)	6	8	8	6,1	5,3	7,5
DPS-AL (mol-baserat %)	36	17	18	7	4	2

till varje lysimeter. Regnsimuleringen skedde med en utrustning som beskrivits av Liu m. fl. (2012) med konstgjort regn med en intensitet av 32 mm tim⁻¹. Efter 2 eller 2,5 timmars läckage samlades en vattenvolym upp som motsvarade 50 - 64 mm avrinning. Denna procedur upprepades 3 gånger med en dags uppehåll däremellan med skyddande lock. Totalt dränerad mängd (minimum 160 mm) var nästan två gånger den teoretiska porvolymen. Tolv matjordslysimetrar av samma storlek togs ut från ogödslad träda mellan försöksrutorna med hjälp av en hydraulisk kolv på en traktor och under fuktiga markförhållanden. I laboratoriet tillsattes samma mängd strukturkalk till 4 plus 4 lysimeterar och i samma mängd som i fältförsöken, antingen i form av ren hydratiserad kalk eller som ren bränd kalk och med en teoretisk dos av 5 t ha⁻¹ som CaO. Dessa tillsatser blandades med jorden vilken återställdes till en bättre struktur efter denna störning genom upprepad försiktig uppblötning följt av torkning under 6 månader. Konstgjort regn simulerades med hjälp av en äldre regnkammare med en regnintensitet på 8–10 mm tim⁻¹ och ett avstånd till jordytan på 1,5 m Svanbäck m.fl. (2013). Tre artificiella regntillfällen (som varade 3 timmar) simulerades och med 1-2 dagars upptorkning emellan bevattningarna. En total volym (77-90 mm) fick läcka igenom som motsvarade jordens teoretiska porvolym.

Test av markens aggregatstabilitet

Två år efter strukturkalkningen (oktober 2013), togs lös matjord (0-20 cm) från vardera av de 8 rutorna vid Wiad. Jordproven transporterades försiktigt till laboratoriet. Jordaggregat (8-11 mm) som tillsammans vägde 120 g vid fältfuktighet preparerades både från strukturkalkade och obehandlade rutor. Varje sådant prov (totalt 16 st) sattes i en plastcylinder (100 mm hög, 102 mm i diameter och med ett nät av storleken 0.6 mm i botten) och doppades manuellt 3 ggr i en bägare med 300 ml syntetiskt regnvatten. Lösningen överfördes sedan till en 250 ml plastflaska som blandades med en långsam oscillerande rörelse (90 omblandningar min⁻¹) under 10 minuter. Innehållet av de fina dispergerade aggregaten och lerpartiklarna i lösningen bestämdes omedelbart med turbidimeter (2100N Hach-Lange company, Düsseldorf, Germany) (Cryz m fl., 2002). Partiklar och fina aggregat fick sedan sedimentera under 4,5 timmar (Sheldrick & Wang, 1933) och innehållet av dispergerat ler som fortfarande var i suspension bestämdes. Lösningen analyserades också på partikulär fosfor (PP) och löst reaktiv fosfor (DRP). Vid Bornsjöförsöket samlades aggregat av samma storlek den 27 augusti 2010 och upplöst ler mättes efter motsvarande förbehandling och våtsiktning och efter sedimentation.

Tabell 3. Försöksuppläggning för laboratorieförsöken med regnsimulering. Varje behandling representerades av 4 upprepningar med jordkolonner

	Wiad	Bornsjön
Lysimeterprovtagning år	2013 ^a	2010 ^b
Tillsats	Ca(OH) ₂	CaO och Ca(OH) ₂
Belastning uttryckt som CaO (t ha ⁻¹)	2	5
Tillsats + inkorporering i matjorden	Innan på fältet	Till lysimetrar i laboratiet

^a Två år efter applicering i fält

^b Ogödslad träda

Vattenanalyser

I allt dräneringsvatten mättes pH följande dag, löst reaktiv fosfor (DRP) inom två dagar och totalfosfor (TotP), och totalkväve (TotN) inom 4 dagar efter lagring vid +4°C. Totalfosfor analyserades som molybdatreaktiv fosfor efter sur oxidation med K₂S₂O₈ (ECS, 1996). Löst reaktiv fosfor (DRP) analyserades efter en förbehandling som bestod av filtrering med filter med en pordiameter på 0,2 µm (Schleicher & Schüll GmbH, Dassel, Germany). Partikulär fosfor (PP) bestämdes som skillnaden mellan TotP före och efter filtrering av vattnet med samma filter. Totalkväve (TotN) analyserades med kol-kväve (CN) analysator (Shimadzu, GmbH, Duisburg, Germany).

Statistik

Variationskoefficienten (CV) användes för att illustrera skillnader i avrinning och läckage mellan rutor. För att analysera skillnader mellan olika behandlingar i fältförsöken utnyttjades årliga förluster mellan de olika behandlingarna (2 år för Wiad och 6 år för Bornsjön). Från Wiad utnyttjades även den treåriga förperioden. En allmän blandmodell användes (SAS mjukvara Version 9.2). Genom att använda beräknade korrelationer över tiden och en modellering med rumslig kovariansstruktur (Littell m. fl., 2006) tog vi hänsyn till att data var i form av tidsserier. Vi testade växelverkan mellan olika led och avrinning. Alla variabler transformerades logaritmiskt före analysen för att stabilisera variansen (som ökade med ökat värde på transportförlusterna). Faktorer för den rumsliga variationen användes som kovariat vid Bornsjöexperimentet som hade ett distinkt rumsligt mönster (Svanbäck m.fl., 2014). Turkeys test användes och signifikansnivå sattes till $\alpha=0.05$ vilket inkluderade p värdet med F statistik för en given effekt ($p_r > F$). Jämförelser mellan lysimetrar från samma plats, som alla fick regnsimulering i samma runda, beräknades med enkel två-test-statistik, på samma sätt som de jämförande aggregatstudierna.

Resultat

Fältförsök

Vid Wiad var avrinningen liten (i snitt 140 mm år⁻¹) men variationen i avrinning mellan olika rutor var ändå något större med koefficient (CV) på 30% jämfört med 25% vid Bornsjön. Det senare försöket har tätt mellan dräneringsledningarna (8 m) och uppvisar en hög avrinning (medel 500 mm år⁻¹). Förutom skillnader i dräneringssystemen är huvudanledningen för det låga läckaget vid Wiad antagligen försöksrutornas läge längs strandbanken av en bäck som gör att en del dränerande vatten kan passera ledningarna. Totalfosforläckaget från Wiad var därför måttligt (medel 0,2 kg ha⁻¹ år⁻¹) och betydligt högre från Bornsjö experimentrutor (medel 0,9 kg ha⁻¹ år⁻¹). Läckage av löst reaktiv fosfor (DRP) var i genomsnitt 55% av läckaget av TotP med ett medelvärde på 0,11 kg ha⁻¹ år⁻¹ och en CV på 70% från Wiad. Läckaget av PP (medelvärde 0,10 kg ha⁻¹ år⁻¹) uppvisade en liknande stor

Tabell 4. Medelvärden för markkaraktäristiska parametrar, avrinning, pH och läckageförluster av totalfosfor (TotP), partikelbunden P (PP) och löst reaktiv P (DRP) efter regnsimulering i laboratoriet

Behandling	Wiad fältlysimetrar		Bornsjö lab.-test med lysimetrar ^a		
	Ca(OH) ₂	Kontroll	CaO	Ca(OH) ₂	Kontroll
<i>Parametrar jord</i>					
pH i jord	7,5	6,5	9,5	8,8	5,9
P-AL (mg 100 jord ⁻¹)	12	14	3,8	4,1	4,4
AL-AL (mmol kg jord ⁻¹)	7	6	16	17	15
Fe-AL (mmol kg jord ⁻¹)	6	7	6,6	6,8	4,8
DPS-AL (molbased %)	30	37	6	9	5
<i>Läckage lysimetera</i>					
Avrinning (mm)	175	179	68	68	66
pH i vatten	7,3	7,0	8,5	8,4	7,1
TotP (kg ha ⁻¹)	0,11**	0,13	0,03**	0,04**	0,15
PartP (kg ha ⁻¹)	0,03	0,03	0,02**	0,03**	0,13
DRP (kg ha ⁻¹)	0,08**	0,10	0,01 ^a	0,01 ^a	0,02
DRP/PP (%)	75	80	25	25	10

**statistisk säkert mindre läckage jämfört med obehandlad med strukturkalk ($p < 0.05$)

^aFör mer detaljer se Ulén m. fl. 2012

^b Uppskattade värden eftersom högt pH stör analysen av of DRP

variens (CV 75%). I motsats till detta var läckaget av DRP relativt lågt (medelvärde 0,15 kg ha⁻¹ år⁻¹) och med en låg CV (20%) mellan rutorna vid Bornsjön (Svanbäck m fl., 2014). Vid Bornsjön, med betydligt lägre fosfortal i försöket i matjorden (P-AL) var proportion DRP till TotP i dräneringsvattnet 21% jämfört med 55% i Wiad.

Vid Wiad var det ingen skillnad i pH i matjorden mellan strukturkalkade och icke-strukturkalkade rutor ett halvår efter behandlingen (data visas inte) på samma sätt som två år efter kalkningen, uppmätt i jordkolonnerna (Tabell 4). På liknande sätt var pH i dräneringsvattnet stabilt och utan signifikanta skillnader mellan strukturkalkade rutor och med icke-kalkade rutor (Tabell 5). Läckaget av TotP och DRP från Wiad var statistisk säkert lägre ($p_r > F < 0,002$) från rutor med strukturkalkning jämfört med kontrollrutorna under de två undersökningsåren (Tabell 5). Det partikelbundna fosforläckaget var däremot inte statistiskt lägre efter kalkningen om man tar i beräkning den rumsliga variationen de tre förberedande åren med läckagemätningar. Under denna förperiod var fosforläckaget lika som i kontrollrutorna under experimentåren 2011-2013. Kväveläckaget var lägre under förperioden när man odlade mycket vall men högre (12-14 kg N ha⁻¹ år⁻¹) under experimentperioden med enbart fodersäd. Kväveläckaget är av den storleken som är vanlig på svenska östkusten (se t.ex. Kyllmar, m.fl., 2006).

De totala läckageförlusterna från Bornsjön var (statistiskt säkert) lägre ($p_r > F < 0,002$) från de strukturkalkade rutorna gödslade på våren än från de icke-kalkade, icke-gödslade försöksrutorna under de 6 åren som undersökningen varade. I motsats uppvisade den ogödslade trädan inget mindre läckage (Tabell 5). Till skillnad från resultaten från Wiad var reduktionen i fosforläckage efter kalkning bara signifikant lägre för fosfor i partikelform vid Bornsjöförsöket. I motsats till detta uppvisade försöksrutorna lägre halter i form av DRP vid Wiad (Tabell 5). På denna plats, med en hög P-AL koncentration i marken återfanns en hög proportion DRP i förhållande till TotP i vattnet (50%) oberoende av behandling.

Tabell 5. Årlig medelavrinning, pH i dräneringsvatten och läckageförluster av totalfosfor (TotP) partikulär fosfor (PP) löst reaktiv P (DRP). Kvoten DRP/TotP, totalkväve (TotN) och kvoten N/P från försöksrutor som strukturkalkats (och plöjts följande år) och konventionella rutor med plöjning utan fosforgödsling (Kontroll) och ogödslad träda

Period Försöksled	Wiad		2007/2009		Bornsjön ^b		
	2011/2013 Ca(OH) ₂	Kontroll	Förperiod ^a		2007/2013 CaO	Kontroll	Träda
Avrinning (mm år ⁻¹)	137	142	141	140	505	546	460
pH i vatten	7,1	7,0	-	-	7,1	6,8	7,1
TotP (kg ha ⁻¹ år ⁻¹)	0,13**	0,30	0,29	0,29	0,59**	0,97	0,77
PP (kg ha ⁻¹ år ⁻¹)	0,07	0,14	0,18	0,14	0,46**	0,82	0,60
DRP (kg ha ⁻¹ år ⁻¹)	0,08**	0,15	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17
DRP/TotP (%)	50	50	50	40	20	15	20
TotN (kg ha ⁻¹ år ⁻¹)	14	12	4	5	30	29	6**
Kvot N/P	113	41	15	19	59	42	9

**Statistiskt säkert lägre läckage jämfört med kontrollen (p,>F < 0,002)

^a vall och öppen odling

^b För mer detaljer se Svanbäck m.fl. 2014

Regnsimulering i laboratoriet

Matjordens värde för P-AL och värdet för DPS-AL från de strukturkalkade och icke-strukturkalkade rutorna vid Wiad (Tabell 4) var utan signifikanta skillnader. Experimentell regnsimulering till dessa lysimetrar visade på ett signifikant minskat läckage för TotP. På samma sätt som för fältstudierna (Tabell 5) visade lysimetrar från Wiad också en statistiskt säker minskning i läckaget av DRP. Samtidigt minskade inte läckaget av PP statistiskt säkert vilket det inte heller skedde i fältförsöken. För matjorden från Bornsjöfältet var det ingen skillnaderna i matjordens fosfortal (P-AL) och fosformättnadsgrad (DPS-AL) när strukturkalken hade tillförts som ett laboratorietest (Tabell 4). Dessa försök med regnsimulering visade på en statistisk reduktion i läckage av PP på ett liknande sätt som i fältförsöken. Koncentrationen av DRP beräknades i detta fall bara som en skillnad eftersom analysen stördes av ett högt pH. Det uppmättes här bara små mängder DRP före kalkning och den var endast marginellt (0,01-0,02 kg ha⁻¹) lägre än från lysimetrar med strukturkalk.

Studier av aggregatstabilitet

Aggregat av storleken 8-11 mm från strukturkalkade försöksrutor vid Wiad uppvisade en statistiskt säker bättre förmåga mot att lösas upp i vatten jämfört med aggregat från rutor utan strukturkalkning. Detta var tydligt både före och efter att man tillät lerpartiklarna att sedimentera (Figur 1a). Jordaggregaten från Bornsjöexperimentet indikerade på samma sätt ett motstånd mot upplösning av vatten efter strukturkalkning (Figur 1b). Efter sedimentering av upplösta lerkolloider från Wiad innehöll det ovanstående vattnet signifikant lägre koncentrationer av både PP och DRP med strukturkalkning liksom lägre turbiditet (Tabell 6).

Diskussion

Två platser representerade en jord med måttlig (Wiad) och mycket hög (Bornsjön) lerhalt men bara jorden från Bornsjön visade på en riktigt tydlig effekt vad gäller läckaget av partikelbunden fosfor (PP) med eller utan strukturkalkning. Dessutom representerade jorden med hög (Wiad) och lågt (Bornsjön) fosfortal P-AL olika effekter på DRP läckage efter strukturkalkning. Bara denna lösta form av P var signifikant lägre jämfört med kontrollen i

Tabell 6. Medelkoncentrationer av turbiditet, totalfosfor (TotP), partikulär P (PP) och löst reaktiv fosfor (DRP) med en standardspridning (SD) efter sedimentering av lösta partiklar från aggergat av storleksordningen 8-11 mm från Wiad

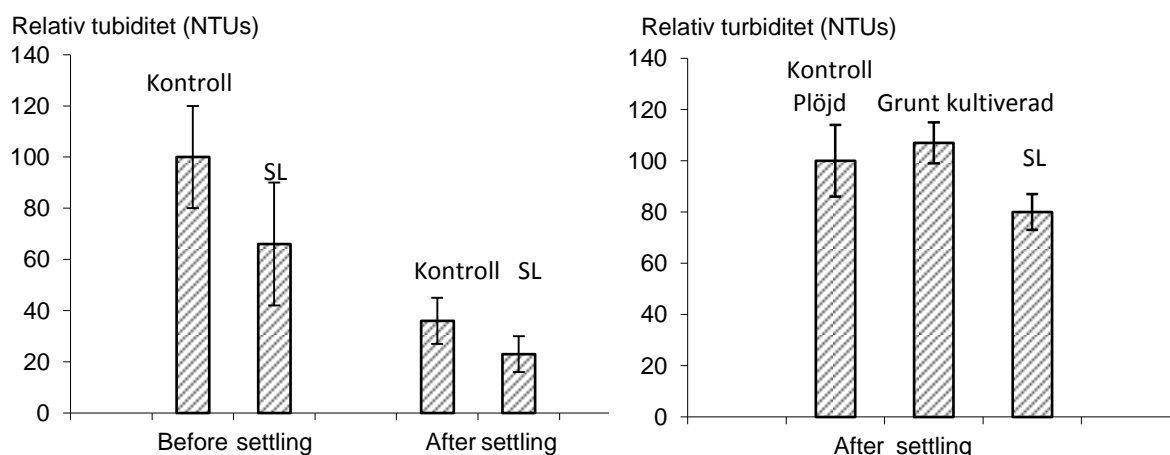
Försöksled	Turbitet (NTU)		TotP (mg L ⁻¹)		PP (mg L ⁻¹)		DRP (mg L ⁻¹)	
	Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD
Strukturkalk	780**	120	0,24**	0,11	0,18**	0,10	0,05**	0,01
Kontroll	1300	260	0,60	0,07	0,48	0,05	0,10	0,02

** Signifikant lägre koncentrationer från kalkade rutor ($p < 0,05$) jämfört med icke-strukturkalkad jord

fältförsöket med hög fosforstatus i matjorden och relativt hög (17-18%) grad av fosformättnad (DPS-AL) i hela alven ner till dräneringsdjup. En förklaring skulle kunna vara bildning av komplex av kalciumfosfat eller kalciumfällningar i jorden vid Wiad med en förmodad hög koncentration av DRP i mark-vatten lösning. Sådana typer av reaktioner har indikerats att ske i lerjordar med en historia med mycket tillförsel av svingödsel (Ulén & Snäll, 2007).

Lysimeterstudier med regnsimuleringar i laboratoriet bör tolkas med försiktighet. De kan betraktas som en förlängd vattenextraktion som löser upp stora mängder av DRP i den vattenmättade jorden. I likhet med alla lysimeterförsök tvingas också vattnet att flöda ner mera rakt ner än vad som brukar ske i fält där man också kan ha mera horisontella vattenflöden och transporter av fosfor. Lateral transportvägar skärs av i lysimetrarna. Matjordsstudier kan också ge mindre realistiska resultat på grund av alvens kritiska roll (se t.ex Sinaj m. fl., 2002). Från Wiad borde det också kunna läcka DRP från alven som har en relativt hög fosformättnad (DPS-AL 18%; Tabell 2). Emellertid, är andelen DRP till TotP i läckagevattnet från lysimetrarna från Wiad hög (75-80%) och reduktionen av DRP var statistiskt säker, på liknande sätt som i dräneringsvattnet från försöksrutorna.

Kalken tycks ha jämviktat sig med leran i fältförsöket eftersom det inte var några större skillnader vare sig i jordens eller i vattnets pH mellan strukturkalkade och icke-strukturkalkade rutor. Efter strukturkalkningen behövdes det synligen lång tid innan kalk-



Figur 1 Relativ turbiditet före och efter sedimentering (before and after settling) av dispergerade jordpartiklar som preparerats från a) Wiad oktober 2011 och b) Bornsjön (enbart efter sedimentering) oktober 2010. Kontrollen (100) är jämförelse av turbiditet från jordprov från icke-strukturkalkade rutor med strukturkalkade rutor (SL). Vid Wiad var kontrollrutorna konventionellt plöjda och vid Bornsjön antingen konventionellt plöjda eller bara grunt bearbetade med kultivator. Figur 1b är baserad på Ulén m.fl., 2012.

partiklarna hade blandat sig riktigt ordentligt med jorden. Den utjämning som skedde underlättades säkerligen av den vanliga plöjningen, harvningen och odlingen som utfördes. Det senare pekar också på att markorganismerna och växtrötterna kan stabilisera jordaggregat (Oades, 1993). De sedimenterande lerpartiklarna i aggregatet verkar innehålla mer fosfor än kolloiderna i suspensionen eftersom fosforkoncentrationerna i vattnet (Tabell 6) minskade mer (-60%) än turbiditetsvärdet (-40%). Sedimenterande material skulle kunna inkludera biofilmer, rotexudat, organiska makromolekyler och andra spår av biologiskt 'klistor' som på motsvarande sätt kan finnas i sedimenterande material i vattendrag (se t ex Droppo, 2000; Williams m fl., 2008). Det finns ett stort behov av att jämföra fält- och laboratorieförsök för en bättre mekanistisk förståelse av bildning och upplösning av jordaggregat.

Mot bakgrund av de generellt höga förlusterna av partikelbunden fosfor från Bornsjöexperimentet kan slutsatsen dras att ansträngningar för att minska eutrofieringen av den närliggande Östersjön borde koncentras till att förbättra jordstrukturen medan det är ineffektivt med extensiv plöjning och ingen fosforgödning alls till denna sprickbildande jord med låg fosforstatus (Svanbäck m fl., 2014). Studierna vid Wiad visar betydelse av att samtidigt minska risken för fosfor i löst reaktiv form genom att prioritera platser med hög fosforstatus. Det behövs emellertid mer fältstudier för att klargöra hur effekten av strukturkalkning beror på lerhalten i kombination med markens innehåll av tillgänglig fosfor. Sådana studier borde också vara långsiktiga eftersom det tar tid med en mera fullständiga inblandningen av kalken liksom aggregatbildningen orsakad av biologiska aktiviteter.

Referenser

- Choquette, M., Bérube, M-A. & Locat, J. (1987). Minerological and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science*, 2, 215-232.
- Cryz, E.A., Dexter, A.R. & Terelak, H. (2002). Content of readily-dispersible clay in the arable layer of some Polish soils. In Pagliai, M., & Jones, R. (eds) *Sustainable land management – environmental protection. Advances in geocology*. Catena verlag, Germany, 115-124.
- Droppo, I. (2001). Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrological Processes*, 15, 1551-1564.
- ECS. (1996). Water quality. Determination of phosphorus. Ammonium-molybdate spectrometric method. *European Standard EN 1189*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 18 pp
- Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W.R. (1960). Investigations on chemical soil analysis as the basis for estimating soil fertility. II. Chemical extraction methods for phosphorus and potassium determination. *Kungliga Lantbrukshögskolan. Annaler*, 26, 199-215.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. (1988). Läckage efter plöjning av vall. *Ekohydrology*, Avdelningen för Vattenvårdslära, SLU, 29-41.
- HELCOM, (2013). Baltic Sea Environment Proceedings No. 141, *Review of the Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation for the 013 HELCOM Ministerial Meeting Helsinki Commission*. Baltic Marine Environment Protection Commission Helsinki Commission, Katajanokanlaituri 6 BFI-00160 Helsinki, Finland <http://www.helcom.fi>
- Kavak. A. & Baykal. G. (2012). Long-term behaviour of lime-stabilized kaolinite clay. *Environment Earth Sciences*, 66, 1943-1955.
- Kyllmar, K., Carlsson, C., Gustafson, A., Ulén, B. & Johnsson, H. (2006). Nutrient discharge from small agricultural catchments in Sweden – Characterisation and trends. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 115, 15-26. B.

- Littell, R., Milliken, G., Stroup, W., Wolfinger, R. & Schabenberger, O. (2006). *SAS for Mixed Models*. 2nd ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Liu J., Aronsson H., Ulén B. & Bergström, L. (2012). Potential phosphorus leaching from sandy topsoils with different fertilizer histories before and after application of pig slurry. *Soil Use and Management*, 28, 457-467.
- Oades, J. M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56, 377-400.
- Šaulys, V. & Bastienė, N. (2007). The impact of lime on water quality when draining clay soils. *Ekologija*, 54, 22-28.
- SBA. (2013). Swedish Board of Agricultural *Guidelines for fertilization and liming 2014*. Jordbruksverket 551 82 Jönköping Report Jo 13:11, 2013-11-18 90 pp. (In Swedish).
- Sheldrick, B. H. & Wang, G. (1993). Particle size distribution. In Varter, M.R. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 499–511.
- Sinaj, S., Stamm, C., Toor, S., Condrón, L. M., Henry, T, Di H. J., Camerón K. C. & Frossard, E. (2002). Phosphorus exchangeability and leaching losses from two grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 31, 319-330.
- Svanbäck, A., Ulén, B., Etana, A., Bergström, L., Kleinman, P. J. A. & Mattsson, L. (2013). Influence of soil phosphorus and manure on phosphorus leaching in Swedish topsoils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 96, 133-137.
- Svanbäck, A., Ulén, B., & Etana, A. (2014). Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface rains from a cracking marine soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, 124-134.
- Ulén, B. (2006). A simplified risk assessment for losses of dissolved reactive phosphorus through drainage pipes from agriculture soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil & Plant Science*, 56, 307-314.
- Ulén, B. & Snäll, S. (2007). Forms and retention of phosphorus in an illite clay soil profile with a history of fertilization with pig manure and mineral fertilisers. *Geoderma*, 137, 455-465.
- Ulén, B., Bechmann, N., Fölster, J., Jarvie, H. & Tunney, H. (2007). Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review. *Soil Use and Management* 23, Suppl. 1, 5-18.
- Ulén, B., Alex G., Kreuger J., Svanbäck A. & Etana A. (2012). Particle-facilitated leaching of glyphosate and phosphorus from a marine clay soil via tile drains. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 62 Suppl. 2, 241-51.
- Ulén B., Etana A. & Lindström B. (2012). Effects of aluminum water treatment residuals, used as a soil amendment to control phosphorus mobility in agricultural soils. *Water Science and Technology*, 65, 1903-1911.
- Williams, N. D., Walling, D. E. & Leeks, G. J. L. (2008). An analysis of the factors contributing to the settling potential of fine fluvial sediment. *Hydrological Processes*, 22, 4153-4162.

RESULTATFÖRMEDLING

Publicering

Internationell publicering

Ulén, B. & Etana A. Effects of structure liming on phosphorus leaching in two Swedish clay soils. Acta Agriculturae Scandinavica B Plant and Soil. Submitted 2014-02-24

Svensk rapport

Barbro Ulén, Annika Svanbäck & Ararso Etana 2013. Strukturkalkning och fosforläckage. Meddelanden från södra jordbruksförsöksdistriktet Red Dave Servin. Partnerskap Alnarp. Rapport från Växtodlings- och växtskyddsdagarna i Växjö 6 och 7 december 2013 ISSN 0282-180X ISRN SLU-SJFD-M-66-SE avsnitt 17:1-17:10.

Föredrag

- 1) Växjö Möte 3013-12-13 Partnerskap Alnarp. C:a 200 åhörare (rådgivare, tjänstemän från Jordbruksverket, Hushållningssällskap, Lantmännen, LRF etc.
- 2) Markkarteringsrådet Seminarium om Strukturkalkning och kalkfilterdiken 2014-02-04 SLU C:a 150 åhörare (rådgivare, personer från JBV, Hushållningssällskap Länsstyrelser, etc.
- 3) KSLA 2014-02-12. Baltic Sea Action Plan – de svåra frågorna. Barbro Ulén: De viktigaste åtgärderna inom jordbruket och deras effekter. C:a 200 åhörare (personer från olika myndigheter JBV, SEPA, HAV, Miljödepartementet, LRF konsulter, forskare. <http://www.ksla.se/wp-content/uploads/2013/12/Barbro-Ulen.pdf>

Permanent utställning och skyltar

Skyltar på svenska och engelska vid Nordkalks permanenta utställning ”projekt Born” Stockholm Vatten ABs förvaltade marker vid naturskyddsområdet vid Bornsjön