

Barbro Ulén, Ararso Etana, Mats Larsbo, Maria Blomberg

Näringsläckage från en vermikulitlera med konventionell odling jämfört med ogödslad träda



Oxelby försöksrutor. Foto: Maria Blomberg

Ekohydrologi 157

Uppsala 2019

**Institutionen för mark och miljö
Sveriges lantbruksuniversitet**

**Department of Soil and Environment
Swedish University of Agricultural Sciences**

**ISRN SLU-VV-EKOHYD-157-SE
ISSN 0347-9307**

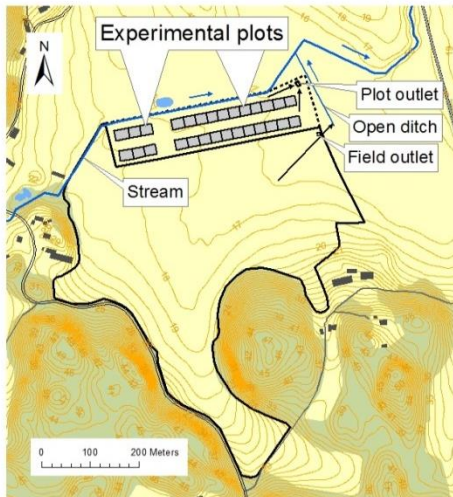
Näringsläckage från en vermikulitlera med konventionell odling jämfört med ogödslad träda

Barbro Ulén, Ararso Etana, Mats Larsbo och Maria Blomberg

Sammanfattning Växtnäringsläckage från jordbruksmark som inte bearbetas (ingen plöjning) och med liten mängd näringsämnen i omlopp (ingen gödsling) föreslås representera bakgrundsläckaget för odlad mark. Vi studerade utlakningen av växtnäring på ett flackt rutförsök med finkornig jord dominerad av lermineralet vermikulit under 10 år. Fyra dränerade försöksrutor med ogödslad träda (årlig avputsning) jämfördes med fyra försöksrutor som odlades konventionellt (höstplöjning och balanserad giva med mineralgödsel). Efter 6 år visade röntgenbilder från skiktet 0-16 cm att medelstorleken på markens makroporer var större i trädan jämfört med den konventionella odlingen. Dessutom var porerna mera vertikalt orienterade och sammanhängande från markytan till 16 cm djup. Efter tio år hade det översta (0-5 cm) matjordsskiktet i trädan lägre halt växttillgänglig fosfor (33 mg P-AL per kg jord) än motsvarande skikt med konventionell odling (37 mg P-AL per kg jord). Trädan hade också högre halt organisk kol än den konventionella odlingen (30 respektive 21 g per kg jord). Trots detta uppmättes det inga statistiskt säkra skillnader i fosforläckage mellan trädan och den konventionella odlingen över tioårsperioden. Det årliga läckaget var i båda fallen 0,90 kg totalfosfor per hektar och år, varav omkring 0,12 kg som löst reaktivt fosfor och 0,78 kg som övrig fosfor. Det fanns inga trender i fosforläckaget över tid för tioårsperioden. Utlakningen av nitratkväve var betydligt lägre från trädan än från den konventionella odlingen (2,7 respektive 21,6 kg per ha och år). Bakgrundsbelastningen av fosfor bedömdes vara mycket hög vid denna plats. Järnets och det organiska materialets roll för fosforläckaget behöver undersökas mer.

INLEDNING

Fosforutlakningen från jordbruksmark till vatten är känd för att variera kraftigt över tid och ofta är årets vinterväder (Ulén m.fl. 2019a) och förhållanden i jorden mer avgörande för läckagets storlek än odlingsmetoderna. På gårdsnivå (Hushållningssällskapets försöksgård Logården i Västergötland) har växttillgänglig markfosfor (P-AL talet) varit en viktig faktor för att förklara koncentrationen av löst reaktiv fosfor i dräneringsvattnet (Ulén m.fl. 2016). Sambandet förbättrades bara marginellt när man dessutom tog hänsyn till koncentrationerna av aluminium (Al-AL) och järn (Fe-AL) i marken (extraherat med sur laktatlösning). Ett hydrologiskt index för "flashiness", dvs. snabba flödesvariationer visade sig vara relaterat till läckaget av den jordbundna fosfor i den nioåriga studien. I ett experiment vid Oxelby utgjordes fosforläckaget till största delen av jordbunden fosfor (Ulén m.fl. 2017). Ett timbaserat index för "flashiness", från de olika försöksrutorna var där en förklarande faktor för den rumsliga variationen av fosforläckaget. I Oxelby var läckaget av den jordbundna fosfor generellt större ju närmare man befinner sig det centrala diket till vilket dräneringsvattnet leds (Figur 1). Detta avstånd har tidigare använts som en parallell faktor (Svanbäck m.fl. 2014; Ulén m.fl. 2017) för dräneringsvattnets fosfortransport. Kväveläckaget i Oxelbyförsöket har varit mera beroende av jordbearbetningen än fosforläckaget och var i mer än 95 procent i form av nitratkväve. Sex år efter full etablering av en träda undersöktes jordens nätverk av markporer i skiktet 0-16 cm med röntgentomografi (Hellner m.fl. 2018). Trädan hade mer vertikalt orienterade porer och dessa var också mer sammanhängande från markytan till 16 cm djup jämfört med de konventionellt odlade rutorna där man hade plöjt varje höst. I marken med träda var också medelstorleken på markens makroporer större.



Figur 1. Oxelby experimentrutor i den nästa plana delen av en flack dal med dränerade försöksrutor (plots) längs en bäck. Varje försöksruta (storlek 20 m x 24 m) har 3 parallella dräneringsledningar på 1 m djup med 8 m avstånd. På dikesbotten och runt dräneringsrören upp till ca 50 cm under markytan ligger grovt dräneringsgrus (8-16 mm). Rutorna är hydrologiskt isolerade mot resten av fältet med längsgående dräneringsledningar. De enskilda rutgränserna delas av med plast under plogdjupet.

För att uppskatta bakgrundsläckaget av fosfor opåverkat av odlingen har ett förslag varit att studera ogödslad träda på mark med historisk begränsad fosforgödning och låga halter växttillgänglig fosfor. Sådan mark har mindre näring i omlopp än i gödslad jord, speciellt om den inte inte plöjs eller bearbetas på annat sätt.

I denna rapport vill vi ge svar på följande frågor:

- Har tio års avsaknad av gödsling påverkat näringsstatusen i marken, dels i det översta skiktet (0-5 cm) och dels i hela matjordsskiktet som vänds vid plöjning?
- Har konventionell odling med höstplöjning (dvs. störd vertikal kontinuiteten av markens makroporer i kombination med en måttlig fosforgödning) påverkat fosforläckaget jämfört med trädan?
- Hur har kväveläckaget påverkats av att jorden inte bearbetats och kvävegödslats?
- Har det skett statistiskt säkra trender i växtnäringläckagen under de tio årens träda och plöjning/gödsling?

METODER

Försöksplats och vattenprovtagning

Försöksplatsen (Figur 1) ligger vid Stockholms stads reservvattentäkt Bornsjön. Jordens textur motsvarar lerig mjälajord till ren lerjord närmast dalens mitt (40-60% ler). Det dominerade (80%) lermineralet är vermikulit (Ulén m.fl. 2019b). Under 20 års tid, innan försöket anlades, var all fosforgödning i området begränsad till maximalt 15 kg P per ha och år för mark med fosforklass I-III medan ingen mineralfosfor över huvud taget tilläts för klass IV och V. För Oxelbyfältet har det betytt att fosfortalet legat och på samma låga nivå som markkarteringar från tidigt 1980-tal visat.

Permanent träda och konventionell odling med testades med fyra slumpmässigt placerade upprepningar. Avrinningen från försöksrutorna mättes i en provtagningskur och vattenprov togs i proportion till avrunnen vattenmängd styrt av en datalogger. Proven har analyserats enligt Svanbäck m.fl. (2014). Index för "flashiness" beräknades som flödets timvariation i relation till hela årsavrinningen (agrohydrologiska år).

Träda och konventionell odling av grödor

Trädan såddes med en blandning av trädesfrön som bestod av timotej (*Phleum pratense* L.), ängsvingel (*Festuca pratensis* (Huds.)) och engelskt rajgrass (*Lolium perenne* L.). Den putsades av varje sommar varvid vegetationsmaterialet fick ligga kvar på marken. Efter tio år hade gräset gradvis övergått till att ha ett stort inslag av kvickrot (*Elymus repens* L.), maskros (*Taraxacum* sp.) och en mindre del klöver och blandade ängsörter. Växtligheten var på sina håll lätt tuvig.

De konventionellt odlade rutorna såddes med vårsådda grödor (korn, havre och ärter) efter att de plöjts hösten innan. Höstplöjningen upprepades årligen utom det sista året. Plöjning under den senare delen av hösten inför vårsådd är vedertagen jordbearbetning i regionen och innebär att man vänder jorden till 23 cm djup. De odlade rutorna fick efter försökets start den rekommenderade gödselgivan för att ersätta vad som fördes bort med den skördade grödan. Den motsvarade (per ha och år) för fosfor 16-20 kg och för kväve 80-90 kg (utom året med ärter). Det innebär dock att matjorden fick ett litet överskott av fosfor de år då skörden var dålig. De flesta år gödslades även med kalium. Gödselmedlen som var i mineralform tillsattes genom radmyllning på våren.

Jordprovtagning och analys

Matjorden provtogs i varje ruta med träda och konventionell odling 2018-10-15. Proverna representerade de fyra grenarna av ett kors som täckte hela rutan. I skiktet 0-5 cm togs fyra samlingsprov (ett från varje gren), där varje samlingsprov bestod av åtta delprov. Från det undre matjordsskitet (5-23 cm) togs ett samlingsprov i vardera av de 8 rutorna. Samtliga jordprov analyserades för pH (H₂O), fosfor (P), järn (Fe), aluminium (Al), kalium (K), magnesium (Mg) and kalcium (Ca) efter extraktion med surt ammoniumlaktat (AL). Graden av fosformättnad i AL-extraktet (DPS-AL) beräknades på molbasis som en kvot mellan P-AL och Al-AL + Fe-AL. Dessutom analyserades jordproven för totalfosfor (TotP) efter uppslutning med salpetersyra och för total organisk kolhalt (OrgC).

Statistik

För att bedöma skillnader mellan odlingsåtgärderna användes t-test och regressionsanalys med signifikansgränsen $p < 0,05$. Dessa beräkningar gjordes i programmet MINITAB. Trendanalys av läckaget under tioårsperioden beräknades med en allmän linjär modell (Mann-Kendall statistik) och trendens riktning uppskattades från trendlinjens lutning (Sen-Thiel slope). Trendanalysen gjordes också med avrunnen mängd som generell förklarande faktor (kovariat) (Libiseller & Grimvall, 2002). Svängningar i atmosfärstrycket över atlanten (Nordatlantiska oscillationen) har visat sig påverka temperaturen och snötäcket under vintern (november-april) i regionen (Ulén m.fl. 2019a). Svängningen beskrivs vanligen med ett index (NAO_i) och eftersom vinterindex tenderade att öka under tioårsperioden (Figur 2a) testades också eventuella trender med NAO_i som en förklarande faktor.

RESULTAT OCH DISKUSSION

Koncentrationer i matjorden

Matjorden hade ett sedan 2007 oförändrat och ganska lågt pH omkring 6. Efter tio agrohydrologiska år (2008-2018) hade trädan ett fosfortal (P-AL) som var statistiskt lägre än efter upprepad konventionell gödsling (33 respektive 37 mg P-AL per kg jord) i det översta (0-5 cm) skiktet av matjorden (Tabell 1). Däremot var det ingen statistiskt säker skillnad i graden av fosformättnad (DPS-AL) och den extraherade järnhalten varierade oregelbundet mellan rutorna. Lerhalten i de båda leden var 51 (träda) resp. 46% (konventionell odling) (Hellner m.fl. 2018) en skillnad som inte var statistiskt säker. Tendensen till högre lerhalt i

trädan kan inte förklara att koncentrationen kalium och magnesium (extraherad från övre matjorden) var något högre för trädan. En svag tendens till minskat kaliumtal sedan 2007 från det odlade ledet kan möjligen ha bidragit till skillnaden.

Organiska ämnen skulle kunna påverka mobiliseringen av fosfor från mark. Speciellt glomalinrelaterade proteiner har visat sig ha en nyckelroll i sådan mobilisering (Xie m.fl. 2015). Samtidigt kan organiskt material påverka stabiliteten och andra egenskaper hos markens struktur. Trädan hade en statistiskt säkert högre halt organisk kol (30 g per kg) i övre matjorden än konventionell odling (21 g per kg) där organiskt material förs bort varje år med skörden. Beräknat för hela matjordsprofilen (då varje ruta bara representerades av ett generalprov) fann vi däremot inga statistiskt säkra skillnader i markens koncentration av organiskt kol mellan de två leden. Det hade heller inte skett några säkra förändringar mellan år 2007 med 2018. Hur det organiska materialet påverkar mobilisering och transport av fosfor behöver därför undersökas mer.

Läckage från trädan och konventionell odling

De mera kontinuerliga och större makroporerna som observerats i trädan skulle kunna innebära snabbare vattenflöden. Det uppmättes dock inga statistiskt säkra skillnader i mängd och mönster (avrinning och flashiness) för vattenflödet (Tabell 2). Trädans lägre fosfortal i ytjorden skulle kunna följas av lägre fosforhalter i dräneringsvattnet i jämförelse med det höstplöjda ledet. Fosforläckaget skiljde sig dock inte mellan trädan och den konventionella odlingen sett till hela tidsperioden (Tabell 2) eller för enstaka år. Förlusterna av löst reaktiv fosfor (DRP) tenderade emellertid att vara något högre från trädan, trots dess lägre fosfortal nära markytan. Det är sedan gammalt känt att själva växtmaterialet utgör en källa för fosfor när det utsatts för frysning. Vidare kan 2:1 mineral som vermikulit avge fosfatjoner när det utsatts för surt smältvatten (Ulén m.fl. 2017). Påverkan kan ha varit olika för de två leden genom att t. ex. växtmaterial i trädan skyddat jorden från direktkontakt med smältvattnet eller att detta infiltrerat olika beroende på markporernas olika utformning.

Tabell 1. Medelvärdet för koncentration i övre (0-5 cm) och i hela (0-23 cm) matjorden av fosfor (P), järn (Fe), aluminium (Al), kalium (K), magnesium (Mg) och kalcium (Ca) efter extraktion med surt ammoniumlaktat (AL) (mg kg⁻¹) samt graden av fosformättmad i detta extrakt (DPS-AL) (%) för ogödslad träda och konventionell odling. De två nedersta raderna visar totalfosfor (TotP) och total organisk kolhalt (OrgC) (mg kg⁻¹). Värden inom parentes återger uppmätta parameterar år 2007

	Ogödslad träda (0-5 cm)	Konventionell	Ogödslad träda (0-23 cm)	Konventionell
P-AL	33,3*	37,1	27,9 (30,6)	34,5 (31,8)
Fe-AL	418	401	478	412
Al-AL	229*	258	236	265
K-AL	240*	114	159 (162)	109 (122)
Mg-AL	498*	372	498	360
Ca-AL	3210*	2980	3200 (3540)	2980 (3500)
DPS-AL	6,83	7,16	5,1	6,67
TotP	814	838	745	843
OrgC	30000*	21500	24800 (24300)	22100 (23200)

*Signifikant (p < 0,05) skillnad i koncentrationer mellan ogödslad träda och i konventionell odling

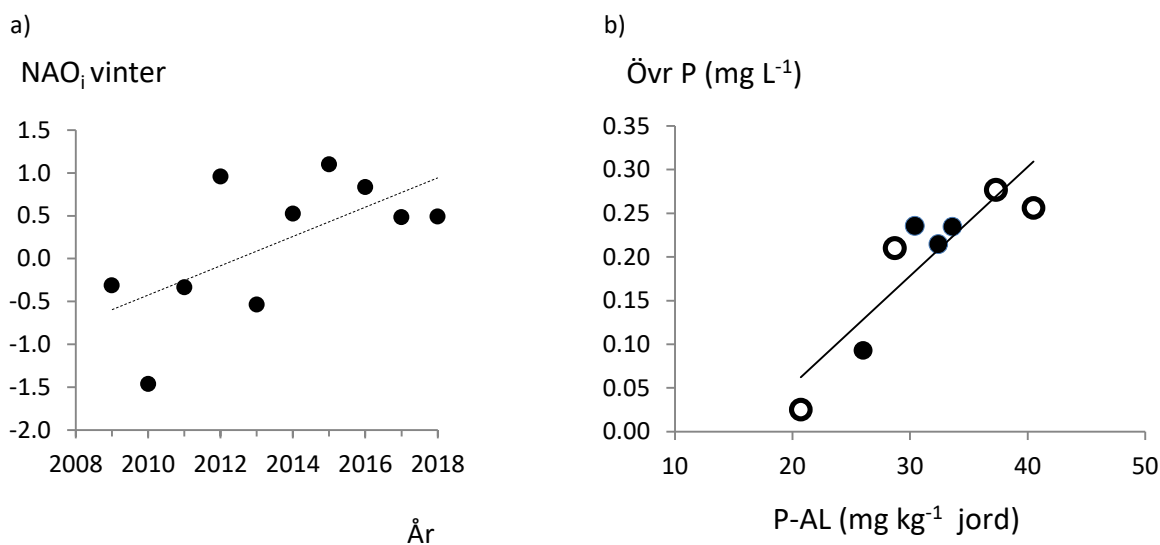
Tabell 2. Medelvärde 2009-2018 för index (november-april) av Nordatlantiska Oscillationen (NAO_i), avrinning (AVR), index för snabba flöden (Flashiness) och årlig transport av totalfosfor (TP), löst reaktiv fosfor (DRP), övrig fosfor (ÖvrP) och nitratkväve (NO₃N) från fyra dränerade försöksrutor med ogödslad träda resp. jordbruksgrödor odlade på vanligt sätt och med höstplöjning

Försöksled	NAO _i (mm år ⁻¹)	AVR	Flashiness -	TP	DRP	ÖvrP (kg ha ⁻¹ år ⁻¹)	NO ₃ N
Ogödslad träda	0,172	400	2,55	0,90	0,14	0,76	2,7**
Plöjning höst	0,172	382	2,38	0,90	0,10	0,80	21,6

* statistiskt säkert mindre läckage (p < 0,05)

Till skillnad från studien vid Logården fann vi inte något statistiskt signifikant samband mellan löst reaktiv fosfor och P-AL-talet. En förklaring kan vara att flera av fälten på Logården var betydligt mer uppgödslade och hade fosfortal som låg 10 ggr högre än Oxelbys försöksrutor. Att markens fosforstatus ändå kanske påverkat den jordbundna fosfor indikeras av det statistiskt säkra sambandet mellan övrig fosfor och P-AL-talet (Figur 2b). Även sambandet med totalfosfor och P-AL var positivt och statistiskt säkert. Möjligen skulle spridning av gödsel som mineral Korn kunna medföra en viss lokal rumslig variation och förklara varför Oxelbys konventionella rutor uppvisade större variation i fosfortalet än trädan som inte gödslades (Figur 2b). Sådan variation i markens fosfor skulle i så fall ha inträffat trots att gödseln hade radmyllats och harvats i samband med vårsådden.

Det fanns ingen statistiskt säker trend i läckaget över tioårsperioden (Tabell 3). En svag tendens (p = 0,059) till ökning av läckaget av totalfosfor beräknades dock i den konventionella odlingen när man tog hänsyn till avrunnen vattenmängd från de olika rutorna. Sammantaget visar resultaten från Tabell 2 och 3 att fosforläckaget vid Oxelby är komplicerat, att det ändras långsamt och att bakgrundsbelastningen på den aktuella platsen är hög.



Figur 2 a) Vinterindex för Nordatlantiska Oscillationen (NAO_i) under 2008-2018 och b) medelvärdet för koncentrationen övrig fosfor (ÖvrP) i relation till fosfortalet i matjorden (0-23 cm) i de olika försöksrutorna. Fylld ring anger försöksrutor med träda och ofylld försöksrutor som odlats konventionellt. Sambandet har regressionskoefficienten (r_{adj}) 0,77 med sannolikhetsvärdet $p=0,003$.

Tabell 3. Sannoliksvärdet (tvåsidigt p-värde) för statistiskt säker trend av årligt läckage ($\text{kg ha}^{-1} \text{år}^{-1}$) i form av totalfosfor (TP), löst reaktiv fosfor (DRP), övrig fosfor (ÖvrP) och nitratkväve (NO_3N) från ogödslad träda och konventionell odling 2008-2018. Trendanalysen gjordes dels med en standardmodell och dels med avrinning (AVR), eller ett index för vinterklimatet (NAOi) som kovariat. Understa raden indikerar trendens riktning (Theil-Sen lutning) som positiv eller negativ

	Tvåsidigt p-värde för säker trend			
	TP	DRP	ÖvrP	NO_3N
<i>Ogödslad träda</i>				
Standardmodell	0,474	0,858	0,371	0,419
Kovariat AVR	0,256	0,314	0,282	0,650
Kovariat NAOi	0,768	0,953	0,695	0,195
Theil-Sen lutning	+	+	+	-
<i>Konventionell odling</i>				
Standardmodell	0,371	0,592	0,371	0,210
Kovariat AVR	0,059	0,684	0,068	0,401
Kovariat NAOi	0,614	0,663	0,678	0,091
Theil-Sen lutning	+	-	+	-

icke-signifikanta trender ($p > 0,05$)

Jordmaterialet i dräneringsvattnet från en av de konventionellt odlade rutorna fraktionerades upp i kolloider ($> 0,45 \mu\text{m}$) och nano-partiklar (10 kDa till $0,45 \mu\text{m}$) (Ulén m.fl., 2019b). Rutan hade ett för ledet typiskt fosfortal 36 mg (P-AL per kg). Fosforformer som var bundna till aluminium var betydande i både kolloiderna och nanopartiklarna och motsvarade en ungefär lika stor fraktion aluminiumbunden fosfor i jordprofilen. I jämförelse med både matjorden och alven innehöll däremot de båda vattenburna fraktionerna avsevärt mer kalciumbunden fosfor än marken. Samtidigt var den vattentransporterade fosfor inte alls bundet till, eller associerat med järn vilket däremot en mycket stor andel av fosfor i marken var (Ulén m.fl. 2019b). Detta indikerar att järnets roll för partikelbunden transport är komplicerad och behöver studeras mer.

Till skillnad från fosfor var utlakning av nitratkväve väsentligt lägre från trädan än från den konventionella odlingen (2,7 jämfört med 21,6 kg per ha och år). Kväveläckaget är ofta direkt relaterat till markens koncentration av mineralkväve och kan vara högt efter jordbearbetning och då marken inte är bevuxen (t.ex. Myrbeck, 2014). Ett visst inslag av klöver i trädan tycks inte ha medfört ökat kväveläckaget under senare år.

Sammanfattning

- Tio års avsaknad av fosforgödsling till trädan minskade fosfortalet i det översta matjordsskiktet (0-5 cm).
- Det uppmättes inga skillnader i fosforläckage mellan träda och konventionell odling under de tio år som försöket varade.
- Kväveläckaget var 8 gånger högre från mark som bearbetats och kvävegödslats.
- Det fanns inga statistiskt säkra trender i växtnärläckage under de tio åren.

Erkännande

Försöksanläggningen vid Oxelby har till största delen finansierats av Stockholm Vatten AB. Undersökningarna och utvärderingen har i huvudsak bekostats av stiftelsen Lantbruksforskning och av Formas, ett svenskt forskningsråd för hållbar utveckling.

Referenser

- Hellner, Q., Koestel, J., Ulén, B., Larsbo, M. 2018. Effects of tillage and liming on macropore networks derived from X-ray tomography images of a silty clay soil. *Soil Use and Management* 34: 197-205.
- Libiseller, C. & Grimvall, A. 2002. Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics* 13: 71-82.
- Myrbeck Å. 2014. Soil Tillage Influences on Soil Mineral Nitrogen and Nitrate Leaching in Swedish Arable Soils. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Doctoral thesis 2014:71. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences.
- Svanbäck, A., Ulén, B. & Etana, A. 2014. Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 184: 124-134.
- Ulén, B., Stenberg, M. & Wesström, I. 2016. Use of a flashiness index to predict phosphorus losses from subsurface drains on a Swedish farm with clay soils. *Journal of Hydrology* 533: 581-590.
- Ulén, B., Larsbo, M., Koestel, J., Hellner, Q. & Blomberg, M. 2017 Åtgärder mot fosforläckage från dränerade lerjordar. *Ekohydrologi* 149, 6 sidor.
- Ulén, B., Larsbo, M., Koestel, J., Hellner, Q., Blomberg, M. & Geranmayeh, P. 2018. Assessing strategies to mitigate phosphorus leaching from drained clay soils. *Ambio* 47: 114-123.
- Ulén, B., Lewan, E., Kyllmar, K., Blomberg, M. & Andersson, S. 2019a. Impact of the North Atlantic Oscillation on Swedish Winter Climate and Nutrient Leaching. *Journal of Environmental Quality* (under tryckning).
- Ulén, B., Simonsson, M., Larsbo, M., Adediran, G., Seisenbaeva, G., Etana, A. & Blomberg, M. 2019b. *Nutrient Discharge from a Clay Soil in a Ten Year Study Comparing Conventional Cropping and Unfertilised Fallow*. IPW9. Zurich 8th-12th July 2019.
- Xie, H.Y., Li, J.W., Zhang, B., Wang, L.F., Wang J.K., He, H.B, & Zhang, X.D. 2015. Long-term manure amendments reduce soil aggregate stability via redistribution of the glomalinrelated soil protein in macroaggregates. *Nature, Scientific Report* 5, 14687. doi: 10.1038/srep14687.

Bilaga 1

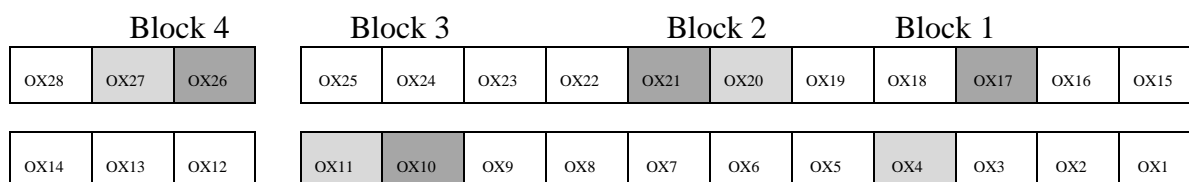
Aggregatstabilitet 11 år efter strukturkalkning

Fyra dränerade försöksrutor (belägna enligt Figur B1) behandlades 2007-09-26, ett år innan etableringen av trädan, med osläckt kalk (CaO). Detta försöksled odlades därefter på samma sätt som det konventionella ledet vilket utgjorde kontroll för kalkningseffekterna. Båda leden höstplöjdes förutom det första året då de strukturkalkade rutorna i stället kultiverades upprepade gånger för att kalken skulle få bra kontakt med jorden. Det finns en rumslig gradient i försöket där jorden har något högre ler- och mullhalt närmare rutornas uppsamlingsdike som ligger centralt på ett flackt jordbruksområde. Försöket med kalkning har därför delats upp i fyra block. Lägst är ler- och mullhalterna närmast skogen (block 4, Figur B1). De båda försöksleden hade dock i genomsnitt ungefär samma halter (Figur B2a).

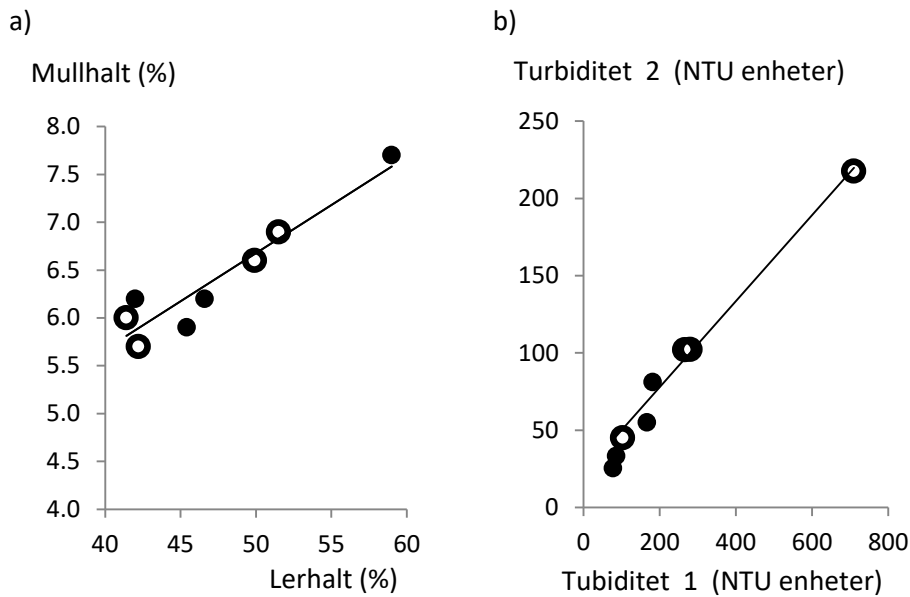
Tre år efter kalkningen var aggregaten från de kalkade rutorna stabilare än i kontrollerna (Ulén & Etana, 2014). Det syntes däremot inga effekter på nätverken av makroporer sju år efter strukturkalkningen (Hellner m.fl. 2018). Efter åtta år var det heller inte längre några signifikanta skillnader i fosforläckage mellan behandlingar trots att man vid utvärderingen två år tidigare hade beräknat en tydlig effekt (Svanbäck m.fl. 2014). Utvärderingen efter sex år var i relation till hela experimentet med sju olika upprepade odlingsmetoder, medan beräkningen två år senare var i relation till de fyra led som fortfarande odlades på samma sätt. För att följa upp orsaker till att effekten av kalkningen skulle kunna ha mattas av under senare år studerades ytjordens aggregatstabilitet för de strukturkalkade och icke-strukturkalkade rutorna elva år efter åtgärden.

Metoder

Metoden vi använde för att analysera aggregatstabilitet bygger på Czyz m.fl. (2002) och Czyz & Dexter (2015). Vid provtagningen (2018-10-15) hade marken ännu inte höstplöjts och var generellt fuktig i större delen av försöket (block 1-3, figur B1) men torr i block 4 där lerhalten och mullhalten är lägst. Efter rensning av markytan på lös jord och växtmaterial togs aggregatprov från ca 3-8 cm:s djup i rutor som kalkkats och i kontrollrutorna. I laboratoriet sållades varje prov (4 prov per ruta och totalt 16 upprepningar från varje led) för att få fram aggregat av storleken 8-11 mm diameter. 100 mg aggregat överfördes till små cylindrar (0,6 mm rutnät vid botten) som placerades i en våtsikt (Eijkelkamp Soil & Water, Giesbeek, Nederländerna). Aggregaten hade samma fuktighet som då de togs i fält. Genom apparatens rörelser doppades aggregaten varsamt 34 gånger per minut under 6 minuter i 80 ml vatten. Detta vattenprov som innehöll en uppslamning av upplösta aggregat överfördes till större cylindriska flaskor och späddes upp till 250 ml. Först skakades proverna för att fördela de upplösta aggregaten jämnt och turbiditet (turbiditet 1) mättes omedelbart i en turbidimeter (2100N Hach-Lange Co, Düsseldorf, Tyskland). Efter att de större partiklarna fått sedimente-



Figur B1. Försöksrutornas inbördes läge vid Oxelby. Ljusgrått markerar strukturkalkade rutor, mörkgrått kontroller. Närliggande rutor har jämförts parvis i fyra block. Block 1 ligger närmare uppsamlingsdiket på jordbrukslättnens mitt och block 4 närmare skogen.



Figur B2a) Mullhalten mot lerhalten i matjorden (0-16 cm) och b) dispergerade lerkolloider mätt som turbiditet 2 efter 4,5 timmars sedimentering avsatt mot turbiditet 1 uppmätt omedelbart efter upplösningen av aggregaten. Strukturkalkade rutor som fyllda och kontrollerna som ofyllda cirklar.

ra 4,5 timmar togs ett vattenprov försiktigt med pipett från det överstående skiktet och turbiditeten mättes i detta (turbiditet 2). Det senare värdet brukar motsvara kornstorleken ler under antagandena att partiklarna är sfäriska och att sedimentationen följer Stokes lag.

Resultat och Diskussion

De från aggregaten dispergerade partiklarna som ännu inte hade sedimenterat efter 4,5 timmar utgjorde 30-45% av vad som totalt slammats upp från aggregaten. Dessa var uppbyggda med ungefär samma fördelning mellan större och finare partiklar över hela försöket eftersom förhållandet mellan turbiditet 2 och 1 var likartat (Figur B2b). Från de kalkade rutorna i block 1-3 var turbiditeten lägre, och därmed aggregatstabiliteten bättre (Tabell B1). Det tycks föreligga en skillnad i mitten av försöket (block 2 och 3), men knappast i block 1, möjligen orsakad av en förhållandevis hög mullhalt (7,7%) i ruta 4. Alltför hög mullhalt skulle kunna ha minskat kalkens cementerande förmåga. Aggregatstabiliteten förändras när jorden blir torr (Czyz & Dexter, 2015) och närmare skogen med torr jord vid provtagningen (block 4), hade det okalkade ledet lägre turbiditet än kontrollen. Över hela försöket var skillnaden i aggregatstabilitet inte statistiskt säker. Om strukturkalkningen medfört starkare aggregat nära markytan, är detta en positiv faktor som kan medföra mindre risk för förluster av jordpartiklar med vattnet. Att genom direkta mätningar verifiera om strukturkalkningen fortfarande efter 11 år medfört mindre fosforläckage skulle kräva ett större antal upprepningar än 4 rutor. Platsen präglas av en stor rumslig flödesvariation som t.o.m. varit större än variationen mellan åren (Ulén m.fl. 2017).

Tabell B1. Nummer för block och försöksrutor, matjordens halt av ler och mull (kalkad och kontroll) samt resultat från mätningarna av aggregatstabilitet (dispergerade partiklar och finare partiklar av lerstorlek som inte sedimenterat efter 4,5 timmar). Värden inom parentes visar variansen för fyra delprover inom varje ruta

Block	Rutnr	Ler		Mull		Dispergerade partiklar		Dispergerat ler 4,5 tim		
		(%)		(%)		kalkad	kontroll	kalkad	Kontroll	
						Turbiditet (NTU enheter)				
1	4 17	59	52	7,7	6,9	79 (18)	103 (16)	28 (8)	45 (28)	
2	20 21	45	50	5,9	6,6	167 (31)	710 (29)	55 (30)	218 (34)	
3	11 16	47	42	6,2	5,7	182 (23)	280 (10)	81 (25)	102 (14)	
4	26 27	42	41	6,2	6,0	266 (60)	86 (44)	102 (53)	33 (11)	
1-4		48	46	6,5	6,3	173 (60)	295 (93)	66 (59)	100 (83)	

Referenser

- Czyz, 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 geoecology*. Catena verlag, Germany, 115-124.
- Czyz, E.A & Dexter, A.R. 2015. Mechanical dispersion of clay from soil into water: readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay. *International Agrophysics*, 29: 31-37.
- Hellner, Q., Koestel, J., Ulén, B., Larsbo, M. 2018. Effects of tillage and liming on macropore networks derived from X-ray tomography images of a silty clay soil. *Soil Use and Management* 34: 197-205.
- Svanbäck, A., Ulén, B. & Etana, A. 2014. Mitigation of phosphorus leaching losses via sub-surface drains from a cracking marine clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 184: 124-134.
- Ulén, B. & Etana, A. 2014. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming. *Acta Agriculturae Scandinavica B, Soil and Plant Science* 64: 425-433.
- Ulén, B., Larsbo, M., Koestel, J., Hellner, Q. & Blomberg, M. 2017. Åtgärder mot fosforläckage från dränerade lerjordar. *Ekohydrologi* 149, 6 sidor.