

Strukturkalkning för minskat fosforläckage

– En fältstudie på mellanlera i Halland

Lisbet Norberg, Helena Aronsson, Maria Blomberg och Barbro Ulén



Titel: Strukturkalkning för minskat fosforläckage – En fältstudie på mellanlera i Halland

Författare: Lisbet Norberg, Helena Aronsson, Maria Blomberg och Barbro Ulén

Kontakt: Lisbet.Norberg@slu.se, 018 – 67 11 87

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2021

Omslagsbild och övriga foton: Lisbet Norberg

Serietitel: Ekohydrologi

Delnummer i serien: 170

ISSN: 0347-9307

ISRN: SLU-VV-EKOHYD-170-SE

Elektronisk publicering: <http://pub.epsilon.slu.se>

Bibliografisk referens: Norberg, L., Aronsson, H., Blomberg, M. och Ulén, B. (2021). *Strukturkalkning för minskat fosforläckage – En fältstudie på mellanlera i Halland*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet. (Ekohydrologi, 170).

Förord

Den här rapporten presenterar resultat från fältförsök R0-1304, beläget på Hushållningssällskapets försöksgård Lilla Böslid i Halland. Försöket syftade till att öka kunskapen om strukturkalkningens effekter på fosforförluster från lerjord men även på aggregatens stabilitet, markens pH och skörd. Strukturkalkningen utfördes hösten 2018 med en blandprodukt i två olika stora givor. I projektet analyserades fosfor- och kvävehalter i dräneringsvattnet från försöksfältets separat dränerade parceller och olika markparametrar under två efterföljande utlakningssäsonger.

Projektgruppen har bestått av Helena Aronsson och Lisbet Norberg i samarbete med fältpersonalen vid Lilla Böslid som stod för fältskötseln med odlingsåtgärder och provtagningar. Maria Blomberg har ansvarat för utlakningsanläggningen och hantering av flödesdata. Barbro Ulén har sammanställt erfarenheter från tidigare utlakningsförsök i rapporten. Tack till Kerstin Berglund och Jens Blomquist som har bistått med sin kunskap och erfarenhet kring strukturkalkning och till Magnus Simonsson som mätt mineralogin för fältet. Tack även till vattenlabbet på Institutionen för vatten och miljö samt marklabbet på Institutionen för mark och miljö. Försöket är finansierat av Jordbruksverket genom projektet *Strukturkalkning av mellanlera i Halland för minskat fosforläckage*.

Författarna

Uppsala mars 2021

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	5
Inledning	6
Resultat från tidigare utlakningsförsök	8
Metoder	10
Försökets upplägg och kalkgivor	10
Jordart, markkartering och mineralogi	13
Utlakning	14
Aggregatens stabilitet och övriga markanalyser	15
Skördar	16
Statistik	16
Resultat och Diskussion	17
Avrinning och utlakning	17
Allmänt om avrinning och utlakningsförhållanden	17
Skillnader mellan behandlingar	18
Aggregatens stabilitet och övriga markanalyser	23
Skördar	25
Sammanfattande diskussion	26
Slutsatser	27
Referenser	29

Sammanfattning

Fältstudien utfördes på Hushållningssällskapetets försöksgård Lilla Böslid i Halland. I försöket studerades strukturkalkning med 8 och 16 ton/ha av fuktig blandprodukt (Fostop, Nordkalk), i jämförelse med okalkad mark (kontroll) på ett försöksfält med specialdränerade rutor. Dräneringsvattnet från varje enskild ruta leddes via ett dräneringsrör till mätstationen där vattenflödet mättes kontinuerligt och koncentrationen av totalfosfor, fosfatfosfor, totalkväve och turbiditet i det avrinnande vattnet analyserades. Försöket kalkades i september 2018 och utlakningsmätningarna påbörjades så fort avrinningen kom igång och pågick sedan över två vintrar fram till och med januari 2021.

Jordarten på försöksfältet är en mellanlera med i genomsnitt 29% lerhalt (26-33) i matjorden (0-30 cm) och något högre i alven. I övrigt dominerar kornstorlekarna mo och mjäla. Lerfraktionerna består till största delen av svällande mineral. Jordprover för test av aggregatstabiliteten togs på våren 2019 och 2020 då jord från det översta lagret sållades för att få fram jord i aggregatklassen 2-5 mm. Dessa aggregat utsattes sedan för regn i en regnsimulator och det avrunna vattnet analyserades för elektrisk konduktivitet och turbiditet. I samband med uttaget av jordprover till aggregatstabilitet togs även matjordsprover (0-20 cm) ut för analys av pH, Ca-AL och elektrisk konduktivitet.

Fältförsöket har inte påvisat några statistiska skillnader mellan kontrolledet utan kalk och de två leden med 8 respektive 16 ton kalkgiva/ha, avseende utlakning av totalfosfor, fosfatfosfor, kväve och turbiditet i dräneringsvattnet. Andra året uppvisade dock en tydlig tendens till minskad utlakning av totalfosfor (40%) och turbiditet med strukturkalkning. Andra årets tendens till minskad utlakning av totalfosfor visar också att skillnaden mellan kalkgivorna 8 och 16 ton/ha var små vilket tyder på att en större mängd kalkblandning inte ger en större effekt på utlakningen från den här jorden. Under det tredje årets början planade dock tendensen ut och inga skillnader mellan leden kunde ses.

Ytjordens struktur, i form av aggregatstabilitet mätt som turbiditet och EC i dräneringsvattnet från jordprover som utsatts för simulerat regn, förändrades inte till följd av strukturkalkningen. Matjordens pH var högre i de kalkade leden jämfört med kontrolledet båda åren medan EC och Ca-AL hade statistiskt högre värden andra året och en tendens till högre värden första året. Skörden av vårkorn tenderade att bli högre med ökad kalkgiva men kärnans innehåll av P och N påverkades inte av kalkningen.

Mätningarna av utlakningen skulle behöva följas upp under flera år framöver, för att kunna se om strukturkalkningen får effekt på längre sikt eller ger effekt främst under förhållanden med stor partikeltransport, eller om effekten är fördröjd genom långsammare reaktioner mellan kalk och ler än väntat.

Inledning

Fosforförluster från åkermark är en av de viktigaste källorna till övergödning av vattensystemen. Förluster sker både genom ytvärning och genom utlakning genom markprofilen, där fosfor (P) transporteras både som partikulärt bunden fosfor och fosfatfosfor. Storlek och fördelning mellan förlustvägar och former av förluster beror till stor del på jorden, men också på andra faktorer (Johnsson m.fl., 2019). Förutom sandjordar med låg bindningskapacitet för fosfor, och erosionskänsliga mjäla- och mojordar, så är lerjordar känsliga för fosforförluster (Ulén och Jacobsson, 2005). Det gäller särskilt lerjordar med svag struktur, där partiklar lätt kommer i rörelse och kan transporteras på ytan eller genom sprickor i marken. Det är på sådana jordar som strukturkalkning kan förbättra situationen genom att stabilisera markens struktur (jordens rumsliga arrangemang av partiklar och porer). När lerpartiklar binds i aggregat, tack vare kalken, minskar mängden fria partiklar och därtill bunden fosfor som kan transporteras med avrinnande vatten på ytan eller genom marken. Stabilisering av aggregaten gör att de inte lika lätt upplöses av genomflödande vatten. Därmed kan fosfor inklusive fosfatfosfor hållas kvar. Strukturkalkning kan alltså minska förluster av både partikulärt bunden fosfor och fosfatfosfor, speciellt om marken på platsen är rik på fosfor.

Strukturkalkning av lerjordar (>15% ler) är en av de prioriterade åtgärderna mot fosforförluster i Vattendirektivets åtgärdsprogram, tillsammans med t.ex. skyddszoner, anpassade skyddszoner, kalkfilterdiken, fosfordammar och tvåstegsdiken. I storleksordningen 50-100 000 ha mark har strukturkalkats inom projekt med lokala vattenvårdsbidrag (LOVA) sedan 2010 (Aronsson m.fl., 2019). Utöver detta har det strukturkalkats inom olika lokala miljövårdsprojekt och EU:s landsbygdsprogram, men även en hel del utan bidrag. En enkätundersökning som gjordes bland lantbrukare 2020 visade att dubbelt så många av de svarande hade strukturkalkat på egen bekostnad än de som gjort det med stöd i LOVA-programmet (Greppa näringen, 2020). Strukturkalkning är en relativt enkel åtgärd för lantbrukaren, och flera av maskinerna som behövs vid utförandet finns normalt på gården. En bättre struktur har positiva effekter också för dränerings- och jordbearbetningsförhållanden vilket gynnar grödans tillväxtmiljö.

Bra struktur betyder grynig och smulig jord som inte är smetig vid för mycket väta eller hård och kokig vid torka. Strukturkalken ska stabilisera den gryniga jorden så att den fortsätter vara lättbearbetad även under torrare eller blötare perioder. Den förhindrar krympning och svällning. Aggregaten kapslar in vatten och jorden upplevs torrare utan att ha lägre vattenhalt, jordens vattenhållande förmåga ökar. Lantbrukaren kan uppleva att marken är mer lättbearbetad, torkar upp snabbare efter blöta perioder och att det behövs färre överfarer för att få en bra såbädd, med minskad bränsleförbrukning som bonus.

Även biologiska och kemiska förhållanden (t.ex. pH och basmättnadsgrad) påverkas av kalkningen. Ibland har man kunnat verifiera en högre skörd efter strukturkalkning (Aronsson, m.fl., 2019), och därför har åtgärden varit intressant för många lantbrukare. En studie av två försök på lerjord (38-40% ler), som anlades 1936 och 1941 på SLUs försöksstation Lanna i Västergötland har visat att struktureffekten av kalkning med bränd och släckt kalk kan vara mycket långvarig med stabilare aggregat och bättre genomsläpplighet av vatten (Berglund m.fl., 2017).

Det är löslig släckt ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) eller bränd kalk (CaO) som är de verksamma delarna (ofta kallas de aktiv kalk) av strukturkalken, genom att de innehåller fria kalciumjoner (Ca^{2+}) som genererar en snabb pH-ökning och som reagerar med lermineralen. De blandas hos producenten med vanligt kalkstensmjöl (CaCO_3) för att få en praktiskt hanterbar produkt. (Berglund och Blomquist, 2015). Kalkstensmjölet, innehåller enbart bundet kalcium och har ingen eller mycket begränsad struktureffekt (Berglund, 1971;

Choquette m.fl., 1987), utan endast en pH-höjande effekt. Även löslig kalk i form av gips kan ha en struktureffekt (Ollikainen m.fl. 2020).

Vilken effekt på minskade fosforförluster man kan förvänta sig av en strukturkalkning och hur lång tid den kvarstår beror av olika faktorer. Givans storlek och jordens lerhalt har visat sig ha central betydelse för effekten på strukturen, liksom förhållanden vid själva nedbrukningen av kalken, vilket i sin tur påverkar förlusterna. I Sverige finns det få fältstudier av de faktiska effekterna av strukturkalkning på utlakningen av fosfor till omkringliggande vatten. Endast två försöksfält med mätningar av avrinnande vatten efter strukturkalkning finns dokumenterade, Oxelby och Viad (Ulén och Etana, 2014; Svanbäck m.fl., 2014; Ulén m.fl., 2018) samt tre pilotområden inom projektet Greppa Fosfor (Malgeryd m.fl., 2015). De två försöksfälten beskrivs närmare i nästa kapitel. Sammanfattningsvis minskade utlakningen av totalfosfor (kg/ha) från de strukturkalkade försöksrutorna i jämförelse med kontrollrutorna utan strukturkalk, för båda försöksfälten. Däremot var det olika fosforformer som stod för minskningen. Oxelby uppvisade en signifikant minskning i partikulärt bunden fosfor medan Viad uppvisade en signifikant minskning i fosfatfosfor. Författarna betonade dock vikten av mer forskning och fältmätningar för att bättre förstå strukturkalkens effekter på fosforförluster från lerjordar, särskilt på längre sikt.

Under 2010-2014 pågick projektet *Greppa Fosfor* (Malgeryd m.fl., 2015) i tre pilotområden, små jordbruksdominerade avrinningsområden, där fosforförluster till avrinnande vatten specialstuderades samtidigt som en rad olika åtgärder utfördes i syfte att minska fosforförlusterna från jordbruksmarken. Områdena låg i Västmanland, Östergötland och Halland. Jordarten dominerades av styv lera förutom i området i Halland där mellanlera dominerade och även lättare jordar förekom. Projektet fokuserade på samarbete med, och rådgivning till, områdets lantbrukare tillsammans med fysiska åtgärder såsom kalkfilterdike och tvåstegsdike (Östergötland). I alla tre områden strukturkalkades stora arealer. Projektet gav varierande resultat i de tre områdena. Störst var framgången i området i Västmanland där stora delar av jordbruksmarken strukturkalkades. Fosforhalterna i bäckvattnet minskade, och effekten kvarstod i åtminstone 3 år efter åtgärdens införande. För området i Halland påverkades inte fosforhalterna i bäckvattnet alls av de utförda åtgärderna och i Östergötland ökade fosforhalterna de första fem åren för att senare minska något.

Resultat från tidigare utlakningsförsök

Som nämnts i inledningen, finns två fältförsök där det tidigare gjorts fältmätningar av utlakning för att undersöka strukturkalkningens effekt på fosforförluster (Ulén och Etana, 2014; Svanbäck m.fl., 2014; Ulén m.fl., 2018). Dessa fältförsök har försöksrutor med separata dräneringssystem för utlakningsmätningar. Parallellt med fältmätningarna gjordes även studier av matjordslysimetrar som utsattes för regnsimulering. *Oxelby* är beläget i Bornsjöområdet söder om Stockholm med en lerhalt på 46-51% ler. Enligt Eriksson (2016) är 29% av lermineralen i Oxelbyjorden av typen "icke-expanderande". *Viad* ligger 15 km sydost om Oxelby, på en mellanlera (22-29% ler) med okänd mineralsammansättning. Det är dessa försök som till stor del ligger till grund för den erfarenhet som hitintills finns om strukturkalkningens uppmätta effekter på vattenkvalitet i Sverige.

I försöket vid Oxelby användes bränd kalk där allt kalcium föreligger som fria kalciumjoner. Andelen biprodukter i kalken var ca 8%. I försöket vid Viad användes blandprodukten Nordkalk aktiv struktur med ca 60% av kalciummängden i form av kalcium bundet i kalksten och 18% biprodukter (till största delen kisel- och aluminiumoxider enligt produktblad). Givornas storlek och tillförd mängd kalcium i förhållande till jordens lerinnehåll framgår av Tabell 1.

På Oxelbyfältet uppmättes signifikanta skillnader i fosforläckage (totalfosfor och partikelfosfor) under år 1-6 efter strukturkalkningen (Tabell 1) Utlakningen av partikelbunden fosfor minskade med 40%. Efter ytterligare tre års läckagemätningar och beräkningar för en längre tidsserie än vad som redovisas i Tabell 1 var skillnaderna inte längre signifikanta (Ulén m.fl., 2018). Läckaget utvärderades med en lokalt anpassad metod där avståndet till ett centralt dike sattes som s.k. fix faktor i den statistiska analysen. Dessutom användes en mer generell faktor (blixtnabbheten för flödesvariationerna), vilket gav samma resultat som den lokala faktorn (Ulén m.fl., 2018). Även i Viad-försöket erhöles signifikant skillnad i läckage under de två år mätningar pågick, men bara för fosfor i löst form, inte i partikelform (Tabell 1).

Lysimetrarna av okalkad matjord (20 cm djup) togs från Oxelbyfältet och behandlades med CaO eller Ca(OH)₂ varefter de utsattes för regnsimulering. För Oxelbylysimetrarna minskade mängden partikelbunden fosfor i avrinnande vatten med 70-80% efter kalktillsats (Tabell 1). Före regnsimuleringen återskapades den naturliga strukturen på jordytan i bästa möjliga mån genom upprepad fuktning-torkning av jordytan under ett halvårs tid för att få en naturlig infiltrationsyta. Inblandningen gjordes till ett par centimeters djup och koncentrationen fri kalk var därför hög i detta skikt. Resultaten från lysimeterstudien pekade i samma riktning som fältförsöket, men storleksmässigt skiljde sig läckaget jämfört med det som uppmättes i fält. Lysimetrarna från Viad togs direkt från de kalkade respektive icke kalkade försöksrutorna. Liksom i fältstudien var det endast läckaget av fosfatfosfor som minskade. Även här skiljde sig det relativa läckaget från resultaten i fält. Lysimeterförsöken omfattade bara matjorden och gjordes med regnsimulering på lab under några veckor medan fältstudien varade hela året. I dränerade rutförsök samlas också vattnet i dräneringsrör där det sker en naturlig interaktion med jorden i alven och med grundvattnet. Därför är det naturligt att resultaten skiljde sig åt.

Oxelbyfältet ingick i en studie av porssystemets egenskaper efter kalkning som utfördes av Bölscher m.fl. (2021), där prover för analys togs ut 9 år efter kalkningen. 11 år efter kalkningen mättes också jordens aggregatstabilitet. Två andra jordar från Ultuna (60% ler) ingick i samma studie, där tillfördes fria kalciumjoner motsvarande 0,06-0,08% av mängd lera (0,20% i Oxelbyförsöket) och där togs jordprov ut 2 år efter kalkning. Egenskaper hos porssystemet som undersöktes var bland annat porositet, porstorleksfördelning, specifik poryta och förbindelse mellan porer. För en av Ultunajordarna uppmättes ett flertal förändringar i porsystemets egenskaper men inte för den andra Ultunaleran eller för Oxelbyjorden. Tid som gått efter kalkning och kalkdos kan möjligtvis förklara de skillnader som uppmättes, se Bölscher m.fl. (2021).

Tabell 1. Kombinerade fält- och lysimeterförsök med mätning av fosforläckage.; Kalkprodukternas sammansättning, givor, givor i förhållande till lerhalt, m.m. och relativ utlakning av partikelbunden, fosfatfosfor och totalfosfor jämfört med kontroll, när skillnaderna var signifikanta ($p < 0,05$)

Försöksplats	Oxelby (Bornsjön)			Viad	
	Fält	Lysimeter	Lysimeter	Fält	Lysimeter
<i>Namn giva och applicering av kalkprodukt/kemikalier</i>					
Namn	Bränd kalk	(Rena kemikalier) CaO	Ca(OH) ₂	Nordkalk Aktiv Ca(OH) ₂ /CaCO ₃	Struktur
Vattenhalt (%)	< 1	0	0	25	25
Giva torr produkt (ton/ha)	5	5 ^a	5 ^a	8,3	8,3
Platsen för applicering	fält	lab.	lab.	fält	fält
Inblandningsdjup (cm)	23	2	2	23	23
<i>Giva av olika typer av kalk ingående i den rena kalkprodukten</i>					
Bränd kalk (ton ts/ha)	4,6	5	0	0	0
Släckt kalk (ton ts/ha)	0	0	5	1,9	1,9
Kalksten (ton ts/ha)	0	0	0	4,6 ^b	4,6 ^b
Fri Ca ²⁺ (ton/ha)	3,3	3,6	2,7	1,0	1,0
Bundet Ca (ton/ha)	0	0	0	1,9	1,9
<i>Tillfört kalcium som andel av mängd ler i inblandningsskiktet (%)^c</i>					
Fri Ca ²⁺	0,20	2,7	2,0	0,12	0,12
<i>Läckagemätning</i>					
Mätdjup av läckaget (m)	0,9	0,2	0,2	0,9	0,2
Mätperiod	2007-2013			2011-2013	
Mätperiod (år) efter applicering	1-6	0,5	0,5	0-2	2
<i>Fosforläckage relativt kontroll utan kalk</i>					
Partikelbunden fosfor (%)	-40**	-80**	-70**	-	-
Fosfatfosfor (%)	-	-	-	-50**	-20**
Totalfosfor (%)	-40**	-50**	-50**	-40**	-20**

^a Analysrena kemikalier användes

^b Endast andelen Ca(OH)₂ är mera exakt känd i detta försök

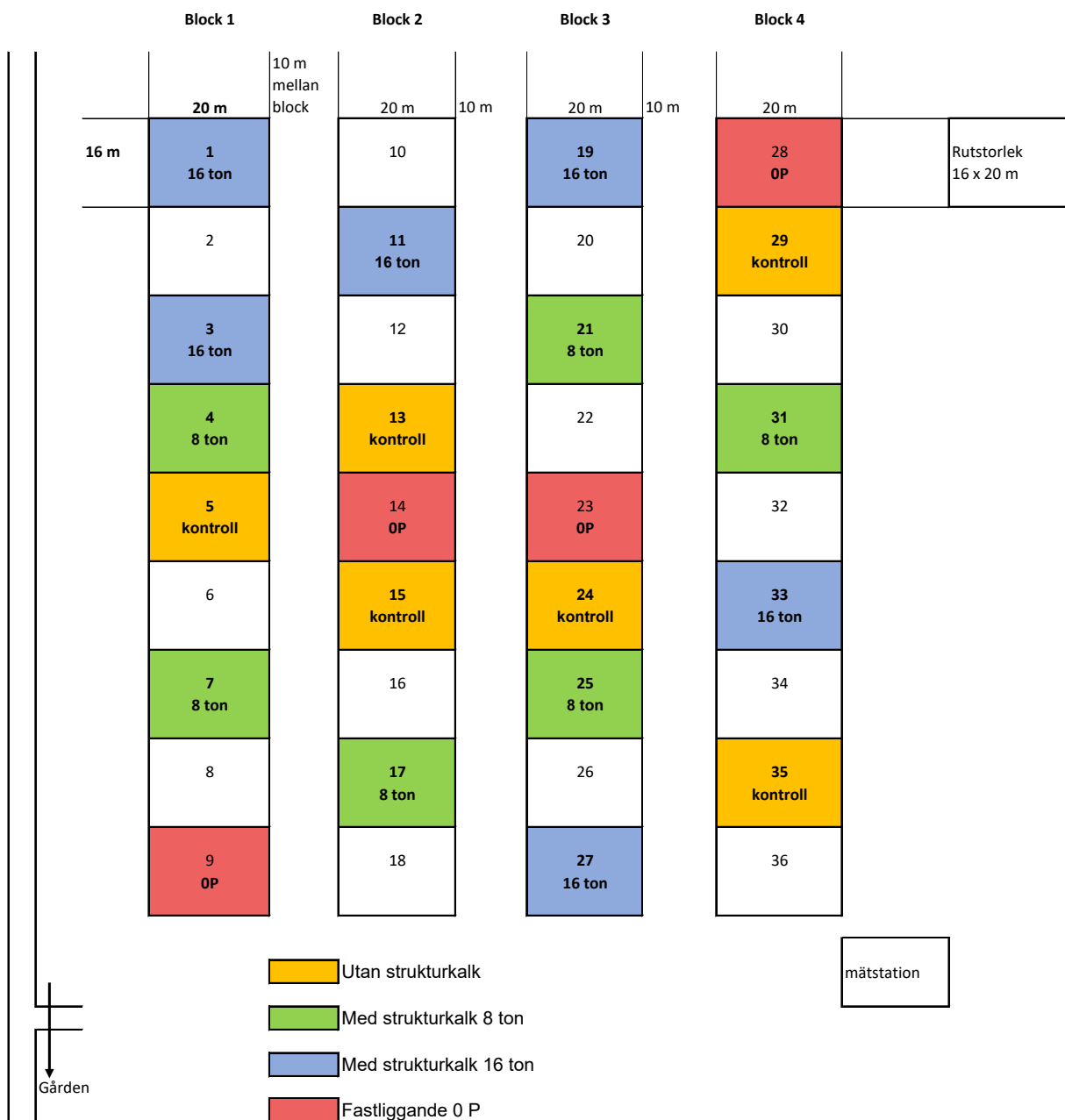
^c Matjordens skrymdensitet antogs vara 1500 kg/m³

** Signifikanta resultat ($p < 0,05$) (Ulén och Etana, 2014)

Metoder

Försökets upplägg och kalkgivor

Försöksfältet är beläget på Hushållningssällskapets försöksgård Lilla Böslid i Halland. I försöket studerades strukturkalkning med två olika givor i jämförelse med okalkad mark (kontroll), i ett försök med 6 upprepningar. Leden slumpades så att de var jämnt fördelade över hela fältet. På fältet fanns sedan tidigare fyra rutor som under lång tid inte gödslats med fosfor (röd färg), dessa rutor ingick ej i försöket, men en enklare utvärdering av skördenivå och jordens innehåll av fosfor presenteras i slutet av rapporten. Försöksfältet består av 36 specialdränerade rutor med arealen 16x20 m men endast 18 användes till försöket. Försöket kalkades i september 2018, varefter påverkan på utlakning studerades under drygt två utlakningssäsonger, fram till och med januari 2021.



Figur 1. Schematisk skiss över försöksfältet och försöksledens fördelning över fältet.

Strukturkalkningen utfördes 19 september 2018. När kalkningen utfördes var marken täckt av stubb från vårkorn. Kalkningen utfördes av Hushållningssällskapet Hallands Försöksavdelning på Lilla Böslid i samarbete med Nordkalk som tillhandahöll produkten och spridare. Direkt efter spridning av kalken djupkultiverades (15-18 cm djup) rutorna 4 gånger diagonalt över rutorna samt ytterligare 3 gånger dagen efter. Detta tillgodosåg att kalken blandades in och fördelades väl i matjorden, enligt gällande praxis vid strukturkalkning. Hela fältet plöjdes i början av december (20 cm djup).

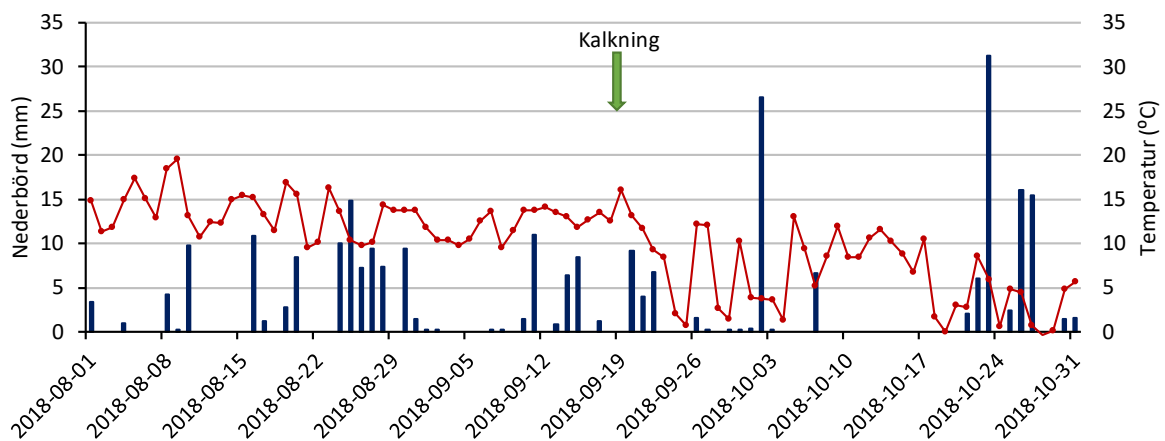
Det regnade en hel del under augusti (101 mm) vilket försenade planerad spridning av kalken. Under september fram till kalkning föll 30 mm men det var uppehåll i tre dagar före spridning. Efter spridningen kom 20 mm under de följande 3 dagarna (Figur 2). September var relativt kall, i medeltal 12°C, fram till kalkning och ingen värmeperiod inföll, men dagen för kalkning var varm och torr (Figur 2). Solinstrålningen var högre dagarna före kalkning samt kalkningsdagen än perioden före och efter (väderdata från LantMet).

Det är tre kemiska reaktioner av släckt, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och bränd kalk, CaO , som bidrar till bättre markstruktur (Berglund, 1971):

Basutbyte innebär i korthet, att joner bundna till lerpartiklarna går ut i markvätskan och byts ut mot Ca-joner från kalken. Lerpartiklarnas platta form binds ihop i en korthusliknande struktur i stället för parallellstrukturen som lätt kan röra sig i sidled och bidra till att marken upplevs smetig tillsammans med vattnet som är bundet till lerpartiklarna. Med de starkt laddade Ca-jonerna som bindemedel mellan lerpartiklarna bildas aggregat som kapslar in vattnet och jorden upplevs torrare trots att den faktiska vattenhalten är den samma som före kalkningen. Basutbyte är en snabb process som sker direkt efter att strukturkalken har blandats med jorden.

Puzzolanreaktionen förstärker effekten som basutbytet skapar genom att kalken förenar sig med markens aluminium- och kiselföreningar och bildar nya sammansättningar som i sin tur binder samman aggregaten ytterligare och gör dem starkare. Puzzolanreaktionen tar flera månader att åstadkomma och är därmed betydligt långsammare än basutbytet.

Även den tredje kemiska reaktionen, *murbruksbildning*, bidrar till att öka aggregatens storlek och stabilitet genom att kalciumkarbonat bildas mellan aggregaten när kalkens Ca-joner förenas med markluftens koldioxid.



Figur 2. Nederbörd (staplar) och temperatur (linje) på Lilla Böslid under perioden före och efter spridningen av strukturkalken (1 augusti-31 oktober 2018, data från LantMet).

I försöket användes två kalkgivor, 8 och 16 ton/ha av fuktig blandprodukt, Nordkalks Fostop struktur, Olshammar. Dessa givor inkluderade ett vatteninnehåll motsvarande 15-25% enligt produktbladets uppgifter (torrvikt 6 respektive 12 ton/ha). Nordkalk rekommendationer ligger på 6-10 ton/ha, med stigande giva för ökande lerhalt och Jordbruksverket rekommenderar 5-8 ton/ha beroende på typen av rena kalkkemikalier som ingår (Kvarmo m.fl., 2020). Dessa rekommendationer gäller torr produkt.

Vid beskrivning av givor i mängd ton/ha har det betydelse om man avser fuktig eller torr produkt. Likaså är det av betydelse i vilken proportion de olika kalkkemikalierna ingår. Det är mängden fria kalciumjoner (Ca^{2+}) från den brända och släckta kalken som genererar en snabb pH-ökning och struktureffekt, medan kalciumet i kalkstenen endast löser upp sig långsamt och inte bidrar nämnvärt till struktureffekten (bundet Ca). Därför är det givan av fria kalciumjoner som har betydelse, och det uttrycks ofta som "aktiv CaO". Nordkalks Fostop struktur innehåller 20% aktiv CaO vilket motsvarar 14% fria kalciumjoner. Däremot kan andelen av bränd och släckt kalk samt kalksten variera mellan olika blandningstillfällen och i försöket är proportionerna mellan kalkslagen inte känt. Med en vattenhalt på 20% tillför givan på 8 ton 0,9 ton fri Ca^{2+} /ha och givan på 16 ton 1,8 ton fri Ca^{2+} /ha.

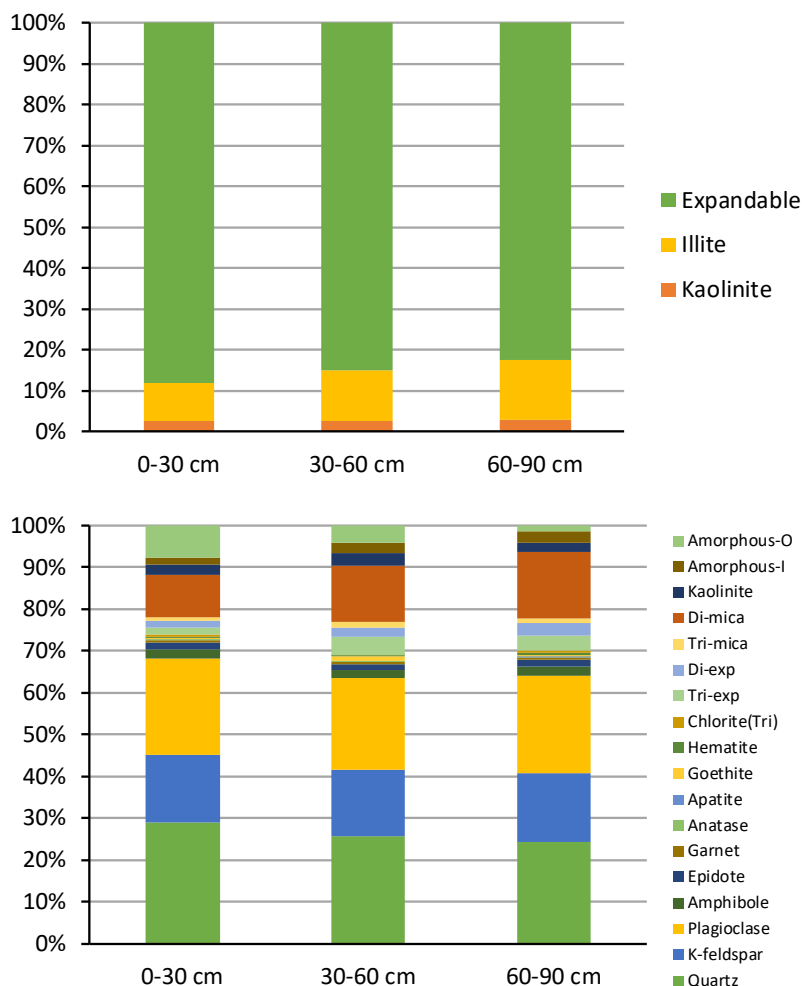
Kalkprodukterna innehåller också olika grad av andra ämnen, t.ex. kvarts som kommit med vid malning av kalkmaterialet, vilket påverkar förhållandet mellan aktiva beståndsdelar och totalvikt. Enligt beräkningar utifrån produktblad från Nordkalk kan biprodukterna utgöra upp till 18% av torrvikten. Kalken innehåller även små mängder av tungmetaller men mängden är försumbar vid dessa givor.

Jordart, markkartering och mineralogi

Jordarten på försöksfältet är en mellanlera med 29 % lerhalt i matjorden (0-30 cm), 37 % lerhalt i övre alven (30-60 cm) och 40 % lerhalt i nedre alven (60-90 cm) (Tabell 2). Övriga kornstorlekar domineras av mo och mjäla i matjord och alv. Mullhalten var 3,2 % i matjorden och nära noll i alven. Jorden var i P-AL klass III. Markkartering utfördes rutvis 2018 innan försöket började (medelvärden för de 18 rutorna i tabell 6). Lerfraktionerna domineras av svällande mineral (expandable) och med innehåll främst av kvarts, plagioklas, kaliumfältspat och glimmer (Figur 3).

Tabell 2. Kornstorleksfördelning, mullhalt och pH på försöksplatsen samt jordens innehåll av näringsämnen vid markkartering 2018, medelvärden för alla rutor. Variationen (min-max) mellan rutorna anges inom parentes

Djup cm	Ler	Silt %	Sand	Mullhalt %	pH	Tot-C %	Tot-N %	P-AL	K-AL mg/100 g	P-HCl	K-HCl
0-30	29 (26-33)	43	28	3,2	6,6	2,0	0,2	4,4 (3,2-6,0)	12	50	229
30-60	37 (30-41)	42	22	0,5							
60-90	40 (36-46)	45	15	0							



Figur 3. Lerfraktioner och lermineral i jorden (medelvärde från ruta 5 och 15). Källa: Magnus Simonsson, opublicerat material.

Utlakning

Utlakningsmätningarna påbörjades så fort avrinningen kom igång efter strukturkalkningen hösten 2018 och pågick sedan över två vintrar, och fram till och med januari 2021. Dräneringsvattnet från varje enskild ruta leddes via ett dräneringsrör till mätstationen i nedre högra hörnet av försöksfältet (Figur 1). Där gjordes kontinuerlig mätning av vattenflödet med hjälp av vippkärl med givare kopplade till en datalogger. Vattenprover togs flödesproportionerligt och samlades i glasflaskor. Samlingsproven tömdes varannan vecka och skickades till vattenanalyslabbet på institutionen för vatten och miljö (SLU) där koncentrationen av totalfosfor (tot-P), fosfatfosfor ($\text{PO}_4\text{-P}$, löst fosfor), totalkväve (tot-N) och turbiditet (se nedan) bestämdes. Analyser av totalfosfor och totalkväve utfördes på ofiltrerade prov efter oxidation. Fosfatfosfor bestämdes på filtrerat prov ($0,2\ \mu\text{m}$) med samma metod som för totalfosforanalys (kolorimetriskt). Differensen mellan totalfosfor och fosfatfosfor användes som en uppskattning av partikelbunden fosfor eftersom mängden löst organiskt fosfor normalt är låg i vatten från lerjordar. För utlakningsberäkning användes de uppmätta koncentrationerna vid ett provtagningstillfälle för alla dygn mellan föregående provtagning och den aktuella provtagningdagen, d.v.s. för den tid som provet samlats i provtagningsflaskan. Dygnskoncentrationerna multiplicerades med dygnsavrinningarna för att beräkna dygnstransporter som därefter summerades till månads- eller årstransporter. Årsvärden avser perioden 1 september – 31 augusti. Flödesvägda månads- eller årsmedelhalter räknades fram genom att dividera månads- eller årstransporten med månads- eller årsavrinningen. Månads- och årsmedelvärden för turbiditet i dräneringsvattnet räknades ut genom att ta medelvärdet för alla mätvärden under månaden respektive året.



Figur 4. Bilden till vänster visar mätstationen där dräneringsrör från varje separat ruta inkommer. Flödet bestämdes kontinuerligt med vippkärl kopplade till en datalogger, som även styrde provtagningen (även bild ovan). Vattenprov togs och samlades i glasflaskor i proportion till avrunnen mängd dräneringsvatten, varefter analys gjordes av samlingsprovet var 14:de dag. Mätstationen är delvis under jord och håller därför låg temperatur även under sommaren.

Aggregatens stabilitet och övriga markanalyser

Jordprover för test av aggregatstabiliteten togs efter uppkomst av vårkorn våren 2019 och direkt efter sådd men före uppkomst våren 2020. Jord från det översta lagret sållades för att få fram 1,5 liter jord i aggregatklassen 2-5 mm. Eventuellt växtmaterial togs bort. Jordproverna torkades sedan i 35 °C innan de utsattes för simulerat regn. 200 g av jorden vägdes upp i (orange) burkar med nät (2 mm) i botten där vatten kan rinna igenom. Dessa burkar placerades ovanpå (vita) burkar avsedda att samla upp vatten. De två burkarna sattes sedan i regnsimulatorens och utsattes för regn under 1 timme. Alla 18 prover behandlades samtidigt. Sprinklerrampen var 50 cm över burkarna. Efter den första regnsimuleringen täcktes burkarna så att aggregaten inte skulle torka. Efter ett dygn hölls det avrunna vattnet upp i flaskor (vitt lock) som sedan användes för att analysera elektrisk konduktivitet (EC) och turbiditet. Sedan startades regnsimulering nummer två där proverna återigen utsattes för 1 timmes regn för att sedan stå i ett dygn innan det avrunna vattnet kunde analyseras. Inför analys av EC och turbiditet skakades vattenproverna i 10 minuter för att få ett homogent prov. Sedan fick vattenproverna vila i 4,5 timmar innan analys. Analysen av EC och turbiditet gjordes enligt standardmetoder. Från varje jordprov finns således två mätvärden, ett för varje regnsimulering, samt upprepning för de två åren.



Figur 5. Prover av sållad jord i aggregatklassen 2-5 mm från de 18 rutorna.



Figur 6. Bilden till vänster visar regnsimulatorens med de 18 jordproverna. De högra bilderna visar flaskorna som innehöll det avrunna vattnet efter regnsimuleringen (överst) och apparaturen för mätning av elektrisk konduktivitet (nederst).

Turbiditet är ett mått på grumligheten i vattenprovet och mäts i NTU, Nephelometric turbidity unit. Ett högt NTU-värde betyder att vattnet innehåller en stor mängd partiklar och kan därför vara ett billigt och enkelt mått på aggregatens stabilitet då det visar hur mycket partiklar som potentiellt kan frigöras från jorden och föras bort med det utlakade vattnet. Turbiditet har ett nära samband med partikulärt fosfor (Etana m.fl., 2009) d.v.s. högre turbiditet betyder högre halt partikulärt fosfor i vattenprovet. *Elektrisk konduktivitet (EC)* är ett mått på vattenprovets specifika ledningsförmåga och beror av dess innehåll av lösta joner. Det mäts i $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hög konduktivitet kan indikera att vattnet innehåller mycket lösta joner t.ex. från mineralgödsel i jordprovet eller från Ca-joner från strukturkalken.

I samband med uttaget av jordprover till aggregatstabilitet togs även matjordsprover (0-20 cm) ut för analys av pH, Ca-AL och EC. Jorden lufttorkades och maldes till <2 mm storlek innan extraktion med vatten och analys. För bestämning av pH blandades jorden med vatten till en suspension i volymproportionen 1:5 och skakades i 15 min. innan analys. Den elektriska konduktiviteten bestämdes i samma vattenlösning efter skakning i 30 min. för att sedan filtreras (Munktell 00A) innan analys med konduktivetsmätare MU 6100 L (pHenomenal, VWR) och konduktivetscell CO 11 (pHenomenal, VWR). Ca-AL bestämdes genom att blanda jord och AL-lösning (ammoniumlaktat/ättiksyra lösning) som sedan skakades i 90 min. innan filtrering (Munktell 00A) och analys med ICP/OES (Avio200, Perkin Elmer, USA).

Skördar

Vårkorn odlades på fältet 2018-2020. Grödan och fältet har dessa år skötts enligt normal jordbrukspraxis för regionen. Gödsling av grödan var lika för alla rutor, 110 kg N/ha och 20 kg P/ha, lagt som en giva i samband med sådd. Kärnskornden bestämdes försöksmässigt (3 tröskdrag per ruta) och kärnans innehåll av fosfor och kväve analyserades.

Statistik

Skillnaden mellan leden och mellan block vad avsåg skördar, utlakning och jordegenskaper testades (var för sig) med en one-way ANOVA och i de fall det fanns skillnader användes Tukey's test för att visa på dem ($p < 0,05$, $n=6$). All data var normalfördelad vilket undersöktes med ett Ryan-Joiner test. Samband mellan parametrar testades med regressionsanalys ($p < 0,05$).



Figur 7. Försöksfältet med den delvis nedgrävda mätstationen i nedre högra hörnet av fältet.

Resultat och Diskussion

Leran i jorden påverkar de strukturförbättrande reaktionerna och är alltså avgörande för kalkens struktureffekt. Markens lerhalt på 29 % (varierade mellan 26-33% över fältet) bedömdes som tillräckligt hög för att ge effekt av strukturkalken.

Jordens mineralinnehåll kan också vara en nyckelfaktor till om strukturkalken lyckas förbättra markstrukturen och minska förlusterna av fosfor. Svällande mineral (t.ex. vermikulit) tycks fungera sämre än icke-svällande mineral såsom illit. Lermineralen på försöksfältet består till största delen av svällande fraktioner (Figur 3) och kan därför möjligen minska effekten av strukturkalken.

Med en antagen matjordensdensitet på 1500 kg/m^3 och ett inblandningsdjup på 20 cm efter plöjningen så skulle mängden fria kalciumjoner utgöra 0,03% av jordens vikt vid givan 8 ton/ha och 0,06% vid givan 16 ton/ha. Uttryckt som andel av mängden lera inom 20 cm djup skulle det innebära 0,10 respektive 0,21% fria kalciumjoner vid lerhalt på 29%, vilket kan jämföras med tidigare fältförsök i Tabell 1. I försöket vid Oxelby, där man fick tydlig effekt av strukturkalkningen tillfördes 0,20%. I försöken beskrivna i Bölscher m.fl. (2021), konstaterades att en kalciummängd motsvarande 0,06% av mängden ler var för lågt, men 0,08% tillräckligt för att få struktureffekt. Alltså skulle den tillförda kalkmängden i det här försöket sannolikt vara tillräckligt för att ge effekt på aggregatstabilitet.



Figur 8. Strukturkalkad jord en frostig dag i november 2018.

Avrinning och utlakning

Allmänt om avrinning och utlakningsförhållanden

Odlingsåret 2018 går till historien som ett år med mycket låga skördar på grund av torka. I Halland började det efter lång tid av torka att regna i början av augusti varvid vattenmängderna i marken fylldes på. Avrinningen i dräneringssystemet kom igång i mitten av oktober (Figur 9). Avrinningen under utlakningssäsongen 1 september 2018 – 31 augusti 2019 var i medeltal 335 mm och under 1 september 2019 – 31 augusti 2020 i medeltal 566 mm. Årsnederbörden var något större det andra året och framförallt var den större under höst och vinter.

Avrinningsmängder och mängd utlakat kväve uppvisar vanligen ett tydligt samband, där stor avrinning ger stor kväveutlakning, d.v.s. mängden vatten som flödar genom marken har en stor inverkan. I försöket var emellertid kväveutlakningen större under den första utlakningssäsongen efter kalkning, som hade lägst avrinning (Figur 9). Halterna av kväve i dräneringsvattnet var höga, troligen på grund av stora restkvävemängder i marken efter en låg skörd (mättes ej). Medelhalterna av totalkväve i dräneringsvattnet var 21-23 mg/l under 2018/2019, vilket resulterade i en årlig kväveutlakning på i medeltal 74 kg/ha. Under 2019/2020 låg halterna på 6-7 mg/l med medelutlakning 39 kg/ha.

Fosforutlakningen var, till skillnad mot kväveutlakningen, däremot lägst under den första utlakningssäsongen efter kalkning (Figur 9). Att man inte såg samma effekt som för kväve efter en dålig skörd var inte oväntat eftersom fosfatfosfor inte ansamlas i markvätskan på samma sätt som mineralkväve gör. Årsutlakningen av totalfosfor var i medeltal 0,2-0,4 kg/ha under 2018/2019 och 1,1-

1,9 kg/ha under 2019/2020. Medelhalten av totalfosfor var 0,10 mg/l under 2018/2019 och 0,24 mg/l under 2019/2020.

Värdena för turbiditet, vattnets grumlighet, var mer än dubbelt så höga under det andra året (Figur 10). En större vattengenomströmning i marken ledde till större transport av partiklar. Det fanns ett linjärt samband mellan turbiditet och totalfosfor ($p < 0,001$). Andelen av fosforförlusterna som utgjordes av partikelbunden fosfor (differensen mellan totalfosfor och fosfatfosfor) utgjorde 82% av mängden totalfosfor under 2018/2019 och 88% under 2019/2020.

Det undersöktes om fosforhalt i marken påverkade utlakningen av fosfor. Det fanns inget samband mellan P-AL-tal i rutorna och utlakning av totalfosfor från rutorna ($p > 0,05$) däremot för halten totalfosfor år 2019/2020 ($p = 0,015$) men inte för år 2018/2019.

På samma försöksplats mättes utlakning under åren 2010-2012 (Aronsson m.fl., 2014), och dessa år var avrinningen ca 400 mm, det vill säga något större än under 2018/2019. I ett försöksled med vårsäd och tillförsel av svinflytgödsel på våren var fosforhalterna i dräneringsvattnet 0,09-0,16 mg/l vilket var jämförbart med 2018/2019. Mängden utlakad fosfor var under 2010-2012 lika eller något större än under 2018/2019 (0,4-0,6 kg/ha). Det var emellertid mycket lägre än de nästan 2 kg/ha som uppmättes under 2019/2020. Kvävehalterna låg under de tidigare försöksåren på 4-6 mg/l. Nivåerna hos kväveutlakningen var betydligt lägre (14-22 kg/ha) än under 2018-2020.

För en jämförelse användes resultat från utlakningsförsöket vid Lönnstorp's försöksplats strax norr om Malmö. Jorden där har en lerhalt på ca 25% (moränlera), och även där odlades vårstråsäd under 2018-2020 (opublicerat). Även där blev kväveutlakningen mycket stor och likartad som på Lilla Böslid, ca 78 kg/ha under 2018/2019. Totalfosforhalter i dräneringsvattnet (0,01 mg/l) och utlakning (0,01 kg/ha) var däremot betydligt lägre på Lönnstorp. Motsvarande värden för 2019/2020 på Lönnstorp var 0,006 mg/l och 0,01 kg/ha för totalfosfor och kväveutlakningen var 30 kg/ha. På Lönnstorp fanns alltså inga tendenser till ökad fosfortransport under hösten och vintern 2019/2020 som på Lilla Böslid, utan fosforutlakningen låg stabilt på låga nivåer.

Skillnader mellan behandlingar

Effekten av strukturkalkning följdes under två år med väldigt olika utlakningsförhållanden. Under de två utlakningssäsonger som följde på strukturkalkningen representerade den första säsongen utlakningsförhållanden för fosfor som var liknande tidigare försökserfarenheter på platsen. Under den andra säsongen efter strukturkalkningen var utlakningen betydligt mer omfattande, där också turbiditeten och koncentrationen av totalfosfor i dräneringsvattnet visade en kraftigare dynamik och högre värden, Figur 9. Det är så det kan se ut på lerjordar när avrinningen ökar kraftigt under höst och vinter. På liknande sätt har även lerjorden vid Lanna visat sig ge kraftiga ökning av fosforutlakningen i sådana situationer (Aronsson, m.fl., 2018).

Under den första hösten, vintern och våren efter strukturkalkningen var skillnaderna i fosforhalter små mellan försöksleden (Figur 9). Kalkning med 8 ton/ha hade högre totalfosforhalter, och det fanns alltså inga tendenser till att strukturkalkning skulle minska fosforutlakningen. För årsvärden eller månadsvärden av koncentrationer och utlakning fanns inga signifikanta skillnader.

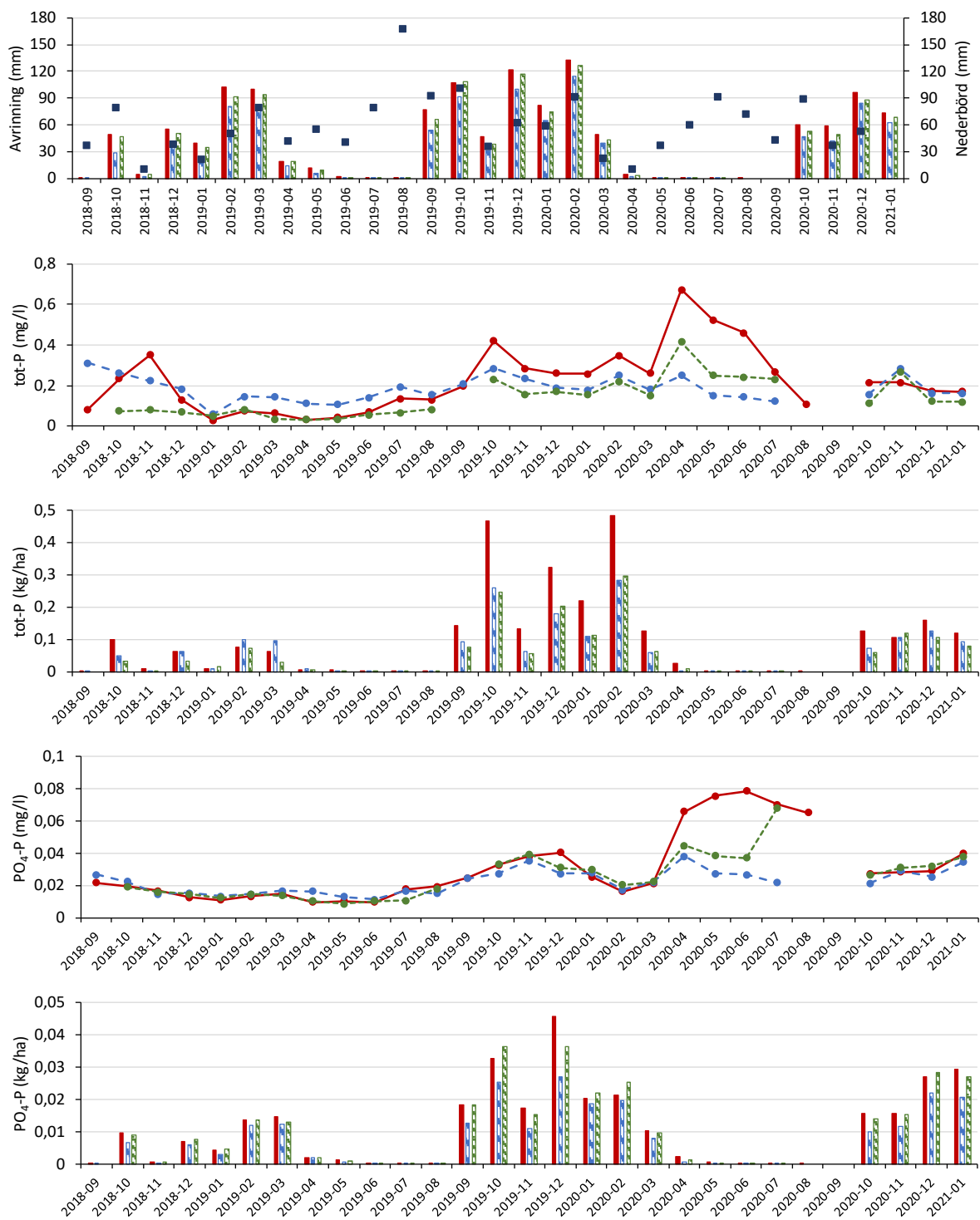
Avrinningen skilde sig däremot åt mellan försöksleden, där medelvärdet för ledet med strukturkalk 8 ton/ha var lägre än för de andra leden båda åren, för 2018/2019 var det signifikant lägre (Figur 10). Troligen berodde detta på skillnader i avrinning mellan de olika försöksrutorna och inte på kalkningsbehandlingarna. En genomgång av avrinningsmätningar mellan 2010/2011-2017/2018 visade att de rutor som ingick i strukturkalk 8 ton/ha hade ca 10% lägre avrinning än rutorna i kontrolledet.

För den andra utlakningssäsongen framträdde ett mönster hos halter och utlakning av totalfosfor med månadshalter i de kalkade leden som låg mer eller mindre konstant högre än kontrollrutorna (Figur 9). Det fanns emellertid inga signifikanta skillnader i halter och utlakning av totalfosfor eller totalfosforfosfatfosfor för månads- eller årsvärden, och inte heller för turbiditeten, trots att årsmedelvärdena var lägre i kalkade led. Den uppmätta årsutlakningen (1 sep 2019-31 aug 2020) av totalfosfor var 1,9 kg/ha i kontrolledet och 1,1 kg/ha i de kalkade leden. Årsmedelkoncentrationerna (1 sep 2019-31 aug 2020) av totalfosfor var 0,30 mg/l i kontrollen, 0,22 mg/l i ledet med 8 ton strukturkalk och 0,19 mg/l för det med 16 ton/ha.

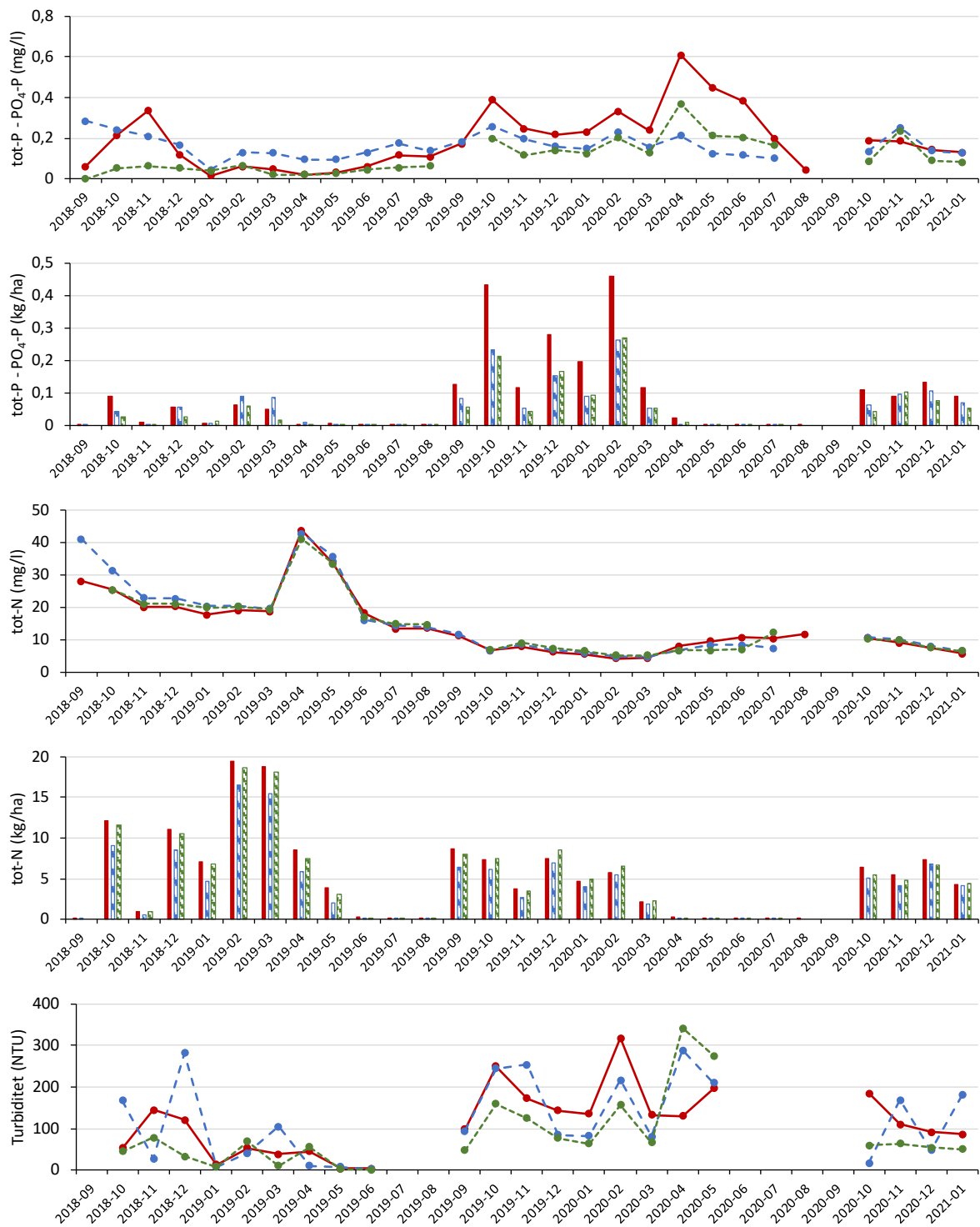
För fosfatfosfor (som utgjorde 12% av fosforförlusterna) var årsutlakningen 2019/2020 signifikant lägre i ledet med strukturkalk 8 ton/ha än i okalkat led och det fanns signifikanta skillnader vid två månadstillfällen (Figur 9 och 10). Detta var i september och december 2019 när kontrolledet hade signifikant högre fosfatfosforutlakning, vilket främst berodde på avrinningsskillnader. De höga halterna fosfatfosfor i kontrolledet våren 2020 sammanföll med mycket låg avrinning och påverkade därför inte utlakningen. De högre fosfatfosforkoncentrationerna i okalkat led under senvår 2020 representerade en mycket liten avrinning och betydde i stort sett inget för kvantiteten som utlakades.

I och med att resultaten visade på en tydlig påverkan av strukturkalkningen under det andra året efter kalkning fortsatte mätningarna även under höst och över vinter 2020/2021 (Figur 9). Skillnaderna var då mycket små mellan försöksleden.

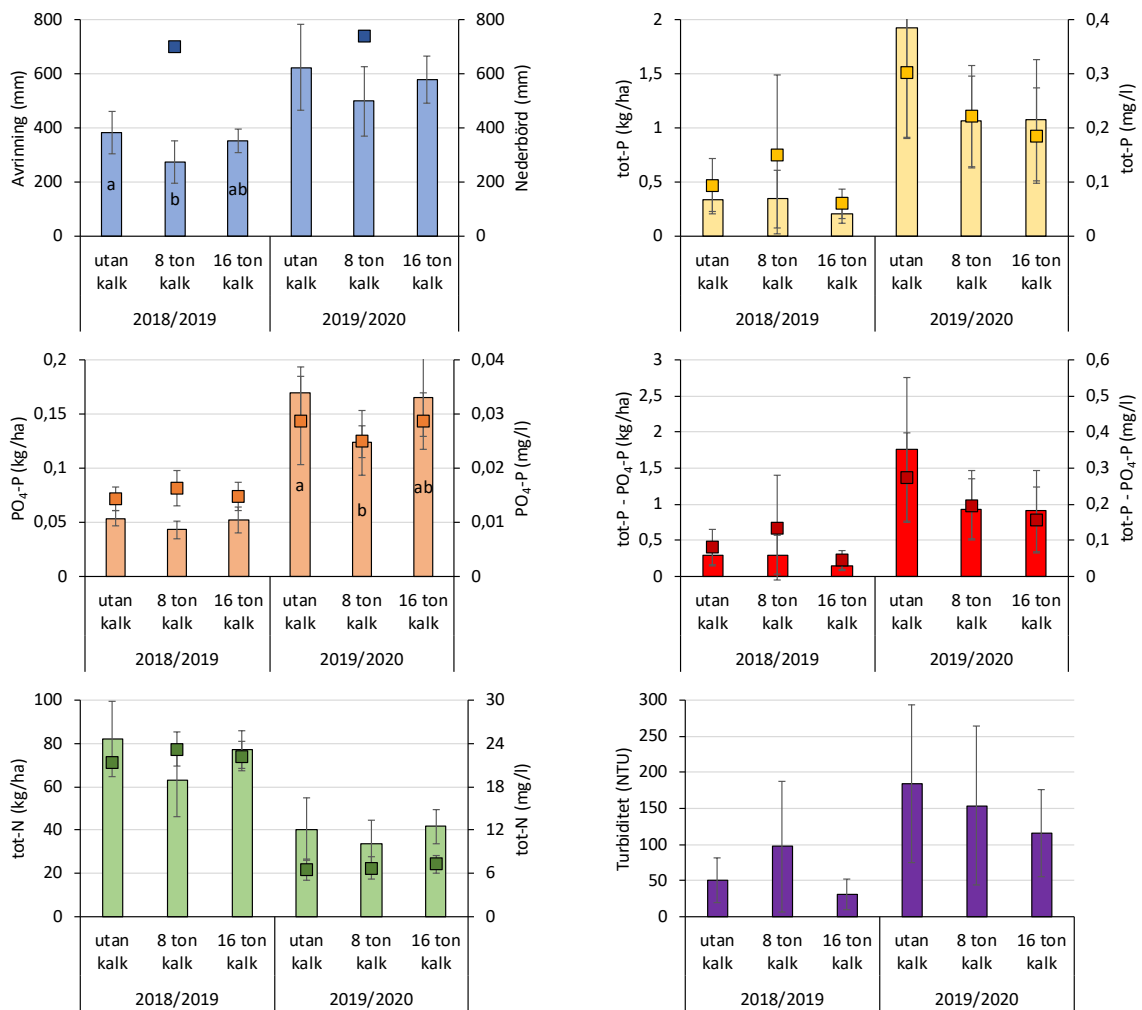
För kväve låg leden mycket lika under hela perioden, utan tendens till effekt av strukturkalkning.



Figur 9 fortsätter på nästa sida.



Figur 9. Månadsmedelhalter (punkter) och månadsmedeltransporter (staplar) för tot-P, PO₄-P, tot-P – PO₄-P, tot-N och turbiditet samt månadsavrinning (staplar) för de två kalkgivorna, 8 (blå, lång streckad) och 16 ton (grön, kort streckad), och kontrolledet utan kalk (röd, fylld).



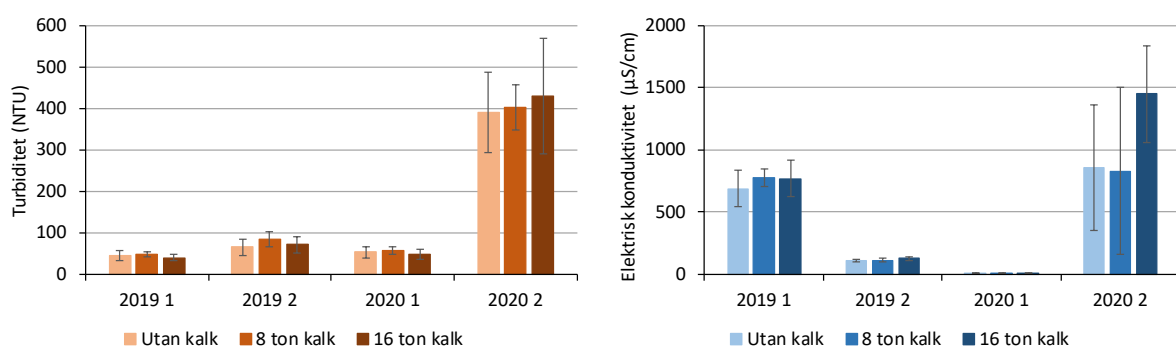
Figur 10. Årsmedelhalter (punkter) och årsmedeltransporter (staplar) för tot-P, PO₄-P, tot-P – PO₄-P, tot-N och turbiditet samt årsnederbörd (punkter) och årsavrinning (staplar) för de två kalkgivorna, 8 och 16 ton, och kontrolledet utan kalk. Olika prefixbokstäver betyder statistiskt signifikant skillnad ($p < 0,05$, $n=6$).

Aggregatens stabilitet och övriga markanalyser

Resultatet från testet av aggregatens stabilitet med regnsimulering visade inga skillnader mellan de två kalkgivorna, 8 och 16 ton, eller kontrolledet utan kalk, varken för mätningen av turbiditet eller för elektrisk konduktivitet hos det avrinnande vattnet (Figur 11). Ett högt värde på turbiditet tyder på att aggregaten hade fallit isär och lösgjort partiklar d.v.s. stabiliteten var låg. Eftersom det inte var några skillnader i hur mycket aggregaten hade sönderdelats av regnet mellan de tre leden så kan det tyda på att strukturkalken inte gett förväntade förbättringar eller att aggregaten var stabila redan innan kalkning – jorden här är strukturbildande i sig själv. Den omfattande utlakningen av partikelbunden fosfor under andra året tyder dock på att så inte var fallet. En annan orsak kan vara att aggregaten hade torkats och lagrats under relativt lång tid och därmed stabiliserats i alla led, vilket utjämnat skillnader mellan leden. Regnsimuleringen bidrog till att aggregaten föll isär mer till andra mätningen, längre tid i blött tillstånd bidrog till att lösa upp aggregaten. Att det var stor skillnad mellan åren kan bero på att regnsimuleringen av jorden skedde flera månader efter provtagning första året och endast någon månad efter provtagning andra året. Vid långvarig förvaring hinner aggregaten torka och stabilisera sig i högre utsträckning.

Värdet på den elektriska konduktiviteten var vid två tillfällen mycket högt och det berodde troligen på att försöket gödslades i samband med sådd d.v.s. strax innan jordprovtagningen (Figur 11). Anledning till att EC värdena var högre vid första regntillfället första året men högre vid andra regntillfället det andra året berodde troligen på att under det första året hade gödselkornen hunnit lösa upp sig på fältet eftersom provtagningen skedde ett par veckor efter gödsling. Under det andra året däremot var gödselkornen nya och hade inte löst upp sig på fältet och därför tog det troligen två regntillfällen för gödselkornen att lösas upp.

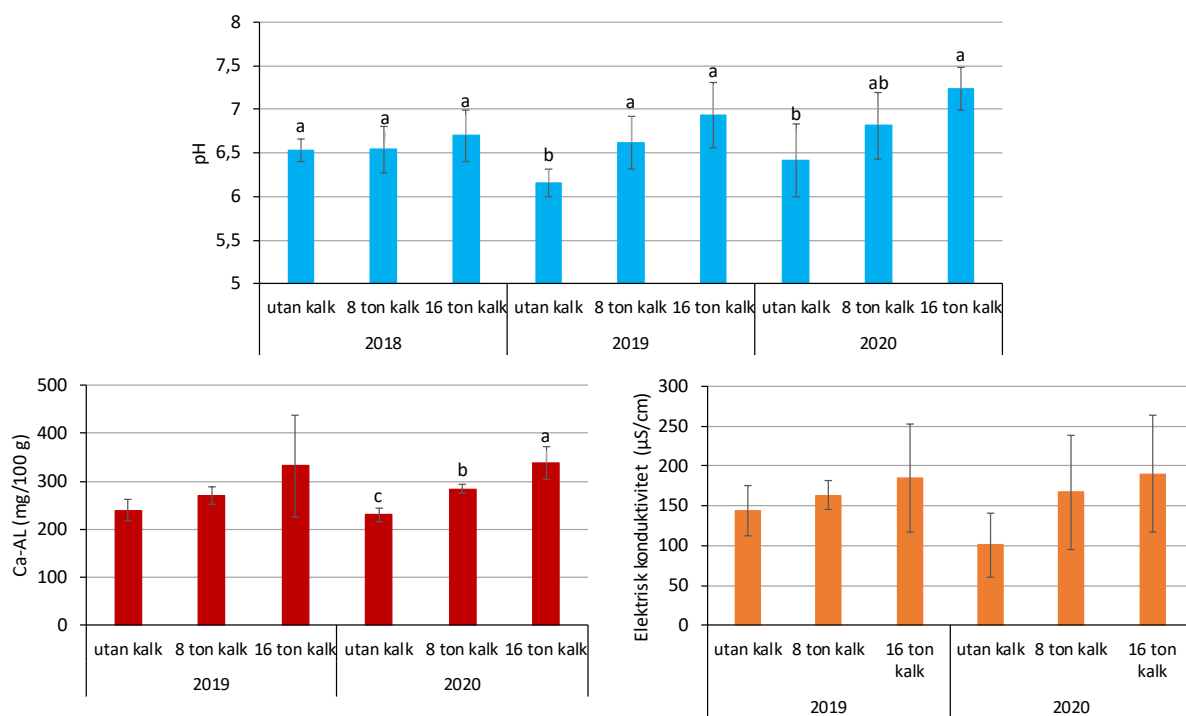
En effekt av höstplöjning efter strukturkalkning kan vara att plöjningen vänder upp okalkad jord och att aggregatstrukturen i översta lagret som provtas inte är kalkpåverkad. Vid nästa plöjning vänds sedan kalkjorden upp igen. Därför är det viktigt att det är liten skillnad mellan kultiveringsdjupet vid nedbrukningen av kalken i förhållande till plöjningsdjupet. I detta försök var skillnaden liten och torde inte haft någon påverkan på aggregatproverna eftersom kalken inblandades väl.



Figur 11. Turbiditet (NTU) och elektrisk konduktivitet ($\mu\text{S}/\text{cm}$) från utlakningsvattnet efter första (1) och andra (2) regnsimuleringen år 2019 och 2020 för de två kalkgivorna, 8 och 16 ton, samt kontrolledet utan kalk. Det fanns inga statistiskt signifikanta skillnader mellan leden ($p < 0,05$, $n=6$).

Resultatet från provtagningen av matjord våren 2019 och 2020 visade att pH höjts till följd av kalkningen (Figur 12). pH-värdet var högre med givorna 8 och 16 ton kalk/ha i jämförelse med utan kalk första året. Det andra året var skillnaden signifikant endast för den högsta kalkgivan. Figur 12 visar också att pH-värdet kan variera mellan år då ledet utan strukturkalk hade högre pH året innan försöket börjat (2018) än de följande åren, skillnaden var dock inte statistiskt signifikant. pH-värdet för ledet med högsta kalkgivan var något högre före försökets start i jämförelse med de andra, vilket kan betyda att pH värdet de följande åren blev något överskattat.

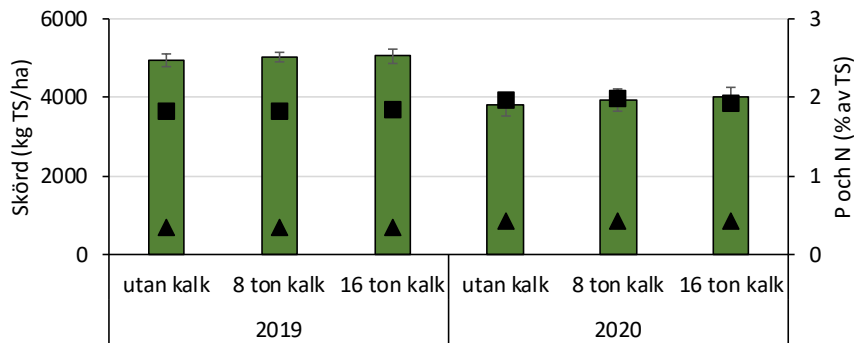
Kalken har tillfört stora mängder Ca-joner till marken och detta förväntas att återspeglas i högre Ca-AL och värden för elektrisk konduktivitet i de kalkade leden. För Ca-AL analysen var detta synligt med statistisk signifikans först den andra våren efter kalkning även om en tendens fanns där redan första våren efter kalkning (Figur 12). Även den elektriska konduktiviteten uppvisade samma trend första våren, och andra våren efter kalkning var skillnaden mellan de kalkade leden och kontrolledet ännu större, men ej statistiskt signifikant (Figur 12).



Figur 12. pH, Ca-AL (mg/100 g) och elektrisk konduktivitet (µS/cm) från matjorden (0-20 cm) för de två kalkgivorna 8 och 16 ton/ha samt kontrolledet utan kalk för år 2019 och 2020. För pH finns även värden från 2018. Olika prefixbokstäver betyder statistisk signifikant skillnad mellan leden ($p < 0,05$, $n = 6$)

Skördar

Skörden av vårkorn 2019 var i medeltal i försöket 4888 kg/ha, vilket var nära medelskörden för Hallands län det året (4960 kg/ha) medan skörden 2020 (3789 kg/ha) var lägre än normalt för området (4690 kg/ha, Jordbruksverkets statistikdatabas). Resultatet från skördemätningen visar att kalkningen inte påverkade skörden eller vårkornets innehåll av P och N. Däremot fanns en tendens till högre skörd med ökande kalkgiva (Figur 13). Blomquist m.fl. (2018) såg varierande skörderespons av strukturkalkning, ibland blev skörden lägre med strukturkalk jämfört med kontrolledet utan strukturkalk.



Figur 13. Skörd av vårkorn (kg TS/ha, staplar) och kärnans innehåll av P och N (% av TS, trianglar respektive kvadrater) år 2019 och 2020 för de två kalkgivorna 8 och 16 ton/ha samt kontrolledet utan kalk. Det finns inga statistiskt signifikanta skillnader mellan leden ($p < 0,05$, $n=6$).

Sammanfattande diskussion

Utlakningsmätningarna från de 18 separat dränerade rutorna kunde inte påvisa signifikanta skillnader mellan de två kalkade leden och det okalkade kontrolledet. Däremot fanns det en tydlig trend att halter och utlakning av totalfosfor var konsekvent lägre i kalkade led under det andra året efter kalkning. Mönstret var även tydligt för differensen mellan totalfosfor och fosfatfosfor, vilket tyder på att det var särskilt partikelbunden fosfor som minskade. Jorden utsattes för större avrinning under höst, vinter och vår 2019/2020 (565 mm sep-april) jämfört med 2018/2019 (325 mm) till följd av stor nederbörd, framförallt under hösten 2019. Detta ledde till en omfattande partikeltransport. Utlakningen av totalfosfor i kontrolledet på 1,9 kg/ha under 2019/2020 var omfattande med svenska mått mätt. Det kan tolkas som att det var först under större påverkan och påfrestning av genomströmmande vatten som strukturkalkningen gav effekt genom minskad partikeltransport. Kalkens strukturskapande processer kan också ha varit långsamma och inte nått sin fulla potential förrän under det andra året.

Enligt mätningarna var utlakningen av totalfosfor i de kalkade leden ca 40% lägre än i kontrolledet 2019/2020, men det var alltså väldigt stor variation mellan de sex replikerade rutorna i respektive led och inte signifikanta skillnader. Årsmedelkoncentrationer av totalfosfor var ca 30% lägre i de kalkade leden 2019/2020. Det fanns inget som tydde på att en kalkgiva på 16 ton/ha skulle ge bättre resultat än en giva på 8 ton/ha för denna jord med 29% lera. För jordar med högre lerhalt är det inte osannolikt att det kan krävas högre givor än 8 ton/ha.

Att kvävehalterna låg stabilt och lika mellan leden förstärkte bilden av att behandlingarna påverkade just fosfortransporten. Kalkningen verkade inte ha påverkat kväveomsättningen i marken, t.ex. genom ökad mineralisering, i sådan omfattning att det gav utslag på kväveläckaget. Resultatet visar tydligt hur stor variation fosforutlakningen har över ett fält (till skillnad från kväveutlakningen) och hur stora krav det ställer på studier för att visa på skillnader. I denna studie med hela 6 replikat och noggranna mätningar gick det inte att säkerställa de observerade skillnaderna. Lerhalten var relativt jämn över fältet och skillnader i rutornas fosforinnehåll verkade inte påverka utlakningen av fosfor.

I de två utlakningsförsöken Oxelby och Viad, har man fått effekt av strukturkalkning, men på olika fosforfraktioner. För Oxelbyfältet (59% ler) minskade förlusterna av partikelbunden fosfor med 40% medan utlakningen av fosfatfosfor minskade med 50% från fältet vid Viad (26% ler) utan effekt på partikelförlusterna. Försöksresultaten från Oxelby tyder också på att effekten av strukturkalkning klingar av efter några år. Efter 6 år fanns ingen läckagereduktion kvar och mätningar av jordegenskaper efter 9 år visade inte på några skillnader mellan kalkad och okalkad jord.

Enligt Bölscher m.fl. (2021) verkade en kalkgiva motsvarande 0,08% fria kalciumjoner av mängden lera i inbrukningsskiktet vara tillräckligt för att få en viss effekt på jordens aggregat och porsystem. Om det var tillräckligt för att ge minskad fosforutlakning undersöktes inte. I det här försöket tillfördes motsvarande 0,10 och 0,21% fria kalciumjoner av mängden lera. Mätningarna i jorden vid två tillfällen (våren 2019 och 2020) efter utförd kalkning på Lilla Böslid hösten 2018 visade att mängden kalcium ökat i marken och att pH-värdet steg. Däremot kunde inte en förbättrad aggregatstabilitet (mätt på strukturförbättring) påvisas, vilket var förvånande eftersom en riktigt stor kalkgiva fanns med i planen. Att ingen förbättring av aggregatstabiliteten gick att mäta kan bero på svag effekt av kalkningen men också på svagheter eller problem med metoden som användes. Den torra sommaren 2018 kan möjligtvis ha påverkat aggregaten så att de var stabila redan innan kalkningen utfördes. Den praktiska upplevelsen efter kalkningen tyder dock på att kalken haft en struktureffekt då fältet bedömts vara mer lättbrukat och de strukturkalkade rutorna har upplevts torra upp jämnare och tidigare enligt försökspersonal på Lilla Böslid (Jan Jönsson, pers. kommentar). Tidigare försök av t.ex. Blomquist m.fl. (2018) har visat att strukturkalk ökar stabiliteten för aggregat i storleken 2-5 mm och därmed minskar

riskan för fosforförluster från fältet. Studierna visade också att fördelningen av aggregat var bättre med strukturkalk d.v.s. finare struktur i såbädden, vilket bl.a. minskar evaporationen och bidrar till bättre fukt i marken.

När den här rapporten skrivs pågår fortfarande mätningarna och koncentrationskillnaderna mellan leden har planat ut sedan hösten 2020. Mätningarna av utlakningen skulle med fördel följas upp under fler år framöver, för att kunna bekräfta om strukturkalkningen har effekt under förhållanden med kraftig avrinning som tendensen antyder. Hösten och tidig vinter 2020 hade inte lika kraftiga avrinningstoppar som under 2019 och fosforkoncentrationerna var låga. Det är därmed oklart om eventuella effekter har klingat av, eller om det beror på årsmånen.

Slutsatser

I detta försök på mellanlera i Halland undersöktes effekter av en vanlig strukturkalkprodukt med två givor, "vanlig" giva (8 ton/ha motsvarande ca 6 ton ts/ha) samt stor giva (16 ton/ha, motsvarande ca 12 ton ts/ha) i jämförelse med ett okalkat kontrollad (6 replikat). Utlakning av kväve och fosfor följdes under drygt 2 år efter kalkning.

Effekter av strukturkalkning på fosforutlakningen var inte entydiga i detta försök. Strukturkalkning gav ingen synbar effekt på fosforläckaget under hösten och vintern som följde direkt efter kalkning. Under det andra året efter kalkning fanns däremot en tydlig trend. Det uppmättes ca 30% lägre årsmedelkoncentration och 40% lägre utlakning av totalfosfor i de kalkade leden men skillnaderna gick ej att verifiera statistiskt. Det var främst partikelbunden fosfor som påverkades.

En stor kalkgiva (16 ton/ha) gav inte annorlunda påverkan på fosforutlakning, jordaggregatens stabilitet eller skörd än en giva på 8 ton/ha.

Det fanns inga tecken på att kväveutlakningen påverkades av strukturkalkningen.

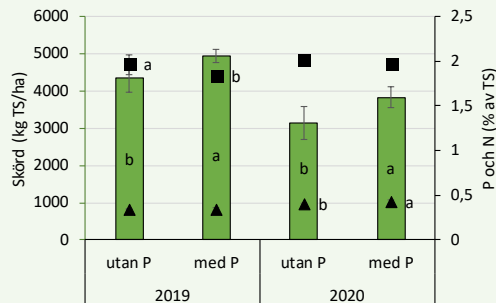
Jorden upplevdes som mer lättbrukad och att den fick en snabbare upptorkning våren efter kalkningen, men mätningar av jordaggregatens stabilitet vid två tillfällen visade inga mätbara strukturförbättringar. Inte heller påverkades skörden av vårkorn under de två första åren efter kalkning.

Försöksjorden bedömdes ha egenskaper där en effekt av strukturkalkning på fosforutlakning kunde förväntas. Orsaker till den osäkra och till synes fördröjda effekten gick ej att förklara. År 2, när effekt uppmättes, hade kraftig avrinning och stor utlakning av fosfor generellt, och därmed var effekten i absoluta tal relativt stor. Mätningarna av utlakningen skulle behöva följas upp under flera år framöver, för att kunna se om och hur strukturkalkningen påverkar utlakningen av fosfor på längre sikt.

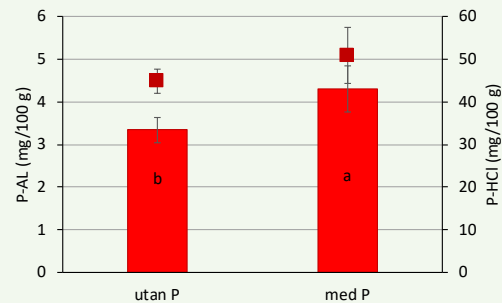
Skördesänkning vid långvarig utebliven tillförsel av fosforgödsel

På fältet för försöket med strukturalk finns sedan 2009 fyra rutor som inte tillförts någon P-gödsel när resten av fältet har gödslats. Dessa rutor har signifikant lägre skörd av vårkorn 2019 och 2020 i jämförelse med rutor som tillförts P (men ingen strukturalk). Innehållet av P i kärnan har påverkats av långvarig brist på P tillförsel med signifikant längre innehåll 2020. Kärnans innehåll av N är signifikant högre i rutorna utan P tillförsel. Detta beror på den lägre skörden och att N koncentreras i färre kärnor.

I jämförelse med rutorna som tillförts P (men ingen strukturalk) har rutorna utan tillförsel av P lägre P-AL, alltså har markens innehåll av lättlöslig P påverkats negativt av långvarig utebliven tillförsel av P. Vid dessa nivåer kan man förvänta sig en tydlig påverkan på skörd av korn, se t.ex. Kirchmann m.fl. (2020). Däremot har inte den hårt bundna förrådsfosfor (P-HCl) i marken påverkats signifikant, även om värdet är lägre i rutorna utan tillförsel av P.



Skörd av vårkorn 2019 och 2020 (kg TS/ha) och kärnans innehåll av P (trianglar) och N (kvadrater, % av TS) i rutor utan P tillförsel och rutor med P tillförsel (och utan strukturalk). Olika prefixbokstäver betyder statistiskt signifikant skillnad ($p < 0,05$, $n = 4-6$).



P-AL (staplar) och P-HCl (kvadrater, mg/100 g) i jorden för rutor utan P tillförsel och rutor med P tillförsel (och utan strukturalk). Olika prefixbokstäver betyder statistiskt signifikant skillnad ($p < 0,05$, $n = 4-6$).

Referenser

- Aronsson, H., Liu, J., Ekre, E., Torstensson, G. and Salomon, E. (2014). Effects of pig and dairy slurry application on N and P leaching from crop rotations with spring cereals and forage leys. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 98: 281-293 (DOI:10.1007/s10705-014-9611-3).
- Aronsson, H, Norberg, L., Blomberg, M & Torstensson, G. (2018). Utlakningsförsök med vintergrön mark 1993-2017. *Ekohydrologi* 151, Inst f mark och miljö, SLU, Uppsala.
- Aronsson, H., Berglund, K., Djodjic, F., Etana, A., Geranmayeh, P., Johnsson, H. och Wesström, I. (2019). *Effekter av åtgärder mot fosforförluster från jordbruksmark och åtgärdsutrymme*, Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Ekohydrologi, 160.
- Berglund, K. och Blomquist, J. (2015). Strukturkalkning – Bra för både mark och miljö, Greppa näringens praktiska råd - 23.
- Berglund, K., Etana, A., Simonsson, M., Blomquist, J. och Börjesson, G. (2017). *Är strukturkalkning lönsam för både lantbrukaren och miljön?* Studier av de långsiktiga effekterna av strukturkalkning på markstruktur och risken för fosforförluster, Slutrapport, SLF (SLF Projnr H1233136).
- Berglund, G. (1971). *Kalkens inverkan på jordens struktur*, Grundförbättring, 1971, 81-93.
- Blomquist, J., Simonsson, M., Etana, A. och Berglund, K. (2018). *Structure liming enhances aggregate stability and gives varying crop responses on clayey soils*, *Acta Agriculturae Scandinavica section B – Soil and Plant science*, vol 68, no 4, 311-322.
- Bölscher, T., Koestel, J., Etana, A., Ulén, B., Berglund, K. och Larsbo, M. (2021). *Changes in pore networks and readily dispersible soil following structure liming*, *Geoderma*, 390, 114948.
- Choquette, M., Bérulé M.A. och Locat, J. (1987). *Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from Eastern Canada*, *Applied Clay Science* 2, 215-232.
- Eriksson, A.K. (2016). *Phosphorus speciation in Swedish agricultural clay soils*. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Doctoral thesis No 2016:25, Uppsala.
- Etana, A., Rydberg, T. och Arvidsson, J. (2009). *Readily dispersible clay and particle transport in five Swedish soils under long-term shallow tillage and mouldboard ploughing*, *Soil and Tillage Research*, 106, 79-84
- Greppa näringen (2020). Lantbrukets osynliga miljöarbete. Greppa Nyhet, 13 oktober 2020 (<http://greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2020-10-13-lantbrukets-osynliga-miljoarbete.html?page=4>)
- Johnsson, H., Mårtensson, K., Lindsjö, A., Persson, K. och Blombäck, K. (2019). *NLeCCS – ett system för beräkning av läckage av näringsämnen från åkermark*, Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Ekohydrologi, 159.
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Bolinder, M., Kätterer, T. och Djodjic, F. (2020). *Soil properties currently limiting crop yields in Swedish agriculture – An analysis of 90 yield survey districts and 10 long-term field experiments*, *European Journal of Agronomy*, 120, 126132.
- Kvarnmo, P., Andersson, E., Börling, K., Hjelm, E., Jonsson, P., List, U. och Malgeryd, J. (2020). *Rekommendationer för gödning och kalkning 2020*, *Jordbruksinformation* 12-2019.
- Malgeryd, J., Stjernman Forsberg, L., Kyllmar, K., Heeb, A., Gustafsson, J., Aurell Svensson, A. och Alström, T. (2015). *Åtgärder mot fosforförluster från jordbruksmark – erfarenheter från tre*

avrinningsområden i Västmanland, Östergötland och Halland, Slutrapport och delrapport 2 från projekt Greppa Fosfor, 2010–2014, Jordbruksverket rapport 2015:2.

Ollikainen, M., Kosenius, A-L., Puntilla, E., Ala-Harja, V., Puroila, S., Iho, A. och Ekholm, P. (2020). *Gypsum amendment of arable fields as water measure – farmers' experience, phosphorus reduction potential and associated costs drawn from a large scale pilot*, Agriculture and Food Science, vol 29, 383-394.

Svanbäck, A. Ulén, B. och Etana, A. (2014). *Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil*, Agriculture Ecosystem and Environment 184, 124-134.

Ulén, B. och Etana, A. (2014). *Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming*, Acta Agriculturae Scandinavica section B – Soil and Plant science, vol 64, no 5, 425-433.

Ulén, B., Larsbo, M., Koestel, J., Hellner, Q., Blomberg, M. och Geranmayeh, P. (2018). *Assessing strategies to mitigate phosphorus leaching from drained clay soils*, Ambio 47 (Suppl.) S 114-S123.

Ulén, B. och Jacobsson, C. (2005). *Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden*, Science of the total environment, vol 344:1-3, 37-50.