

Slutrapport 2017-03-31 för projekt (Dnr 4.1.18-10955/13)

EKOKALK: Strukturalkning för förbättrad markstruktur och minskade fosforförluster i ekologisk odling?

EKOKALK: Structural liming for improved soil structure and reduced phosphorus losses in organic farming?

Docent Kerstin Berglund (projektledare), Docent Ararso Etana och Docent Magnus Simonsson, Institutionen för mark och miljö, SLU, Box 7014, 750 07 Uppsala

Inledning

Minskad fosforutlakning till ytvatten ingår som ett av de miljömål, som riksdagen antog 1999 (se www.miljomal.nu). Jordbrukssektorn har ett stort ansvar när det gäller att minska näringsläckaget till vattenmiljön. Inom regeringens satsning på Lokala vattenvårdsprojekt (LOVA) har man i vissa län fått bidrag till strukturalkning och kalkfilterdiken för att genom en förbättrad markstruktur minska riskerna för fosforförluster från åkermark. Enligt Havs- och vattenmyndigheten har 84 miljoner i LOVA-bidrag fram till nu lagts på strukturalkningsprojekt. Strukturalkning har även fått mycket positiv respons bland lantbrukare, tack vare positiva effekter för både produktion och miljö. De strukturalkningsmedel som används inom konventionell odling är en blandning mellan bränd/släckt kalk och kalkstensmjöl. Dessa blandprodukter är inte godkända för ekologisk odling. Det ligger både i lantbrukets och i samhällets intresse att hitta ett fullgott alternativ för den ekologiska odlingen (Jordbruksaktuellt, 2010).

Mål

Målsättningen i detta projekt har varit att utvärdera en restprodukt från stålindustrin (i projektet benämnd "Ekokalk") som förmodligen skulle uppfylla kriterierna för KRAV-märkta jordbrukskalker. Vi har undersökt om Ekokalken är lika effektiv som konventionella strukturalkningsmedel och släckt kalk. I projektet har vi testat

- 1) om inblandning av Ekokalk har en positiv effekt på markstrukturen på lerjordar och därmed minskar risken för fosforförluster.
- 2) om effekten på markstruktur och fosforförluster av inblandning av Ekokalk är i samma storleksordning som de blandvaror som används i konventionell odling och även i jämförelse med släckt kalk.

Utvärderingen har skett i fältförsök och i laboratoriestudier avseende strukturstabilitet och fosforutlakning. Markstruktureffekten av Ekokalk har jämförts med de blandvaror som används i konventionell odling (blandvara med ca 20 % släckt kalk) och ren släckt kalk som i projektet använts som referens.

Bakgrund

Kalk påverkar markens kemiska, biologiska och fysikaliska egenskaper. Vid kalkning höjs markens pH och växtnäringsämnenas växttillgänglighet påverkas. De fysikaliska förändringarna är framför allt kopplade till kalkningsmedlens innehåll av löslig bränd eller släckt kalk, som har stor betydelse för strukturutvecklingen i lerjordar (Berglund, 1971; Berglund & Eriksson, 1982; Haynes & Naidu, 1998; Berglund & Blomquist, 2002). Med bränd eller släckt kalk uppnår man att kalciumjonhalten i marken snabbt blir mycket hög. På kort sikt medför tvåvärda joner, kalcium och magnesium, att lerpartiklarna flockar ut, vilket är första steget i bildningen av aggregat (Shanmuganathan & Oades, 1983; Churchman & Tate, 1986). Om kalkningsmedlet innehåller kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), som finns i släckt kalk får man även en stabilisering av

aggregaten genom s.k. puzzolanreaktioner och murbruksbildning (Berglund 1971). Dessa reaktioner är inte lika snabba som den inledande utflockningen och aggregatbildningen men inom ett år bör huvuddelen av de stabiliserande reaktionerna skett. Effekten på markstrukturen kan vara mycket långsiktig (mer än 30 år). Ju högre Ca-koncentration och ju högre pH marklösningen har, desto snabbare och effektivare sker förloppet. Med bränd och släckt kalk (CaO respektive Ca(OH)₂) kan en mycket hög Ca-jonkoncentration uppnås, och temporärt också ett mycket högt pH, jämfört med det man uppnår med kalkstensmjöl (CaCO₃). Bränd och släckt kalk ger därför en struktureffekt på både kort och lång sikt. Kalkstensmjöl, CaCO₃, är mindre lösligt och ger vanligen en mer begränsad struktureffekt. På jordar med högt pH, där ingen pH-höjande effekt eftersträvas, liksom i ekologisk odling, kan gips (CaSO₄) användas för att tillföra kalciumjoner i strukturuppbyggande syfte (Hamza & Anderson, 2002; Ekholm et al, 2012). Struktureffekten är dock kortvarig (2-3 år), eftersom inga stabiliserande reaktioner sker. Den slaggprodukt, Ekokalk, som har testats i projektet består till största delen av släckt kalk (Ca(OH)₂), kol och kiseloxid, men innehåller även en mindre mängd järn- och aluminiumoxid. Innehållet av kalciumhydroxid gör att man bör få en god effekt på markstrukturen på lerjordar. I ett pilotprojekt finansierat av Partnerskap Alnarp (Larsson Jönsson m.fl., 2014) har man i krukförsök i växthus studerat Ekokalkens (i det projektet benämnd Nordkalk Aktiv Struktur Kol) effekt på växten och dess upptag av bl.a. en del tungmetaller. För en del restprodukter från stålindustrin kan innehållet av tungmetaller hindra användning som jordförbättringsmedel (Jernkontoret, 2012). Vissa slaggprodukter har en hög halt av vanadin (Jonsson, 2006) vilket gör dem olämpliga som jordförbättringsmedel även om det inte finns några gränsvärden enligt t.ex. Jordbruksverkets eller KRAV:s regler (Jordbruksverket, 2016).

Material och metoder

Försöksplatser

Tre fältförsök (figur 1 och 2) anlades på jordar med olika lerhalt hösten 2014. Alla försök lades ut runt Uppsala, två vid Ultuna (Ultuna 3 och 9) och ett vid Linnés Hammarby. Jordprovtagning genomfördes innan utläggningen för att genomföra karakterisering av jordarna på försöksplatserna. Resultat av mekaniska analysen enligt pipettmetoden redovisas i tabell 1. Samtliga försöksjordar klassificeras som styva lerjordar med de lägsta lerhalterna vid Ultuna 3 och ca 10 % högre lerhalt i de två andra försöken. Även mullhalten är lägre vid Ultuna 3 jämfört med övriga försök.

Tabell 1. Mekanisk analys enligt pipettmetoden (fraktionerna angivna i %) för försöksplatserna Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Provtagningen skedde i rutorna 1 och 15 i alla försök. Mullhalten beräknad från glödningsförlust och lerhalt

Försöksplats	Ler	Fin- mjåla 0,002- 0,006	Grov- mjåla 0,006- 0,02	Fin- mo 0,02- 0,06	Grov- mo 0,06- 0,2	Mellan- sand 0,2- 0,6	Grov- sand 0,6- 2	Glödn. förlust %	Mull- halt %
Ultuna 3 - 1	46,8	14,6	13,5	12,6	10,5	1,2	0,8	5,2	2,0
Ultuna 3 - 15	45,1	13,0	13,4	11,9	13,7	2,0	0,9	4,4	1,3
Ultuna 9 - 1	55,3	15,7	12,0	9,9	5,2	1,1	0,8	7,2	3,6
Ultuna 9 - 15	59,1	15,8	11,6	7,4	4,4	1,1	0,6	6,9	3,2
Linnés H 4 -1	58,0	14,4	15,1	9,5	2,6	0,4	0,1	7	3,4
Linnés H 4 -15	50,8	15,0	16,6	13,2	3,7	0,4	0,3	-	-

På jordarna gjordes även en detaljerad texturanalys med lasermetoden där lerfraktionen går att dela upp på underklasser som grovler, finler och ultraler (tabell 2). Alla tre försöksplatserna är enligt traditionell texturanalys enligt pipettmetoden styva leror (40-60 % ler) men laseranalysen ger generellt en lägre lerhalt. Några grundläggande kemiska markdata för försöken finns redovisade i tabell 3-4. Den kemiska analysen visar på en viss variation mellan försöksplatserna med något lägre fosfor- och kalistatus vid Linnés Hammarby 4.

Tabell 2. Kornstorleksfördelning (procent av finjorden, <2 mm) på försöksplatserna (ruta 1 och 15). Kornstorleksanalysen är gjord med laserscanning, vilket generellt ger en lägre lerhalt än traditionell mekanisk analys. Den totala lerhalten är även uppdelad på olika lerklasser

Fältförsök	Sand 200-2000 µm	Mo 20-200 µm	Mjäla 2-20 µm	Lerhalt <2 µm	Grovler 0,2-2 µm	Finler 0,1-0,2 µm	Ultraler <0,1 µm
Ultuna 3	0,1	17,7	47,8	34,3	28,4	5,5	0,5
	0,7	19,6	47,9	31,8	26,9	4,6	0,4
Ultuna 9	0,2	13,9	48,8	37,1	30,3	6,2	0,6
	0,4	10,4	48,7	40,5	33,6	6,3	0,6
Linnés	0,2	12,1	52,0	35,6	28,6	6,4	0,6
Hammarby 4	0,0	14,4	55,2	30,4	25,6	4,4	0,4



Figur 1. Fältförsöken vid Ultuna. Ultuna 3 norr om Lervägen och Ultuna 9 söder om Lervägen.



Figur 2. Fältförsöket vid Linnés Hammarby.

Tabell 3. Kemisk analys av matjorden vid försöksplatserna Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4 med avseende på CEC, basmättnadsgrad, pH_{vatten}, mullhalt_{glf} samt fosforstatus

	CEC _{pH7} me/100 g	Bas- mättnad %	pH	Mull- halt %	P-AL mg/100 g	P-AI klass	P-HCl mg/100 g	P-HCl klass
Ultuna 3 ruta 1	25	86	6,7	2,3	9,3	IVA	84	5
Ultuna 3 ruta 15	22	93	7,2	2,0	22,0	V	96	5
Ultuna 9 ruta 1	32	84	6,4	4,1	8,1	IVA	87	5
Ultuna 9 ruta 15	36	84	6,6	4,6	9,3	IVA	87	5
Linnés Hammarby ruta 1	31	83	6,5	4,9	5,5	III	70	4
Linnés Hammarby ruta 15	24	84	6,6	2,7	9,2	IVA	75	4

Tabell 4. Kemisk analys av matjorden vid försöksplatserna Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4 avseende kaliumstatus, kalium/magnesium-kvot, magnesium, kalcium och koppar

	K-AL mg/100 g	K-AL klass	K-HCL mg/100 g	K-HCl klass	K/Mg kvot	Mg-AL mg/100 g	Ca-AL mg/100 g	Cu-HCl mg/100 g
Ultuna 3 ruta 1	20	IV	530	5	0,7	30	270	26
Ultuna 3 ruta 15	20	IV	510	5	0,7	30	290	25
Ultuna 9 ruta 1	16	III	510	5	0,5	33	340	28
Ultuna 9 ruta 15	19	IV	560	5	0,4	45	380	28
Linnés Hammarby ruta 1	15	III	380	4	0,3	51	330	33
Linnés Hammarby ruta 15	15	III	400	4	0,5	31	270	27

Försöksled

I försöken testades tre olika strukturkalkningsmedel med 4 upprepningar i en randomiserad blockdesign. Behandlingar:

- A. Obehandlad
- B. Släckt kalk
- C. NKAS torr
- D. Ekokalk

I led B användes en ren släckt kalk (92 % Ca(OH)₂) vilket kan ses som en referens gentemot äldre strukturkalkningsförsök där släckt och bränd kalk ofta använts. I led C användes ett av de strukturkalkningsmedel som idag används i konventionellt lantbruk (i detta fall Nordkalk Aktiv Struktur, torr = NKAS torr)) som innehåller släckt kalk (Ca(OH)₂) och kalciumkarbonat (CaCO₃). I försöken användes en torr vara men normalt används en fuktig vara vid spridning i lantbruket. Ekokalken i led D är en tunnelugnsslagg, som är en biprodukt vid tillverkning av järnsvamp vid Höganäs AB där kalk och koks ingår i produktionsprocessen. Ekokalken (som torr vara) består till största delen av bränd kalk (CaO), kol och kiseloxid, men innehåller även en mindre mängd järn- och aluminiumoxid.

I försöken har vi utgått från att en giva på ca 6 ton/ha av ett konventionellt strukturkalkningsmedel med ca 14 % CaO i form av släckt kalk, är en vanligt förekommande giva vid strukturkalkning i lantbruket. Omräknat till CaO motsvarar det ca 3 ton/ha CaO. Alla kalkningsmedel spreds som torr vara för att kunna precisionsspridas med rörspridare. Normalt så

sprider man en fuktig vara som är säkrare att hantera. Den vara vi använde i försöket, Nordkalk Aktiv Struktur torr (NKAS torr), har en något högre halt släckt kalk än den fuktiga standardvaran. Givan av övriga kalkprodukter beräknades så att tillförseln av kalcium (Ca) skulle vara densamma oberoende av kalkprodukt och dess löslighet. Givan 3 ton CaO/ha (2,1 ton Ca/ha) innebar en tillförsel av 4,2 ton släckt kalk, 8,3 ton/ha Ekokalk respektive 6 ton/ha NKAS torr (tabell 5).

Tabell 5. Kalkinnehåll (viktsprocent av ts) hos de olika kalkprodukterna och motsvarande kalkgiva i försöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4

Kalkprodukt	Kalkinnehållet omräknat till CaO %		Kalkproduktgiva i försöken 3 ton CaO omräknat till kg vara per ha
	Totalt	Varav från släckt och bränd kalk	
Släckt kalk	72	72	4250
NKAS torr	51	20	6000
Ekokalk	37	22	8270

Utläggningen av försöken skedde i slutet av september 2014. Förfrukten vid Ultuna 3 och Ultuna 9 var höstvetete (med insådd) som skördades i mitten av augusti och åtföljdes av en kemisk ogräsbekämpning i september. Två dagar innan utläggningen av försöket gjordes en bearbetning med en Swift kultivator för att underlätta upptorkningen av matjorden. Kalkinblandningen gjordes också med en Swift kultivator som kördes två gånger till ca 15 cm djup. Vid Linnés Hammarby var förfrukten en gräsvall som sprutades en gång i mitten av juli och en gång i början av september följt av en bearbetning med Swift kultivator 2 dagar innan utläggning av försöket. Kalkinblandningen gjordes med en Swift kultivator som kördes en gång till ca 15 cm djup samt en körning med en rotorharv till samma djup. Alla kalkningsmedel spreds som torr vara med rörspridare den 1 oktober 2014 och bearbetades in omedelbart efter spridning.

Jordbearbetning, grödor, gödsling och skörd

Försöksytorna har inte plöjts under försöksperioden utan bearbetats med en Swift kultivator. Grödan i alla tre försöken 2015 var vårkorn av sorten Makof och 2016 vårkorn av sorten Salome. Gödselgivan var 2015 i samtliga försök 320 kg NPK 27-2-3 YaraMila och 2016 tillfördes 305 kg av samma gödselmedel. Försöken skördades försöksmässigt 2015 och 2016.

Mätningar i fält

I vårbruket 2015 gjordes en såbäddsundersökning med avseende på bearbetningsdjup, aggregatstorleksfördelning och vattenhalt (Kritz, 1983) i försöket vid Linnés Hammarby. I vårbruket 2016 efter sådden mättes vattenhalten i fält med Wet Sensor (Delta-T devices Ltd, Cambridge, UK) i försöket Ultuna 9. Mätningen gjordes med 10 stick till ca 10 cm djup i en diagonal över parcellerna. Efter sådd genomfördes även penetrometermätningar (10 stick per ruta) i försöken vid Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Vidare gjordes planträkningar efter uppkomst i samtliga försök 2015 och i Ultuna 3 och 9 våren 2016.

Mätning av strukturstabilitet och risken för fosforutlakning

I projektet har strukturkalkens förmåga att stabilisera lerjordarnas struktur analyserats antingen genom att aggregat i storleksfraktionen 2–5 mm sällas fram från hela såbädden ner till såbotten och sedan utsatts för regnsimulering på labbet eller genom att lysimetrar (20 cm diameter, 20 cm höjd) med jord i ostörd lagring tagits ut från fältförsöken (en lysimeter per ruta) och utsatts för regnsimulering. För aggregaten var regnintensiteten ca 42 mm/h (i två timmar) och för lysimetrarna ca 11-16 mm/h (i 3 timmar). I båda fallen genomfördes två regnsimuleringar (bevattningar) med ett dygns mellanrum. Genom att mäta grumligheten (turbiditeten) på vattnet som passerar aggregaten respektive genom den ostörda jorden i lysimetrarna värderas strukturstabiliteten. Grumligheten beror på att partiklar lossnar från aggregaten vid regnsimuleringen. Det grumliga vattnet skakades i en skakapparat i 10 min och fick sedan stå för att sedimentera i 4 timmar och 30 min. Efter sedimentering, togs ett vätskeprov ut på 5,6 cm djup och turbiditeten (benämnd turbiditet 1:2 efter första regnsimulering och turbiditet 2:2 efter andra regnsimulering) i vattenprovet mättes vilket blir ett mått på lerkoncentrationen i vattnet. I lysimeterstudien analyserades dräneringsvattnet även med avseende på totalfosfor, löst fosfor ($\text{PO}_4\text{-P}$) och partikulär fosfor. Både lysimeterjorden och dräneringsvattnet analyserades med avseende på elektrisk konduktivitet (EC). EC höjs vid kalkningen och blir en kontroll på att kalken hamnat rätt.

Övriga analyser

Matjorden i försöken analyserades med avseende på pH (H_2O) och ledningsförmåga (elektrisk konduktivitet, EC) våren 2015 och 2016. Provtagningen (10 stick per ruta till ett samlingsprov) skedde i samtliga fall på 0-10 cm djup i matjorden. Normalt bestäms pH efter att proverna får stå i 2 timmar efter skakning för att komma i jämvikt. På kalkade eller katbonathaltiga jordar är det möjligt att inte jämvikt uppnås efter denna tid. Värdena kan bli både för låga och för höga. Mätningarna kompletterades därför med ytterligare en mätning 24 timmar efter skakning och det är dessa värden som redovisas.

För att klarlägga Ekokalkens innehåll av spårelement mot bakgrund av KRAV:s regler för tillförsel (Jordbruksverket, 2016), redovisas data från tre olika laboratorier, som analyserat prover från tre olika år. Jernkontoret har redovisat analys av osläckt TU-slagg från Höganäs (Andreas et al., 2010) vilket motsvarar den torra vara som användes i försöken. Analyserna i den undersökningen genomfördes av Luleå tekniska universitet (Avdelningen för Processmetallurgi). Vidare har Nordkalk redovisat analyser (produktblad för Nordkalk Aktiv Struktur Kol, 2012) och dessutom har det parti Ekokalk som användes i försöken analyserats av ALS i Luleå.

Statistisk analys

Försöken analyserades som randomiserade blockförsök. Variansanalysen (ANOVA) gjordes i SAS med proceduren MIXED (REML/Kenward-Roger). För enskilt år på enskild plats användes *led* och *block* som förklarande faktorer. För flerårsmedeltal vid analys av skörden användes huvudfaktorerna *led*, *försök* och *år* samt eventuella signifikanta samspel mellan dessa faktorer. För skördedata användes ej transformerade värden (skörd, vattenhalt vid skörd, tusenkovvikt och stråstyrka vid skörd). Redovisade sannolikhetsvärden (p) avser faktorn *led*. LSD-värden (*least significant difference*) anger det numeriska värde som skillnaden mellan två ledmedelvärden måste överskrida, för att falla ut som signifikant på 5 %-nivån. Parvisa

jämförelser är relevanta endast när sannolikhetsvärdet visar att det finns signifikanta skillnader mellan leden (*, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$); LSD-värden givna inom parentes anger att en sådan jämförelse inte ska göras, men i resultatdelens tabeller finns ändå i något fall markerat med fet stil, att skörden var signifikant skild från obehandlat led vid parvis jämförelse, $p < 0,05$. Alla behandlingsmedelvärden är justerade medelvärden (LS-means). När dataseten är fullständiga (inga saknade värden) är LS-means detsamma som det aritmetiska medelvärdet.

För alla övriga mätdata, utom plantantal och pH, gjordes variansanalysen med logaritmerade värden (naturliga logaritmen) för att åstadkomma en mer homogen varians och därmed förbättra signifikanstestet. Medelvärden beräknades per led. Före redovisningen transformerades dessa medelvärden tillbaka till ursprunglig skala med hjälp av exponentialfunktionen, d.v.s. geometriska medelvärden beräknades. De geometriska medelvärdena är genomgående något lägre än de aritmetiska medelvärdena. Vid de parvisa jämförelserna användes samma signifikansnivåer som för skördedata.

Resultat

Analys av innehållet i Ekokalken

Den kemiska analysen av Ekokalken (tabell 6) visar på en viss variation mellan analyser av olika partier av Ekokalken, men med tanke på att proven kommer från tre olika år så är resultaten förvånansvärt enhetliga. Även analysen av spårelementen (tabell 7) är relativt enhetlig förutom för vanadin, där ALS-analysen (den Ekokalk som användes i försöken) visar på betydligt högre värden än Nordkalks analys. I tabell 8 har en beräkning gjorts av hur mycket av de spårelement som omfattas av KRAV:s regler som tillförs med den giva av Ekokalken som tillförts i försöken. För huvuddelen av spårelementen vore det inget problem ens med en årlig giva på 8,3 ton/ha, men för att inte överskrida tillåtna mängder av krom och nickel bör man inte återkomma med strukturkalkning med Ekokalken oftare än mellan 10 och 20 år. Halten Vanadin är relativt hög i Ekokalken (tabell 7), men för det spårelementet har vi inte funnit några gränsvärden för tillförsel till åkermark. I en doktorsavhandling (Larsson, 2014) redovisas tester med två olika slagger (M-kalk och Merit 5000) som tillfördes i mängder motsvarande 8-230 mg V per kg jord. I avhandlingen konstateras att "Risken för kontaminering av marken genom tillsats av metallurgiska slagger verkar mycket begränsad baserat på experiment som utförts i denna avhandling". Om man räknar med att Ekokalken blandas in till 20 cm djup (jordens volymvikt 1500 kg/m^3) så motsvarar en tillförsel av 8,3 ton ca 4-6 mg V per kg jord, att jämföra med medianvärdet 34 mg/kg uppmätt i 7 M HNO_3 -extrakt från svenska matjordar (Eriksson m.fl. 2010) och riktvärdet 100 mg/kg i jord avsedd för "känslig markanvändning" (Larsson, 2014). Lösligheten av vanadin kan dock variera för olika typer av metallurgiska slagger och även jordens förmåga att binda vanadin kan variera mellan olika jordtyper.

Tabell 6. Kemisk analys av Ekokalken. Analysresultat från Jernkontoret finns redovisade i en rapport från 2010, resultat från Nordkalk i produktblad 2012 och analyser gjorda inom projektet, ALS 2016, är på det material som användes i försöken

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	CoO	ZrO ₂	C	S
Jernkontoret	18,4	0,62	6,6	7,09	38,7	2,05	0,19	0,39	0,1	0,22	0,07	0,03	0,03	23,9	1,58
ALS	16,5	0,73	7,2	5,51	33,5	0,9	0,25	0,54	0,17		0,22			23,4	1,53
Nordkalk	18		8	9	37		0,3							24	1,3

Tabell 7. Analys av spårelement i Ekokalken. Analysresultat från Nordkalk återfinns i produktblad från 2012 och analyser gjorda inom projektet, ALS 2016, är på det material som användes i försöken

mg/kg TS	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Nb	Ni	Pb	Sc	Sn	Sr	V	W	Y	Zn	Zr
ALS 2016	5,81	260	3,84	<0,01	15,6	64,1	19,1	<0,04	3,43	7,56	45,1	0,96	11,9	1,26	381	2210	1,66	29,7	8,18	167
Nordkalk				< 0,2	13	49	21	<0,1			35	1				1300			6	

Tabell 8. KRAV:s gränser för tillförsel av spårelement (Jordbruksverket, 2016) samt tillförsel med den giva Ekokalk på 8,3 ton/ha som användes i försöken. Tillåtna mängder för tillförsel till åkermark vid olika tidshorisonter kan ge en indikation om hur ofta man kan återkomma med strukturkalkningen

Ämne	Tillåtna mängder (g/ha) vid olika tidshorisonter				Analysvärden		Om en giva på 8,3 ton/ha används tillsätts (g/ha)	
	1 år	5 år	10 år	20 år	ALS	Nordkalk	ALS	Nordkalk
					mg/kg TS	mg/kg TS		
Bly (Pb)	25	125	250	500	0,956	1	7,9	8,3
Kadmium (Cd)	0,75	3,75	7,5	15	<0,01	< 0,2	<0,08	<0,17
Koppar (Cu)	300	1500	3000	6000	19,1	21	158	174
Krom (Cr)	40	200	400	800	64,1	49	532	407
Kvicksilver (Hg)	1	5	10	20	<0,04	<0,1	<0,33	<0,8
Nickel (Ni)	25	125	250	500	45,1	35	374	290
Zink (Z)	600	3000	6000	12000	8,18	6	68	50
Vanadin (V)	Gränsvärde saknas						18300	10800

Skörderesultat enskilda år på enskilda platser

I tabellerna 9-14 redovisas skörderesultaten för alla tre försöken 2015 och 2016. Skördenivåerna var genomgående höga i försöken. Den statistiska analysen för 2015 (tabell 9-11) visade på signifikanta skördeeffekter av kalkningen endast vid parvisa jämförelser i ett av försöken, Linnés Hammarby 4 (tabell 11). Där var skörden i led med släckt kalk och NKAS torr 5 respektive 4 % högre än i obehandlat led. I försöken var det en tendens till större utslag för strukturkalkningen 2015 när man går från försöket vid Ultuna 3, till Ultuna 9 till Linnés Hammarby 4. Inga skillnader mellan led för andra skörderelaterade data, som kärnans vattenhalt vid skörd, tusenkornvikt eller stråstyrka. 2016 (tabell 12-14) var skördenivåerna något lägre än 2015. Vid Linnés Hammarby 4 var skörden signifikant högre i kalkade led, 11 % högre skörd för släckta kalken och Ekokalk (**, $p < 0,01$) och 6 % högre för NKAS torr (*, $p < 0,05$). I alla tre försöken var vattenhalten i kärnan vid skörd signifikant lägre i alla kalkade led och även signifikant lägre tusenkornvikt i led med släckt kalk respektive Ekokalk vid försöksplatserna Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Det var genomgående god stråstyrka i alla försök.

Tabell 9. Skörderesultat 2015 för strukturkalkningsförsöket Ultuna 3 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt höstvetete med insädd

Försöksled	Skörd	Relativtal	Vattenhalt vid skörd	Tusen- kornvikt	Stråstyrka vid skörd
	kg/ha		%	g	0-100
Obehandlad	5930	100	16,3	47,7	88
Släckt kalk	5930	100	16,3	48,1	90
NKAS torr	5930	100	16,4	47,4	89
Ekokalk	5930	100	16,4	48,2	90
-X-	5930		16,4	47,9	89
CV%	5,3		0,9	2,2	2,4
OBS	16		16	16	12
PROB F1	(0,00)		0,5572	0,7261	0,7590
LSD F1	(500)		(0,2)	(1,6)	(22)

Tabell 10. Skörderesultat 2015 för strukturkalkningsförsöket Ultuna 9 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt höstvetete med insädd

Försöksled	Skörd	Relativtal	Vattenhalt vid skörd	Tusen- kornvikt	Stråstyrka vid skörd
	kg/ha		%	g	0-100
Obehandlad	6130	100	15,9	50,5	90
Släckt kalk	6120	100	15,5	51,2	90
NKAS torr	6230	102	15,8	50,4	90
Ekokalk	6240	102	14,4	50,4	90
-X-	6180		15,4	50,6	
CV%	3,8		6,1	1,7	
OBS	16		16	16	
PROB F1	0,8079		0,1724	0,5760	
LSD F1	(370)		(1,5)	(1,3)	

Tabell 11. Skörderesultat 2015 för strukturkalkningsförsöket Linnés Hammarby 4 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt gräsval

Försöksled	Skörd	Relativtal	Vattenhalt vid skörd	Tusen- kornvikt	Stråstyrka vid skörd
	kg/ha		%	g	0-100
Obehandlad	8390	100	27,0	50,8	10
Släckt kalk	8840 ¹	105	27,6	49,0	8
NKAS torr	8740 ¹	104	26,3	49,5	8
Ekokalk	8620	103	27,1	49,4	10
-X-	8650		27,0	49,7	9
CV%	2,5		2,2	3	33
OBS	16		16	16	16
PROB F1	0,0644		0,0763	0,3614	0,4363
LSD F1	(340)		(0,9)	(2,4)	(5)

¹Fetstilt = Skörden signifikant skild från obehandlat led endast vid parvisa jämförelser, p < 0,05

Tabell 12. Skörderesultat 2016 för strukturkalkningsförsöket Ultuna 3 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt vårkorn

Försöksled	Skörd kg/ha	Relativtal	Vattenhalt vid skörd %	Tusen- kornvikt g	Stråstyrka vid skörd 0-100
Obehandlad	5670	100	16,0	50,7	90
Släckt kalk	5810	102	15,6**	50,9	90
NKAS torr	5730	101	15,6**	50,1	90
Ekokalk	5680	100	15,6**	50,1	90
-X-	5720		15,7	50,5	
CV%	4,7		1	2,2	
OBS	16		16	16	
PROB F1	0,8754		0,0090	0,6762	
LSD F1	(430)		0,2	(1,8)	

** Signifikansnivå i jämförelse med från obehandlat led

Tabell 13. Skörderesultat 2016 för strukturkalkningsförsöket Ultuna 9 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt vårkorn

Försöksled	Skörd kg/ha	Relativtal	Vattenhalt vid skörd %	Tusen- kornvikt g	Stråstyrka vid skörd 0-100
Obehandlad	5900	100	16,0	53,2	90
Släckt kalk	6020	102	15,1***	50,6*	90
NKAS torr	6170 ¹	105	15,4**	52,0	90
Ekokalk	5940	101	15,2***	49,6**	90
-X-	6010		15,4	51,3	
CV%	2,7		1,2	2,6	
OBS	16		16	16	
PROB F1	0,1723		0,0002	0,0208	
LSD F1	(260)		0,3	2,2	

¹ Fetstilt = Skörden signifikant skild från obehandlat led endast vid parvisa jämförelser, p < 0,05

*, **, *** Signifikansnivå i jämförelse med från obehandlat led

Tabell 14. Skörderesultat 2016 för strukturkalkningsförsöket Linnés Hammarby 4 utlagt hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt), förfrukt vårkorn

Försöksled	Skörd kg/ha	Relativtal	Vattenhalt vid skörd %	Tusen- kornvikt g	Stråstyrka vid skörd 0-100
Obehandlad	6160	100	19,9	54,8	90
Släckt kalk	6840**	111	17,3**	51,8*	90
NKAS torr	6660*	106	17,5*	52,5	90
Ekokalk	6850**	111	17,4*	52,2*	90
-X-	6630		18,0	52,8	
CV%	4,4		6,7	2,2	
OBS	16		16	16	
PROB F1	0,0254		0,0452	0,0231	
LSD F1	470		1,9	1,9	

*, ** Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Sammanställning av avkastningsresultaten för alla år och alla försök

Den statistiska analysen visade på signifikant högre skörd (3-4 %) i alla kalkade led (tabell 15) men inga signifikanta skillnader i avkastning mellan de olika kalkprodukterna.

Tabell 15. Sammanställning av avkastningsresultaten 2015 och 2016. Medelvärden för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Försöken utlagda hösten 2014. Gröda vårkorn (15 % vattenhalt) i samtliga försök. Behandlingseffekterna är signifikanta ($p = 0,0241$)

Försöksled	Skörd (kg/ha)	Relativtal	p-värde
Obehandlad	6363	100	
Släckt kalk	6594***	104	0,0067
NKAS torr	6578**	103	0,0111
Ekokalk	6545*	103	0,0306

*, **, *** Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Plantantal på våren

Skillnaderna i plantantal på våren var relativt stora (tabell 16). På grund av stor variabilitet i materialet förelåg inga statistiskt signifikanta behandlingseffekter, trots påtagligt högre medelantal plantor i kalkade led.

Tabell 16. Plantantal på våren 2015-05-12 (3 försök) och 2016-05-23 (2 försök). Medelvärden för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Grödan var vårkorn i samtliga försök. Resultaten redovisas som aritmetriska medelvärden. Behandlingseffekterna är ej signifikanta

Försöksled	Plantantal Våren 2015	Relativtal	Plantantal Våren 2016	Relativtal
Obehandlad	87	100	64	100
Släckt kalk	95	109	68	105
NKAS torr	94	107	77	121
Ekokalk	99	113	72	113

Penetrometermätning och vattenhalt på våren

En mätning av penetrationsmotståndet i matjorden genomfördes efter sådd vid Ultuna 9 (2016-05-02) och Linnés Hammarby 4 (2016-04-25). I försöket Ultuna 9 mättes samtidigt vattenhalten i matjorden. Penetrationsmotståndet redovisas som ett medeltal för djupen 1-10 cm, 5-14 cm och 9-18 cm (tabell 17). Det var lägre penetrationsmotstånd i alla kalkade led i lagren 1-10 cm och 5-14 cm, men endast led med släckt kalk och Ekokalk var signifikant lägre än obehandlat led. Såväl inblandning av kalk som all bearbetning under försöksperioden har skett till ca 15 cm djup vilket kan förklara den uteblivna effekten i det djupare lagret. Vattenhalten var på våren efter sådd högre i alla kalkade led och signifikant högre i led med släckt kalk och NKAS torr (tabell 17).

Tabell 17. Penetrationsmotstånd och vattenhalt (endast Ultuna 9) i matjorden våren 2016. Medeltal för strukturkalkningsförsöken Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Resultaten redovisas som geometriska medelvärden för djupen 1-10 cm (PEN1), 5-14 cm (PEN5) och 9-18 cm (PEN9) samt vattenhalt i matjorden vid Ultuna 9 som redovisas som aritmetiska medelvärden. Behandlingseffekterna är signifikanta för PEN1 ($p = 0,0043$), PEN5 ($p = 0,0295$) och vattenhalt ($p = 0,0274$)

Försöksled	PEN1 MPa	Relativtal	PEN5 MPa	Relativtal	PEN9 MPa	Relativtal	Vattenhalt Vol %	Relativtal
Obehandlad	0,56	100	0,73	100	0,96	100	23,1	100
Släckt kalk	0,43***	76	0,60**	82	0,87	91	28,4**	123
NKAS torr	0,49	87	0,65	89	0,88	92	27,3*	118
Ekokalk	0,44**	79	0,62*	85	0,84	87	25,3	109

, * Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Matjordens pH och EC

Vid den första provtagningen våren efter spridningen av kalken var det inga signifikanta pH-effekter i försöken (tabell 18). Men ett och halvt år efter kalkinblandningen vid provtagningen våren 2016 var det signifikant högre pH i samtliga kalkade led jämfört med obehandlat led men ingen skillnad i effekt mellan de olika kalkslagen. Analysen visade dessutom på ett samspel mellan behandling och försök. Även i de enskilda försöken var det signifikant högre pH i samtliga kalkade led jämfört med obehandlat led men endast vid Ultuna 3 var det skillnad i behandlingseffekt mellan kalkslagen. Släckt kalk och Ekokalk höjde pH mer än NKAS torr. Eftersom pH varierar mycket över växtodlingsåret och även rumsligt är det svårt att uttala sig om skillnader i pH mellan år. Jordens elektriska konduktivitet (EC) är ett mått på lösta salter (tabell 19). pH-sänkningen från 2015 till 2016 i obehandlat led har troligen med gödsling och saltbalans att göra, snarare än med någon påtaglig försurning av jorden från ett år till ett annat.

Tabell 18. Matjordens pH (H₂O) och elektriska konduktivitet (EC). Medeltal för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Provtagning 27-28/5 2015 och 2016-05-31. Kalkinblandningen skedde hösten 2014. Resultaten redovisas som geometriska medelvärden för EC och aritmetiska medelvärden för pH. Behandlingseffekterna är signifikanta för pH våren 2016 ($p < 0,001$) och för båda åren för EC ($p < 0,001$)

Försöksled	pH (H ₂ O) våren 2015	EC (µS/cm) våren 2015	pH (H ₂ O) våren 2016	EC (µS/cm) våren 2016
Obehandlad	6,5	64	5,9	97
Släckt kalk	6,6	144***	6,7***	160***
NKAS torr	6,5	140***	6,7***	194***
Ekokalk	6,6	142***	6,6***	161***

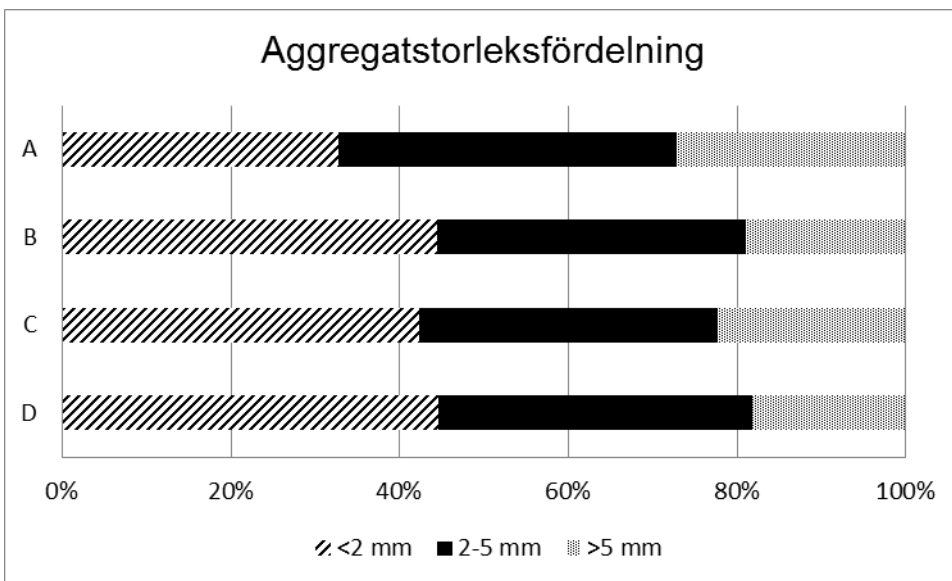
*** Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Jordens EC påverkades dock i första hand av upplösning av de tillförda kalkprodukterna (tabell 19). Både vid den första provtagningen våren efter spridningen av kalken och ett och halvt år efter kalkinblandningen vid provtagningen våren 2016 var det signifikant högre EC i samtliga kalkade led jämfört med obehandlat led (tabell 19) men ingen skillnad i effekt mellan de olika

kalkslagen. Den statistiska analysen visade dessutom på ett samspel mellan behandling och försök. Även i de enskilda försöken var det signifikant högre EC i samtliga kalkade led jämfört med obehandlat led 2015 i samtliga försök och 2016 vid Ultuna 3 och Ultuna 9.

Såbäddens aggregatfördelning

Såbäddsundersökningen våren 2015 vid Linnés Hammarby 4 (figur 3) visade att andelen aggregat 2-5 mm var signifikant mindre (signifikansnivå $p=0,05$) i led kalkade med släckt kalk och NKAS torr och att andelen aggregat mindre än 2 mm var signifikant större (signifikansnivå $p=0,05$) i samtliga kalkade led jämfört med obehandlat led. Strukturkalkningen gav förutsättningar för en fin såbädd och därmed en bra etablering av grödan.



Figur 3. Aggregatstorleksfördelning i såbädden i vårbruket 2015 i försöket vid Linnés Hammarby 4. A = Obehandlad, B = Släckt kalk, C = NKAS torr och D = Ekokalk.

Aggregatstabilitet – såbäddsprover 2-5 mm

Idén med strukturkalkning är att stabilisera leraggregaten för att därmed minska P-förlusterna från mark till vatten. Aggregat i storleksfraktionen 2–5 mm utsattes för två regnsimuleringar (ca 42 mm/h i två timmar) med ett dygns mellanrum på labbet. Aggregaten utsattes med andra ord för ganska hård behandling. Tendensen är att turbiditeten i utlagningsvattnet är lägre i kalkade led efter både första och andra regnsimulering (tabell 19) men resultaten är endast signifikanta efter andra regnsimulering i led behandlade med NKAS torr. Den elektriska konduktiviteten i utlagningsvattnet är högre i kalkade led men inte alltid signifikant skilda från obehandlat led.

Tabell 19. Aggregatstabilitet för såbäddsprover (2-5 mm). Medelvärden för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Provtagning 2015-04-24. Elektrisk konduktivitet (EC1 och EC 2) och turbiditet 1:2 och 2:2 i utlakningsvattnet efter regnsimulering 1 respektive 2 gånger av aggregaten. Resultaten redovisas som geometriska medelvärden. Behandlingseffekterna är signifikanta för EC1 ($p = 0,0115$), turbiditet 2:2 ($p = 0,0138$) och EC2 ($p < 0,0001$)

Försöksled	Turbiditet 1:2 (NFU)	Relativ- tal	EC1 ($\mu\text{S/cm}$)	Relativ- tal	Turbiditet 2:2 (NFU)	Relativ- tal	EC 2 ($\mu\text{S/cm}$)	Relativ- tal
Obehandlad	40	100	156	100	24	100	42	100
Släckt kalk	34	85	184	118	25	104	51***	123
NKAS torr	33	83	222**	143	17**	72	58***	139
Ekokalk	34	85	236**	151	19	82	54***	129

, * Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Lysimeterundersökning – risken för utlakning av fosfor

Lysimetrarna utsattes för 2 regnsimuleringar med 1 dygns mellanrum. Efter regnsimuleringarna analyserades jorden i lysimetrarna för elektrisk konduktivitet (EC). Det var signifikant högre EC ($p < 0,0001$) i kalkade led (90, 94 och 109 $\mu\text{S/cm}$) än i obehandlat led (63 $\mu\text{S/cm}$), med motsvarande relativtal 100 för obehandlat led och 143, 149 och 174 för kalkade led. Vid parvisa jämförelser mellan kalkleden var EC lägre i led med släckt kalk och NKAS torr än i Ekokalkledet.

Tendensen är att turbiditeten i utlakningsvattnet är lägre i kalkade led (30-50 %) efter både första och andra regnsimulering (tabell 20) men resultaten är endast signifikanta för den första regnsimuleringen. Även efter den andra regnsimuleringen är utslagen för kalkningen enhetliga med ca 35 % lägre turbiditet i kalkade led men resultatet var inte signifikant på 0,05-nivån även om det inte är långt ifrån. P-värdet för den parvisa jämförelsen med obehandlat led var för släckt kalk 0,0536, NKAS torr 0,0611 och för Ekokalken 0,0829 vid regnsimulering 2. Elektriska konduktiviteten i utlakningsvattnet var högre i kalkade led men i led med släckt kalk inte signifikant skilt från obehandlat led.

I lysimeterstudien analyserades dräneringsvattnet efter den första regnsimuleringen även med avseende på totalfosfor, partikulär fosfor och löst fosfor (tabell 21). Det var signifikant lägre halt totalfosfor (ca 40-50 % lägre) och partikulär fosfor (ca 35 % lägre) i utlakningsvattnet i alla kalkade led men ingen skillnad i effekt mellan kalkslagen.

Tabell 20. Strukturstabilitet i utlakningsförsök med lysimetrar med ostörd jord. Medelvärden för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Provtagning hösten 2015. Turbiditet 1:2 och 2:2 och elektrisk konduktivitet (EC1 och EC2) i utlakningsvattnet efter regnsimulering en respektive två gånger av lysimetrarna. Resultaten redovisas som geometriska medelvärden. Behandlingseffekterna är signifikanta för turbiditet 1:2 ($p = 0,0265$), EC1 ($p = 0,0003$) och EC2 ($p = 0,0385$)

Försöksled	Turbiditet 1:2 (NFU)	Relativ- tal (Turb 1:2)	EC1 ($\mu\text{S/cm}$)	Relativ- tal (EC1)	Turbiditet 2:2 (NFU)	Relativ- tal (Turb 2:2)	EC2 ($\mu\text{S/cm}$)	Relativ- tal (EC2)
Obehandlad	670	100	109	100	923	100	78	100
Släckt kalk	331*	49	128	118	577	63	93	119
NKAS torr	312**	47	181***	166	565	61	132**	168
Ekokalk	384*	57	161***	148	603	65	113*	144

*, **, *** Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Tabell 21. Fosforutlakning i lysimeterförsöken med ostörd jord. Medelvärden för strukturkalkningsförsöken Ultuna 3, Ultuna 9 och Linnés Hammarby 4. Provtagning hösten 2015. Totalfosfor (Tot-P), partikulär fosfor (Part-P) och löst fosfor (Löst-P) i utlakningsvattnet efter den första regnsimuleringen av lysimetrarna. Resultaten redovisas som geometriska medelvärden. Behandlingseffekterna är signifikanta för Tot-P ($p = 0,0346$) och Part-P ($p = 0,0075$)

Försöksled	Tot-P $\mu\text{g/l}$	Relativtal Tot-P	Part-P $\mu\text{g/l}$	Relativtal Part-P	Löst-P $\mu\text{g/l}$	Relativtal Löst-P
Obehandlad	1003	100	678	100	285	100
Släckt kalk	665*	66	367**	54	258	90
NKAS torr	639**	64	335**	49	249	87
Ekokalk	709*	71	401*	59	266	93

*, **, *** Signifikansnivå i jämförelse med obehandlat led

Sammanfattande diskussion

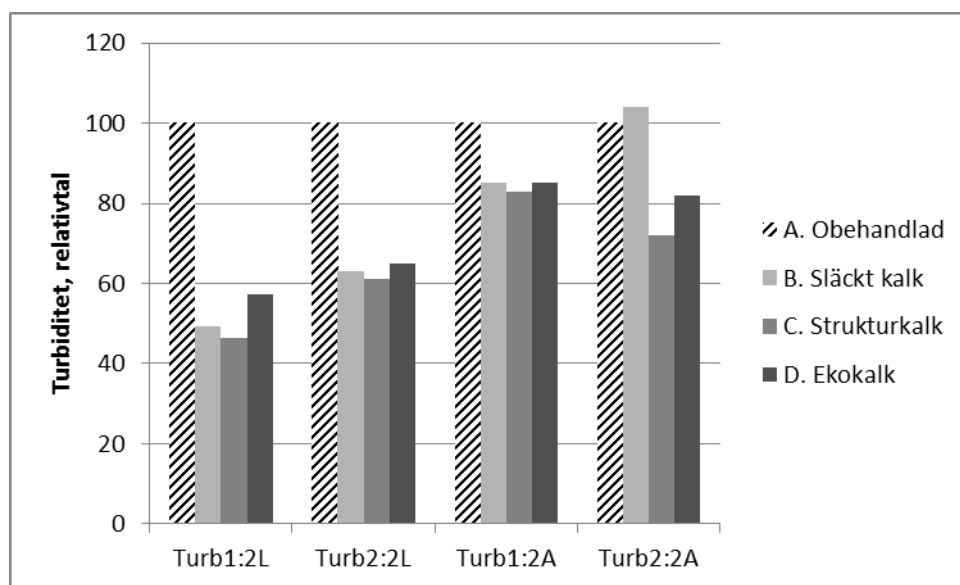
Det kemiska innehållet i Ekokalken analyserades i projektet men avsaknaden av regler för tillförsel av en del ämnen gör att det är svårt att göra en fullständig bedömning av Ekokalkens lämplighet som strukturkalkningsmedel ur miljöhänsende. Av analyserade spårelement var det endast krom och nickel som med den i försöken tillförda kalkgivan (8,3 ton/ha) överskred uppsatta gränsvärden för årlig tillförsel enligt KRAV. Konsekvensen för dessa element blir emellertid att 10–20 år bör förflyta mellan upprepade behandlingar med Ekokalk. Produkten innehåller emellertid relativt hög halt vanadin (1000–2000 mg/kg). Gränsvärde saknas för tillförsel av detta element, men riktvärdet för ”känslig markanvändning”, 100 mg/kg i jorden, motsvarar ca 20 givor av den storlek som användes i försöken. Ekokalken innehåller även en hel del kol. Olika typer av ”biokol” (biochar) används i vissa sammanhang för att förbättra de vatten- och näringshållande egenskaperna hos odlingsjordar och kan givetvis även påverka fosforns tillgänglighet (Parvage m.fl., 2013). Vi har emellertid inte gjort någon specifik bedömning av hur tillförseln av kol har påverkat jordarna och utlakningen av fosfor.

Jordarten på alla tre försöksplatserna klassificeras som styva leror (tabell 1) med en variation i lerhalt inom intervallet 45-59 % ler. Inom lerfraktionen (tabell 2) var variationen relativt liten i

halten finare ler (finler + ultraler) som i hög grad bidrar till aggregatbildningen. Både pH i jord och EC i jord var signifikant högre i kalkade led vilket visar att kalken hamnat rätt och framför allt att provtagningen är representativ.

Den genomsnittliga skördeökningen i strukturkalkade led för alla tre försöken under de två försöksåren var 3-4 % (tabell 15). Men bilden är ganska heterogen när man analyserar resultaten på en enskild plats ett enskilt år istället. Försöket Ultuna 3 visade ingen skördeökning varken 2015 eller 2016, Ultuna 9 visade på en tendens till skördeökning i vissa led 2015 och 2016 medan Linnés Hammarby 4 hade en tendens till skördeökning 2015 och statistiskt säker skördeökning för alla tre kalkslagen 2016. Detta visar att genomsnittliga skördeeffekter är en sak men vad som händer på det enskilda fältet är en helt annan. Variationen inom enskilda stora fält kan säkert vara minst lika stor.

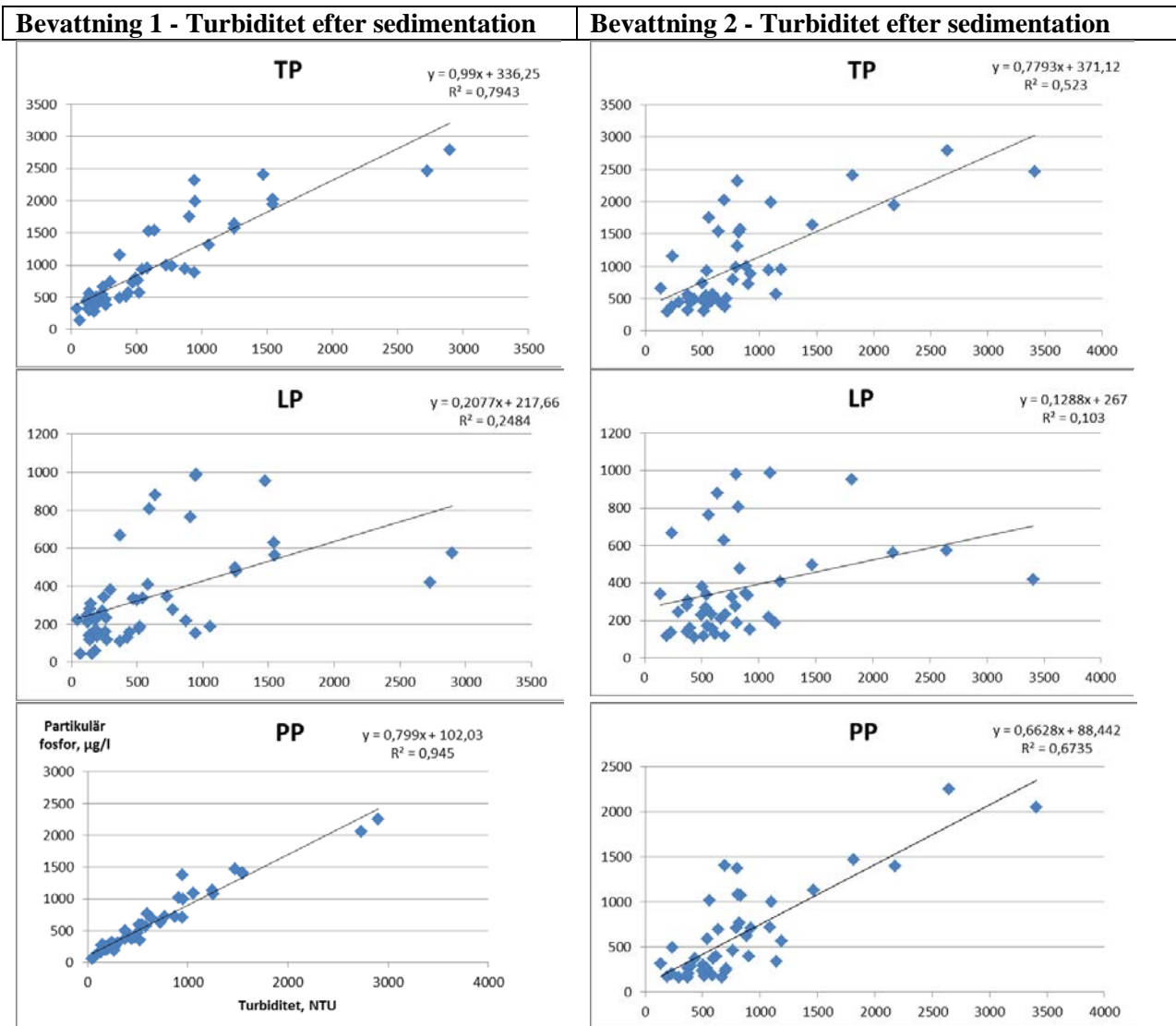
Strukturkalkens effekter på markstrukturen och dess stabilitet har mätts på flera olika sätt. I fält mättes penetrationsmotståndet som var lägre i alla kalkade led, och signifikant lägre i led med släckt kalk och Ekokalk (tabell 17). Ett lägre penetrationsmotstånd indikerar en bättre markstruktur och kan minska dragkraftsbehovet vid bearbetningarna. Även såbäddsundersökningen vid Linnés Hammarby 4 visade på en positiv struktureffekt i samtliga kalkade led (figur 3). Struktureffekten, uppmätt som minskad turbiditet i utlakningsvattnet efter regnsimuleringar av både aggregatprover och i lysimeterprover (Figur 4), visar på att strukturen stabiliserats av strukturkalkningen och därmed minskar även risken för fosforutlakning.



Figur 4. Grumlighet (turbiditet) i utlakningsvattnet efter regnsimuleringar av jordprover från alla tre försöken. Lysimetrar med ostörd jord efter första regnsimulering (Turb1:2L) och andra regnsimulering (Turb2:2L) och aggregat (2-5 mm) efter första regnsimulering (Turb1:2A) och andra regnsimulering (Turb2:2A). Behandlingseffekterna är signifikanta för Turb1:2L ($p = 0,0265$) och Turb2:2A ($p = 0,0138$).

I lysimeterstudien var utlakningen av totalfosfor och partikulär fosfor ca 50 % lägre i struktur-kalkade led vilket överensstämmer väl med vad som tidigare rapporterats för bränd kalk respektive blandvara i fältförsök med dränerade rutor på lerjordar i Mellansverige (Ulén & Etana, 2014). I försöken uppmättes ingen skillnad i struktureffekt mellan kalkslagen i det här mycket korta perspektivet där provtagningen skedde ett halvår efter kalkspridningen på våren 2015 respektive ett år efter kalkinblandningen, hösten 2015. Alla kalkade led hade förhöjda värden på EC både 2015 och 2016, vilket visar att marklösningen hade förhöjda halter av lösta salter till följd av kalkprodukterna under hela projektiden. Vad som händer i ett längre perspektiv, när de lösta kalciumjonerna lakats ut ur profilen, är svårt att förutsäga. Den släckta kalken borde enligt teorin ge en bättre struktureffekt eftersom den är mycket löslig vilket krävs för aggregeringen och dessutom innehåller så stor andel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vilket krävs för att få de reaktioner som behövs för de stabiliserande effekterna på strukturen. Övriga kalkningsmedel innehåller en liten andel släckt respektive bränd kalk och resten kalciumkarbonat (tabell 5). Det vore givetvis en fördel om man kunde följa upp resultaten med mätningar under ett par år till och även göra mätningar om 10 år. Mycket av ekonomin för lantbrukaren och motiven för strukturkalkning som miljöåtgärd beror ju på hur långsiktig effekten är.

Turbiditeten i utlakningsvattnet vid aggregatstabilitetstest bör vara väl korrelerad med P-förlusterna från lerjorden eftersom fosfor på lerjordar är bunden till lerpartiklarna (Ulén m.fl., 2012). I figur 5 visas den linjära korrelationen mellan turbiditeten i utlakningsvattnet från lysimetrarna och de olika fosforformerna i utlakningsvattnet. Sambanden både mellan partikulär fosfor och turbiditeten och mellan totalfosfor och turbiditet i utlakningsvattnet är uppenbar. Generellt var det linjära sambandet mer uttalat efter den första bevattningen än efter den andra. Något samband mellan turbiditet och löst fosfor borde inte finnas vilket bekräftas av resultaten. Det är med andra ord möjligt att utifrån en turbiditetsmätning kunna förutsäga risken för fosforutlakning, speciellt partikulär fosfor, på lerjordar. I detta projekt har vi använt både aggregat från såbädden och lysimetrar med jord i ostörd lagring vid testerna. Lysimeterstestet gav något stabilare resultat men det kan också bero på att provtagningen gjordes ett halvår senare efter att strukturen utsatts för säsongens påfrestningar som kan ha gjort skillnaden mellan leden större. Lysimeterstestet är dyrare att genomföra vilket talar för att aggregatstestet trots allt kanske är att föredra.



Figur 5. Sambandet mellan turbiditet (NTU) och totalfosfor (TP), löst fosfor (LP) och partikulär fosfor (PP) i utlakningsvattnet ($\mu\text{g/l}$) i lysimeterstudien. Data från både den första och den andra regnsimuleringen av lysimetrar. Medeltal från alla tre försöken. Turbiditeten i vattnet efter sedimentering av alla partiklar större än ler.

Publicering och resultatförmedling till näringen

Denna slutrapport kommer att ligga till grund för en vetenskaplig artikel. De preliminära resultaten har presenterats vid rådgivarträffar och i kurser för markväxtagronomstudenter vid SLU. På vår hemsida för strukturkalkningsfrågor www.slu.se/strukturkalk ligger en länk till projektet och när slutrapporten är godkänd kommer den att läggas ut på hemsidan. Resultat från detta och andra strukturkalkningsprojekt har bidragit med bakgrundsmaterial till en skrift med praktiska råd om strukturkalkning för Greppa Näringen (Strukturkalkning – bra för både mark och miljö) som Kerstin Berglund och Jens Blomquist har skrivit med Johan Malgeryd, Jordbruksverket som redaktör. Råden finns att ladda ned på Greppas hemsida <http://www.greppa.nu/download/18.6b6712dc151ab7054519c133/1450374226635/Praktiska+R%C3%A5d+Nr+23+Strukturkalkning.pdf>.

Både Jordbruksaktuellt och ATL har uppmärksammat råden och strukturkalkningen i allmänhet.

Referenser

- Andreas, L., Engström, F., Diener, S., Björkman, B. & Lind, L. 2010. Konstruktionsprodukter baserade på slagg. Jernkontorets Forskning D832, (TO55-01). 34 s. och bilaga 3.12, 6 s.
- Berglund, G. 1971. Kalkens inverkan på jordens struktur. Grundförbättring 24, 1971:2, 81-93.
- Berglund, K & Eriksson, L. 1982. Kalkens struktureffekt. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Avd. för växtnäringslära. Rapport 148, p.59-70.
- Berglund, K & Blomquist, J. 2002. 4.2.1. Effekter av strukturkalkning på skörd och markstruktur I: *4T Tillväxt Till Tio Ton (4T The Ten Ton Target)*. Slutrapport. Kap 4.2.1, 14-15.
- Churchman, G.J. & Tate, K.R. 1986. Aggregation of clay in six New Zealand soil types as measured by disaggregation procedures. *Geoderma*, 37, 207-220.
- Ekholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiirikki, M., Lahti, K. & Pietola, L. 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. *Agricultural and Food Science*, 21: 279-291.
- Eriksson, J., Mattsson, L. & Söderström, M. 2010. Tillståndet i svensk åkermark och gröda, data från 2001-2007. Naturvårdsverket, rapport nr 6349.
- Hamza, M.A. & Anderson, W.K. 2002. Improving soil physical fertility and crop yield on clay soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 615-620.
- Haynes, R.J. & Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 123-137.
- Kritz, G. 1983. Såbäddar för vårsträsäd: En stickprovsundersökning. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. Nr 65. Avd. för jordbearbetning, Inst. för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Larsson, M. A. 2014. Vanadium in Soils. Chemistry and Ecotoxicity. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Doctoral Thesis No. 2014:102, 60 s.
- Larsson Jönsson, H., Wadmark, L. & Törner, L. 2014. Aktiv Struktur Kol – ett alternativ till kalkning. LTV-fakultetens faktablad. Fakta från Partnerskap Alnarp. 2014:18.
- Jernkontoret. 2012. Stålintustrin gör mer än stål. Handbok för restprodukter 2012. ISBN 978-91-977783-2-9. 52 s.
- Jonsson S. 2006. Vanadinutvinning ur LD-slagg. Examensarbete Luleå Tekniska Högskola 2006: 127 CIV. 66 s.
- Jordbruksaktuellt. 2010. Nyhet från Jordbruksaktuellt 2010-07-30. KRAVs regler stoppar strukturkalkning.
- Jordbruksverket. 2016. Gödselmedel för ekologisk odling. Specialgödselmedel och stallgödsel. Version 2016-01-11. 14 s.
- Parvage, M., M., Ulén, B., Eriksson, J., Stroock, J. & Kirchmann, H. 2013. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biol Fertil Soils* (2013) 49:245–250.
- Shanmuganathan, R.T. & Oades, J.M. 1983. Modification of Soil Physical Properties by Addition of Calcium Compounds. *Aust. J. Soil Res.*, 21, 285-300.
- Ulen, B., Alex, G., Kreuger, J., Svanbäck, A. & Etana, A. 2012. Particulate facilitated leaching of glyphosate and phosphorus from a marine clay soil via tile drains, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 62:sup2, 241-251.
- Ulen, B. & Etana, A. 2014. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 64:5, 425-433.