

Markstrukturförbättring och begränsning av fosforförluster från åkermark med hjälp av inblandning av olika kalciumprodukter i matjorden

Kerstin Berglund, Jens Blomquist, Ararso Etana och Magnus Simonsson
Institutionen för mark och miljö, SLU

Bakgrund och syfte

En god markstruktur är grunden för en väl fungerande odlingsjord. Många miljöproblem vid odling, som t.ex. kväve- och fosforförluster, är relaterade till en dåligt fungerande markstruktur. Eftersom en stor del av fosforläckaget på lerjordar sker genom partikulärt bunden fosfor som följer med yt- och dräneringsvattnet bör markstrukturförbättrande åtgärder, där målet är att lerpartiklarna bildar större svårtransporterade aggregat, minska fosforläckaget avsevärt. Tidigare studier har visat att inblandning av strukturkalk (bränd och släckt kalk) kan ge bättre markstruktur, högre skörd (Berglund, 1971; Berglund & Blomquist, 2002) och mindre utlakning av fosfor via ytavrinning och dräneringsvatten (Alakukku & Aura, 2006; Ulén & Etana, 2014). De strukturkalkningsmedel som idag används i lantbruket är en blandning av bränd eller släckt kalk (ca 15 %) och kalkstensmjöl (ca 85 %). Inom den ekologiska odlingen har gips (kalciumsulfat) lanserats som ett alternativ. Dessa nya strukturkalkningsmedel är betydligt billigare och lättare att hantera och sprida än den rena släckta kalken, men deras effekt har inte i någon större omfattning testats under kontrollerade förhållanden.

Målsättningen med detta projekt var att utvärdera effekten på markstruktur och skörd av inblandning av olika kalciumprodukter i matjorden på lerjordar. Studien har genomförts dels i nyutlagda fältförsök med nya kalciumprodukter med olika löslighet, dels i långliggande strukturkalkningsförsök. Fältförsöken kompletterades med laboratoriestudier och test av en förenklad metod för mätning av aggregatstabilitet.

Material och metoder

Fältförsök

Fyra fältförsök (8501A, 8501B, 8502 och 8503), med vardera fyra upprepningar och med olika kalciumprodukter, lades ut i oktober 2010 vid Säby söder om Uppsala (tabell 1–4). Termen ”kalciumprodukt” kommer att användas som samlingsnamn för både pH-höjande kalkningsmedel och gips, som inte verkar pH-höjande. Försök lade även ut på två ytterligare platser (Årsta i Södermanlands län, Hackstad i Östergötland), men skördades av olika skäl endast ett respektive två år; resultat därifrån kommer inte att behandlas i rapporten. I försöken testades olika givor (motsvarande 1, 2 och 6 ton CaO/ha) av släckt kalk och en blandprodukt (släckt/bränd kalk och kalciumkarbonat). I ett försök 8502 vid Säby ingick även gips i försöksplanen. Förutom dessa nyanlagda försök gjordes aggregatstabilitetsanalys i fem långliggande försök med strukturkalkning startade mellan åren 1989 och 1998.

Försöksplatsernas jordarter redovisas i tabell 1; för deras pH-värden hänvisas till tabell 10 och 11. Det fanns en stor variation i växtnäringsstatus mellan de olika försöksplatserna (tabell 2). Försök 8502 och 8503 hade en högre bördighet än 8501A och 8501B. Försök 8501A utmärkte sig genom lägre basmättnadsgrad än i övriga försök. Försök 8501B hade låg P-AL-klass, 8503 mycket hög sådan.

Tabell 1. Mullhalt och kornstorleksfraktioner (procent av finjorden, <2 mm) på försöksplatserna vid Säby. Kornstorleksanalysen är gjord med laserscanning, vilket generellt ger en lägre lerhalt än traditionell mekanisk analys med pipettmetoden

Fältförsök	Mullhalt	Sand	Mo	Mjåla	Lerhalt (<2 µm)	Grovler (0,1–2 µm)	Finler (0,1–0,2 µm)	Ultraler (<0,1 µm)
8501A	2,6	0,4	28,6	43,1	27,9	23,8	3,8	0,25
8501B	3,8	0,6	24,4	52,4	22,6	19,8	2,7	0,15
8502	4,7	0,1	13,0	47,4	39,5	31,8	7,0	0,70
8503	1,9	0,5	17,5	56,9	25,1	21,5	3,4	0,25

Tabell 2. Växtnäringsstatus för försöksplatserna 8501A, 8501B, 8502 och 8503 vid Säby i obehandlat led

Fält-försök	CEC (pH7)	Bas-mättnad	P-AL (klass)	P-HCl (klass)	K-AL (klass)	K-HCl (klass)	Mg-AL	K/Mg-kvot	Ca-AL	Cu-HCl
	mg/100 g	%	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g		mg/100 g	mg/1000 g
8501A	16	64	5,7 (III)	83 (5)	16 (III)	390 (4)	9,3	1,7	145	22
8501B	22	82	2,7 (II)	66 (4)	12 (III)	315 (4)	27	0,5	235	23
8502	32	89	4,5 (III)	73 (4)	20 (IV)	545 (5)	24	0,8	385	37
8503	20	92	16,5 (V)	94 (5)	25 (IV)	595 (5)	19	1,3	275	35

Givor av kalciumprodukter

Givor av de olika kalciumprodukterna beräknades så, att tillförseln av kalcium (Ca) skulle vara densamma oberoende av kalciumprodukt och dess löslighet (tabell 3); de motsvarade konsekvent 1, 2 och 6 ton CaO/ha. Givan 1 ton CaO/ha (0,7 ton Ca/ha) innebar en tillförsel av 1,4 ton släckt kalk, 2 ton/ha Nordkalk Aktiv Struktur (NKAS) respektive 3,8 ton/ha gips (Yara Finland). Kalkgivan i försök 8501B blev dock något lägre (tabell 8) än planerat.

Tabell 3. Innehåll (viktsprocent av ts) och egenskaper hos de olika kalciumprodukterna. Produkterna märkta med '**' har en sammansättning som varierar något med ursprungsmaterialet (kalkstenen).

Kalciummedel	Använt i försök nr			Kemisk formel	Ca %	S %	Löslighet ¹ g/l	pH (H ₂ O)
	8501A	8502	8503					
	8501B							
Kalkstensmjöl*	–	–	–	CaCO ₃	40	0,02	0,014	7–9
Bränd kalk*	–	–	–	CaO	64	–	1,3	12,3
Släckt kalk*	Ja	Ja	Ja	Ca(OH) ₂	50	0,02	1,8	12,4
Nordkalk Aktiv Struktur* (NKAS)	Ja	Ja	–	CaCO ₃ / Ca(OH) ₂	36	1,5	–	–
Gips Yara Finland ²	–	Ja	–	CaSO ₄ · 2H ₂ O	19	18	0,021	7

¹ Löslighet i H₂O vid 18°C

² Gipsen är en lättlöslig biprodukt från fosforgödselframställningen och innehöll utöver Ca och S bl.a. 1,8 g/kg P.

Spridning av kalciumprodukterna, jordbearbetning, grödor, gödsling

Spridning av kalciumprodukterna i 8501A, 8501B, 8502 och 8503 utfördes 13–21 okt 2010. Inblandning gjordes med en till två överfarter (Carrier) samma dag som spridningen eller dagen efter. Konventionell höstplöjning utfördes 0–4 dagar efter spridningen. Tabell 4 visar grödor och ungefärliga gödselgivor avseende N, P och S under de fyra försöksåren.

Tabell 4. Grödor och gödselgivor (kg/ha) i försöken under år 2011–2014. Tillförsel av N och P gjordes 2011 med NP 26-4; 2012–2014 tillfördes N och S med NS 27-4 (Axan)

Försök	2011			2012			2013			2014		
	Gröda	N	P	S	Gröda	N	P	S	Gröda	N	P	S
8501A	Havre	82	13	13	Havre	85	0	12	Vårkorn	85	0	12
8501B	Havre	82	13	13	Havre	85	0	12	Vårkorn	85	0	12
8502 ¹	Havre	82	13	13	Höstvete	122	0	17	Vårkorn	85	0	12
8503	Havre	82	13	13	Havre	85	0	12	Vårkorn	85	0	12

¹ Med gipsbehandling i vissa led tillfördes 2010 dessutom upp till 4 100 kg/ha S och 40 kg/ha P (jfr not till tabell 3).

Metodutveckling för att bestämma aggregatstabilitet

Aggregatstabilitet är ett mått som ofta används för att mäta effekten av olika åtgärder på markstrukturen på lerjordar. Aggregatens stabilitet mäts genom att doppa aggregat i vatten och sedan mäta vattnets grumlighet (turbiditet). Turbiditeten har visat sig vara väl korrelerad med förlusten av partikulär P (Etana m.fl., 2009). Instabila aggregat faller sönder och vattnet blir grumligt. I projektet utvecklades en förenklad metod med större provmängd och förenklad utrustning jämfört med tidigare metodutformning (Etana m.fl., 2009). Jord (2–5 mm diameter) togs i samband med såbäddsundersökning på våren 2013 i samtliga nyutlagda försök (8501A, 8501B, 8502 och 8503). I de långliggande försöken togs jordprover på 5–15 cm djup och preparerades i laboratoriet. Jordproverna lufttorkades och 80 g jord placerades i en ring med nät i botten (0,6 mm nätöppning) och sänktes helt ned i en bägare med 300 ml regnvatten (tillverkat på lab) tre gånger. Det fuktiga provet fick stå ett dygn varefter procedu-

ren upprepades men provet doppades endast en gång i nytt vatten denna gång. Turbiditeten i vattnet mättes enligt Etana m.fl. (2009). Här redovisas endast turbiditet som mättes vid andra dopningen.

Övriga analyser

pH och elektrisk konduktivitet mättes 2011, 2012 och 2013. Provtagningen för pH-bestämning skedde i samtliga fall på 5–15 cm djup i matjorden. I vårbruket 2013 gjordes undersökningar i fält av vattenhalter med Wet Sensor (Delta-T devices Ltd, Cambridge, UK) före såbäddsberedning. Mätningen gjordes med 10 stick till ca 10 cm djup i plogtiltan i en diagonal över parcellerna. I de plöjningsfria leden i försök 8503 gjordes registreringen på plan mark, men också till ca 10 cm djup. Efter sådd undersöktes såbäddarna dessutom med avseende på bearbetningsdjup, aggregatstorleksfördelning och vattenhalt (Kritz & Håkansson, 1971). Vidare gjordes en planräkning efter uppkomst. Efter skörd av vårkorn, men före jordbearbetning, gjordes i orörd stubb i månadsskiftet september/oktober 2013 undersökningar av vatteninfiltration i fält (Berglund & Gustafson Bjuréus, 2008) i samtliga fyra försök. I försök 8501A togs dessutom samtidigt ut stålcyllindrar för mätning av torr skrymdensitet, hydraulisk konduktivitet och krympning (Andersson, 1955) på laboratoriet.

Statistisk bearbetning

Variansanalys (ANOVA) gjordes i SAS med proceduren *mixed*. För enskilt år på enskild plats användes *led* och *block* som faktorer. I flera fall beräknades ANOVA på flerårsmedeltal med huvudfaktorerna *plats*, *år*, *led* och *block* samt eventuella signifikanta samspel mellan dessa faktorer. I resultatdelens tabeller anger fet stil, att ledets medelvärde är signifikant skilt från kontrolledets medelvärde på 5 % signifikansnivå. 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 ($p < 0,05$); LSD-värden givna inom parentes anger att en sådan jämförelse inte ska göras. I vissa fall analyserades kontrasten mellan å ena sidan kontrolledet (A), å andra sidan en grupp av behandlingar, t.ex. samtliga led som behandlats med pH-höjande kalciumprodukter (B–G).

Resultat

Avkastningseffekter av pH-höjande kalciumprodukter

I tre av försöken (8501A, 8501B och 8502) fanns sju gemensamma led, A–G. I tabell 5 redovisas avkastningen för dessa sju led och försök under åren 2011–2014 som enskilda år och som medeltal för 4 år. Den statistiska analysen visade inga signifikanta skillnader i avkastning mellan leden, vare sig i genomsnitt över de fyra åren ($p 0,393$) eller för något enskilt år. Inte heller fanns något samspel mellan år och kalkbehandling, d.v.s. de olika grödorna (=åren) reagerade inte på olika sätt för kalkbehandlingarna.

Bakom medeltalen i tabell 5 döljer sig emellertid olika reaktioner för behandlingarna i de olika försöken, vilket yttrade sig i ett signifikant samspel mellan försök och behandling ($p 0,025$). Medan pH-höjande kalciumprodukter (led B–G) inte gav några avkastningseffekter i försök 8502, eller ens i det relativt sura 8501A (jfr tabell 2), blev det i försök 8501B under två av åren en signifikant *negativ* effekt i några enskilda kalkningsled (tabell 6) åren 2011 och 2013. En statistisk analys av kontraster visade, att de kalkade leden B–G som grupp betraktad gav en signifikant skördesänkning med ca 170 kg/ha jämfört med det obehandlade A-ledet under perioden 2011–2014 ($p 0,020$).

Tabell 5. Avkastning (kg/ha, 15 % vh) för led A-G i försök 8501A, 8501B och 8502, 2011–2014 enskilda år samt flerårsmedeltal

Led	Behandling	2011 (3 x havre)		2012 (2 x havre, 1 h- vete)		2013 (3 x vårkorn)		2014 (3 x vårkorn)		2011–2014	
		Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.
A.	0 ton Obehandlat	4150	100	5960	100	4920	100	4830	100	4960	100
B.	1 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	3950	95	5820	98	4910	100	4770	99	4860	98
C.	2 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	4070	98	5950	100	4890	99	4900	101	4950	100
D.	6 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	3970	96	6090	102	4830	98	4880	101	4940	100
E.	1 ton CaO/ha som NKAS	4030	97	6060	102	4640	94	4750	98	4870	98
F.	2 ton CaO/ha som NKAS	4100	99	6040	101	4930	100	4780	99	4970	100
G.	6 ton CaO/ha som NKAS	4020	97	5980	100	4710	96	4930	102	4910	99
	p	0,613		0,243		0,140		0,461		0,393	
	LSD	(410)		(380)		(430)		(350)		(120)	

Tabell 6. Avkastning (kg/ha, 15 % vattenhalt) i försök 8501B, 2011–2014 samt flerårsmedeltal

Led	Behandling	2011 (havre)		2012 (havre)		2013 (vårkorn)		2014 (vårkorn)		2011–2014	
		Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.
A.	0 ton Obehandlat	5310	100	5310	100	5810	100	5020	100	5360	100
B.	0,9 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	4730	89	5150	97	5700	98	4910	98	5120	96
C.	1,7 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	5060	95	5340	101	5610	97	5010	100	5250	98
D.	5,1 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	5240	99	5550	105	5300	91	5080	101	5290	99
E.	0,7 ton CaO/ha som NKAS	5130	97	5450	103	5390	93	4720	94	5180	97
F.	1,4 ton CaO/ha som NKAS	4860	92	5450	103	5390	93	4830	96	5130	96
G.	4,2 ton CaO/ha som NKAS	5040	95	5490	103	5280	91	4920	98	5180	97
	p	0,045		0,176		0,001		0,146		0,107	
	LSD	360		(310)		250		(270)		(180)	

Avkastningseffekter av gips

Försök 8502 var en utvidgad version av försök 8501A och 8501B, genom att tre led med gipsbehandlingar (kalciumsulfat) fanns med i planen. Skörderesultaten för åren 2011–2014 samt medeltal för de 4 åren visas i tabell 7.

Tabell 7. Avkastning (kg/ha, 15 % vh) i försök 8502, 2011–2014 för enskilda år samt flerårsmedeltal

Led	Behandling	2011 (havre)		2012 (höstvet)		2013 (vårkorn)		2014 (vårkorn)		2011–2014	
		Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.
A.	0 ton Obehandlat	4360	100	6750	100	5060	100	4510	100	5170	100
B.	1 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	4430	102	6510	96	5050	100	4310	96	5070	98
C.	2 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	4680	107	6750	100	5090	101	4650	103	5290	102
D.	6 ton CaO/ha som Ca(OH) ₂	4160	95	6620	98	5250	104	4550	101	5140	99
E.	1 ton CaO/ha som NKAS	4030	92	6680	99	4640	92	4510	100	4960	96
F.	2 ton CaO/ha som NKAS	4470	103	6820	101	4000	99	4490	99	5190	100
G.	6 ton CaO/ha som NKAS	4410	101	6600	98	5250	104	4770	106	5260	102
H.	1 ton CaO/ha som Gips	4460	102	6810	101	5320	105	4510	100	5280	102
I.	2 ton CaO/ha som Gips	4550	104	7030	104	5350	106	4750	105	5420	105
K.	6 ton CaO/ha som Gips	4400	101	6960	103	5720	113	5130	114	5550	107
	p	0,204		0,017		0,005		0,150		0,005	
	LSD	(440)		280		430		(510)		260	

Det första året efter utläggning, 2011, fanns inga signifikanta skillnader mellan A-ledet och behandlade led, men 2012 och 2013 skilde sig i tur och ordning led I och K från A-ledet genom en signifikant högre avkastning. Det sista försöksåret, 2014, fanns dock inte längre några statistiskt signifikanta effekter gentemot A-ledet. Sett över hela perioden, 2011–2014, avkastade led K signifikant högre skörd än led A. De beräknade kontrasterna visade att avkastningen var signifikant högre i de tre gipsleden (led H–K) än i led A (p 0,025) sett över åren 2011–2014.

Avkastningseffekter av släckt kalk och olika grundbearbetning

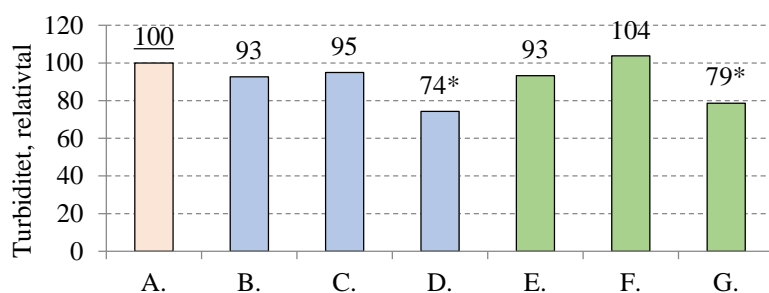
I försök 8503 kombinerades strukturkalkning genom tillförsel av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (2 ton/ha CaO) med grundbearbetning med respektive utan plog i split-plot design. Tabell 8 redovisar avkastningen årsvis och som medeltal för de fyra åren. Medan avkastningen inte påverkades signifikant av de olika grundbearbetningarna, medförde strukturkalkningen en signifikant skördeökning i medeltal över åren 2011–2014 (p 0,006). Skördeökningen inträffade dock först under de två sista åren, 2013–2014. År 2013 ökade avkastningen med 490 kg per hektar som resultat av kalkning med 2 ton CaO per hektar som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som medeltal av plöjda och icke-plöjda led där båda bearbetningsformerna reagerade likadant på kalkningen. År 2014 höjde kalkningen avkastningen med 230 kg per hektar som medeltal av plöjda och icke-plöjda led. Det sista året 2014 fanns också ett signifikant samspel såtillvida att kalkningen endast ökade avkastningen signifikant i det plöjningsfria ledet, men inte hade någon statistiskt säker skördepåverkan i det plöjda ledet. Av den statistiska bearbetningen framkom också att strukturkalkningen i medeltal över åren 2011–2014 ökade avkastningen signifikant i det plöjningsfria ledet (S0/S2; p 0,018) med 190 kg per hektar, medan avkastningsökningen i det plöjda ledet inte var statistiskt signifikant (P0/P2; p 0,099). Strukturkalkningen hade alltså en mer positiv effekt i det plöjningsfria ledet än i det plöjda.

Tabell 8. Avkastning (kg/ha, 15 % vattenhalt) i försök 8503, 2011–2014 samt flerårsmedeltal.

Led	Behandling	2011 (havre)		2012 (havre)		2013 (vårkorn)		2014 (vårkorn)		2011–2014	
		Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.	Avk. kg/ha	Rel.
P0.	Plöjt, 0 ton CaO	3970	100	5850	100	5760	100	5260	100	5210	100
P2.	Plöjt, 2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$	4110	104	5920	101	6150	107	5170	98	5340	102
S0.	Stubbearb, 0 ton CaO	4090	103	6300	108	5150	89	4830	92	5090	98
S2.	Stubbearb, 2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$	4030	102	6000	103	5730	99	5370	102	5280	101
P.	Plöjt	4040	100	5890	100	5950	100	5210	100	5270	100
S.	Stubbearb	4060	100	6150	104	5440	91	5100	98	5190	98
0.	0 ton CaO	4030	100	6080	100	5450	100	5040	100	5150	100
2.	2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$	4070	101	5960	98	5940	109	5270	105	5310	103
	p F1, Plöjt/Stubbearb	0,946		0,248		0,341		0,196		0,707	
	p F2, 0/2 ton CaO/ha	0,662		0,421		0,007		0,019		0,006	
	p F1*F2	0,272		0,205		0,461		0,003		0,566	
	LSD F1	(680)		(500)		(1450)		(180)		(530)	
	LSD F2	(210)		(320)		290		180		110	

Aggregatstabilitet

Turbiditetsmätningarna redovisas i figur 1. I de nyutlagda försöken i Uppsala (8501A, 8501B och 8502) reducerades turbiditeten och därmed jordförlusten signifikant med 26 respektive 21 % vid 6 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ respektive NKAS. Givorna 1 respektive 2 ton CaO per hektar av produkterna gav däremot inga signifikanta skillnader i turbiditet jämfört med kontroll i led A. Turbiditetsmätningarna i de fem långliggande försöken utlagda mellan 1989 och 1998 visade inga signifikanta skillnader mellan de behandlade leden och kontrolledet.



Figur 1. Turbiditet, aggregat 2–5 mm från såbädd i försök 8501A, 8501B och 8502 våren 2013. Led A=100. Turbiditeten i led D och G var signifikant lägre (*) än i led A. Se tabell 5 för ledbeteckningar.

Undersökningar i vårbruket 2013

Behandlingarna med kalciumprodukter gav inga signifikanta effekter på jordens vattenhalt före vårbruket. Den enda noterbara skillnaden fanns i försök 8503, där de plöjda leden hade lägre vattenhalt än de plöjningsfria, dock utan att skillnaden var statistiskt säkerställd. Vidare visade såbäddsundersökningen efter sådd inga signifikanta skillnader i bearbetningsdjup eller vattenhalt (vikts-%) i aggregaten. Aggregatstorleksfördelningen visade inga signifikanta skillnader för behandlingarna i försök 8501A, 8501B eller 8502, vare sig i de enskilda försöken eller sammanslagna i de tre försökens sju gemensamma led A–G. I försök 8503 fanns dock statistiskt säkra skillnader i aggregatstorleksfördelning, både som effekt av jordbearbetning och strukturkalkning (tabell 9). Således var andelen grova aggregat (5–16 mm) signifikant mindre i de plöjda leden (p 0,044) och det fanns också en tendens till samma mönster i de kalkade leden (p 0,059). Andelen fina aggregat (< 2 mm) var signifikant högre i de plöjda leden (p 0,004) och likaså högre i de strukturkalkade leden (p 0,002). Planträkningarna efter uppkomst visade i försök 8501A signifikant högre plantantal i de strukturkalkade leden B, C, E, F och G jämfört med obehandlat led A. I övriga försök fanns inga säkra skillnader.

Tabell 9. Aggregatstorleksfördelning i såbäddar efter sådd våren 2013 i försök 8503.

Led	Behandling	Aggregat 5–16 mm, vol-%	Aggregat 2–5 mm, vol-%	Aggregat < 2 mm, vol-%
P0.	Plöjt, 0 ton CaO	30,4	34,7	34,9
P2.	Plöjt, 2 ton CaO som Ca(OH) ₂	27,8	33,0	39,2
S0.	Stubbearb, 0 ton CaO	43,5	33,3	23,2
S2.	Stubbearb, 2 ton CaO som Ca(OH) ₂	40,9	32,3	26,8
P.	Plöjt	29,1	33,8	37,1
S.	Stubbearb	42,2	32,8	25,0
0.	0 ton CaO	37,0	34,0	29,1
2.	2 ton CaO	34,4	32,6	33,0
	medeltal	35,7	33,3	31,0
	CV %	6,2	3,6	4,7
	p F1, Plöjt/Stubbearb	0,044	0,701	0,004
	p F2, 0/2 ton CaO/ha	0,057	0,064	0,002
	p F1*F2	0,977	0,545	0,653
	LSD F1	12,4	(7,5)	4,8
	LSD F2	(2,7)	(1,4)	1,8

Undersökningar före höstbruket 2013

Infiltrationsmätningarna i fält visade inga signifikanta skillnader för de olika behandlingarna med strukturkalk. I försök 8503 fanns dock en säker skillnad som effekt av jordbearbetning med högre infiltrationshastighet för de plöjningsfria leden. Inga signifikanta effekter fanns med avseende på torr skrymdensitet, krympning eller hydraulisk konduktivitet bestämda på laboratoriet i jord från försök 8501A.

pH-värde och elektrisk konduktivitet

Även om inte alla behandlade led uppvisade signifikanta pH-effekter fanns inte oväntat ett mönster med högre pH-värde efter en högre giva med pH-höjande kalciumprodukter (tabell 10, led B–G och tabell 11, led 2). Kalkningen med gips (försök 8502) visade däremot en motsatt effekt, med signifikant sänkt pH-värde i led K, som hade den högsta givan. Att notera är att i det fall pH mättes våren efter spridningen (försök 8501A) fanns ännu inga signifikanta pH-effekter, och att de i samtliga försök hade klingat av hösten 2013, tre år efter spridningen (tabell 10 och 11). Dock kvarstod i många fall effekter av samtliga kalciumprodukter i form av en signifikant förhöjd elektrisk konduktivitet jämfört med obehandlat A-led, särskilt i led med de högsta givorna (tabell 10 och 11).

Tabell 10. pH-värde 2011–2012 samt elektrisk konduktivitet och pH-värde 2013 i försök 8501A, 8501B och 8502. Se tabell 4 för försöksbehandlingar

Led	8501A				8501B			8502		
	pH april 2011	pH sept 2012	pH okt 2013	El kond. okt 2013 $\mu\text{S/cm}$	pH sept 2012	pH okt 2013	El kond. okt 2013 $\mu\text{S/cm}$	pH dec 2011	pH okt 2013	El kond. okt 2013 $\mu\text{S/cm}$
A.	6,11	5,92	6,47	95	6,34	6,86	94	6,82	7,12	133
B.	6,28	6,29	6,07	140	6,39	6,92	98	7,14	6,91	142
C.	6,49	6,05	6,26	124	6,65	6,87	100	7,40	6,87	140
D.	6,63	6,77	6,35	141	7,33	6,77	151	7,87	6,95	166
E.	6,16	6,17	6,3	99	6,44	6,83	100	7,01	6,80	147
F.	6,22	5,90	6,36	110	6,49	6,87	96	7,14	6,92	126
G.	6,56	6,81	6,34	150	7,13	6,83	148	7,50	6,92	203
H.	—	—	—	—	—	—	—	6,96	6,87	124
I.	—	—	—	—	—	—	—	6,56	6,88	128
K.	—	—	—	—	—	—	—	6,34	6,79	259
medeltal	6,35	6,27	6,31	123	6,68	6,85	112	7,07	6,90	157
CV %	4,6	5,1	3,3	12	3,4	2,2	15	3,5	2,7	18
p	0,114	0,003	0,280	0,000	0,000	0,859	0,000	0,000	0,470	0,000
LSD	(0,43)	0,49	(0,31)	21	0,34	(0,22)	25	0,36	(0,27)	41

Tabell 11. pH-värde 2012 samt elektrisk konduktivitet och pH-värde 2013 i försök 8503

Led	Behandling	pH sept 2012	pH okt 2013	El kond. okt 2013 $\mu\text{S/cm}$
P0.	Plöjt, 0 ton CaO	7,30	7,12	101
P2.	Plöjt, 2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$	7,63	7,01	113
S0.	Stubbearb, 0 ton CaO	7,28	6,76	146
S2.	Stubbearb, 2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$	7,85	7,02	186
P.	Plöjt	7,47	7,07	107
S.	Stubbearb	7,56	6,89	166
0.	0 ton CaO	7,29	6,94	123
2.	2 ton CaO	7,74	7,02	149
	medeltal	7,52	6,98	136
	CV %	4,6	2,6	13
	p F1, Plöjt/Stubbearb	0,613	0,225	0,023
	p F2, 0/2 ton CaO/ha	0,040	0,446	0,025
	p F1*F2	0,518	0,091	0,151
	LSD F1	(0,55)	(0,37)	43
	LSD F2	0,42	(0,22)	21

Växtnäringsanalyser (spannmålskärna)

I försök 8502 utfördes det sista försöksåret 2014 växtnäringsanalyser på spannmålskärna (vårkorn). För makronäringsämnena Ca, K, Mg, P och S fanns inga signifikanta skillnader mellan leden (tabell 12). För mikronäringsämnena Mn och Cu var emellertid halterna signifikant lägre i led D och G med de högsta givorna av släckt kalk och NKAS, jämfört med det obehandlade ledet. I led G var också halten Zn signifikant lägre än i led A (tabell 12), vilket indikerar att höga kalkgivor i vissa fall kan hålla nere koncentrationen även av detta ämne. Av de mätta ämnena var det bara Mn som låg inom det kritiska intervallet, där viss skördenedsättning kan vara aktuell (Reuter m.fl., 1997). Övriga element låg betydligt över gränsen för eventuell brist. Positiva korrelationer mellan skörd och halterna av K (p 0,005) och Mg (p 0,048) förelåg också, men halterna av sistnämnda ämnen var inte signifikant påverkade av behandlingarna.

Tabell 12. Halt (mg/kg ts) av Ca, K, Mg, P, S, Zn, Mn och Cu i kärna av vävorn i försök 8502 skördeåret 2014. Se tabell 4 för ledbe-teckningar. Kritiska halter för kornkärna, under vilka 5–10% skördenedsättning kan väntas, enligt Reuter m.fl. 1997 (saknas för Ca, Mg och K)

Led	Tot-Ca mg/kg ts	Tot-Mg mg/kg ts	Tot-K mg/kg ts	Tot-P mg/kg ts	Tot-S mg/kg ts	Tot-Zn mg/kg ts	Tot-Mn mg/kg ts	Tot-Cu mg/kg ts
A.	494	1 370	5 260	3 590	1 420	36,6	10,4	4,64
B.	495	1 340	5 210	3 510	1 260	35,6	9,4	4,51
C.	496	1 290	5 200	3 410	1 210	34,6	9,8	4,58
D.	513	1 330	5 380	3 570	1 260	34,6	8,1	4,45
E.	500	1 320	5 150	3 390	1 370	36,8	9,9	4,64
F.	492	1 330	5 200	3 470	1 160	35,8	9,6	4,53
G.	501	1 340	5 400	3 540	1 240	34,2	8,1	4,49
H.	501	1 320	5 220	3 400	1 250	38,1	10,2	4,67
I.	505	1 300	5 180	3 320	1 260	38,2	10,3	4,66
K.	492	1 380	5 380	3 560	1 230	36,9	11,0	4,71
medeltal	499	1 330	5 260	3 480	1 270	36,1	9,7	4,59
CV %	2,5	3,4	3,0	4,4	12	4,5	7,6	2
p	0,371	0,249	0,225	0,231	0,512	0,013	0,000	0,003
LSD	(17)	(70)	(230)	(220)	(230)	2,4	1,1	0,13
Kritisk halt	–	–	–	1900–2600	1100–1300	ca 8	9–10	1–2

Diskussion och sammanfattning

De fyra försöken utanför Uppsala lades ut utan finansiering när det hösten 2010 stod klart att LOVA-stöd för strukturkalkning skulle bli verklighet. Påpassligheten var avgörande för att resultat snabbt skulle finnas tillgängliga för svenskt jordbruk, men spridning och nedbrukning av kalk utfördes därmed också under stor tidspress och under icke optimala förhållanden. Kalkprodukterna spreds sent på hösten, i andra halvan av oktober, med minusgrader på nätterna och nedbrukningen inskränktes till ytlig bearbetning med Carrier. De höga temperaturer som krävs för puzzolanreaktioner och den grundliga inblandning mellan jord och kalk som bör eftersträvas för maximal jordkontakt uteblev alltså.

Aggregatstabiliteten förbättrades

Trots dessa förutsättningar minskade turbiditeten signifikant i led D och G på aggregat i såbädden från våren 2013, ca 2,5 år efter spridning i jämförelse med i det obehandlade A-ledet (figur 1). Aggregatstabiliteten förbättrades m.a.o. signifikant vid de högsta givorna av släckt kalk och NKAS. Tidigare undersökningar (Ulén et al., 2012) visade också en förbättring av markstrukturen med höga givor av bränd kalk, men resultaten från dessa nya fältförsök visar att också blandprodukten NKAS kan ge en strukturförbättring. Något förvånande är att både släckt kalk i led D och NKAS i led G gav ungefär samma minskning av turbiditet. I försöken baserades givorna på tillförd mängd kalcium (Ca). Andelen Ca som tillfördes i form av den reaktiva $\text{Ca}(\text{OH})_2$ var dock relativt liten i NKAS, där större delen av kalciumet tillfördes i form av CaCO_3 . Den förbättrade effekt på markstrukturen som kunde förväntas i led D utifrån en högre halt av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ blev alltså ungefär densamma som i led G. Resultaten förväntas och behöver verifieras med fler undersökningar.

Förbättringen av aggregatstabilitet, mätt som minskning av turbiditet, blev dock mindre än det Vattenmyndigheterna räknar med som resultat av strukturkalkning, nämligen en minskning av P-förlusterna med 30 procent. I våra undersökningar var förbättringen av aggregatstabilitet drygt 20 procent som resultat av 6 ton CaO per hektar som NKAS. Om denna nivå var en effekt av ogynnsamma förhållanden vid spridning som beskrivs ovan, eller den nivå som man kan räkna med skulle behöva klarläggas med ytterligare undersökningar.

I vår studie var det bara de högsta givorna av släckt kalk respektive NKAS som gav en signifikant förbättring av markstrukturen. Det är möjligt – och även sannolikt – att strukturförbättringen inträder från det första kilot av produkt som blandas med en lerjord, men det var enbart i leden D och G med de högsta givorna som signifikanta aggregatstabilitetsförbättringar gick att visa.

En annan indikation på att strukturkalken förändrade markens aggregat fanns vid såbäddsundersökningen våren 2013 i försök 8503 (tabell 9). Där var andelen fina aggregat (< 2 mm) i såbädden signifikant högre i leden med 2 ton CaO som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ än i de obehandlade leden utan kalk, samtidigt

som det fanns en tydlig tendens till en mindre andel grova aggregat (>5 mm) i de kalkade leden. Regressionsanalys antydde ett samband mellan andelen aggregat < 2 mm och avkastning ($R^2=0,19$).

Både plus och minus i skörd

För lantbrukaren är en förväntad positiv effekt på avkastningen sannolikt avgörande för att man ska välja att strukturkalka. I medeltal över fyra års försök fanns inga signifikanta effekter på avkastningen av spannmål i led som strukturkalkats med pH-höjande kalciumprodukter (8501A, 8501B och 8502; tabell 5). Emellertid fanns ett samspel mellan behandling och försöksplats på följande sätt:

- 8501A – inga signifikanta effekter av släckt kalk och NKAS
- 8501B – signifikant negativ effekt av led med släckt kalk och NKAS år 2011 och 2013 (tab 6)
- 8502 – inga signifikanta effekter av släckt kalk och NKAS (tabell 7)

I försök 8503, som hade olika slags grundbearbetningar, fanns i motsats till försök 8501B en signifikant positiv effekt av strukturkalk, som var mer uttalad i det plöjningsfria ledet än i det plöjda. Varför de olika försöksplatserna reagerade på så olika sätt för strukturkalk är oklart. En orsak till de negativa effekterna av strukturkalk i 8501B kan vara att denna försöksplats hade låg P-status i matjorden (klass II, P-AL 2,7) och att pH-höjningen möjligen kan ha haft negativa effekter på tillgängligheten av P. De två aktuella våren 2011 och 2013 när utslaget var signifikant negativt var nederbördsfattiga, vilket sannolikt var utslagsgivande.

Utgångsläget i jorden i försök 8503 var det motsatta med högre pH-värde och högre basmättnad i det okalkade A-ledet och framför allt mycket högre P-status (klass V, P-AL 16,5). På denna försöksplats förändrade sannolikt strukturkalken jorden i positiv riktning utan de negativa konsekvenserna för grödorna. Denna förbättring yttrade sig som en signifikant större andel fina aggregat och en mindre andel grova aggregat i såbäddsundersökningen 2013 (tabell 9). Den mer finbrukade såbädden hade rimligen ett positivt inflytande på avkastningen genom lägre vattenavdunstning och bättre vattenushållning, vilket gav utslag under den mycket torra våren och försommaren 2013.

Mätningarna av växtnäringshalter i kornkärnan från försök 8502 (tabell 12) tyder på att viss skördebegränsning p.g.a. manganbrist skulle kunna förklara en del av de fall av skördenedsättning som tycks föreligga efter kalkning, medan skördebegränsning genom effekter på tillgången på P, Cu, Zn inte är sannolik utifrån data i tabell 12+. Upptaget av Mg och K påverkades inte av kalkbehandlingarna. Man bör dock vara medveten om att halterna i kärnan är en osäker indikator på grödans växtnäringstatus under de (tidigare) stadier i plantans tillväxt, då grunden till ett gott skörderesultat läggs (se t.ex. Mengel & Kirkby, 2001).

Sammanfattningsvis varierade effekten av strukturkalk i dessa fyra försök från minus 11 procent i försök 8501B till plus 11 procent i försök 8503. Denna oförutsägbara avkastningseffekt på ca ± 10 procent skiljer sig mycket från de 8 procent som Vattenmyndigheten anger som förväntad merskörd vid strukturkalkning. Strukturkalkningens positiva bieffekter på avkastningen kan alltså ifrågasättas.

Gips ökade avkastningen

I försök 8502 fanns, utöver de pH-höjande behandlingarna, tre led med stigande mängder av gips (kalciumsulfat; led H–K). Med den högsta givan gips (led K), som motsvarade 6 ton/ha CaO, ökade avkastningen signifikant i medeltal över år 2011–2014 (tabell 7). Med gipsgivan tillfördes betydande mängder P som, eftersom den aktuella produkten framställts genom reaktion mellan kalksten och svavelsyra, kan ha en tillgänglighet liknande den i P-innehållande mineralgödsel. Dessutom tillfördes med gipsen stora mängder S, som grödorna kunde tillgodogöra sig under de följande fyra försöksåren. I växtnäringanalyserna på västkornkärna det sista försöksåret 2014 fanns emellertid inga signifikanta skillnader mellan led K och det obehandlade led A med avseende på något av de analyserade makro- och mikronäringssämnena. Vad gäller S, låg halten i kornkärnan ganska nära den kritiska nivån (tabell 12). Dock är växtens upptag och assimilation av S aktiva, energikrävande processer, som regleras av växtens behov av ämnet (Mengel & Kirkby, 2001; Haneklaus et al. 2007). Det faktum att gipstillförelsen inte gav någon effekt på halten av S i kornkärnan (tabell 12) kan därför tolkas som att grödan inte var svavelbegränsad. Det förefaller troligt att gipsens positiva avkastningseffekter har att göra med tillgängligheten av P. Den aktuella typen av gips är inte godkänd för användning inom ekologisk odling.

pH-värdet steg och sjönk

Ofta ställs frågan hur mycket och hur länge en strukturkalkning påverkar markens pH-värde. Mätningarna visade att pH-värdet i försök 8501A, 8501B och 8502 var signifikant högre vid de höga givorna av släckt kalk och NKAS ca 2 år efter spridningen. Ytterligare ett år senare (ca 3 år efter spridningen) återstod inga signifikanta skillnader i pH. I försök 8503, där start-pH i det obehandlade ledet var betydligt mycket högre än i övriga försök (pH 7,3), fanns inga signifikanta pH-effekter av strukturkalktillförseln. Intressant att notera är dock att halterna av pH-känsliga mikronäringsämnen Zn, Mn och Cu påverkades signifikant i vårkornet 2014, nästan 4 år efter kalkspridningen, trots att pH-mätningen alltså inte indikerade några signifikanta skillnader. Detta är ett observandum som bör tas ad notam vid strukturkalkning, i synnerhet för Mn som i de aktuella försöken kan ha varit skördebegränsande.

Publikationer och resultatförmedling till näringen

Resultaten från projektet kommer att publiceras i en vetenskaplig artikel och i artiklar i lantbrukspresen. Slutrapporten publiceras på hemsidan (www.slu.se/strukturkalk). Resultaten har även förmedlats genom att Kerstin Berglund och Jens Blomquist under projektiden medverkat med ca 40 föreläsningar om strukturkalkning i olika sammanhang riktade till jordbruket. Kerstin håller återkommande föreläsningar om strukturkalkning i agronomutbildningen. Till projektet har det varit knutet en referensgrupp med representanter för näringen, rådgivare, kalkproducenter och myndigheter. Under projektets gång har ett samarbete med forskare i Finland om strukturkalkningsfrågorna lett till en gemensam projektansökan inom Interreg Central Baltic (SLAP Structural liming as a water protection measure – practical aspects, potential in phosphorus loss abatement and cost-efficiency).

Referenser

- Alakukku, L. & Aura, E. (2006). Zero Tillage and Surface Layer Liming Promising Technique to Reduce Clay Soil Erosion and Phosphorus Loading. *ASABE Annual International Meeting*, Portland, Oregon July 9-12 2006. Paper Number: 062191
- Andersson, S. 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. VIII. En experimentell metod. Grundförbättring, 8, Specialnummer 2, s. 7-98. <http://www.slu.se/PageFiles/181248/spec2.pdf>
- Berglund, G. 1971. Kalkens inverkan på jordens struktur. Grundförbättring 24, 1971:2, 81-93.
- 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. (<http://4t.sockerbetor.nu/readmore.asp?id=99>)
- Berglund, K. & Gustafson Bjurés, A. 2008. "Markstrukturtest i fält". Beskrivning och instruktioner. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Inst f markvetenskap. Avd f hydroteknik. Rapport 8. 48 p. <http://pub-epsilon.slu.se/375/01/Rapport8.pdf>
- Delta-T devices Ltd, Cambridge, UK. 20140330. <http://www.delta-t.co.uk/>
- Etana, A., Rydberg, T, Arvidsson, J. 2009. Readily dispersible clay and particle transport in five Swedish soils under long-term shallow tillage and mouldboard ploughing. *Soil & Tillage Research* 106, 79-84.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E., de kok, L. & Stulen, I. 2007. Sulfur. Ur: Barker, A.V. & Pilbeam, D.J. (red.) *Handbook of plant nutrition*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, s. 183–238.
- Kritz, G. & Håkansson, I. 1971. Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovsundersökning 1969-70. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. Lantbrukshögskolan Uppsala. Nr. 23. 1971.
- Mengel, K. & Kirkby, E.A. *Principles of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 5 uppl.
- Reuter, D.J., Edwards, D.G. & Wilhelm, N.S. 1997. Temperate and tropical crops. Ur: Reuter, D.J. & Robinson, J.B. (red.) *Plant Analysis – an Interpretation Manual*. SBS Publishers & Distributors, New Delhi, s. 83–284.
- Ulén, 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, 241-251.
- Ulén, 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.