

Infiltration – ett enkelt fältmått på jordens produktionsförmåga (Slutrapport)

Förord

Denna rapport utgör slutredovisning från det av Stiftelsen Lantbruksforskning finansierade projekt ”Infiltration – ett enkelt fältmått på jordens produktionsförmåga” (projektnummer V0633007). Projektet är en pilotstudie med syfte att studera samband mellan infiltration och skörd på fältnivå (inomfältvariation). Ett annat mål var att testa en enkel fältmetod för att mäta jordens infiltrationsförmåga som indikator för markens struktur.

Uppsala, januari 2007

Thomas Keller och Tomas Rydberg

Bakgrund

Inomfältskördevariationer förekommer i stort sett på alla fält. Anledningen till detta kan enligt Hatfield (2000) uppdelas i tre orsaker av variation: naturlig variation (mark, topografi, *etc.*), slumpartad variation (regn, vind, *etc.*), och variation som beror på brukningsmetoder (jordbearbetning, gödning, *etc.*). Thylén (1997) fann att den rumsliga skördevariationen inom ett fält utanför Uppsala var ganska konstant under fyra år, dvs. att skördemönster (områden med hög respektive låg avkastning) återkom år efter år. Liknande observationer har gjorts av Bourennane *et al.* (2003).

Inom precisionsodling har man framför allt försökt förklara skördevariationer med variationer i näringsämnen i matjorden (Bölenius *et al.*, 2005). Korrelationen mellan markens innehåll av näringsämnen och skörd är dock ofta ganska låg, dvs. inomfältvariationer av näringsämnen kan inte förklara skördevariationer (Thylén, 1997; Mallarino *et al.*, 1999; Müller *et al.*, 2005).

Eftersom markens fysikaliska och mekaniska egenskaper påverkar de flesta processer i marken, inklusive t.ex. bioaktivitet, näringsämnens tillgänglighet för rötter, *etc.*, har man på senare år börjat studera samband mellan markens fysikaliska (inklusive mekaniska) egenskaper och skörd (t.ex., Bölenius *et al.*, 2005; Vrindts *et al.*, 2005).

Vrindts *et al.* (2005) fann inget klart samband mellan markens skrymdensitet och skörd. Cotching *et al.* (2004) hittade korrelationer mellan skörd och markens struktur, och Hamza & Anderson (2002) visade att strukturförbättringsåtgärder leder till ökad skörd. I en studie i USA kunde skörden relateras till antal dagar grödorna utsetts för vattenstress (Benjamin *et al.*, 2003). I ett stort projekt i södra Sverige, det s.k. 4T-projektet (Blomquist *et al.*, 2002) analyserades samband mellan ett stort antal variabler och skörd av sockerbetor. Fyra variabler hittades som kunde förklara 85 % av sockerskörden, varav en var vertikal infiltration. Modellsimuleringar indikerar att markens hydrauliska egenskaper som t.ex. dess genomsläpplighet har stor effekt på grödornas tillväxt och avkastning (t.ex., Rajkai *et al.*, 1997; Paz *et al.*, 1998; Connolly *et al.*, 2001; Irmak *et al.*, 2001).

Markens struktur definieras som ”den rumsliga variationen av olika komponenter eller egenskaper hos jorden” (Dexter, 1988). Markstrukturen påverkar många viktiga egenskaper och processer i jorden, såsom hydrauliska processer, lufthushållning (och därmed kemiska reaktioner), markens hållfasthet, *etc.*, vilka i sin tur starkt påverkar rötternas tillväxt och

grödornas utveckling (t.ex., Dexter, 1988; Pagliai *et al.*, 2004). Ett av de mest värdefulla måtten på markens struktur är vattenlednings- och infiltrationsförmågan (t.ex., Dexter, 1988; Dexter *et al.*, 2004; Pagliai *et al.*, 2004).

Projektets syfte var att studera samband mellan infiltration och skörd på fältnivå (inomfältvariation). Ett annat syfte var att testa en enkel fältmetod för att mäta jordens infiltrationsförmåga som indikator för markens struktur.

Material och metoder

Försöksplatser

Studien utfördes på två gårdar i Östergötland (EDL, Mjölby; och Nolo Lantbruks AB, Väderstad) och en gård i Sörmland (Sjösa Gård AB, Nyköping). Alla dessa gårdar hade GPS-skördekartat sina fält under ett antal år. På varje gård valdes ett fält där mätningarna utfördes; de tre fälten kallas Varv, Svanshals respektive Sjösa. Genom att studera historiska skördekartor kunde på varje fält ett område med hög skörd, ett med medelgod skörd och ett med låg skörd bestämmas. Vändtegar, infarter och andra områden med uppenbart låg skörd valdes bort.

Inom varje område gjordes infiltrationsmätningar för bestämning av den hydrauliska konduktiviteten i matjorden och alven. Samtidigt togs cylinderprover för bestämning av vattenhalten i fält, mättad vattenhalt samt markens skrymdensitet. Dessutom togs jordprover för bestämning av textur och mullhalt. Totalt gjordes mätningar på 3 (fält) x 3 (områden) x 2 (djup) = 18 punkter.

Infiltrationsmätningar

Den fältmättade hydrauliska konduktiviteten, K_{fs} , mättes med den s.k. ”simplified falling-head (SFH)” tekniken (Bagarello *et al.*, 2004). SFH-tekniken går ut på att snabbt applicera en liten volym vatten, V , på markytan inom en cylinder (med tvärsnittsarea A) som drivits ner några centimeter i marken och att mäta tiden, t_a , från det att man har applicerat vatten till dess att markytan inte längre är vattentäckt. K_{fs} beräknas sedan som (Bagarello *et al.*, 2004):

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1-\Delta\theta)t_a} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + \frac{1}{\alpha^*}}{(1-\Delta\theta)} \ln \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)D}{\Delta\theta \left(D + \frac{1}{\alpha^*} \right)} \right) \right] \quad (\text{Ekvation 1})$$

där $\Delta\theta$ är skillnaden mellan den mättade vattenhalten och vattenhalten i fält vid mätningens start, $D = V/A$ är vattendjupet vid mätningens start, och α^* är förhållandet mellan K_{fs} och matrixflödepotential (engelsk: matric flux potential). För alla mätningar användes ett värde av 12 m^{-1} för α^* (Elrick & Reynolds, 1992; Bagarello *et al.*, 2004, 2006).

Mätningarna utfördes med stålcyllindrar med en genomsnittlig diameter på 15,6 cm och en höjd på ungefär 15 cm. Cyllindrarna drevs ner 8 cm i marken på 3 respektive 25 cm djup. På varje ställe och djup gjordes sju infiltrationsmätningar (upprepningar). För alla mätningar användes samma volym vatten, $33 \text{ cl} = 330 \text{ cm}^3$, vilket motsvarar innehållet i en läskburk.

Den hydrauliska konduktiviteten för hela jordprofilen, $K_{fs, \text{Profil}}$, beräknades som

$$K_{fs,Pr ofil} = 2 \frac{(K_{fs,Matjord} K_{fs,Alv})}{(K_{fs,Matjord} + K_{fs,Alv})} \quad (\text{Ekvation 2})$$

där $K_{fs,Matjord}$ och $K_{fs,Alv}$ är den hydrauliska konduktiviteten i matjorden respektive alven.

Dataanalys

Absoluta skördevärden omvandlades till relativa skördevärden för att kunna jämföra olika grödor och olika fält. För varje fält beräknades den relativa skörden i procent, RS, som

$$RS_{område} = 100 \frac{Skörd_{område}}{Skörd_{Hög}} \quad (\text{Ekvation 3})$$

Den relativa skörden i området med hög skörd blir således 100 %. På liknande sätt beräknades den relativa hydrauliska konduktiviteten, RK_{fs} , för varje fält som

$$RK_{fs,område} = 100 \frac{K_{fs,område}}{K_{fs,Hög}} \quad (\text{Ekvation 4})$$

Den relativa hydrauliska konduktiviteten i området med hög skörd blir därför 100 %.

För statistiska analyser användes GLM proceduren i SAS (SAS, 1996).

Resultat

Skörd

Det fanns ingen trend mot att den genomsnittliga skördenivån på de tre undersökta fälten skulle ha ökat eller minskat med åren. Man måste dock komma ihåg att den tillgängliga datan är begränsad och ett uttalande om generell skördeutveckling därför är svårt att göra.

I genomsnitt över alla platser och år var skörden i området med låg skörd 78 % och i området med medelskörd 93 % av skörden i området med hög skörd. På alla tre fält var skördarna i området med låg skörd stabilt låga över åren, medan skördarna i området med medelskörd sjönk över åren jämfört med skördarna i området med hög skörd.

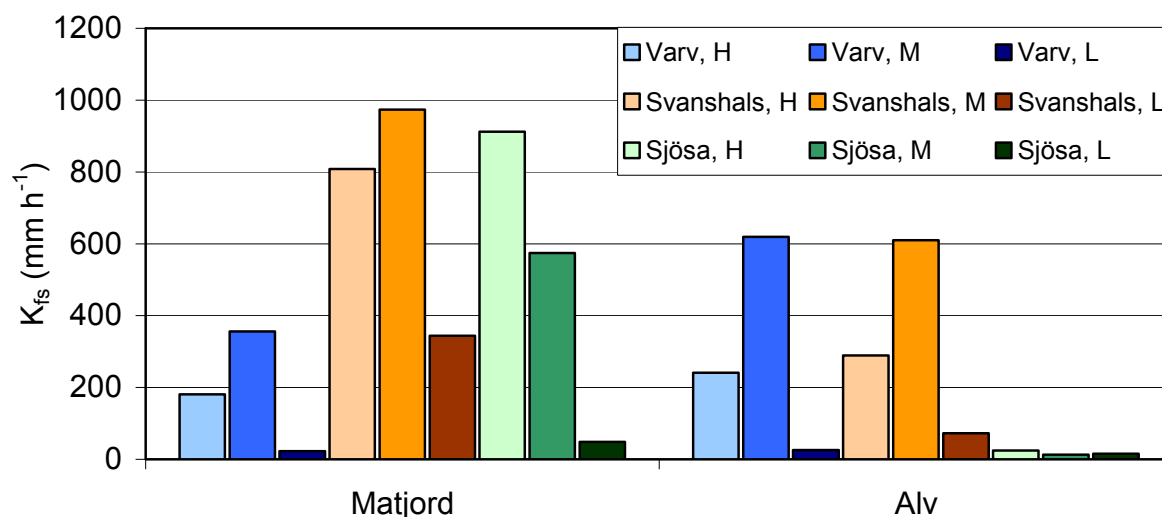
Jordart, mullhalt och skrymdensitet

Textur samt mullhalt och skrymdensitet i de olika områdena på de tre fälten redovisas i tabell 1. Jordarten på de tre fälten varierade från mellanlera till styv lera. Lerhalten var lite högre i området med låg skörd på Svanshals (både matjord och alv) och Varv (bara alv). På Sjösa var lerhalten däremot lägre i området med låg skörd. Jämfört med området med hög skörd var mullhalten i området med låg skörd lite lägre på Sjösa och Varv, men lite högre på Svanshals. På Varv var skrymdensiteten högre i området med låg skörd jämfört med området med hög skörd, medan det inte fanns nämnvärda skillnader mellan de olika områdena på de andra två fälten.

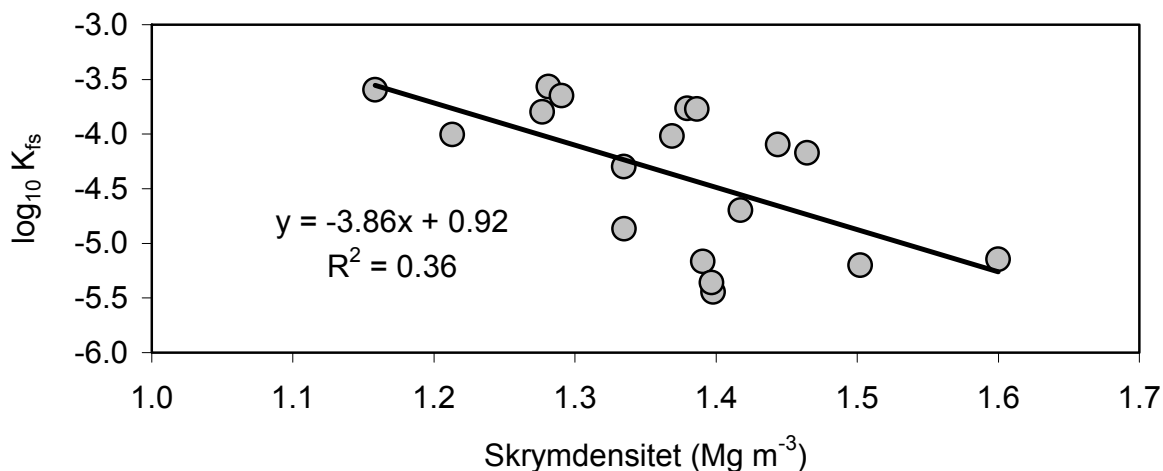
Tabell 1

Textur samt mullhalt och skrymdensitet på de undersökta platserna

Fält, skördenivå, skikt	Jordart	Lera	Silt	Sand	Mullhalt	Skrymdensitet
		----- (vikts-%) -----				(Mg m ⁻³)
Sjösa						
Hög skörd, alv	Styv lera	42,4	49,4	8,4	3,9	1,39
Hög skörd, matjord	Styv lera	41,6	49,6	8,8	4,3	1,16
Låg skörd, alv	Mellanlera	37,8	47,3	14,9	2,6	1,40
Låg skörd, matjord	Mellanlera	37,2	48,5	14,3	3,7	1,33
Medelskörd, alv	Styv lera	49,8	32,6	17,6	3,0	1,40
Medelskörd, matjord	Styv lera	47,3	35,8	16,9	3,7	1,28
Svanshals						
Hög skörd, alv	Mellanlera	33,5	45,5	21,0	2,3	1,44
Hög skörd, matjord	Mellanlera	32,5	44,9	22,7	2,7	1,29
Låg skörd, alv	Styv lera	50,6	37,3	12,1	3,9	1,42
Låg skörd, matjord	Styv lera	50,6	36,5	13,0	4,6	1,37
Medelskörd, alv	Mellanlera	32,7	45,3	22,1	1,9	1,39
Medelskörd, matjord	Mellanlera	31,5	46,7	21,9	2,4	1,28
Varv						
Hög skörd, alv	Mellanlera	33,2	53,9	13,0	4,6	1,46
Hög skörd, matjord	Mellanlera	35,8	52,1	12,2	4,3	1,33
Låg skörd, alv	Styv lera	43,9	26,9	29,2	1,9	1,60
Låg skörd, matjord	Mellanlera	30,3	26,3	43,4	3,2	1,50
Medelskörd, alv	Mellanlera	25,7	47,5	26,7	4,6	1,38
Medelskörd, matjord	Mellanlera	26,0	47,0	26,9	4,9	1,21



Figur 1 Fältmättad hydraulisk konduktivitet, K_{fs} , på de tre platserna Varv, Svanshals och Sjösa; H: hög skörd, M: medelskörd, L: låg skörd

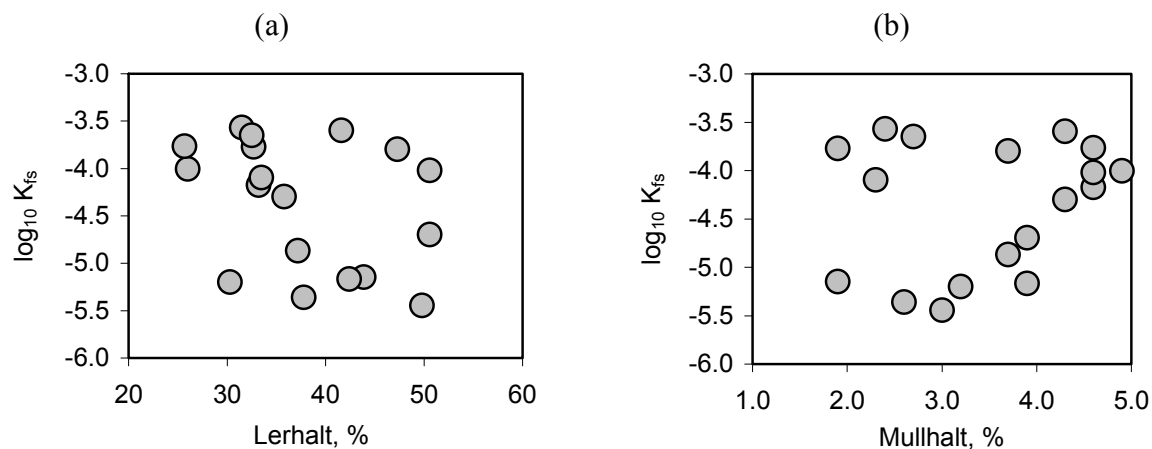


Figur 2 Samband mellan markens skrymdensitet och hydrauliska konduktivitet, K_{fs}

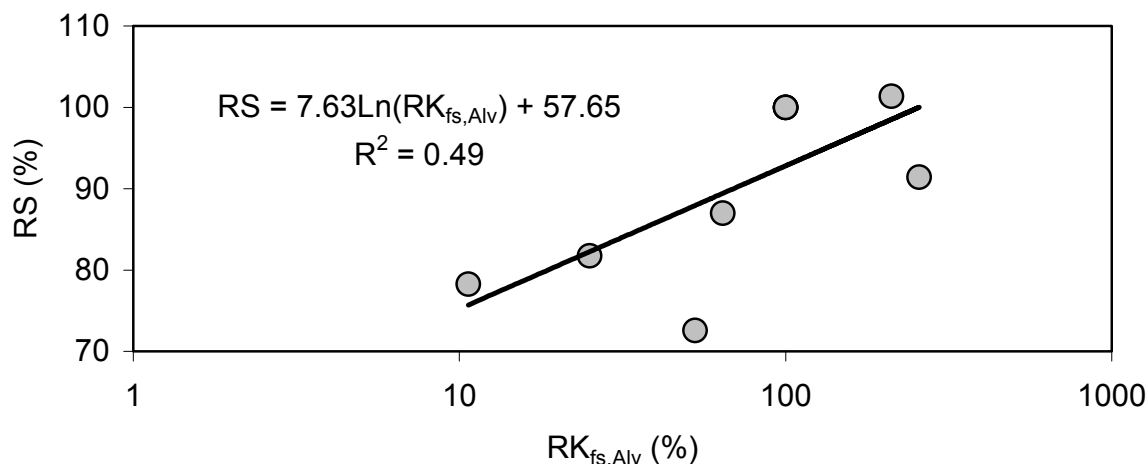
Fältmättad hydraulisk konduktivitet

De uppmätta värdena på fältmättad hydraulisk konduktivitet, K_{fs} , visas i figur 1. K_{fs} varierade mellan 1,30 cm i timme (Sjösa, alv) och 97,4 cm i timme (Svanshals, matjord). Generellt uppmättes det högre K_{fs} i matjorden jämfört med alven ($p < 0.1$). Förutom i alven på Sjösa var K_{fs} i området med låg skörd signifikant lägre ($p < 0.05$) än K_{fs} i området med medelskörd och hög skörd. Det fanns inga signifikanta skillnader ($p > 0.05$) mellan K_{fs} i området med medelskörd och hög skörd, med undantag av alven i Varv, där K_{fs} i området med medelskörd var högre än K_{fs} i området med hög skörd.

K_{fs} i området med låg skörd var mellan 11 och 64 % av K_{fs} i området med hög skörd i alven och mellan 5 och 43 % i matjorden, medan $K_{fs, Profil}$ var mellan 12 och 50 %. I området med låg skörd var K_{fs} alltså betydligt lägre än K_{fs} i området med hög skörd.



Figur 3 Samband mellan hydraulisk konduktivitet, K_{fs} , och (a) lerhalt respektive (b) mullhalt



Figur 4 Samband mellan relativ skörd, RS, och relativ hydraulisk konduktivitet i alven, $RK_{fs,Alv}$

K_{fs} var negativt korrelerat till markens skrymdensitet (figur 2). Inget samband hittades mellan lerhalt respektive mullhalt och K_{fs} (figur 3a och b).

Samband mellan infiltration och skörd

Det fanns ett ganska bra samband mellan relativ hydraulisk konduktivitet, RK_{fs} , och relativ skörd, RS (Figur 4). R^2 -värdet var lika för sambandet mellan $RK_{fs,Alv}$ och RS (figur 4, $R^2 = 0.49$) som för sambandet mellan $RK_{fs,Profil}$ och RS ($R^2 = 0.51$). Generellt ökade RS med ökad RK_{fs} (figur 4). På Svanshals och Varv var RK_{fs} i området med medelskörd större än 100 % (dvs. K_{fs} i området med medelskörd var högre än K_{fs} i området med hög skörd, vilket dock bara var signifikant i alven på Varv). Detta tyder på att skörden inte kan förväntas öka hur mycket som helst med ökande K_{fs} , utan att en ökning av K_{fs} över en viss gräns inte har någon eller till och med en negativ effekt på skörden.

Diskussion

SFH-teknik

SFH-tekniken som användes för att mäta jordens infiltrationsförmåga i fält visade sig vara mycket enkel. Allt som krävs är en (stål)cylinder som drivs ner i marken, vatten och ett tidtagarur.

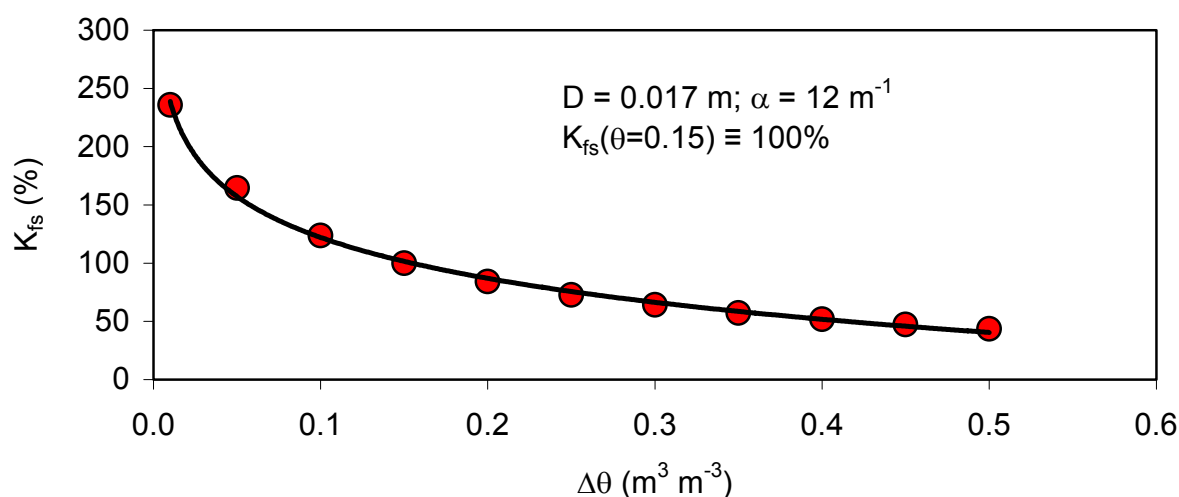
Tiden, t_a , från det att man har applicerat vatten till dess att markytan inte längre är vattentäckt varierade mellan ett tiotal sekunder och 2 timmar. Den senare kan tyckas lång. Av de totalt 126 mätningar som gjordes inom denna studie fanns det dock bara 15 med $t_a > 30$ minuter, och 8 med $t_a > 1$ timme. Två tredjedelar av alla mätningar hade $t_a < 5$ minuter. Tidsvinsten med SFH-tekniken ligger framför allt i att många mätningar (upprepningar) kan göras inom rimlig tid. En annan stor fördel med SFH-tekniken är den relativt ringa volym vatten som går åt. I denna studie gjordes 42 mätningar på varje fält, vilket krävde knappt 15 liter vatten per fält.

K_{fs} är inte särskilt känsligt för små fel i bestämningen av $\Delta\theta$ (figur 5). Istället för att mäta $\Delta\theta$ skulle det därför vara tillräckligt att använda sig av ett ungefärligt värde för $\Delta\theta$; ett litet fel i $\Delta\theta$ som har ett litet fel i K_{fs} till följd har ingen betydelse ur praktiskt synvinkel. Bagarello *et al.* (2004) kom fram till att små fel i mätningen av D , t_a och $\Delta\theta$ inte påverkar K_{fs} väsentligt. Ett värde för α^* på 4 m^{-1} (finkorniga jordar utan struktur; Elrick & Reynolds, 1992) respektive 36 m^{-1} (grov sand och jordar med mycket bra struktur; Elrick & Reynolds, 1992) istället för 12 m^{-1} (de flesta jordar; Elrick & Reynolds, 1992) hade ingen nämnvärd effekt på K_{fs} (data visas inte). Enligt Bagarello *et al.* (2006) är ett fel i K_{fs} av en faktor två till tre godtagbar med tanke på att K_{fs} varierar mellan 10^{-9} m s^{-1} för kompakt lera och 10^{-4} m s^{-1} för grov sand (Elrick & Reynolds, 1992), att K_{fs} varierar mycket i rum och tid (Bagarello & Sgroi, 2006), och att K_{fs} är mycket känslig för mätmetoden (Reynolds *et al.*, 2000). Som jämförelse kan nämnas att det var en faktor 3,6 (Svanshals), 8,1 (Varv) respektive 18,0 (Sjösa) för $K_{fs,Matjord}$ och en faktor 1,3 (Sjösa), 4,7 (Svanshals) respektive 8,7 (Varv) för $K_{fs,Alv}$ mellan området med låg och hög skörd.

Vid konstant D , α^* och $\Delta\theta$ är K_{fs} en funktion av enbart t_a : $K_{fs} = C t_a^{-1}$, där C är en konstant. För $D = 0,017 \text{ m}$ (som i denna undersökning), $\alpha^* = 12 \text{ m}^{-1}$ och $\Delta\theta = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ gäller till exempel: $K_{fs} (\text{cm t}^{-1}) = 2224,8 t_a^{-1}$, där t_a mäts i sekunder.

Markens hydrauliska konduktivitet och skörd

Inget samband mellan textur respektive mullhalt och K_{fs} hittades (figur 3), vilket tyder på att K_{fs} påverkas mycket mera av markens struktur än av markens textur. En av de strukturförstörande processerna är markpackning; således hittades en negativ korrelation mellan K_{fs} och skrymdensitet (figur 2). Skrymdensitet i sig är dock en relativ dålig indikator för markens struktur (Dexter, 1988), vilket syns i en ganska stor spridning i figur 2.



Figur 5 Samband mellan hydraulisk konduktivitet, K_{fs} , och skillnaden mellan den mättade vattenhalten och vattenhalten i fält vid mätningens start, $\Delta\theta$

Det fanns inget tydligt samband mellan inomfältvariation av jordart och mullhalt och inomfältvariation av skörd (cf. tabell 1) eller mellan (relativ) skrymdensitet och inomfältvariation av skörd (figur visas inte). Däremot hittades en positiv korrelation mellan den relativa konduktiviteten, RK_{fs} , och den relativa skörden, RS (figur 4). Områdena med låg skörd hade betydligt lägre K_{fs} än områdena med hög skörd (figur 1 och 4), vilket kan tyda på strukturproblem (markpackning, jordbearbetning vid fel tidpunkt, *etc.*) i de förstnämnda områdena. Detta stöds av den visuella bedömningen av strukturen i fält: i områden med låg skörd föll jorden inte sönder lika lätt som i områden med hög skörd och det var betydligt tyngre att gräva. K_{fs} i områden med medelskörd skilde sig inte från K_{fs} i områden med hög skörd förutom i matjorden på Varv, där K_{fs} i området med medelskörd var högre än K_{fs} i området med hög skörd. Samtidigt som en jord ska ha en hög genomsläpplighet för att leda bort överskottsvatten måste den ha förmågan att lagra vatten. En möjlig förklaring till lägre skörd trots högre K_{fs} kan därför vara att marken i området med medelskörd kunde lagra mindre vatten, dvs. hade mindre växttillgänglig vatten, än marken i området med hög skörd.

Markens genomsläpplighet eller hydraulisk konduktivitet är en bra indikator av markens struktur (Dexter, 1988; Pagliai *et al.*, 2004). En korrelation mellan K_{fs} och skörd behöver därför inte betyda att K_{fs} i sig är den kritiska egenskapen som ensam bestämmer skörden. Andra egenskaper som påverkas av strukturen, t.ex. vattentillgängligt vatten, luftfylld porositet, syretransport, mekaniskt motstånd för rötter, *etc.*, är också viktiga för grödornas tillväxt. De olika egenskaperna kan emellertid vara olika avgörande beroende på väderleken. En bra vattengenomsläpplighet i sig är dock troligtvis en förutsättning för en bra avkastning. En dålig genomsläpplighet är ett tecken på dålig struktur, vilket kan resultera i minskad rottillväxt och försämrade skörd.

Slutsatser

SFH-tekniken är en enkel metod för att bestämma markens infiltrationsförmåga i fält. Mätutrustningen består av en (stål)cylinder som drivs ner i marken, vatten och ett tidtagarur. Metoden lämpar sig därför bra för både vetenskapliga studier och praktiska tillämpningar.

En positiv korrelation mellan relativ konduktivitet och relativ skörd hittades. Speciellt områdena med låg skörd var karakteriserade av låg konduktivitet och sämre struktur. Även om markens struktur troligtvis inte är orsaken till all skördevariation kan vissa inomfältvariationer av skörd förklaras med inomfältsskillnader i markstruktur.

Markens infiltrationsförmåga är en bra indikator på markstrukturen. Flera undersökningar behövs dock för att mer i detalj kunna förstå hur markstrukturen påverkar grödornas tillväxt och skörd för att veta vilka åtgärder (t.ex. strukturkalkning, mekanisk eller biologisk alvluckring, *etc.*) som skall vidtagas för att förbättra markstrukturen på lång sikt.

Publicering och resultatförmedling

Resultaten publicerades i Lantmannen Nr 1/2007 i en artikel med titeln ”Skördekartan skvallrar om jordens struktur”. Resultaten kommer att redovisas i avdelningen för jordbearbetningens årsrapport 2006 som trycks under våren 2007. En vetenskaplig artikel är under förberedelse.

Resultaten från projektet kommer att presenteras på 23:e NJF (Nordic Association of Agricultural Scientists) kongress, som äger rum 26-29 juni i Köpenhamn. Ett abstract med titeln "Soil structure explains some within-field variation in crop yield" har skickats in.

Tack till

Detta arbete var finansierat av Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF). Ett stort tack till Sven-Axel Nordstrand (Nolo Lantbruks AB, Väderstad), Stefan Lindgren (Sjösa Gård AB, Nyköping) och Erik Danckwardt-Lilleström (EDL, Mjölby) för visat intresse, urval av lämpliga fält och tillhandahållande av skördekartor; till Anna Lindberg och Torbjörn Lovang (Lovanggruppen AB, Vikingstad) för tillhandahållande av adresser till dessa tre lantbrukare; och till Urban Svantesson och Christina Öhman (SLU Uppsala), för hjälp i fält respektive laboratoriet.

Litteraturförteckning

- Bagarello V; Iovino M & Elrick D (2004) A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 68, 66-73.
- Bagarello V; Elrick D E; Iovino M & Sgroi (2006) A laboratory analysis of falling head infiltration procedures for estimating the hydraulic conductivity of soils. *Geoderma* 135, 322-334.
- Bagarello V & Sgroi A (2006) Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of a sandy loam soil. *Soil & Tillage Research*, in press.
- Benjamin J G; Nielsen D C & Vigil M F (2003) Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137-148.
- Blomquist J; Christensson B; Gerhardson B; Hellgren O; Berglund K; Larsson H; Wildt-Persson T & Rydberg T (2002) 4T – Tillväxt till Tio Ton. Slutrapport.
- Bölenius E; Rogstrand G; Arvidsson J & Stenberg B (2005) Site-specific rapid determination of physical soil properties limiting the yield. In: *Book of Abstracts of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, Uppsala, Sweden, pp. 48-50.
- Bourennanne H; Nicoullaud B; Couturier A & King D (2003) Assessment of spatial correlation between wheat yields and some physical and chemical properties. In: *Proceedings of the 4th ECPA conference on Precision Agriculture*, pp 95-101.
- Connolly R D; Freebairn D M; Bell M J & Thomas G (2001) Effects of rundown in soil hydraulic condition on crop productivity in south-eastern Queensland – a simulation study. *Australian Journal of Soil Research* 39, 1111-1129.
- Cotching W E; Sparrow L A; Hawkins K; McCorkell B E & Rowley W (2004) Linking Tasmanian potato and poppy yields to selected soil physical and chemical properties. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44, 1241-1249.
- Dexter A R (1988) Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* 11, 199-238.
- Dexter A R; Czyż E A & Gaje (2004) Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil & Tillage Research* 79, 185-189.
- Elrick D E & Reynolds W D (1992) Methods for analyzing constant-head well permeameter data. *Soil Science Society of America Journal* 56, 320-323.
- Hamza M A & Anderson W K (2002) Improving soil physical fertility and crop yield on a clay soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 53, 615-620.
- Hatfield J (2000) Precision agriculture and environmental quality: challenges for research and education. In: *Workshop on Precision Agriculture and the Environment: Research Priorities of the Nation*. National Soil Tillage Laboratory, Agricultural Research Service, USDA.
- Irmak A; Jones J W; Batchelor W D & Paz J O (2001) Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. *Transactions of the ASAE* 44, 1343-1353.
- Mallarino A P; Oyarzabal E S & Hinz P N (1999) Interpreting Within-Field Relationships Between Crop Yields and Plant Variables Using Factor Analysis. *Precision Agriculture*, 1, pp. 15-25.

- Müller K; Böttcher U & Kage H (2005) Analyzing yield potential differences in winter oilseed rape caused by in-field variation of nitrogen and water availability. In: Book of Abstracts of the 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, pp. 211-212.
- Pagliai M; Vignozzi N & Pellegrini S (2004) Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research* 79, 131-143.
- Paz J O; Batchelor W D; Colvin T S; Logsdon S D; Kaspar T C & Karlen D L (1998) Analysis of water stress effects causing spatial yield variability in soybeans. *Transactions of the ASAE* 41, 1527-1534.
- Rajkai K; Vegh K R; Varallyay G & Farkas C S (1997) Impacts of soil structure on crop growth. *International Agrophysics* 11, 97-109.
- Reynolds W D; Bowman B T; Brunke R R; Drury C F & Tan C S (2000) Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 64, 478-484.
- SAS, 1996. SAS/STAT™ Software: Changes and Enhancements Through Release 6.11. SAS Institute Cary NC.
- Thylén L (1997) Consistency in yield variation and optimal nitrogen rate. In: Proceedings of the ECPA conference on Precision Agriculture, pp. 345-350.
- Vrindts E; Mouazen A M; Reyniers M; Maertens K; Maleki M R; Ramon H & De Baerdemaeker J (2005) Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosystems Engineering* 92, 419-428.