

INOMFÄLTSVARIATION AV SKÖRD OCH MARKSTRUKTUR

Slutrapport för projekt V0733239

BAKGRUND

Skörden kan variera ganska kraftigt inom ett fält. Anledningen till detta kan enligt Hatfield (2000) delas upp i tre orsaker: naturlig variation (mark, topografi), slumpartad variation (regn, vind), och variation som beror på bruksmetoder (jordbearbetning, gödsling). Väderleken är den största orsaken till tidlig skördevariation, dvs. skördevariation från år till år (Bakhsh *et al.*, 2007). Trots att variationen från år till år kan vara stor (t.ex. Bakhsh *et al.*, 2007), hittas ofta tidligt stabila skördemönster med områden med hög respektive låg avkastning (t.ex. Blackmore, 2000; Bourennane *et al.*, 2003).

Vi kan anta att tidligt stabila skördemönster beror på tidligt stabila faktorer som begränsar grödornas utveckling, så som markens textur (jordart) och fältets topografi, medan skördevariation från år till år beror på faktorer som är mer dynamiska, så som väderlek eller matjordens egenskaper.

Markstrukturen påverkar viktiga egenskaper och processer i jorden, som vatten- och luftfuktighet (och därmed kemiska reaktioner, biologisk aktivitet och näringsämnenas tillgänglighet för rötter) och markens hållfasthet, vilka i sin tur starkt påverkar rötternas tillväxt och grödornas utveckling (t.ex., Dexter, 1988). När jorden bearbetas faller den sönder i aggregat av olika storlekar. Bearbetningsresultatet (aggregatstorleksfördelningen) påverkas starkt av vattenhalten vid bearbetning (Dexter & Bird, 2001). Vi framställer hypotesen att om vattenhalten vid bearbetning ligger över den optimala vattenhalten, θ_{opt} , på vissa områden och under θ_{opt} på andra områden, resulterar det i inomfältvariation av markstruktur, vilket kan ha effekter på skörden. Markstrukturen i alven förändras långsamt; alvpackning är bestående under mer än ett decennium (Håkansson, 2005; Berisso *et al.*, 2011). Till skillnad mot matjordens struktur kan alltså markstrukturen i alven anses som tidligt stabil under flera år. Vår hypotes är därför att tidligt stabila skördemönster kan relateras till alvens egenskaper.

Projektets huvudsyfte var att studera samband mellan markstruktur och skörd på fältnivå (inomfältvariation). Inom projektet karakteriserades markstrukturen genom mätning av olika markfysikaliska egenskaper vid olika tidpunkter under året.

MATERIAL OCH METODER

Mätningar utfördes på fyra skördekarterade fält: ett i Uppland, ett i Södermanland och två i Östergötland. På varje fält gjordes mätningar på sex platser med varierande avkastning (dvs. områden med dålig, genomsnittlig respektive bra skörd). De olika platserna på varje fält valdes ut i samråd med respektive lantbrukare samt genom en preliminär analys av historiska skördekartor. Exakt skördenivå på varje plats beräknades i efterhand (se ”Skördekartor” nedan). På varje plats utfördes mätningar i matjorden och i alven. På varje plats gjordes alla mätningar/provtagningar inom en radie av 3 m från platsens mittpunkt. På alla fält dominerade spannmål som gröda, men växtföljderna innehöll också oljeväxter och/eller ärtor.

Mätningar direkt efter skörden år 2007

På alla fält som ingick i studien odlades spannmål år 2007. Mätningar och provtagning gjordes i augusti-september 2007, kort efter skörden.

Markens vattengenomsläpplighet, den ”fältmättade hydrauliska konduktiviteten”, K_{fs} , bestämdes i fält 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 på markytan i en cylinder som slagits ner några centimeter i marken och att mäta tiden från det att vattnet applicerades till dess att markytan inte längre är vattentäckt. Mätningarna utfördes med stålcyllindrar (15,6 cm diameter, 15 cm höjd). Cylindrarna slogs

ner 8 cm i marken på 3 cm:s djup i matjord och på 30 cm:s djup i alven. På varje ställe och djup gjordes sju infiltrationsmätningar (upprepningar). För alla mätningar användes samma volym vatten, 33 cl.

Cylindriska, ostörda jordprover (7,2 cm diameter, 5 cm höjd) togs i matjord och alv, för mätningar i laboratorium av: vattenhållande förmåga ("pF-kurva") och därmed växttillgängligt vatten ($\theta_{100\text{hPa}} - \theta_{15000\text{hPa}}$, där θ är den volumetriska vattenhalten och 100 respektive 15000 hPa är vattentensionen; Carter & Gregorich, 2008), luftfylld porositet vid fältkapacitet ($\theta_{\text{sat}} - \theta_{100\text{hPa}}$, där θ_{sat} är den mättade volumetriska vattenhalten; Carter & Gregorich, 2008); och markens mekaniska hållfasthet (kompressionsindex och svällningsindex; t.ex. Keller *et al.*, 2011). Sju cylindrar togs per plats och djup.

Ostörd "lös" jord togs för bestämning av aggregatstorleksfördelning (efter att jorden hade lufttorkats), aggregatstabilitet (genom den s.k. turbiditetsmetoden, t.ex. Etana *et al.* 2010), och textur samt mullhalt (genom standardmetoder, se t.ex. Carter & Gregorich, 2008). Aggregatens specifika yta, A_{spec} , bestämdes enligt Keller *et al.* (2007). Rosin-Rammler-funktionen (Rosin & Rammler, 1933, Perfect *et al.*, 1993) anpassades till aggregatstorleksfördelningen, varifrån parametrarna α (ett mått på den genomsnittliga aggregatstorleken) och β (ett mått på fördelningens bredd) erhöles.

Mätningar vid grundbearbetning hösten 2007

I samband med höstbearbetning (grundbearbetning: plöjning alternativt kultivering) bestämdes vattenhalten vid bearbetning. Efter bearbetningen togs ungefär 40 liter lös (bearbetad) jord på varje ställe för sällning och bestämning av aggregatstorleksfördelningen av den bearbetade jorden. Parametrarna A_{spec} , α och β bestämdes enligt ovan.

Mätningar vid sådd våren 2008

Direkt efter sådden gjordes en såbäddsundersökning (Håkansson *et al.*, 2002), vilket innebär bestämning av såddjup, såbäddens ojämnhet, vattenhalt och aggregatstorleksfördelning. A_{spec} beräknades enligt ovan.

Skördekartor

Alla fält skördades med skördetröskor (skärbordets bredd: 6 m) som hade utrustning för skördekartering. Skördedatan filtrerades innan skördekartorna importerades i ett GIS-program: där tröskan abrupt ändrade hastigheten och/eller riktningen togs data bort, likaså togs extremvärden (genom att analysera histogram) bort. Data överfördes sedan till ArcGIS 9.3 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) för vidare databehandling. Felaktiga värden, t.ex. p.g.a. varierande skärbredd (skärbredd < skärbordet i början och slutet på skördedraget), upptäcktes genom att analysera histogram och skördekartor och togs bort. Proceduren liknar den i Vrindts *et al.* (2003, 2005). Interpolation av skördedata gjordes i ArcGIS genom "ordinary kriging" med en linjär semivariogram-modell och en radie på 20 m för att säkerställa att varje punkt hade data från minst tre skördedrag (Blackmore *et al.*, 2003). De interpolerade skördekartorna producerades på ett 2,5 x 2,5 m rasternät.

Analysen av skördedata inkluderade skörd för varje område (plats) och år, relativskörd, genomsnittlig skörd för flera år baserad på relativa skördevärden, och en utvärdering av den tidliga skördestabiliteten. Absoluta skördevärden konverterades till relativskörd (RY) inom varje fält och för varje år, för att kunna ta hänsyn till olika grödor. Relativskörden beräknades enligt (Blackmore, 2000):

$$RY_i = 100 \frac{Y_i}{Y_{\text{Mean}}} \quad (1)$$

där i är respektive plats inom ett fält och Y_{Mean} är den genomsnittliga skörden för respektive fält och år. Genomsnittlig skörd för flera år av en viss plats i , $RY_{i, \text{LTA}}$, beräknades enligt (Blackmore, 2000):

$$RY_{i, \text{LTA}} = \frac{1}{n} \sum_1^n RY_i \quad (2)$$

där n är antal år. Den tidliga skörde stabiliteten för de olika platserna i kvantifierades genom variationskoefficienten (CV), enligt (Blackmore, 2000):

$$CV_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (RY_i - RY_{i,LTA})^2}}{RY_{i,LTA}} . \quad (3)$$

Statistisk analys

Sambanden mellan skörd och markegenskaper analyserades genom att anpassa linjära regressionsmodeller med "ordinary least squares"- metoden. Regressionsanalyserna gjordes med hjälp av REG proceduren i SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

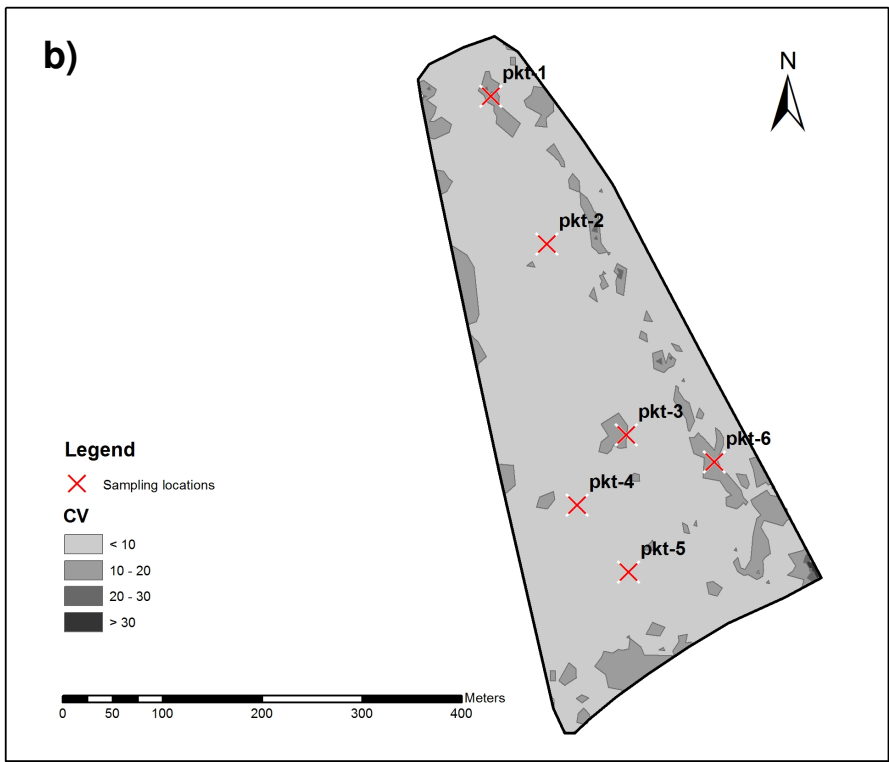
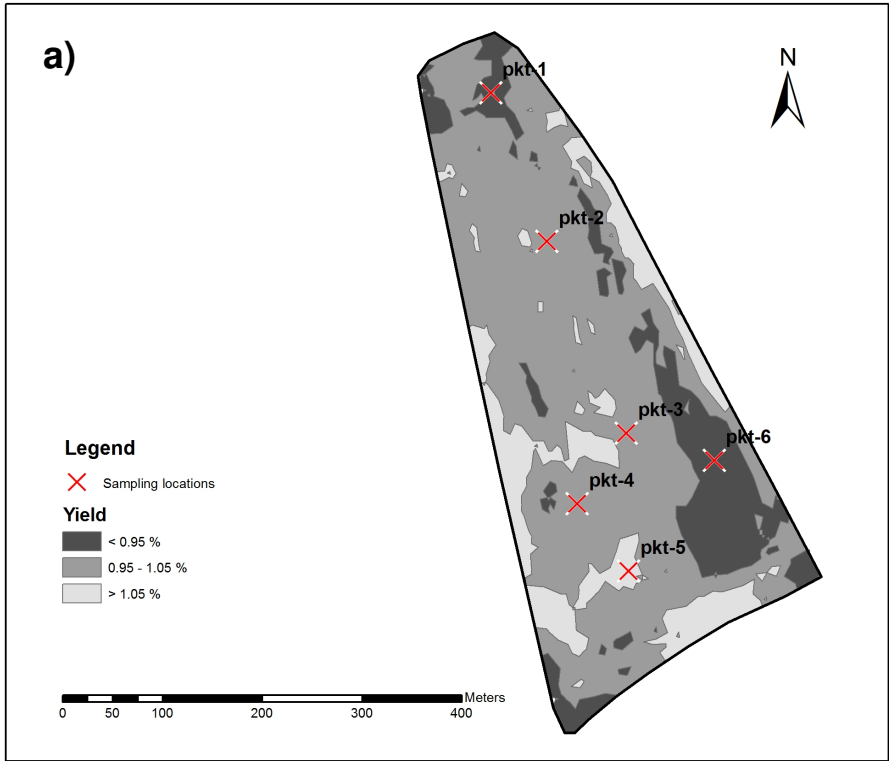
RESULTAT OCH DISKUSSION

Skörd, skördevariation och tidlig stabilitet av skördemönster

Skördedata i form av relativskörd visas i Tabell 1. Tyvärr kunde inte skördedatan från ett fält i Uppsala inkluderas, eftersom lantbrukaren förlorat all data. Inom varje fält valdes minst en punkt med en genomsnittlig skörd som var betydligt mindre än 100 % och minst en punkt med betydligt högre avkastning ut (Tabell 1). Skörden på de uppmätta punkterna varierade mellan 80,5 och 107,1 % (Svanshals), 84,5 och 117,9 % (Grimstorp) och 90,6 och 114,0 % (Hagnesta), se Tabell 1.

Tabell 1. Genomsnittlig relativ skörd för år 2002-2008 (Svanshals), 1999-2007 (Grimstorp) och 1998-2008 (Hagnesta). CV: variationskoefficient

Fält, plats	Lerhalt (%)	Genomsnittlig relativ skörd (CV ^a inom parentes) (%)
Svanshals (Väderstad)		
Plats 1	31,5	90,7 (11,0)
Plats 2	62,0	100,7 (4,8)
Plats 3	23,3	99,9 (11,8)
Plats 4	33,4	98,8 (3,7)
Plats 5	28,6	107,1 (2,2)
Plats 6	27,0	80,5 (13,8)
Grimstorp (Mjölby)		
Plats 1	10,3	84,5 (20,6)
Plats 2	25,3	117,9 (16,7)
Plats 3	16,6	107,6 (4,4)
Plats 4	18,3	112,7 (10,7)
Plats 5	20,2	104,3 (19,9)
Plats 6	17,3	105,0 (14,8)
Hagnesta (Sjösa)		
Plats 1	43,2	97,8 (5,6)
Plats 2	40,3	90,6 (16,9)
Plats 3	41,7	102,8 (12,5)
Plats 4	38,6	108,7 (13,8)
Plats 5	33,3	111,5 (6,8)
Plats 6	34,9	114,0 (6,1)



Figur 1. (a) Karta över den genomsnittliga skörden för flera år för fältet "Svanshals-10A", och (b) karta över den tidliga skördestabiliteten för fältet "Svanshals-10A".

Variationskoefficienten, som är ett mått på hur stabil skördenivån är över flera år, är ganska låg för alla punkterna (Tabell 1). Enligt Blackmore (2000) är ett område inom ett fält stabilt om CV < 30 %. För punkterna på de fälten som ingick i denna studie var CV mellan 2,2 och 20,6 %, dvs. betydligt mindre än 30 %. Detta är mycket intressant och ett värdefullt resultat i sig. Det tyder på att skörden styrs av tidligt (kvasi-)konstanta egenskaper. Ett exempel på en karta över den genomsnittliga skörden för flera år visas i Fig. 1b, och ett exempel på en karta med tidlig stabilitet visas i Fig. 1a.

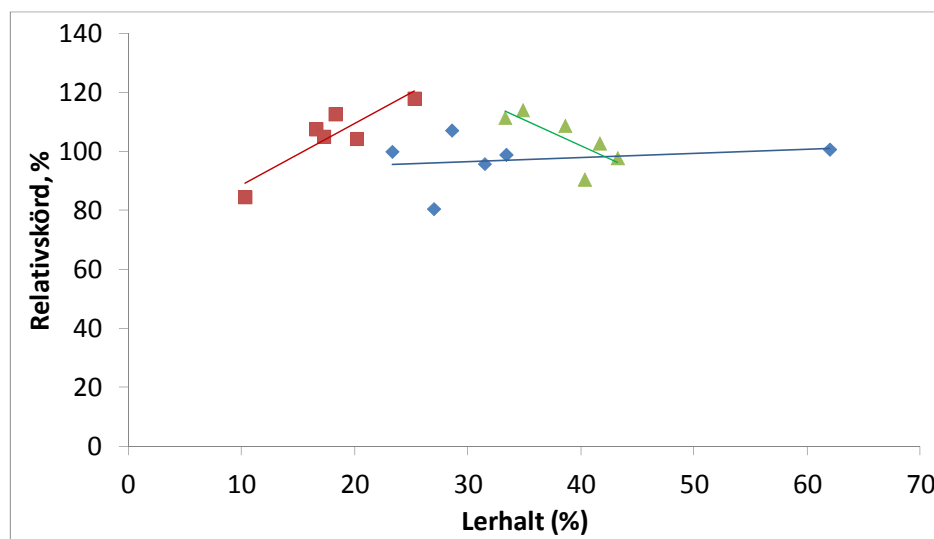
I det följande redovisas markens egenskaper och samband mellan markegenskaperna och skörd. Hypotesen var att den genomsnittliga skörden för flera år främst är beroende på alvens egenskaper. Detta motiverades med att matjordens tillstånd, och därmed dess egenskaper, kan variera mycket från ett år till ett annat, främst p.g.a. bearbetningen, medan alvens struktur är mycket stabil (Håkansson, 2005). Därför relateras den genomsnittliga skörden för flera år till alvens egenskaper.

Konstanta eller mycket stabila markegenskaper: textur och mullhalt

Lerhalten varierade med c:a 10-15 % på Hagnesta och Grimstorp, och med närmare 40 % på Svanshals (Tabell 1). På både Hagnesta och Grimstorp fanns det ett samband mellan lerhalt och $RY_{i,LT A}$ ($r = -0,76$, $p < 0,1$ respektive $r = 0,89$, $p < 0,05$) medan texturen inte kunde förklara skördevariationer på Svanshals (Fig. 2). På den lättare jorden (Grimstorp) ökade $RY_{i,LT A}$ med lerhalten, medan $RY_{i,LT A}$ sjönk när lerhalten ökade på den styvare jorden (Hagnesta). Skörden ökade med ökande mullhalt i alven på Hagnesta ($r = 0,75$, $p < 0,1$). På Svanshals fanns det inget samband mellan mullhalt i alven och $RY_{i,LT A}$. Om dock punkten med låg skörd ("Svanshals 6", $RY_{i,LT A} = 80,5$ %; Tabell 1) togs bort, fanns även ett positivt, dock ej signifikant, samband mellan mullhalt och $RY_{i,LT A}$ för Svanshals ($r = 0,67$).

(Mikro)reliefen är en trolig förklaring till den låga skörden på punkten "Svanshals 6", eftersom den låg på en liten "rygg", vilket gör den känsligare för torra. Skörden var t.ex. speciellt dålig (bara 70 %, jämfört med 80,5 % i genomsnitt; Tabell 1) år 2006 och 2008; båda åren var torrare än vanligt under perioden mars-juli (källa: www.smhi.se).

Mellan $RY_{i,LT A}$ och matjordens mullhalt fanns det inga tydliga samband. Detta kan tyda på att genomsnittskörden över flera år bestäms mest av alvegenskaperna. Det är intressant att platsen med låg skörd på Grimstorp var den enda platsen på alla fält där jorden var "övermättad" av organiskt kol enligt Dexter *et al.* (2008), dvs. där det fanns organiskt kol i marken (matjorden) som inte var bunden till leran.



Figur 2. Samband mellan markens lerhalt och relativskörd för Grimstorp (röda kvadrater), Svanshals (blå rombi) och Hagnesta (gröna trianglar). Observera att relativskörd är fältspecifisk.

Markmekaniska egenskaper

Skrymdensiteten varierade inom varje fält. I alven var variationen 1.39-1.60 Mg m⁻³ (Svanshals), 1.52-1.69 Mg m⁻³ (Grimstorp) samt 1.27-1.50 Mg m⁻³ (Hagnesta). Den absoluta skrymdensiteten är dock inget bra mått i samband med rottillväxten (Håkansson, 1990). Följaktligen påträffades inget samband mellan skrymdensitet och skörd. Därför beräknades packningsgraden, DC (Håkansson, 1990), genom att beräkna referensskrymdensiteten enligt Keller & Håkansson (2010). Det fanns dock inget tydligt samband mellan alvens DC och $RY_{i,LT A}$ heller. Detta kan bero på att DC-konceptet inte utvecklades för alven, och på osäkerheten av uppskattningen av referensskrymdensiteten via pedotransferfunktioner.

Det fanns ett svagt positivt samband mellan $RY_{i,LT A}$ och alvens svällningsindex på Grimstorp ($r = 0,71$, $p < 0,15$), och på Svanshals om den ovan nämnda punkt Svanshals 6 exkluderades ($r = 0,78$, $p < 0,15$). Svällningsindexet är ett mått på markens mekaniska återhämtningsförmåga (Kuan *et al.*, 2007). Det beskriver hur mycket marken fjädrar tillbaka efter mekaniskt belastning; ju högre svällningsindexet, ju större fjädringen. På Grimstorp fanns ett positivt samband mellan $RY_{i,LT A}$ och alvens kompressionsindex ($r = 0,70$, $p < 0,15$); ett liknande, dock ej signifikant, samband fanns på Hagnesta. Detta kan förklaras med att en mark med högre kompressionsindex (en mark som kan komprimeras mera) är mindre packad, och därför gynnar rottillväxten mer. På Svanshals var dock sambandet mellan $RY_{i,LT A}$ och alvens kompressionsindex negativt, mycket på grund av punkten "Svanshals 6" som nämndes ovan.

Växttillgängligt vatten och luftfylld porositet

För att en gröda ska kunna växa bra behöver den både tillräckligt med vatten och syre. Enligt Reynolds *et al.* (2009) är det optimalt om det finns ≥ 15 % växttillgängligt vatten, PAW, och ≥ 14 % luftfylld porositet vid fältkapacitet (-100 hPa vattenpotential), AFP. För alla punkter på alla fält var alvens PAW $\geq 14,8$ %, vilket kan vara anledningen att det inte fanns ett samband med skörden. Däremot var alvens AFP mellan 0 och 11,8 % på alla fält, dvs. otillräcklig enligt Reynolds *et al.* (2009). Inga tydliga samband mellan AFP och $RY_{i,LT A}$ noterades dock.

Vattengenomsläpplighet

I ett pilotprojekt (det av Stiftelsen Lantbruksforskning finansierade projekt "Infiltration – ett enkelt fältmått på jordens produktionsförmåga", projektnummer V0633007) uppmättes en positiv korrelation mellan relativ konduktivitet och relativ skörd på tre fält. Speciellt områdena med låg skörd var karakteriserade av låg konduktivitet och sämre struktur (Keller & Rydberg, 2007). Sambandet förklarades med att markens vattengenomsläpplighet var en god indikator på markens struktur.

Detta samband kunde nu bekräftas på ytterligare ett fält, Grimstorp: $RY_{i,LT A} = 97.5 + 0.1 K_{fs}$ ($r = 0,68$, $p < 0,15$). På Hagnesta och Svanshals fanns dock inget samband mellan K_{fs} och relativ skörd. På Hagnesta var K_{fs} hög för alla punkter. Dessutom fanns på detta fält ingen punkt med mycket låg skörd (relativskörd i alla punkter > 90 %) – till skillnad mot pilotprojektet valdes i denna studie inte nödvändigtvis området med fältets absolut lägsta skördepotential, vilket gör skillnaderna mindre tydliga. På Svanshals var punkten med lägst skörd den ovan beskrivna "Svanshals 6"; för alla andra punkter var den relativa skörden mellan 91 och 107 %, alltså varken speciellt låg eller speciellt hög.

De uppmätta värdena på K_{fs} var dock mycket variabel inom varje fält och mellan fälten; K_{fs} varierade mellan 0,8 cm h⁻¹ ("Svanshals 2") och 97,1 cm h⁻¹ ("Hagnesta 2"). Inomfältsskillnaden mellan stället med högst respektive lägst K_{fs} var en faktor 5,0 (Hagnesta) till 48,1 (Svanshals).

Aggregatstabilitet

Med turbiditetsmetoden uppmäts hur stabilt ett aggregat är när det kommer i kontakt med vatten; denna aggregatstabilitet kan relateras till igenslamning och förlust av partikelbunden fosfor (Etana *et al.*, 2010). På både Svanshals fanns det en positiv korrelation mellan aggregatstabilitet och relativ skörd ($r =$

0,93, $p < 0,01$), dvs. sämre skörd där aggregatstabiliteten var lägre. På Grimstorp var sambandet mellan aggregatstabilitet och relativ skörd svagt ($r = 0,80$ $p = 0,2$). På Hagnesta däremot fanns inget samband mellan skörd och aggregatstabilitet.

Speciellt intressant var att "Svanshals 6", som har nämnts som "outlier" ovan, hade betydligt lägre aggregatstabilitet än resten av punkterna på Svanshals, trots att "Svanshals 6" hade liknande textur och mullhalt som "Svanshals 1, 3-5" ("Svanshals 2" hade betydligt högre lerhalt).

Aggregatstorleksfördelning

Enligt Dexter (1988) kan markstrukturen beskrivas som sammansättningen av aggregat av olika storleksordningar, där stora aggregat består av mindre aggregat, osv. Därför borde en bra markstruktur vara karakteriserad av en "bredare" aggregatstorleksfördelning, dvs. ett mindre β . På Hagnesta och Grimstorp fanns det ett negativt dock ej signifikant samband ($r = -0,57$ respektive $-0,61$) mellan $RY_{i,LTA}$ och alvens β ; skörden var alltså högre där marken hade en bredare aggregatstorleksfördelning. På Svanshals fanns det däremot inget samband mellan $RY_{i,LTA}$ och alvens β .

Grundbearbetning på hösten: vattenhalt och aggregatstorleksfördelning

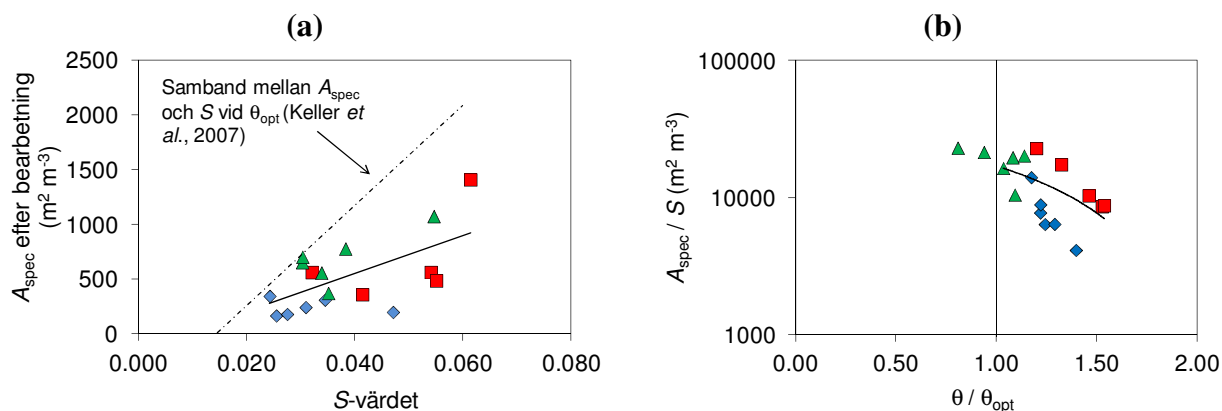
Vattenhalten vid grundbearbetning på hösten, θ , varierade inom alla de undersökta fälten; den var mellan 21 och 25 % på Grimstorp, 21-31 % på Hagnesta och mellan 20 och 41 % på Svanshals. Den större variationen på Svanshals reflekterar den stora variationen i textur på detta fält (27-62 % lerhalt). Den absoluta vattenhalten är dock inte avgörande eftersom den är jordartsberoende. Därför används en relativ vattenhalt. Det finns en optimal vattenhalt för bearbetning, θ_{opt} , som kan beräknas från markens pF-kurva (Dexter & Bird, 2001). Keller *et al.* (2007) visade också att den totala ytan på aggregaten som produceras vid bearbetning, A_{spec} , var större ju bättre markens fysikaliska kvalité var, uttryckt i form av markens S-värde (Dexter, 2004). Detta samband kan bekräftas i denna studie (Fig. 3a). Vidare visar Fig. 3a att A_{spec} var lägre än den maximalt möjliga A_{spec} vid θ_{opt} enligt Keller *et al.* (2007), eftersom marken bearbetades vid en vattenhalt som inte var optimal.

Den relativa vattenhalten var 1,20-1,54 på Grimstorp, 0,81-1,09 på Hagnesta och 1,17-1,40 på Svanshals. På Hagnesta var den nära θ_{opt} . På Grimstorp och Svanshals var det vid alla punkter en aning för blött vid bearbetningens tidpunkt. Variationen i θ/θ_{opt} hade direkta konsekvenser för hur bra bearbetningsresultatet blev: det var sämre när marken bearbetades vid för blöta förhållanden (Fig. 3b). På den "torra sidan" av θ_{opt} ($\theta < \theta_{opt}$) fanns det för få datapunkter för att kunna tolka resultaten. Det syns också i Fig 3b att plöjning (Svanshals) leder till mindre A_{spec} än kultivering (Grimstorp och Hagnesta). På Hagnesta fanns det ett svagt positivt samband mellan skörden år 2008 och A_{spec} hösten 2007 ($r = 0,62$, $p < 0,2$), dvs. ett grövre bearbetningsresultat medförde lägre skörd. Datan tillåter dock inga generella slutsatser.

Såbäddsegenskaper

Enligt Håkansson *et al.* (2002) ska såbädden för småfröigt utsäde vara minst 4 cm djup och innehålla > 50 % aggregat < 5 mm. Det första kriteriet uppfylldes inte på någon punkt i de fält som ingick i denna studie (sådjupet < 4 cm), medan det andra kriteriet uppfylldes på alla förutom en punkt ("Svanshals 2"), där dock andelen aggregat < 5 mm var 48 % och därmed mycket nära gränsvärdet. Därför hittades inte heller något samband mellan såbäddens aggregatstorleksfördelning och skörden år 2008.

Relationen mellan bearbetningsresultatet efter grundbearbetning och aggregatstorleksfördelningen i såbädden var svårtolkat. På Hagnesta och Grimstorp fanns det en tendens till att ett grövre bearbetningsresultat på hösten ledde till ett grövre och ojämnare såbädd, men sambanden var ej signifikanta.



Figur 3. (a) Samband mellan markens S -värde (Dexter, 2004) och den specifika ytan på aggregaten som producerades vid bearbetning, A_{spec} , och (b) samband mellan A_{spec}/S och den relativa vattenhalten vid bearbetning, $\theta/\theta_{\text{opt}}$ för Grimstorp (röda kvadrater; kultiverat), Svanshals (blå romb; plöjt) och Hagnesta (gröna trianglar; kultiverat).

SLUTSATSER

Sammanfattningsvis kan konstateras att det inte finns några enkla förklaringar till inomvälvtsvariation av skörd. Inom detta projekt framställdes hypotesen att över tiden stabila skördemönster kan relateras till alvens egenskaper. Denna hypotes kunde stödjas, men inte på alla fält, och inte för alla uppmätta egenskaper. Sambanden mellan skörd och markegenskaper var ofta svaga. Den största anledningen kan nog vara att det finns många faktorer som påverkar skörden. En svårighet är också att analysera data från olika fält, eftersom de har olika absoluta skördenivåer och brukas olika.

Över tiden stabila skördemönster fanns på alla de undersökta fälten. Detta är intressant och ett mycket värdefullt resultat i sig. Det tyder på att skörden styrs av tidsligt (kvasi-)konstanta egenskaper, så som markens textur (jordart), fältets topografi eller alvens egenskaper. Det betyder också att precisionsodling måste ta hänsyn till (i) markens fysikaliska egenskaper och (ii) alven.

På två av fälten (Hagnesta, Grimstorp) fanns det samband mellan alvens fysikaliska egenskaper (inklusive textur) respektive markstruktur och den genomsnittliga skörden för flera år. På fältet "Svanshals" var skörden påverkad av topografien: punkten med den lägsta skörden låg på en liten "rygg" och var därför känslig för torka. Denna punkt ("Svanshals 6") var en "outlier" när det gällde samband mellan skörd och struktur: sambandet mellan alvens struktur och skörd var densamma som på Grimstorp och Hagnesta när "Svanshals 6" exkluderades. Skörden var tendensiellt lägre där strukturen var sämre, dvs. där markens aggregatstorleksfördelningen var mindre homogen, och där t.ex. markens mekaniska återhämtningsförmåga var mindre och där marken hade lägre aggregatstabilitet. Sambandet mellan relativskörd och markens genomsläpplighet som påträffades i en tidigare studie kunde bekräftas på ett fält (Grimstorp). På de andra fälten fanns inget samband, vilket dock kunde förklaras.

Vattenhalten vid grundbearbetning på hösten varierade inom alla de undersökta fälten. Resultaten av denna studie visade att den totala ytan på aggregaten som produceras vid bearbetning var (i) större ju bättre markens fysikaliska kvalitet var, och (ii) mindre ju blötare marken var vid bearbetning. Dessutom fanns en tendens till att ett grövre bearbetningsresultat på hösten medförde en grövre och ojämnare såbädd.

Framtida forskning skulle kunna ta en mera geostatistisk ansats, dvs. utföra mätningar på flera punkter inom olika skördeområden på ett fält, t.ex. i kombination med "proxi och remote sensing" teknik. Vidare vore det intressant att utföra mätningar på ett fält under flera år. Inomfältsvariation av

skörd skulle kunna studeras i ett interdisciplinärt projekt. Slutligen krävs det bättre kunskap om rot-mark interaktionen.

RESULTATFÖRMEDLING

Vetenskapliga artiklar

Keller T., Lamandé M., Schjønning P. & Dexter A.R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma* 163 (1-2), 13-23.

Keller T., Sutter J.A., Nissen K. & Rydberg T. 2011. Using field measurement of saturated hydraulic conductivity as a simple indicator of low yielding zones in some Swedish fields (*Submitted*).

Keller T., Sutter J.A., Nissen K. & Rydberg T. 2010. Soil structure explains some within-field variation in crop yield. Proc. Int. Conf. AgEng, Clermont-Ferrand (F), 6-9 September 2010, REF374, 10 pp.

Ytterligare två vetenskapliga artiklar i referee-granskade tidskrifter är planerade:

Keller T., Sutter J.A., Nissen K. & Rydberg T. Temporal stability of crop yield in some Swedish fields and relationships with soil physical properties.

Keller T. & Dexter A.R. Soil structure produced by tillage in relation to the water content at tillage: within-field variability.

Muntliga presentationer vid vetenskapliga konferenser och seminarier

Keller T., Sutter J.A., Nissen K. & Rydberg T. 2010. *Soil structure explains some within-field variation in crop yield*. Int. Conf. AgEng, Clermont-Ferrand, France; 6-8 September 2010.

Keller T. 2011. *Temporal and spatial variability in crop yield and relationships with soil structure*. Colloquium Dep. Natural Resources & Agriculture, Agroscope, Zurich, Switzerland; 2 March 2011.

Seminarier för lantbrukare och rådgivare

Keller T. 2008. *Markpackning: Konsekvenser och motåtgärder*. Seminarium Kraftsamling växtodling i Östergötland: Marken som växtplats, Linköping, Sweden; 7 November 2008.

Keller T. 2011. *Bodenverdichtungen – Auswirkungen auf Ertrag und Bodenfunktionen*. Fältvandring, Etzwil/Schlierbach LU, Switzerland; 18 April 2011.

Undervisning

Resultaten eller delar av resultaten har använts i undervisning vid:

- SLU, Uppsala: inom kursen *Markvetenskap för civilingenjörer* (2009)
- Swiss College of Agriculture SHL, Zollikofen: inom kursen *Terramechanics* (2008)

Följande Minor Field Study (MFS) i Kenya, där markstukuren i fält med bra och dålig avkastning studerades, har varit inspirerade av detta SLF projekt: Rosén S. 2009. Soil physical properties and erosion risks at smallholder farms in Embu, Kenya. Minor Field Study (MFS)/Bachelor Thesis, SLU Uppsala (huvudhandledare: Thomas Keller).

TACK TILL

Jag vill tacka Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF) som finansierade detta projekt. Jag vill också tacka Lovang Lantbrukskonsult AB, Vikingstad, för hjälp med urval av gårdarna; Sven-Axel Nordstrand (Nolo Lantbruks AB, Väderstad), Stefan Lindgren and Johan Varenius (Sjösa Gård AB, Nyköping) och Erik Danckwardt-Lilleström (EDL Lantbruk, Mjölby) för deras interesse i detta projekt och för deras stora hjälp med att hitta lämpliga fält, ta fram skördekartor, *etc.*; Urban Svantesson (Ärla-Hagby Gård, Eskilstuna), Emma Petersson och Christina Öhman (SLU, Uppsala) för hjälp med arbetet i fält och på laboratoriet; Janine Sutter (Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich, Switzerland) och Knud Nissen (Lantmännen, PrecisionsSupport, Lidköping) för hjälp med att ta fram och analysera skördekartorna; och Elisabeth Bölenius och Tomas Rydberg (SLU, Uppsala) som (språk)granskade denna slutrapport.

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.
- Bakhsh A., Kanwar R.S. & Malone R.W. (2007) Role of landscape and hydrologic attributes in developing and interpreting yield clusters. *Geoderma* **140**, 235-246.
- Berisso F.E., Schjønning P., Keller T., Lamandé M., Etana A., de Jonge L.W., Iversen B.V., Arvidsson J. & Forkman J. (2011) Persistent effects of subsoil compaction on pore characteristics and functions in a loamy soil. *Soil & Tillage Research*, Under review.
- Blackmore S. (2000) The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture* **26**, 37-51.
- Blackmore S., Godwin R.J. & Fountas S. (2003) The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering* **84**, 455-466.
- Bourennanne H., Nicoulaud B., Couturier A. & King D. (2003) Assessment of spatial correlation between wheat yields and some physical and chemical properties. In: *Proc. 4th ECPA Conf. Precision Agriculture*, pp 95-101.
- Carter M.R. & Gregorich E.G. (eds) (2008) *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd Edition. CRC Press, 1224 pp.
- Dexter A.R. (1988) Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* **11**, 199-238.
- Dexter A.R. (2004) Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120**, 201-214.
- Dexter A.R. & Bird N.R.A. (2001) Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research* **57**, 203-212.
- Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyż E.A., Jolivet C. & Duval O. (2008) Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* **144**, 620-627.
- Etana A., Rydberg T. & Arvidsson J. (2010) Readily dispersible clay and particle transport in five Swedish soils under long-term shallow tillage and mouldboard ploughing. *Soil & Tillage Research* **106**, 79-84.
- Håkansson I. (1990) A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research* **16**, 105-120.
- Håkansson, I. (2005) *Machinery-induced Compaction of Arable Soils: Incidence – Consequences – Counter-measures*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Uppsala, Sweden. Reports from the Division of Soil Management No 109, 153 pp.
- Håkansson I., Myrbeck Å. & Etana A. (2002) A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil & Tillage Research* **64**, 23-40.
- 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.
- Keller T. & Håkansson I. (2010) Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* **154**, 398-406.
- Keller T. & Rydberg T. (2007) Soil structure explains some within-field variation in crop yield. In: *Proc. 23rd Congress of NJF*, Copenhagen, Denmark. *NJF Report* Vol. 3, Nr. 2, Year 2007, pp. 171-172.
- Keller T., Arvidsson J. & Dexter A.R. (2007) Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil & Tillage Research* **92**, 45-52.
- Keller T., Lamandé M., Schjønning P. & Dexter A.R. (2011) Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma* **163**, 13-23.
- Kuan H.L., Hallett P.D., Griffiths B.S., Gregory A.S., Watts C.W. & Whitmore A.P., 2007. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. *European Journal of Soil Science* **58**, 811-821.
- Perfect E., Diaz-Zorita M. & Grove J.H. (2002) A prefractal model for predicting soil fragment mass-size distributions. *Soil & Tillage Research* **64**, 79-90.
- Perfect E., Kay B.D., Ferguson J.A., da Silva A.P. & Denholm, K.A. (1993) Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil & Tillage Research* **28**, 123-139.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A. & Yang X.M. (2009) Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* **152**, 252-263.
- Rosin P. & Rammler E. (1933) Laws governing the fineness of powdered coal. *Journal Inst. Fuel* **7**, 29-36.
- Vrindts E., Reyniers M., Darius P., De Baerdemaeker J., Gilot M., Sadoui Y., Frankinet M., Hanquet B. & Destain M.-F. (2003) Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat. *Biosystems Engineering* **85**, 141-152.
- 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.