



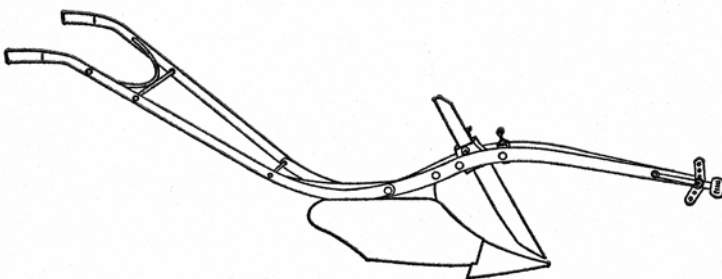
SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET
UPPSALA

INSTITUTIONEN FÖR MARKVETENSKAP

RAPPORTER FRÅN _____ _____

JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Swedish University of Agricultural Sciences,
S-750 07 Uppsala
Department of Soil Sciences
Reports from the Division of Soil Management



Nr 106

2003

Karin Gustafsson, Johan Arvidsson,
Thomas Keller

**Dragkraftsbehov för plog, kultivator
och tallriksredskap vid olika
markvattenhalter**

ISSN 0348-0976

ISRN SLU-JB-R--106--SE

Dragkraftsbehov för plog, kultivator och tallriksredskap vid olika markvattenhalter

Förord

Dragkraftsbehovet vid bearbetning är av mycket stor betydelse för kostnaderna inom växtodlingen, genom att påverka både bränsle-, maskin- och arbetskostnader. Denna rapport redovisar mätningar under 2001 och 2002 av hur dragkraftbehov och bearbetningsresultat för olika redskap påverkas av jordart, vattenhalt, bearbetningsdjup och körhastighet. Mätningarna har ingått i projektet "Vattenhaltens betydelse vid höstbearbetning med olika redskap – effekter på markstruktur, avkastning och bränsleåtgång", finansierat av SLF, som härmed slutrapporteras.

Dragkraftsbehov för plog, kultivator och tallriksredskap vid olika markvattenhalter

Innehåll

SAMMANFATTNING.....	3
1. INLEDNING OCH SYFTE	4
2. JORDENS HÅLLFASTHET OCH DEFORMATION.....	4
2.1 NORMAL- OCH SKJUVSPÄNNINGAR	5
2.2.SKJUVHÅLLFASTHET	5
2.3 PENETRATIONS MOTSTÅND.....	6
2.4 KONSISTENSGRÄNSER	7
2.4.1 <i>Bearbetbarhet</i>	7
2.4.2 <i>Plasticitet</i>	7
3. REDSKAPENS ARBETSSÄTT	8
3.1 OLIKA BROTT.....	8
3.1.1 <i>Skjuvningsbrott</i>	8
3.1.2 <i>Plastisk deformation</i>	9
3.1.3 <i>Sprickbildning</i>	9
3.2 TVÅDIMENSIONELLT BROTT.....	10
3.3 TREDIMENSIONELLT BROTT	10
3.4 ANGREPPSVINKEL.....	12
3.5 PLOG	13
3.6 KULTIVATOR	13
3.7 TALLRIKSREDSKAP.....	14
4. HASTIGHET OCH BEARBETNINGSDJUP	15
4.1 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ DRAGKRAFTBEHOVET	15
4.2 ARBETSDJUPETS INVERKAN PÅ DRAGKRAFTBEHOVET	15
5. BEARBETNINGENS SYFTE.....	16
5.1 AGGREGATSTORLEKAR/ SÖNDERDELNING	16
5.1.1 <i>Olika breda blad</i>	16
5.1.2 <i>Hastighet</i>	16
6. MATERIAL OCH METODER	17
6.1 FÖRSÖKSPLATSER.....	17
6.2 FÖRSÖKSLED	17
6.3 MÄTNING OCH BERÄKNING AV EFFEKTBEHOV	18
6.3.1 <i>Mättraktor</i>	18
6.3.2 <i>Slirning och rullningsmotstånd</i>	18
6.4 BERÄKNING AV DRAGKRAFTBEHOV.....	19
6.4.1 <i>Verkligt bearbetningsdjup</i>	19

6.5 BEARBETNINGRESULTAT	19
6.5.1 Sönderdelningsgrad.....	19
6.5.2 Energibehov för sönderdelning.....	19
6.6 MÄTNING AV JORDENS HÅLLFASTHET	20
6.6.1 Kohesionsmätningar.....	20
6.6.2 Penetrationsmotstånd.....	20
6.7 EXTRAKÖRNINGAR	20
6.8 DROP-SHATTER TEST	20
7. RESULTAT	21
7.1 SPECIFIKT DRAGKRAFTBEHOV	21
7.2 INSTÄLLT OCH VERKLIGT BEARBETNINGSDJUP	21
7.3 TOTALT DRAGKRAFTBEHOV	23
7.4 SLIRNING	23
7.5 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	26
7.6 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT.....	26
7.7 REDSKAPENS, BEARBETNINGSDJUPETS OCH VATTENHALTENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT.....	26
7.8 ENERGIBEHOVET FÖR SÖNDERDELNING.....	28
7.9 KOHESIONENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET.....	29
7.10 VATTENHALTENS BETYDELSE FÖR KOHESIONEN	29
7.11 VATTENHALTENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET.....	30
7.12 PENETRATIONS MOTSTÅNDETS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	30
7.13 DROP-SHATTERTEST	31
8. DISKUSSION	32
SPECIFIKT DRAGKRAFTBEHOV	32
TOTALT DRAGKRAFTBEHOV	33
SLIRNING.....	33
DROP-SHATTERTEST.....	35
HASTIGHETENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT	34
REDSKAPENS, BEARBETNINGSDJUPETS OCH VATTENHALTENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT.....	34
ENERGIBEHOVET FÖR SÖNDERDELNING.....	34
HÅLLFASTHET	35
9. SLUTSATSER.....	36
LITTERATUR.....	37
APPENDIX. SIMULERING AV SKJUVHÅLLFASTHET OCH DRAGKRAFTSBEHOV I FÖRSÖK PÅ LERJORD PÅ ULTUNA.....	39

Sammanfattning

Bränsleförbrukning, maskin- och arbetskostnader medför höga kostnader för jordbearbetningen i ett lantbruksföretag. I ett projekt höstarna 2001 och 2002 studerades energiåtgången och dragkraftbehovet för olika redskap på en lätt och en styv jord under blöta, fuktiga och torra bearbetningsförhållanden. Även aggregatstorleksfördelningen och energibehovet för sönderdelning mättes. Redskapen som jämfördes var plog, kultivator och tallriksredskap. Tre olika hastigheter jämfördes och för plogen och kultivatoren även tre olika bearbetningsdjup. För att få ett mått på jordens hållfasthet användes en penetrometer och ett s.k. vingborr.

Traktorn som användes vid mätningarna var en Valmet 6600 på 100 hk som hade utrustning för bränslemätning. Med hjälp av denna kunde en effekt motsvarande effekten på kraftuttaget räknas fram för varje bearbetningsmoment och detta antogs motsvara drivhjulseffekten. Genom att ta hänsyn till effektförluster på grund av slirning och rullningsmotstånd räknades den nyttiga ”dragkrokseffekten” ut. Det genomsnittliga verkliga bearbetningsdjupet för de olika redskapen kunde beräknas genom att mäta skrymdensiteten samt väga den bearbetade jorden. Utifrån det verkliga bearbetningsdjupet och effektmätningarna kunde energibehovet per kg bearbetad jord, samt det specifika dragkraftbehovet räknas ut. Det senare definieras som kraften per bearbetad tvärsnittsarea (kN m^{-2}), eller energiåtgång per bearbetad jordvolym. Efter sållning av jorden kunde också sammanlagda partikelytan och energibehovet för sönderdelning beräknas (J m^{-2}).

Det specifika dragkraftbehovet var lägst för plogen och högst för kultivatoren, och minskade med ökad vattenhalt. Energitillbehovet för sönderdelning var lägst under fuktiga förhållanden för samtliga redskap och tallriksredskapet var det

redskap som uppnådde högst sönderdelning i förhållande till tillförd energi. Både det specifika dragkraftbehovet och sönderdelningsenergin blev lägre på den lättare jorden.

För kultivatoren ökade det specifika dragkraftbehovet med bearbetningsdjupet, medan dragkraftbehovet för plöjning inte påverkades av bearbetningsdjupet. Detta kan delvis förklaras av skillnader i redskapens geometri.

Det fanns en tendens att det specifika dragkraftbehovet ökade med ökad hastighet. Detta var tydligast för plöjning på den lättare jorden. Dragkraftökningen kan förklaras av jordens ökade acceleration samt av att en ökad deformationshastighet ger en ökad hållfasthet hos jorden.

Jordens hållfasthet och därmed även dragkraftbehovet skiljer sig mellan olika jordar och mellan olika vattenhaltsförhållanden. Jordens kohesion gav en god uppfattning om hållfastheten och dragkraftbehovet vid ett visst tillfälle och kunde lätt mätas i fält med ett vingborr. Penetrometern gav en dålig uppfattning om dragkraftbehovet.

Plogen hade lägst specifikt dragkraftsbehov, men om hänsyn tas också till bearbetningsresultatet kan inget redskap entydigt pekas ut som det mest effektiva. Resultaten tyder på att bearbetning vid en vattenhalt nära eller strax under plasticitetsgränsen utgör den bästa kompromissen för att uppnå ett lågt dragkraftsbehov och ett gott bearbetningsresultat.

1. Inledning

Utvecklingen inom jordbearbetningsområdet går mot att minska kostnaderna i samband med bearbetning. Metoderna för detta handlar både om tidsmässiga vinster och om bränslebesparingar. Samtidigt finns det ett visst krav på bearbetningsresultatet. Både kraven på och förutsättningarna för ett visst bearbetningsresultat kan skilja sig åt mellan olika jordar och tidpunkter. Om målet med bearbetningen är ett fint bruk bör sönderdelningen vara så hög som möjligt redan vid primärbearbetningen för att spara in efterföljande körningar. Om det främsta målet är att luckra eller ogräsbekämpa kan en hög sönderdelning däremot ses som ett ”slöseri” med energi. Istället bör en metod väljas där den önskade jordmängden bearbetas med en så låg energiinsats som möjligt. Genom att undersöka dragkraftbehovet och bearbetningsresultatet för olika bearbetningar under olika förutsättningar kan rekommendationer för val av bearbetningsmetod utformas.

Dragkraftbehovet för en viss bearbetning kommer dels att påverkas av jordens hållfasthet, dels av redskapets geometri (Desbiolles, m.fl., 1997). För att kunna jämföra dragkraftbehovet för olika redskap med olika arbetsbredd och arbetsdjup måste det specifika dragkraftbehovet användas. Detta definieras som kraften per tvärsnittsarea bearbetad jord (Gill & Vanden Berg, 1967, Spoor & Godwin, 1978). Det finns flera olika modeller framtagna för att förutsäga dragkraftbehovet. Ingående parametrar i dessa är ofta: jordens kohesion och interna friktionsvinkel, friktionen mellan jorden och redskapet, redskapets angreppsvinkel, bearbetningsdjupet och körhastigheten. I följande avsnitt beskrivs jordens hållfasthet och vad som kan skilja olika jordar åt.

Det arbete som presenteras här syftade till att jämföra dragkraftbehov, energiutnyttjande och bearbetningsresultat för olika redskap under olika jordarts- och

fuktighetsförhållanden. Vidare studerades påverkan av arbetsdjup och hastighet på dragkraftbehovet. Dessutom undersöktes dragkraftbehovet som funktion av penetrationsmotstånd och kohesion i jorden. Dessa parametrar kan enkelt mätas direkt i fält och skulle därför vara lämpliga att använda för att förutsäga dragkraftbehovet. Avsikten är att bidra till bättre rekommendationer för jordbruket vid val av bearbetningsmetod. Rekommendationerna bör vara anpassade efter jordart, vattenhalt och målet med bearbetningen. I ett appendix redovisas också beräkningar av lämplig tidpunkt för bearbetning på hösten, baserat på simuleringar av markvattenhalt.

I efterföljande avsnitt görs först en litteraturgenomgång om redskapens arbetsätt och hur olika faktorer inverkar på dragkraftbehovet. Där behandlas också jordens sönderdelning och hur denna påverkas av olika parametrar.

2. Jordens hållfasthet och deformation

Med deformation menas en formförändring och kan beskrivas som summan av ren skjuvning och sammanpackning (Dexter & Arvidsson, 2002). Ren skjuvning innebär en formförändring utan en förändring av volymen. En rent kompressiv spänning förändrar volymen utan att förändra formen. Under praktiska förhållanden är det svårt att skilja dessa deformationstyper åt, då båda formerna sker i olika stor utsträckning.

Jordens hållfasthet definieras som det motstånd, vilket måste överskridas för att jorden ska deformeras (Sirjacobs, m.fl., 2002). Ur bearbetningssynpunkt är en alltför hög hållfasthet en nackdel då detta ökar dragkraftbehovet samt gör det svårare att uppnå en optimal struktur.

2.1 Normal- och skjuvspänningar

Vid jordbearbetning utsätts jorden för krafter från redskapets yta (Koolen & Kupiers, 1983). Både krafterna och ytan kan vara av olika storlek, men det är inte dessa absolutvärden som är av störst betydelse för jordens reaktion. Istället är det kraftintensiteten, eller spänningen som har betydelse. Med spänning menas kraft per ytenhet som verkar på en kropp och uttrycks i Nm^{-2} eller Pa (Dexter & Arvidsson, 2002). Spänningar som verkar parallellt med den yta som studeras kallas för skjuvspänningar, medan spänningar som verkar vinkelrätt mot ytan kallas för normalspänningar.

2.2. Skjuvhållfasthet

När jorden utsätts för krafter från en traktor eller ett redskap uppstår en jordrörelse genom att partiklarna antingen glider över varandra (skjuvning) eller över redskapsdelarna i marken (Spor, 1975). Detta bygger upp skjuvspänningar i jorden som kommer att nå ett maximum vid en viss deformation (se fig. 1). Den maximala skjuvspänningen beskriver jordens skjuvhållfasthet och det finns flera metoder för att mäta detta (Koolen & Kupiers, 1983, Dexter, 1973, Dexter & Arvidsson, 2002).

Skjuvningen kan vara homogen och inhomogen (Dexter, 1973), den homogena skjuvningen diskuteras inte vidare här. Med skjuvning menas i fortsättningen inhomogen skjuvning, vilket innebär att jorden deformeras längs ett sk. skjuvningsplan då den utsätts för en spänning. Detta sker genom att ytorna längs deformationsplanet glider mot varandra och skjuts i sidled. För att skjuva jorden måste skjuvspänningen överstiga jordens skjuvhållfasthet (Koolen & Kupiers, 1983). Skjuvhållfastheten består av kohesionskrafter (bindningskrafter) mellan jordpartiklarna och friktionskrafter mellan de båda ytorna (Koolen & Kupiers,

1983, Spoor, 1975). Den allmänt accepterade beskrivningen av jordens skjuvning är den s.k. Mohr-Coulombs lag som bl.a. beskrivs av Koolen & Kupiers (1983). I denna framgår att skjuvspänningen (τ_f) som krävs för att skjuva jorden ökar med ökad normalspänning (σ_n), d.v.s. med ökad belastning. Den lägsta skjuvhållfastheten hos jorden erhålls då normalspänningen är noll och benämns jordens kohesion (C). Hur stor ökning som sker med ökad normalspänning bestäms av den interna friktionsvinkeln (ϕ). Detta kan beskrivas med formeln $\tau_f = C + \sigma_n \tan \phi$, d.v.s. skjuvspänningen som krävs = kohesionskraft + friktionskraft (Koolen & Kupiers, 1983, Spoor, 1975) (se fig. 2). En lerjord har i regel hög kohesion och låg intern friktionsvinkel, medan det omvända gäller för en sandjord (Spor, 1975). Kohesion är attraktionskrafter mellan jordpartiklar (Baver m.fl., 1972). Bindningskrafterna involverade i kohesionen kan vara (1) van der Waals-bindningar, (2) elektrostatisk attraktion mellan negativa och positiva sidor av lermineralen, (3) katjonbryggor, (4) sammanbindande krafter på grund av organiskt material, karbonater, aluminium- och järnoxider m.m. och (5) kapillärt vatten. Dessa bindningskrafter kan ha olika stor betydelse under olika vattenhaltsförhållanden och för olika jordar. Partikelstorleken påverkar kohesionen så att stor andel små partiklar (hög andel ler) ger hög kohesion. Detta kan förklaras med att jorden då kan innehålla fler vattenfilmer i form av kapillärt vatten eftersom den specifika ytan ökar. Kohesionen beror av summan av de sammanhållande krafterna hos dessa vattenfilmer (Baver m.fl., 1972, Yong, 1975). Förutom attraktion mellan partiklar finns attraktionskrafter mellan den flytande fasen till ytan på den fasta fasen (Baver m.fl., 1972). Dessa attraktionskrafter benämns adhesion. Vattenmolekylerna kan både attraheras till ytan på jordpartiklar och till redskap som går genom jorden.

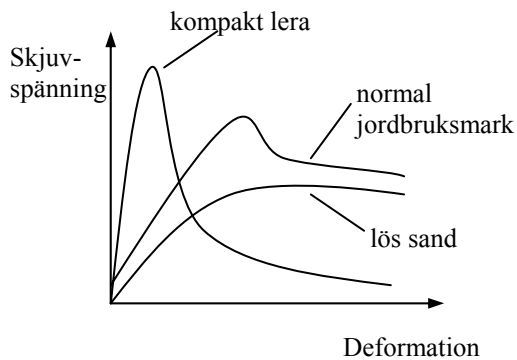


Fig. 1. Deformation och skjuvspänning för olika jordar (Spoor, 1975)

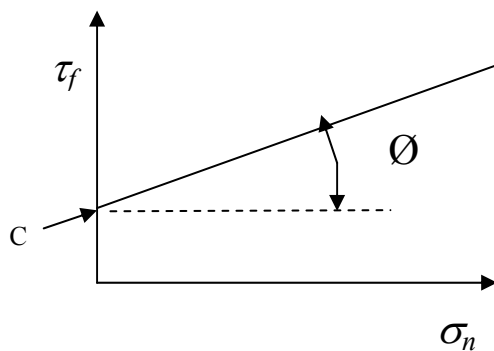


Fig. 2. Coulombs modell över sambandet mellan normalspänning (σ_n) och jordens skjuvhållfasthet (τ_f). Då det inte verkar någon normalspänning är skjuvhållfastheten lika med jordens kohesion (C).

Payne (1956) fann att kohesionen är den parameter som har störst inverkan på dragkraftsbehovet och varierar mycket på grund av förhållandena i fält. Den interna friktionsvinkeln och friktionen mellan jorden och redskapet kunde mer eller mindre betraktas som konstanta. I ett försök med att förutsäga dragkraftsbehovet jämförde Stafford (1979) kohesionens, adhesionens och densitetens inverkan på den beräknade dragkraften. Det visade sig att kohesionstermen hade mycket större inverkan än de övriga på alla jordar vid

alla förhållanden och kunde förklara 87-98 % av dragkraftsbehovet. Detta innebär att kohesionstermen ensam kan användas för att approximera dragkraftsbehovet.

2.3 Penetrationsmotstånd

Penetrationsmotståndet hos en jord är också ett mått på jordens hållfasthet och metoden brukar anses fördelaktig genom att den är enkel att utföra (Dexter & Arvidsson, 2002). Kraften som krävs för att trycka en konisk spets genom marken mäts och

penetrationsmotståndet brukar anges som kraften som krävs per påverkad areaenhet. En nackdel med metoden är att penetrationsmotståndet påverkas av flera olika faktorer som skjuvhållfasthet, kompressionsförmåga, friktion och adhesion. Faktorerna kan väga olika tungt i olika jordar och vid olika vattenhalter. Därför kan det vara svårt att tolka resultat från penetrationsmotståndsmätningar.

2.4 Konsistensgränser

Vattenhalten hos en jord har betydelse för dess egenskaper när det gäller t.ex. bearbetning. Beroende på vattenhalten befinner sig en jord i något av tre stadier:

fast och sprickbenägen, plastisk eller flytande (Eng brittle, plastic and liquid), se fig. 3 (Dexter & Arvidsson, 2002). Då jorden är sprickbenägen kommer den, som namnet antyder, att spricka om den bearbetas eller skjuvas. I sitt plastiska tillstånd kan en jord skjuvas eller knådas utan att spricka. Vid höga vattenhalter kan jorden flyta. Gränsen mellan sprickbenäget och plastiskt tillstånd kallas för plasticitetsgränsen och gränsen mot flytande tillstånd kallas för flytgränsen. Det vattenhaltsområde inom vilket jorden är plastisk kallas även för plasticitetsindex (Kézdi, 1974, Yong & Warkentin, 1975).

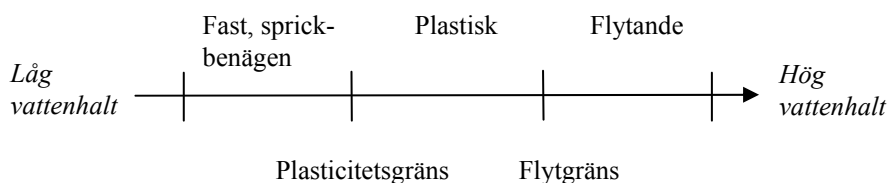


Fig. 3. Schematisk bild över konsistensgränserna hos en jord vid olika vattenhalter (Dexter & Arvidsson, 2002).

2.4.1 Bearbetbarhet

En jords bearbetbarhet säger hur lätt det är att sönderdela jorden (Baver m.fl., 1972). Förhållandena för bearbetning är således optimala inom det vattenhaltsområde som jorden är smulbar och lucker. Kohesionen är under sådana förhållanden låg och vattenhalten är tillräckligt hög för att minimera "cementation" mellan partiklar. Samtidigt är vattenhalten tillräckligt låg för att inte skapa plastiska förhållanden. Enligt Dexter (1988) ligger den optimala vattenhalten för bearbetning nära plasticitetsgränsen. Han menar att optimala bearbetningsförhållanden generellt uppträder då vattenhalten är 90 procent av plasticitetsgränsen, oavsett jordtyp.

Vid låga vattenhalter sker en cementation mellan torkade partiklar och jorden blir hård och mycket kohesiv (Baver m.fl., 1972). Om jorden bearbetas i detta tillstånd kommer stora kokor att bildas. Allteftersom vattenhalten ökar blir jorden mer bearbetningsbar. Jorden blir plastisk när en vattenfilm täcker jordpartiklarna helt och är då inte längre bearbetningsbar. Hur mycket vatten som kan tas upp innan en vattenfilm bildas beror bl.a. på typen av lermineral och innehållet av organiskt material.

2.4.2 Plasticitet

Plasticiteten hos en jord kan vara olika hög och vissa jordar saknar helt plastiska

egenskaper. Plasticitet definieras på flera sätt. Gemensamt för definitionerna gäller att lera kan ta upp vatten och vid en viss vattenhalt deformeras till en önskad form om den utsätts för en kraft (Baver m.fl., 1972, Yong & Warketin, 1975). Vidare gäller att formen bibehålls då kraften avlägsnas och efter att vattnet försvunnit. Sand som inte har några plastiska egenskaper kan formas då den är blöt, men formen bibehålls inte om den torkar (Baver m.fl., 1972). Hur stor deformation som kan ske i det plastiska tillståndet bestäms av hur långt ifrån varandra partiklarna kan flyttas utan att de förlorar sin kohesion. I ett plastiskt tillstånd måste jordpartiklarna kunna glida på varandra och inta nya positioner och därefter behålla dessa positioner (Yong & Warketin, 1975). Kohesionen måste vara tillräckligt låg för att tillåta partiklarna att flytta på sig, men tillräckligt hög för att upprätthålla de nya positionerna. En jord med hög plasticitet är seg vid plasticitetsgränsen och kan deformeras mellan fingrarna utan att falla sönder (Kézdi, 1974). Jordar med låg plasticitet kan bara rullas med försiktighet och går lätt sönder. Mellan dessa finns jordar med medelhög plasticitet. Plasticiteten är en funktion av andelen små partiklar och beror således bl.a. på lerhalten (Baver m.fl., 1972). Både plasticitetsgränsen och plasticitetsindex ökar med ökande lerhalt.

De utbytbara katjonerna har en betydande inverkan på plasticiteten (Baver m.fl., 1972). Na-mättade jordar har låg plasticitetsgräns, låg flytgräns, samt ett högt plasticitetsindex. K-mättade jordar har ett lågt plasticitetsindex och låg flytgräns. Ca- och Mg-mättade jordar har både hög plasticitetsgräns och hög flytgräns. H-mättade jordar varierar mycket.

Jordens plasticitet påverkas även i stor utsträckning av det organiska materialet (Baver m.fl., 1972). Plasticitetsgränsen är ofta högre i ytjorden än i djupare jordlager. Detta beror till stor del på att mullhalten är

högre i ytan. Både plasticitetsgränsen och flytgränsen ökar med ökad mullhalt, medan plasticitetsindex är oförändrat eller minskar (Baver m.fl., 1972, Kézdi, 1974). Exempel finns från en jord vars mullhalt sjönk från 3,9 % till 2,6 % under en 60-årsperiod (Baver m.fl., 1972). Detta medförde en förändring i plasticitetsgränsen från 27 % till 22 %. Organiskt material har hög förmåga att adsorbera vatten. Vattnet måste binda till ytan på det organiska materialet innan det kan bildas en kontinuerlig vattenfilm runt partiklarna, vilket gör jorden plastisk. En hög mullhalt gör det därför möjligt att bearbeta jorden vid höga vattenhalter med ett gott resultat.

3. Redskapens arbetsätt

3.1 Olika brott

Beroende på jordens och redskapets egenskaper kan jorden brytas på olika sätt då den bearbetas. Jordens uppbyggnad kan beskrivas generellt med tre grundmodeller.

3.1.1 Skjuvningsbrott

Jorden utsätts för kompressiva spänningar då ett redskap rör sig framåt och kommer att deformeras då skjuvspänningen överstiger jordens skjuvhållfasthet (Aluko & Sieg, 2000). Jorden skjuvas längs ett plan från redskapets spets i marken snett framåt mot jordytan, se fig. 4. Jordblocket som lossnar trycks framåt, uppåt längs redskapet och den obearbetade jorden. Mönstret upprepas allteftersom redskapet rör sig framåt i marken och flera jordblock skjuvas loss. Avståndet mellan skjuvningsplanen bestäms av hur kompressibel jorden är (Dexter & Arvidsson, 2002). Ju lättare det är att pressa samman jorden desto längre ifrån varandra hamnar skjuvningsplanen. Skjuvningsbrott uppstår vid relativt låg kohesion (Koolen & Kupiers, 1983).

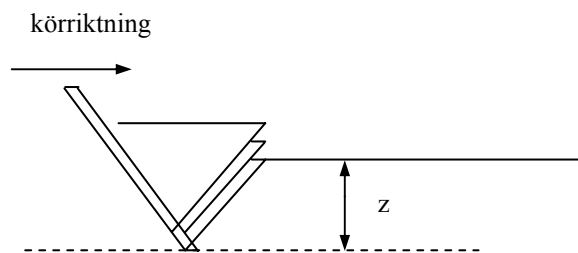


Fig. 4. Skjuvningsbrott, jordbitarna som skjuvas loss glider längs pinnen och rör sig uppåt och framåt (Aluko & Sieg, 2000).

Om hastigheten på redskapet ökar kan en förändring ske från tydliga skjuvningsplan till en mer fullständig deformation av hela den bearbetade jorden (Aluko & Sieg, 2000). Detta innebär att en ökad hastighet kan ge en ökad sönderdelningsgrad.

3.1.2 Plastisk deformation

Då en pinne rör sig genom marken kommer jorden att brytas upp snett uppåt, utåt från pinnen ner till ett visst kritiskt djup, d_c , (Dexter & Arvidsson, 2002, Spoor & Godwin, 1978). Under det kritiska djupet ändras jordens rörelse från framåt och uppåt till en horisontell rörelse på sidorna om redskapet, se fig. 5 (Aluko & Sieg, 2000). Jorden kommer att flyta runt pinnen och deformeras plastiskt och blir därför sammanpackad istället för luckrad (Koolen & Kupiers, 1983, Spoor & Godwin, 1978). Angreppsvinkeln på spetsen har stor inverkan på det kritiska djupet (Spoor & Godwin, 1978). En liten angreppsvinkel ökar det kritiska djupet så att jorden kan brytas upp till ett större djup. Det kritiska djupet påverkas även av pinnens bredd så att en bredare pinne får ett större kritiskt djup än en smalare pinne, men kan variera för samma pinne på olika jordar (McKyes, 1989). Jordens egenskaper och dess vattenhalt vid bearbetningstillfället har stor inverkan på den plastiska deformationen (Yong & Warketin, 1975). Det kritiska djupet varierar med vattenhalten så att det

minskar om vattenhalten ökar (Dexter & Arvidsson, 2002, Spoor & Godwin, 1978).

Ett visst bearbetningsdjup kan under blöta förhållanden överstiga det kritiska djupet, som i fig. 5. Samma bearbetningsdjup kan under torrare förhållanden vara långt ifrån det kritiska djupet. Det totala dragkraftbehovet (kraften per meter arbetsbredd) påverkas inte så mycket av att bearbetning sker under det kritiska djupet jämfört med bearbetning till samma djup under torrare förhållanden (McKyes, 1989). Däremot kommer det *specifika* dragkraftbehovet att öka drastiskt då bearbetning görs djupare än det kritiska djupet. Det specifika dragkraftbehovet definieras som kraften per tvärsnittsarea bearbetad jord (kN m^{-2}). Eftersom det totala dragkraftbehovet inte påverkas av ett kritiskt djup, samtidigt som den bearbetade jordvolymen minskar kommer det specifika dragkraftbehovet att öka då bearbetning görs djupare än det kritiska djupet.

3.1.3 Sprickbildning

Jorden kan också sönderdelas genom sprickbildning då ett redskap rör sig framåt, detta sker i regel då hållfastheten hos jorden är relativt hög (Aluko & Sieg, 2000). Sprickorna uppträder relativt oregelbundet runt aggregat där hållfastheten är som lägst (Payne, 1956). Sprickor bildas från redskapets spets och

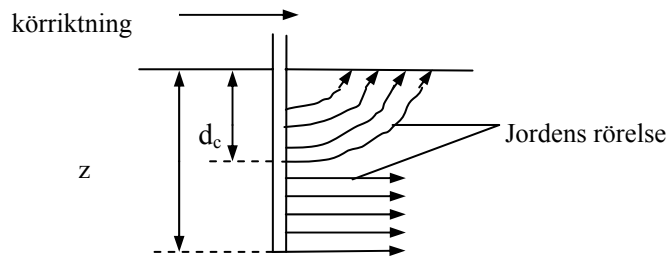


Fig. 5. Vid plastisk deformation, under ett visst kritiskt djup, d_c , ändras jordens rörelse från uppåt framåt till en rörelse i sidled (Aluko & Sieg, 2000). Under det kritiska djupet trycks jorden ihop istället för att luckras.

växer upp mot markytan där en jordklump lossnar, se fig. 6 (Aluko & Sieg, 2000). Hur stora kokor som bildas beror på jordens hållfasthet. Ju högre hållfastheten är, desto större blir kokorna vid bearbetning. Sprickbildning medför varken skjuvning eller sammanpackning av jorden.

3.2 Tvådimensionellt brott

Då bladet som går i marken är bredare än vad det är djupt kan jordens uppbyggnad beskrivas enligt en tvådimensionell modell (McKyes, 1989). Jordens rörelse sker i huvudsak framåt och vertikalt och eventuella sidoeffekter kan försummas. Jorden lossas lika brett som bladets vidd i marken (Koolen & Kupiers, 1983, Dexter & Arvidsson, 2002).

3.3 Tredimensionellt brott

För att beskriva hur jorden bryts av smala pinnar måste hänsyn tas till jorden på sidorna om pinnen (Aluko & Sieg, 2000). Med smala pinnar menas pinnar med ett djup/breddförhållande större än 1:1 (Payne, 1956). Jordens uppbyggnad för en pinne som är smalare än vad den är djup kan beskrivas med en tredimensionell modell. Skillnaden mot ett brett blad är att jorden som bryts upp och rör sig på sidorna om pinnen kommer att utgöra en större andel och därför inte kan försummas. Bredden på den bearbetade jorden efter pinnen kommer att vara mycket bredare än pinnens bredd (Dexter & Arvidsson, 2002). Från pinnens spets bryts jorden både snett framåt och snett åt sidorna så att tvärsnittsarean efter pinnen blir

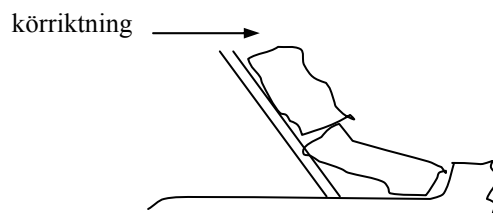


Fig. 6. Sprickbildning, sprickorna uppträder relativt oregelbundet och uppstår där hållfastheten är som lägst

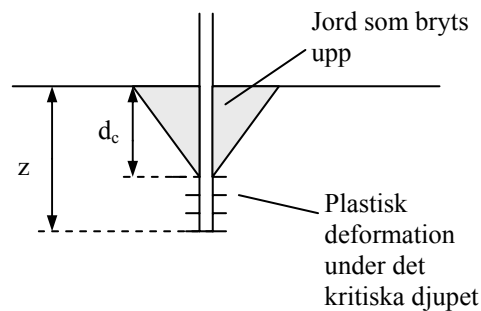


Fig. 7. Jorden som bryts upp på sidorna av en pinne utgör en ganska stor andel av den uppbrutna jorden (Dexter & Arvidsson, 2002).

V-formad från spetsen och uppåt. Om bearbetningsdjupet överstiger det kritiska djupet kommer tvärsnittsarean att bli V-formad ner till detta djup (fig. 7). I ett försök med en rak pinne som gick genom fuktig sand undersökte Payne (1956) hur jorden bryts. Han fann att jorden bryts upp framför pinnen i form av en halvmåne (fig. 8). På pinnen bildas en kil av jord som följer med pinnen framåt och klyver den uppbrutna jorden i två halvor. Halvorna pressas upp något samtidigt som de skjuts åt sidorna. Kilen byggs på med ny jord underifrån och stiger hela tiden upp mot ytan där den faller sönder. Allteftersom pinnen rör sig framåt upprepas mönstret.

Mönstret var särskilt tydligt vid en viss vattenhalt. Till skillnad från breda pinnar där jorden framförallt utsätts för kompressiva krafter orsakar smala pinnar även sprickbildande spänningar då jorden passerar på sidorna om pinnen (Aluko & Sieg, 2000).

Jorden bryts upp på samma sätt i fält, men detta är inte alltid lika tydligt eftersom kohesionen oftast är större inom aggregat än mellan dem (Payne, 1956). Detta gör att sprickor lättast uppträder runt aggregat istället för genom dem, samt att lösa uppbrutna aggregat ibland gör mönstret otydligt.

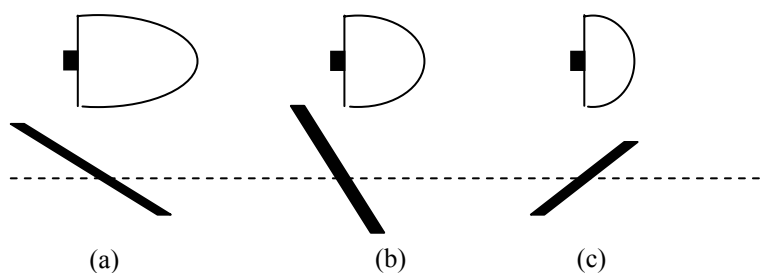


Fig. 8. Schematisk bild över hur jorden bryts i form av en halvmåne framför pinnen (Payne & Tanner, 1959). Vid små angreppsvinklar (a) blir formen mer långsträckt än vid större angreppsvinklar (b), (c).

3.4 Angreppsvinkel

Beroende på den angreppsvinkel (se fig. 9) som en pinne har mot markytan kommer jorden att brytas på olika sätt, vilket även påverkar dragkraftbehovet (Davies m.fl., 1993, Payne & Tanner, 1959). Vid små angreppsvinklar (mindre än 45°) kommer jorden att lyftas och partiklar separeras genom sprickbildning (Davies m.fl., 1993). Detta sker genom att pinnen utövar en uppåtriktad kraft på jorden (Koolen & Kupiers, 1983). Pinnar med stora angreppsvinklar (över 90°) har omvänd effekt. Dessa kommer istället att pressa jorden nedåt och effekten blir hög sönderdelning av jordklor (Davies m.fl., 1993). Dragkraftbehovet är högre för trubbiga vinklar än för spetsiga (Payne & Tanner, 1959). En tydlig gräns går redan vid en angreppsvinkel mellan 45° och 50° . Dragkraftbehovet ökar mycket kraftigt för angreppsvinklar över denna gräns. Detta beror både på att mekanismen för hur jorden bryts ändras (Aluko & Sieg, 2000) och att en större angreppsvinkel medför att arean som skjuvas ökar (Payne & Tanner, 1959).

Skjuvningsplanet från pinnens spets nere i marken till halvmånens främre del i ytan är bågformad och avståndet har betydelse för dragkraftbehovet (Payne & Tanner, 1959). Ju större angreppsvinkeln är desto längre blir avståndet och därmed arean som

måste skjuvas av pinnen, vilket innebär ett högre dragkraftbehov.

Dragkraften i förhållande till bredden på den bearbetade halvmånen i ytan kan användas som ett mått på dragkrafteffektiviteten (Payne & Tanner, 1959). Effektiviteten är högre hos pinnar med liten angreppsvinkel (upp till 45°). För angreppsvinklar över 45° ökar dragkraftbehovet per area bearbetad jord kraftigt. Detta innebär att pinnar med större angreppsvinklar kommer att gå tyngre, men utan att den bearbetade bredden i ytan ökar. Resonemanget tar dock inte hänsyn till sönderdelningsgraden. Om målet med bearbetningen är hög sönderdelningsgrad kan effektiviteten vara den omvända. Pinnar med stor angreppsvinkel krossar klor bättre än pinnar med liten angreppsvinkel. Exakt vilken angreppsvinkel som ger det lägsta dragkraftbehovet kan skilja sig mellan olika jordar (McKyes, 1989). Vilken typ av brott som kommer att ske beror på jordens hållfasthet, redskapets egenskaper och med vilken angreppsvinkel som jorden bryts (Koolen & Kupiers, 1983). Skjuvning sker vid större angreppsvinklar än sprickbildning på en viss jord och en övergång mellan typerna kan ske om angreppsvinkeln ökar (Aluko & Sieg, 2000).

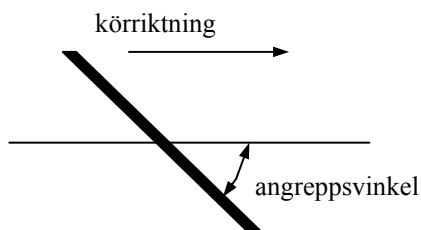


Fig. 9. Angreppsvinkeln är vinkeln mellan pinnens del i marken och markytan.

Sprickbildning sker lättast då jordens hållfasthet är hög, medan skjuvning sker vid lägre hållfasthet. Om jordens hållfasthet ökar kommer även den angreppsvinkel vid vilken övergången mellan sprickbildning och skjuvning sker att öka. Vid hög hållfasthet hos jorden kan därmed sprickbildning ske även vid ganska stora angreppsvinklar. Dragkraftbehovet ökar med ökad angreppsvinkel och är således högre för skjuvningsbrott än för sprickbildning. Detta betyder dock inte att sprickbildning alltid är att föredra, då skjuvningsbrott i regel medför en större sönderdelning hos jorden. Även redskapets yta påverkar till viss del jordens uppbyggnad. Hög friktion mellan jorden och redskapet, t.ex. på grund av en skrovlig yta, gynnar skjuvningsbrott.

Pinnar som i övrigt är olika, men som har samma bredd och angreppsvinkel på spetsen har i regel samma kritiska djup (Godwin & Spoor, 1978). Uppbyggnaden av jord kommer att ske likartat för dessa pinnar då bearbetningsdjupet inte överstiger det kritiska djupet. Om spetsen däremot bearbetar under det kritiska djupet kommer uppbyggnaden av jorden ovanför det kritiska djupet istället vara beroende av bredden och vinkeln på pinnen ovanför spetsen. Bredare pinnar kommer att bearbeta en större jordvolym än smalare genom att uppbyggnaden åt sidorna (V-formen) blir bredare. Det kritiska djupet kommer fortfarande vara lika stort för pinnarna, men den bearbetade tvärsnittsarean blir större för den bredare pinnen.

3.5 Plog

Plogen bryter jorden tvådimensionellt, d.v.s. jorden bryts inte upp på sidorna om plogkroppen, utan den bearbetade bredden är lika med bredden på bladet (Koolen & Kupiers, 1983). Jorden skärs loss vertikalt av skäret, vilket har en mycket liten angreppsvinkel. Tiltan som lossas vänds

120°-150°. Vridningen och böjningen av tiltan medför ofta att denna spricker upp. Hur mycket tiltan faller sönder beror på vändskivans utformning, körhastighet och jordens egenskaper.

Flödet av jord över bladet påverkas av hur jorden bryts upp av spetsen (Koolen & Kupiers, 1983). Om skjuvningsbrott uppstår kommer de skjuvade jordbitarna att glida längs bladet, vilket ofta ökar sönderdelningen genom att de gnids mot varandra. Om jorden bryts genom sprickbildning fortsätter jorden ofta att spricka under vändningen. Den plastiska deformationen består i att tiltan håller ihop under uppbyggnaden och vändningen utan att spricka. Något kritiskt djup diskuteras däremot i regel inte. En viss sönderdelning sker även då tiltan lämnar bladet. Denna bestäms av jordens hållfasthet och av hur mycket tiltan försvagats under uppbyggnaden och vändningen.

Eftersom plogen arbetar med en liten angreppsvinkel sker uppbyggnaden av jord troligen till stor del genom sprickbildningen (Aluko & Sieg, 2000). Detta medför att sönderdelningen kan förväntas vara relativt liten (Davies m.fl., 1993).

3.6 Kultivator

Kultivatoren bearbetar även jorden på sidorna om pinnen, s.k. tredimensionellt och med en större angreppsvinkel än plogen. Uppbyggnaden av jord sker snett uppåt och utåt från pinnen i en halvmåneform framför pinnen (Payne, 1956). Under bearbetningen kan jorden utsättas för både skjuvning och sprickbildning eftersom olika spänningar induceras då jorden rör sig upp och runt pinnen (Aluko & Sieg, 2000). Effektiv bearbetning sker endast då jorden bryts i en V-form ut från pinnen, vilket innebär att bearbetning ovanför kritiskt djup alltid ska eftersträvas (Godwin & Spoor, 1978).

Det kritiska djupet kan ökas genom att sätta vingar på pinnen (Godwin & Spoor, 1978). Dessa bidrar till att bredda den bearbetade jordvolymen på djupet och minskar det specifika dragkraftbehovet. Det specifika dragkraftbehovet minskar även med vingarnas bredd. Ett annat alternativ är att bearbeta jorden i två steg, så att en grundare bearbetning följs av en djupare. Det specifika dragkraftbehovet kan därmed bli lägre än om djup bearbetning sker i ett steg. Om djupgående pinnar med vingar kombineras med grundare pinnar kan pindelningen ökas väsentligt utan att den bearbetade arean minskar.

3.7 Tallriksredskap

Jordens uppbrutning av en tallrik är mycket komplex och har inte undersökts i samma utsträckning som t.ex. pinnens (Godwin m.fl., 1985). Brottet är tredimensionellt, men inte symmetriskt som för en kultivator. Framför den konkava sidan bryts jorden i en halvmåne, som framför en pinne. Halvmånen är störst då tallriks skärvinkel är 90° och minst då vinkeln är 0° , se fig. 10. På baksidan av tallriken bildas en skåra i marken där den konvexa sidan har kontakt med jorden. Denna kontaktyta är störst då skärvinkeln är noll och minskar allteftersom skärvinkeln ökar. Effekten försvinner vid en viss kritisk skärvinkel då istället jorden släpper bakom tallriken. Den kritiska skärvinkeln bestäms av tallriks kurvatur, samt av arbetsdjupet. Vid ett stort arbetsdjup kommer den kritiska skärvinkeln att vara större än vid ett

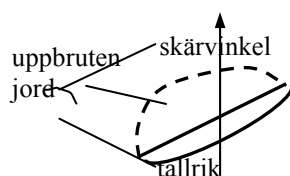


Fig. 10. Skärvinkeln hos en tallrik (Godwin m.fl., 1985).

mindre arbetsdjup.

Vid bearbetning kommer varje tallrik att lämna en fära i bearbetningsbotten samt mer eller mindre tydliga åsar mellan dessa (Klenin m.fl., 1985). Detta kommer att påverkas av tallriksdiametern, avståndet mellan tallrikarna och skärvinkeln. Vid en ökad skärvinkel kommer höjden på åsarna att minska.

För skärvinklar mindre än den kritiska skärvinkeln kommer en vertikal kraft att verka uppåt på tallriken, medan den vertikala kraften är noll för större skärvinklar (Godwin m.fl., 1985, Klenin m.fl., 1985). Detta gör att penetrationskraften minskar vid små angreppsvinklar, vilket påverkar bearbetningsdjupet. Även hastigheten kan inverka på bearbetningsdjupet så att detta minskar vid en ökad hastighet (Klenin m.fl., 1985). Penetrationsförmågan hos en tallrik ökar om denna lutar något från det vertikala planet (Klenin m.fl., 1985, Hettiaratchi & Alam, 1997). Vinkeln mellan vertikallplanet och tallriken kallas för tiltvinkel.

Angreppsvinkeln hos en tallrik påverkas av arbetsdjup, skärvinkel, tiltvinkel, samt av tallriks kurvatur och är därför svår att bestämma exakt. Där angreppsvinkeln behövs i olika beräkningsmodeller används i regel en approximation (Godwin m.fl., 1985, Hettiaratchi, 1997)

Det totala dragkraftbehovet minskar med minskande skärvinkel, men det specifika dragkraftbehovet är högst vid små skärvinklar då lite jord bearbetas (Godwin m.fl., 1985). Det lägsta specifika dragkraftbehovet uppträder vid en viss skärvinkel för att sedan åter öka svagt med ökande skärvinkel.

4. Hastighet och bearbetningsdjup

4.1 Hastighetens inverkan på dragkraftbehovet

I ett försök uppmätte Payne (1956) en genomsnittlig ökning av det totala dragkraftbehovet mellan 20 och 30 procent då hastigheten ökades från 0,8 till 9,7 km/h. Dragkraftökningen beräknades i försöket som ett medelvärde från flera överfarter med olika redskap där målet var att skapa en fin såbädd. Det är rimligt att anta att dragkraftökningen blivit högre om endast primärbearbetning hade beaktats. I en omfattande studie där resultat från flera hundra försök med plöjning har sammanställts framgår att ökningen av det totala dragkraftbehovet var 25 procent när hastigheten ökade från 3,2 till 6,4 km h⁻¹ och 50 procent mellan 4,8 och 9,6 km h⁻¹ (Davies m.fl., 1993).

Största förklaringen till att dragkraftbehovet ökar med ökad hastighet ligger i att jordens hållfasthet ökar med ökad deformationshastighet (Flenniken, m.fl., 1977). Hur mycket hållfastheten ökar med deformationshastigheten skiljer sig mellan olika jordar. Vissa jordar har en väldigt kraftig ökning i hållfasthet med ökad deformationshastighet, medan andra jordars hållfasthet endast påverkas svagt. Hur jorden reagerar på deformationshastigheten beror på lerhalt, densitet och struktur hos jorden. Hållfastheten hos jorden ökar med ökad densitet.

Deformationshastigheten påverkar även vilken typ av deformation som sker (Flenniken m.fl., 1977). Då deformationshastigheten ökar blir skjuvningsplanen otydliga, sönderdelningen ökar och jorden flödar istället mer kontinuerligt. Detta skiljer sig mellan jordar med olika egenskaper och vissa jordar faller sönder även vid låga

deformationshastigheter. Liknande resultat rapporteras även från Stafford (1979) som upptäckte att deformationen ändades från tydliga skjuvningsplan till ett mer kontinuerligt flöde av material då hastigheten ökade.

4.2 Arbetsdjupets inverkan på dragkraftbehovet

Det specifika dragkraftbehovet ökar vanligen med bearbetningsdjupet (Payne, 1956, Gill & Vanden Berg, 1967). En av förklaringarna till detta anses vara att trycket från den ovanliggande jorden ökar med arbetsdjupet (Payne, 1956). Det ökade trycket ökar jordens hållfasthet, vilket medför ett högre specifikt dragkraftbehov.

Payne (1956) visade att kohesionen hos en jord ökade med djupet och specifika dragkraftbehovet för olika bearbetningsdjup följde denna kohesionsökning mycket tydligt. Hur stor denna ökning var berodde på jordtyp och vilka förhållanden som rådde. För en lerjord ökade specifika dragkraftbehovet kraftigt med djupet, medan ökningen var mindre för en lättare sandjord.

Vid ett ökat bearbetningsdjup ökar även arean som skjuvas genom att avståndet från pinnens spets till den bearbetade jordens främre del i ytan ökar (Payne 1956). Då en större area skjuvas krävs ett högre dragkraftbehov.

Bredden på den bearbetade arean från en pinne ökar inte proportionellt med bearbetningsdjupet (Davies m.fl., 1993). Det specifika dragkraftbehovet för en pinne kommer därför att öka mycket kraftigt med djupet.

5. Bearbetningens syfte

5.1 Aggregatstorlekar/ Sönderdelning

När jordens hållfasthet är låg kan ofta olika bearbetningar skapa ungefär samma resultat (Gill & Vanden Berg, 1967). När däremot jordens hållfasthet är hög blir skillnaderna ofta mycket stora mellan olika bearbetningar. Ett sätt att mäta graden av sönderdelning är att mäta storleken på de jordklumpar som bryts upp. Om andelen små aggregat är stor har den tillförda energin kommit till nytta och förlusterna har varit förhållandevis små (Gill & McCreery, 1960).

Vid plöjning av torra lerjordar bildas ofta stora kokor (Hadas & Wolf, 1987). Under sådana förhållanden kan plogen förlora sin skjuvande förmåga och uppbyggnaden sker nästan uteslutande genom sprickbildning. Även den skärande förmågan försämras, vilket leder till att storleken på aggregaten som bryts upp inte begränsas i djupled i samma utsträckning. Plöjning av samma jord vid två olika vattenhalter gav vid fuktiga förhållanden en tredjedel så stora aggregat jämfört med torra förhållanden.

5.1.1 Olika breda blad

Bearbetningsresultatet kan även påverkas av bredden på bladet som går genom marken (Gill & McCreery, 1960, Gill & Vanden Berg, 1969). En jämförelse av bearbetningsresultatet gjordes mellan olika breda plogkroppar under torra förhållanden på en jord där hållfastheten var hög (Gill & McCreery, 1960). Under sådana förhållanden tenderar ett brett blad att bilda större kokor än ett smalare blad. Samtidigt är det specifika dragkraftbehovet ofta lägre för ett brett blad, vilket kan ses som en fördel. Om målet med bearbetningen är ett fint bruk kan dock ett smalt blad få en högre effektivitet per tillförd energi än ett bredare blad, även om det specifika

dragkraftbehovet är högre för det smala bladet.

5.1.2 Hastighet

Vid plöjning bildas generellt mer intakta tiltor vid låg körhastighet och en jämnare yta med mer sönderslagna tiltor vid högre hastigheter (Davies et. al, 1993). En ökad hastighet anses öka sönderdelningsgraden samtidigt som det specifika dragkraftbehovet ökar.

I sitt försök med en pinne som gick genom en jord fann Payne (1956) inga större skillnader i bearbetningsresultatet vid olika hastigheter. Jorden närmast pinnen verkade dock vara mer uppbruten vid högre hastigheter.

I vissa fall anses det finnas en optimal hastighet där bearbetningsresultatet blir som bäst. För ett tallriksredskap kan ett optimalt resultat innebära att en hög andel stubb och ogräs blivit avskurna (Klenin m.fl., 1985). Andelen avskurna växtrester blev i en undersökning högst vid en optimal hastighet runt 8 km/h. Liknande resonemang kan även föras för skärvinkeln som i samma undersökning gav ett optimalt resultat runt 35°.

6. Material och metoder

6.1 Försöksplatser

Under hösten 2001 startades ett projekt för att studera energiåtgång och dragkraft-behov för olika redskap. Mätningarna fortsatte under hösten 2002 och skedde på en lättare respektive en styvare jord i Uppsala vid totalt tre olika tillfällen. Mätplatserna på den styvare jorden var alla på samma fält, men skiljde sig något åt mellan 2001 och 2002. Den styvare jorden kallas i fortsättningen för Ån. På den lättare jorden gjordes mätningarna på tre olika platser, i fortsättningen kallade Säby. Tidpunkten för de olika mättillfällena valdes så att jämförelser kunde göras mellan blöta, torra och fuktiga fältförhållanden. För de olika platserna bestämdes kornstorleksfördelningen och plasticitetsgränsen. Vattenhalter och plasticitetsgränser presenteras tillammans

med datum för mätningarna i tabell 1. Eftersom mätplatserna skiljde sig åt mellan mättillfällena för den lättare jorden blir resultaten inte alltid jämförbara och förklarar varför vattenhalten var lägst för de blöta förhållandena på lättjorden. Kornstorleksfördelningen visas i tabell 2.

6.2 Försöksled

Redskapen som jämfördes var plog, kultivator och tallriksredskap och de olika försöksleden visas i tabell 3. Några av leden fanns inte med vid alla mättillfällen, vilket framgår av tabellen. För alla led 2001 och för led B och E 2002 jämfördes tre olika hastigheter:

- 1 = 4 km h⁻¹
- 2 = 6 km h⁻¹
- 3 = 9 km h⁻¹

Tabell 1. Tidpunkter för mätningar samt fältförhållanden

Tillfälle	Plats	Fältförhållanden	Vattenhalt	Plasticitetsgräns
2001-09-14	Ån	blött	0.29 g g ⁻¹	-
2002-10-22	Ån	fuktigt	0.22 g g ⁻¹	0,219 g g ⁻¹
2002-08-22	Ån	torrt	0.16 g g ⁻¹	0,219g g ⁻¹
2001-09-14	Säby	blött	0.18 g g ⁻¹	-
2002-10-30	Säby	fuktigt	0.28 g g ⁻¹	0,266 g g ⁻¹
2002-08-15	Säby	torrt	0.22 g g ⁻¹	0,269 g g ⁻¹

Tabell 2. Kornstorleksfördelning (g 100 g⁻¹)

	Jordart	Ler	Fmj*	Gmj*	Fmo*	Gmo*	Ms*	Gs*	Mull
Ån blött	mfSL	41.7	13.4	11.6	8.9	14.5	4.8	0.7	1.5
Ån torrt, fuktigt	mfML	29.45	10.1	10.05	10.5	26.2	8.3	1.15	1.8
Säby blött	mflSa	13.5	4.5	4	5.6	28.1	40.3	1.6	1.2
Säby torrt	mmhLL	19.7	6.1	9.5	30.4	27.7	0.4	0.2	4.1
Säby fuktigt	mmhLL	23.3	6.8	10.6	32.9	20.1	0.5	0.3	3.4

*Fmj=finmjåla, Gmj=grovvmjåla, Fmo=finmo, Gmo=grovmo, Ms=Mellansand, Gs=grovsand.

Tabell 3. Försöksled

Led	Bearbetning	Tillfälle
A	Plog 13cm	Alla
B	Plog 17 cm	Alla
C	Plog 21 cm	Alla
D	Kultivator 13 cm	Alla
E	Kultivator 17 cm	Alla
Ed	Kultivator 17 cm en andra gång diagonalt	Ån 2002-08-22, 2002-10-22 och Säby 2002-10-30
F	Kultivator 21 cm	Alla
G	Tallriksredskap	Alla
H	Kultivator med gåsfötter 13 cm	Ån 2002-10-22 och Säby 2002-10-30
I	Kultivator 9 cm	Ån 2002-10-22 och Säby 2002-10-30

6.3 Mätning och beräkning av effektbehov

6.3.1 Mättraktor

Traktorn som användes vid mätningarna var en Valmet 6600 på 100 hk. Denna hade en mätutrustning som utvecklats av JTI, vilken kontinuerligt registrerade bränsleförbrukning och motorvarvtal i en logger. Traktorn hade provbelastats i en bromsbänk samtidigt som morvarvtal och bränsleförbrukning mättes kontinuerligt. Utifrån dessa mätningar och med hjälp av multipel linjär regressionsanalys togs en formel fram där en effekt motsvarande kraftuttagseffekten kunde räknas fram utifrån de registrerade värdena. Pto-effekten antogs vara likvärdig med hjuleffekten. Under körning skedde även registrering av hjulhastighet och radarmätt verklig hastighet och slirningen kunde räknas fram enligt formeln:

$$S(\%) = \frac{(V_H - V_R)}{V_H} * 100$$

Där: S =slirning
 V_H =hjulhastighet
 V_R =radarhastighet

För att variationerna skulle bli så små som möjligt kördes alla dragen med full

gas. Växelvalet anpassades efter önskad hastighet.

7.3.2 Slirning och rullningsmotstånd

Genom att ta hänsyn till effektförluster på grund av slirning (P_{slirn}) och rullningsmotstånd (P_{rull}) räknades den nyttiga ”dragkrokseffekten” ut. Pto-effekten minskades med slirningen i procent enligt Saleque (1990):

$$P_{slirn} = P \left(\frac{S}{100} \right)$$

Effektförlusten på grund av rullningsmotståndet räknades ut enligt följande formel:

$$P_{rull} = f * G * V_H \quad (\text{Saleque, 1990})$$

Där: f =koefficient för rullningsmotstånd
 G =traktorns tyngd
 V_H =hjulhastigheten

För att räkna ut f användes effektuttaget från transportkörningar på fältet då redskapet var upplyft och slirningen minimal. Under dessa körningar motsvarade effektuttaget effektförlusten på grund av rullningsmotståndet. Effektuttaget plottades mot hastigheten vid flera olika

hastigheter och räta linjer anpassades till punkterna. Eftersom underlaget skiljde sig mellan platserna och mellan mättillfällena gjordes flera kurvor. Koefficienten för rullningsmotståndet kunde bestämmas ur linjernas ekvationer:

Linjernas ekvation : $P_{rull} = k * V_H$, där k = linjens lutning

Vilket ger: $f = \frac{k}{G}$

6.4 Beräkning av dragkraftbehov

6.4.1 Verkligt bearbetningsdjup

Före bearbetningen togs cylindrar ut i rutorna för bestämning av den blöta skrymdensiteten. Efter bearbetning slogs en stålram med ytan 0,25 m² ner, där all lös bearbetad jord ned till bearbetningsbotten togs bort och vägdes. Det verkliga bearbetningsdjupet kunde därmed bestämmas rutvis oavsett hur ojämn bearbetningsbotten var och en rättvis jämförelse mellan redskapen kunde göras. I varje ruta gjordes två mätningar med stålramen. Ett medelvärde av bearbetningsdjupet beräknades därefter för varje led för att minska variationen från olika mätningar.

Utifrån det verkliga bearbetningsdjupet och tillsammans med effektmätningarna kunde energibehovet per kg bearbetad jord, samt det specifika dragkraftbehovet räknas ut. Det senare definieras som kraften per bearbetad tvärsnittsarea. Skillnaden i bearbetningsdjup mellan den första och den andra överfarten med kultivatoren beräknades och endast det extradjup som diagonalkörningen bidrog till användes för dragkraftberäkningarna.

6.5 Bearbetningsresultat

6.5.1 Sönderdelningsgrad

Från varje ruta togs en hink med lös jord från den bearbetade jordvolymen. Jordan från hinkarna sållades för att få ett mått på sönderdelningsgraden. Fraktionerna som

sållades fram var >64 mm, 32-64 mm, 16-32 mm, 8-16 mm, 4-8 mm och <4 mm. Senare användes fraktionerna >32 mm som jämförelse mellan leden.

6.5.2 Energibehov för sönderdelning

Utifrån sållningsdata kunde ytan (A_i) för varje sållningsfraktion räknas fram enligt formeln nedan (Hadas & Wolf, 1983, Hadas & Wolf, 1987). Den totala ytan för den bearbetade jorden (A) erhöles genom summering av fraktionernas ytor. En stor andel små aggregat ger en stor yta och står därmed för en hög sönderdelningsgrad. Den totala ytan dividerades därefter med den totala vikten på jordprovet. Sönderdelningsenergin (E_f), (J m⁻²) beräknades genom att den tillförda energin per kilo jord (E_m), (J kg⁻¹) dividerades med den totala ytan för den bearbetade jorden (m²). Energibehovet för en viss sönderdelning (J m⁻²) erhöles därmed.

Ytan för varje sållningsfraktion

$$A_i = \frac{6W_i}{\rho(\phi_i * \phi_{i+1})^{\frac{1}{2}}}; \quad A = \sum_{i=1}^n A_i$$

Sönderdelningsenergin

$$E_f = \frac{E_m * \sum W_i}{A}$$

där ρ är skrymdensiteten hos jorden, W_i är massan hos den sållade fraktionen mellan sållen med storleken ϕ_i och ϕ_{i+1} . För den största och den minsta fraktionen sattes övre och undre gränsdiameter till 200 mm respektive 2 mm.

På samma sätt som för bearbetningsdjupet beräknades ett medelvärde av den specifika ytan för varje led. Antagandet gjordes därmed att variationerna mellan blocken för ett visst led och mättillfälle var små.

6.6 Mätning av jordens hållfasthet

6.6.1 Kohesionsmätningar

För varje mättillfälle gjordes mätningar av jordens skjuvhållfasthet med hjälp av ett så kallat vingborr (Koolen & Kupiers, 1983, Dexter & Arvidsson, 2002.). Detta bestod av en metallstav med fyra vingar i botten som slogs ner i marken. Då denna vreds skjuvades en jordcylinder och motståndet för detta mättes. Cylindern hade radien 0,025 m och höjden 0,100 m. Överst satt ett handtag med en skala där vridmomentet (T) kunde läsas av. Skjuvhållfastheten (τ_f) beräknades därefter med formeln:

$$\tau_f = \frac{T}{2\pi r_v^2 \left(\frac{2}{3} r_v + h \right)} \quad (\text{Dexter \& Arvidsson, 2002})$$

Arvidsson, 2002)

där r_v = radien på cylindern som skjuvas
 h = höjden på cylindern

Skjuvhållfastheten ökar linjärt med ökad normalspänning enligt följande ekvation känd som Mohr-Coulombs lag (Dexter & Arvidsson, 2002, Koolen & Kupiers, 1983):

$$\tau_f = C + \sigma_n \tan \phi$$

där C är kohesionen, σ_n är normalspänningen och ϕ är den interna friktionsvinkeln.

Då normalspänningen antogs vara försumbar kunde värdet på skjuvhållfastheten användas som ett mått på kohesionen. Mätningar gjordes i jordskiktet 5 – 15 cm och 8 – 10 mätningar gjordes per plats och tillfälle. Medelvärdet för varje mättillfälle beräknades för att undersöka hur specifika dragkraftbehovet varierade med detta.

6.6.2 Penetrationsmotstånd

För att undersöka hur markens penetrationsmotstånd inverkar på

specifika dragkraftbehovet användes en penetrometer (06.15 Penetrologger, Eijelkamp Agrisearch Equipment 2000). Denna bestod av en konisk metallspets med tvärsnittsarean 1 cm² som var fäst på en rund metallstav med något mindre diameter än spetsen, samt en logger. Spetsen trycktes ner i marken till 30–40 cm djup. Kraften som krävdes för detta registrerades i loggern för varje cm. Penetrationsmotståndet (Q_{pr}) för varje cm beräknades enligt:

$$Q_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_{pr}}$$

där F_{pr} är kraften och A_{pr} är metallspetsens tvärsnittsarea (Bengough & Mullins, 1990). Ett medelvärde beräknades för skiktet 5 – 15 cm utifrån 10 stick med penetrometern.

6.7 Extra körningar

För att få så många mätvärden som möjligt gjordes några extra körningar med plog till ca 20 cm utöver de ordinarie dragkraftmätningarna. Dessa skedde vid varje ordinarie mättillfälle 2002 samt vid ytterligare ett tillfälle senare på hösten. Extramätningarna gjordes förutom på de ordinarie försöksplatserna i ett intilliggande försök till Ån, kallat 4111. Tillsammans med dessa mätningar gjordes även mätningar av kohesion, penetrationsmotstånd och vattenhalt.

6.8 Drop-shatter test

På laboratorium gjordes ett s.k. drop-shatter test (Gill & McCreery, 1960, Hadas & Wolf, 1983) för att undersöka hur sönderdelningsgraden påverkas av jordens vattenhalt. Testet gjordes för den styvare jorden och på två platser i fält, kallade "Norr" och "Syd". Enligt kornstorleksfördelningen fanns en lerhaltsgradient i fält så att Syd hade högre lerhalt än Norr. På varje plats togs 14 st jordkuber ut från orörd jord i jordskiktet 5-

15 cm. Även prov för vattenhaltsbestämning togs ut. Jordproven delades i två halvor så att totalt 28 prov per plats erhöles. Jorden fick sedan torka i rumstemperatur till olika vattenhalter. Några av jordklumparna sprayades med vatten för att uppnå en högre vattenhalt. För att vattenhalten skulle jämnas ut i hela jordklumpen plastades jorden in och placerades i ett kylrum i ca 7 veckor. Sammantaget iordningställdes jord med sju olika vattenhalter och fyra prov per vattenhalt.

Drop-shattermetoden innebär att sönderdela jorden genom att tillföra en bestämd mängd energi enligt ekvationen (Hadas & Wolf, 1987):

$$E^* = mghn$$

Där E^* är den kumulativa energin (J) som tillförts till en jord med massan m (kg) som släppts från höjden h , n antal gånger. Den specifika energin E ges av $E = E^* / m$ ($J \text{ kg}^{-1}$). Det antas att nästan all kumulativ energi går åt till att spräcka jorden och att förlusterna i form av värme eller på grund av att jorden studsar är försumbara. Testet har tidigare främst använts på hårda jordkotor och inte för att jämföra olika vattenhalter. Ursprungligen är testet framtaget för att testa hållfastheten hos kol (Gill & McCreery, 1960). Drop-shattermetoden mäter inte totalenergin som krävs för att sönderdela jorden i fält, eftersom krafterna och spänningarna som appliceras skiljer sig från dem som orsakas av jordbearbetningsåtgärder (Hadas & Wolf, 1983).

I försöket tillfördes en energimängd på ca 60 J kg^{-1} genom att släppa jorden 3 gånger från 2 meters höjd. För att underlätta hanteringen placerades jordklumparna i stora plastpåsar innan de släpptes från höjden. Påsarna ansågs tillräckligt stora för att inte störa jordens sönderdelning i kollisionen mot golvet. Därefter sållades jorden så att en

jämförelse kunde göras av sönderdelningsgraden. Fraktionerna som sållades fram var: $>32 \text{ mm}$, $16\text{-}32 \text{ mm}$ och $<16 \text{ mm}$

7. Resultat

7.1 Inställt och verkligt bearbetningsdjup

Fastän det inställda bearbetningsdjupet var detsamma för både plogen och kultivatoren var det stor skillnad mellan redskapen vad det gäller det verkliga bearbetningsdjupet. Plogen gick i stort sett ner till det inställda djupet under alla förutsättningar. För kultivatoren var det verkliga djupet alltid lägre än det inställda, och ökade heller inte i samma utsträckning som det inställda, se tabell 4. För kultivatoren var det verkliga bearbetningsdjupet som högst under blöta förhållanden vid Säby och som lägst under torra förhållanden vid Ån. Gåsfötterna bidrog inte till att öka det verkliga bearbetningsdjupet. Där kultivatoren även kördes på diagonalen ökade det verkliga bearbetningsdjupet med några cm.

7.2 Specifikt dragkraftbehov

Specifika dragkraftsbehovet blev lägre för de plöjda leden än för de kultiverade, medan värdena för tallriksredskapet låg någonstans emellan, ibland i storleksordning med plogens och ibland i storleksordning med kultivatorns, se tabell 5 och fig. 11.

Bearbetningsdjupets inverkan på det specifika dragkraftsbehovet var inte lika tydligt. För plogen har bearbetningsdjupet inte inverkat mycket på det specifika dragkraftsbehovet. Det är bara för "Ån blött" som skillnaderna är signifikanta, se tabell 5. Detta innebär att det totala dragkraftsbehovet (per meter arbetsbredd) kom att öka linjärt med bearbetningsdjupet. För kultivatoren finns det signifikanta skillnader mellan olika bearbetningsdjup och det specifika dragkraftsbehovet ökade i regel med ökat bearbetningsdjup, tabell 5.

Tabell 4. Inställt och verkligt bearbetningsdjup (cm) för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt

		Ån (styv jord)			Säby (lätt jord)		
Redskap och inställt djup		blött	fuktigt	torrt	blött	fuktigt	torrt
Plog	13	13.0	11.6	13.2	12.9	13.8	12.5
	17	18.8	18.2	17.8	18.3	18.0	15.9
	21	21.7	22.6	20.7	22.2	21.3	17.9
Kultivator	9		4.4			4.9	
	13	9.9	5.9	4.2	8.9	7.4	6.1
	17	10.8	7.0	4.8	15.4	7.7	6.7
	21	9.9	7.9	4.3	17.1	8.9	9.3
<i>diagonal*</i>	17		2.2	2.0		1.4	
<i>gåsfötter</i>	13		6.6			7.0	
Tallrik	-	9.8	6.0	2.0	7.4	7.0	5.6

* Siffran anger med hur många cm bearbetningsdjupet ökade efter en andra överfart på diagonalen, det totala bearbetningsdjupet är summan av kultivator till 17 cm och diagonal.

Gåsfötterna hade ingen signifikant inverkan på det specifika dragkraftbehovet, men tenderade att ge något lägre värden än körning utan gåsfötter, tabell 4. Det

specifika dragkraftbehovet för en andra körning med kultivatorn på diagonalen var i samtliga fall signifikant högre än för de övriga bearbetningarna. Den grunda

Tabell 5. Specifikt dragkraftsbehov (kN/m^2)

		Ån (styv jord)			Säby (lätt jord)		
Redskap	Djup	blött	fuktigt	torrt	blött*	fuktigt	torrt
Plog	13	84.4c	89.0c	160.8ef	44.3	62.0b	61.2d
	17	70.9d	76.3c	160.4ef	47.7	63.8b	66.0d
	21	83.5c	81.8c	138.8f	59.3	74.0b	65.9d
Kultivator	9		143.3b			72.0b	
	13	99.2b	154.3b	253.4cd	50.2	93.4b	102.3b
	17	105.9b	149.7b	291.6c	54.0	103.4b	122.2a
	21	123.0a	150.8b	398.8b	59.2	95.4b	125.8a
<i>diagonal</i>	17		331.0a	560.4a		508.3a	
<i>gåsfötter</i>	13		138.5b			64.6b	
Tallrik		70.3d	87.8c	214.2de	52.8	74.2b	78.2c
Sign		***	***	***	***	***	***

* Endast ett block representativt för lätt jord, ingen statistisk analys utförd

bearbetningen med kultivatoren till 9 cm krävde lägre specifikt dragkraftbehov än de djupare bearbetningarna, men skillnaden var inte signifikant.

Det verkar som om skillnaderna mellan olika bearbetningar blivit större under torra förhållanden än under blöta eller fuktiga. Det högsta specifika dragkraftbehovet erhöles under torra förhållanden för i stort sett samtliga bearbetningar. De lägsta värdena uppmättes under blöta

förhållanden. Det specifika dragkraftbehovet var dessutom alltid högre vid Ån än för Säby.

En sammanställning av resultaten visas i fig. 11. Staplarna visar specifika dragkraftbehovet för plöjning och kultivering till 17 cm, samt tallriksredskap vid de olika bearbetningstillfällena. Specifika dragkraftbehovet ökade med sjunkande vattenhalt och blev särskilt högt under torra förhållanden vid Ån.

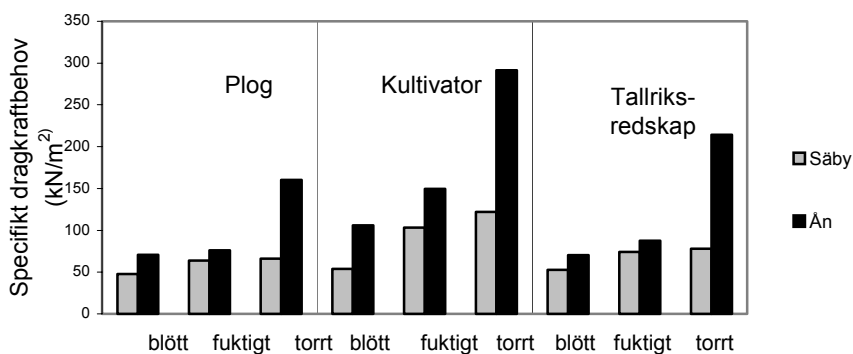


Fig. 11. Specifikt dragkraftbehov för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt (hastighet 6 km/h, inställt bearbetningsdjup 17 cm för plog och kultivator).

7.3 Totalt dragkraftbehov

Det totala dragkraftsbehovet (per meter arbetsbredd) tar inte hänsyn till bearbetningsdjupet och ger därför en annan bild än det specifika dragkraftbehovet. De plöjda leden hade signifikant högst totalt dragkraftbehov och detta ökade med bearbetningsdjupet, se tabell 6. Kultivatoren hade ett lägre totalt dragkraftbehov än plogen då det effektiva bearbetningsdjupet inte beaktas. Även det totala dragkraftbehovet ökade med inställt bearbetningsdjup trots att det verkliga bearbetningsdjupet endast ökade svagt för kultivatoren. Gåsfötter på kultivatoren

minskade det totala dragkraftbehovet, men skillnaden var inte signifikant. Det lägsta totala dragkraftbehovet hade tallriksredskapet som även bearbetade minst jord.

7.4 Slirning

Slirningen blev lägst i de plöjda leden och högst i de kultiverade leden vid samtliga tillfällen, se tabell 7. Slirningen blev högre då bearbetningsdjupet ökade. Vid Ån var slirningen som högst under torra förhållanden. På den lättare jorden var slirningen i regel högst under fuktiga förhållanden.

Tabell 6. Totalt dragkraftbehov (kN/m) för olika redskap på styv resp. lätt jord vid olika vattenhalt

		Ån (styv jord)			Säby (lätt jord)		
Redskap och inställt djup		blött	fuktigt	torrt	blött*	fuktigt	torrt
Plog	13	11.0d	10.4cd	21.2b	5.7	8.6c	7.7c
	17	13.3b	13.9b	28.5a	8.7	11.5b	10.5b
	21	18.1a	18.5a	28.7a	13.1	15.8a	11.8a
Kultivator	9		6.3f			3.6f	
	13	9.8e	9.1de	10.6d	4.5	6.9d	6.2d
	17	11.4cd	10.6cd	14.0cd	8.3	8.0cd	8.2c
	21	12.2c	11.9bc	17.0bc	10.1	8.5c	11.6ab
<i>diagonal gåsfötter</i>	17		7.5ef	11.2d		7.2cd	
	13		9.2de			4.5ef	
Tallrik		6.9f	5.3f	4.2e	3.9	5.2e	4.4e
Sign		***	***	***		***	***

* Endast ett block representativt för lätt jord, ingen statistisk analys utförd

Tabell 7. Slirning (%) för olika redskap på styv resp. lätt jord vid olika vattenhalt

		Ån (styv jord)			Säby (lätt jord)		
Redskap och inställt djup		blött	fuktigt	torrt	blött*	fuktigt	torrt
Plog	13	4.1e	3.2e	7.7c	2.1	3.6f	1.9d
	17	4.6e	5.3de	11.3b	2.4	5.0de	3.2c
	21	7.2d	7.0cd	12.1b	5.7	7.2bc	3.6bc
Kultivator	9		5.4de			4.7ef	
	13	10.6b	8.4c	10.2bc	3.4	6.8bc	3.1c
	17	12.4a	12.0b	20.7a	6.1	9.3a	4.5b
	21	13.2a	16.1a	24.0a	7.8	9.5a	12.8a
<i>diagonal gåsfötter</i>	17		5.4de	13.0b		6.2cd	
	17		7.7cd			7.9b	
Tallrik		8.8c	6.5cd	2.9d	3.0	7.2bc	3.3c
Sign		***	***	***		***	***

* Endast ett block representativt för lätt jord, ingen statistisk analys utförd

7.5 Hastighetens inverkan på specifika dragkraftbehovet

Generellt ökade det specifika dragkraftbehovet med ökad hastighet. Sambandet var tydligast för plog på Säby, se fig. 12. Signifikanta skillnader erhöles endast för Ån blött och Ån fuktigt, men även

samspelet mellan led och hastighet blev signifikant. Detta innebär att redskapen bör jämföras var för sig eftersom hastigheten hade olika inverkan på specifika dragkraftbehovet för plog och kultivator. Specifika dragkraftbehovet för olika redskap och hastighet visas i figur 12.

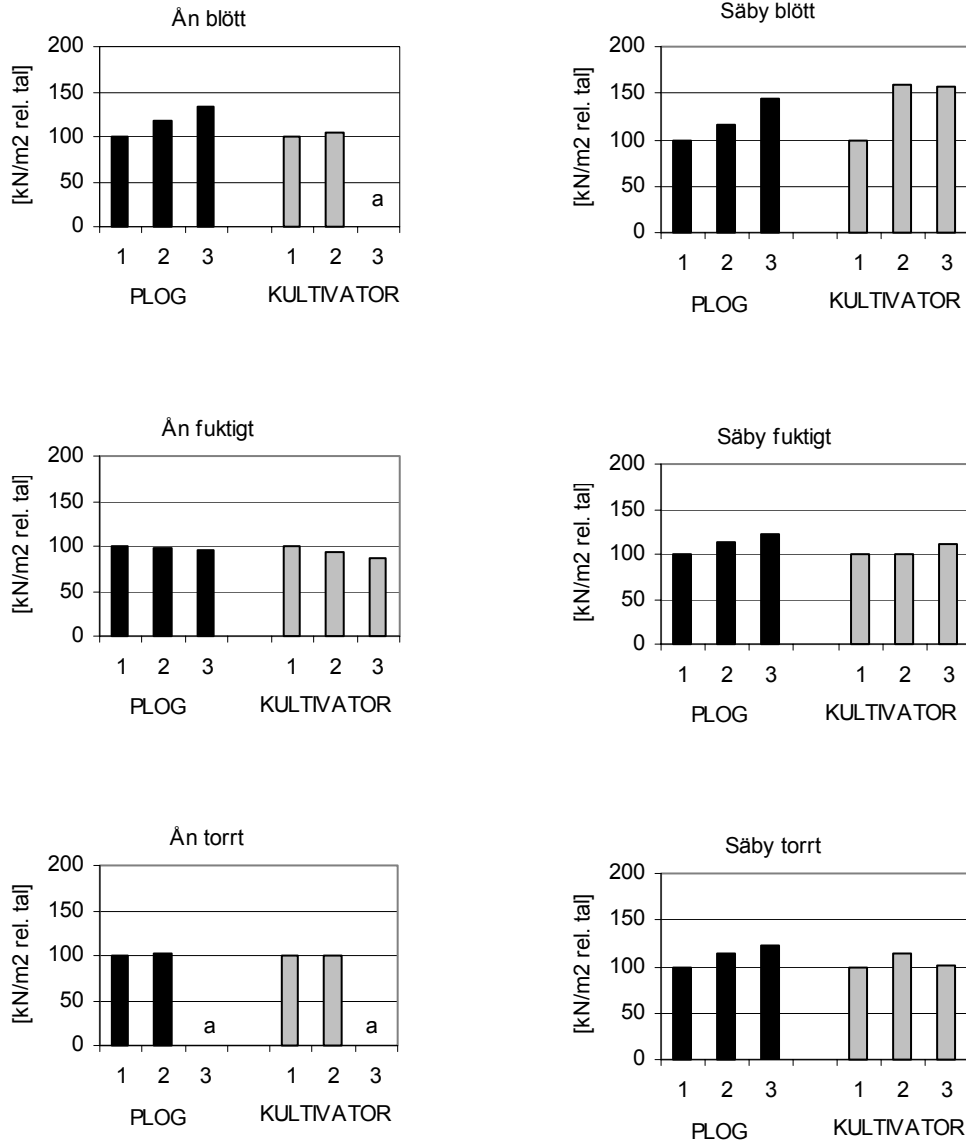


Fig. 12. Hastighetens inverkan på det specifika dragkraftbehovet uttryckt som relativa tal där hastighet 1 är satt till 100 för både plogen och kultivatorn. Siffrorna står för de önskade hastigheterna som var: $4\text{km/h}=1$, $6\text{km/h}=2$ och $9\text{km/h}=3$ Några staplar saknas (a) där hastigheten sjönk kraftigt under hela draget så att en tillförlitlig mätning inte kunde göras.

7.6 Hastighetens inverkan på andelen stora aggregat

Andelen stora aggregat (>32 mm) var lägst vid den högsta hastigheten för både plogen och kultivatoren, se fig. 13. För kultivatoren sjönk andelen stora aggregat med ökande hastighet. För plogen blev andelen stora aggregat däremot högst vid mellanhastigheten 6 km/h. Skillnaderna var inte signifikanta.

7.7 Redskapens, bearbetningsdjupets och vattenhaltens inverkan på andelen stora aggregat

Andelen stora aggregat blev högst i de plöjda leden och lägre för kultivator och tallriksredskap, se fig. 14. Variationen var stor och signifikanta skillnader erhöles

endast för två av tillfällena, Ån torrt och Ån fuktigt. Vid Ån blev andelen stora aggregat högst efter plöjning till 17 cm vid alla tillfällen. Bearbetningsdjupets inverkan på andelen stora aggregat är ganska otydligt och mönstret varierar. För plog vid Ån blev andelen stora aggregat alltid lägst vid den grunda bearbetningen. För kultivatoren finns inget liknande mönster. Försöksplatserna Säby blött och torrt utmärker sig genom att få eller inga stora aggregat bildades vid bearbetningen. Eftersom mätplatserna skiljde sig åt för den lättare jorden blir en jämförelse av bearbetningsresultatet beroende på vattenhalt meningslös. Vid Ån erhöles lägst andel stora aggregat under fuktiga förhållanden för plog och kultivator, se fig. 15. För tallriksredskapet var andelen stora aggregat som lägst vid torra förhållanden.

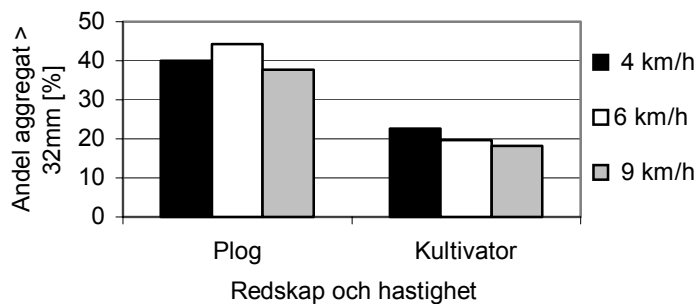


Fig. 13. Andelen aggregat > 32mm vid olika körhastighet för plog och kultivator. Medel från samtliga körningar 2002, bearbetningsdjup 17 cm.

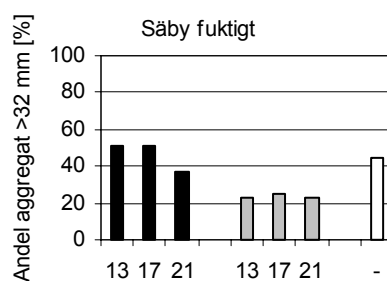
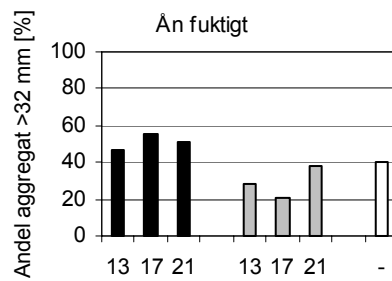
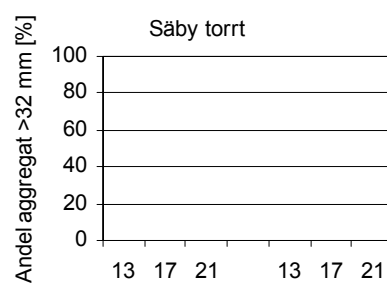
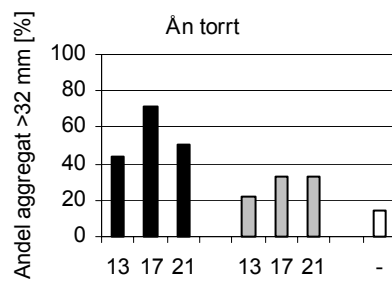
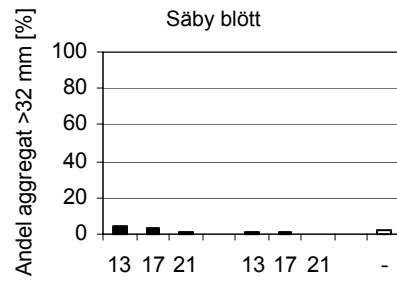
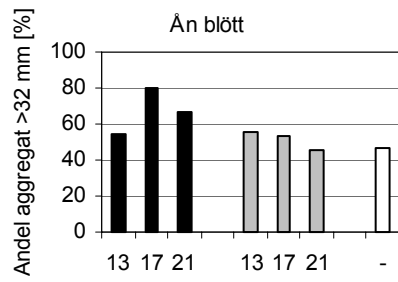


Fig. 14. Andel stora aggregat vid olika jordart, vattenhalt, redskap, samt bearbetningsdjup. Svarta staplar = plog, grå staplar = kultivator och vita staplar = tallriksredskap, siffrorna står för inställt arbetsdjup.

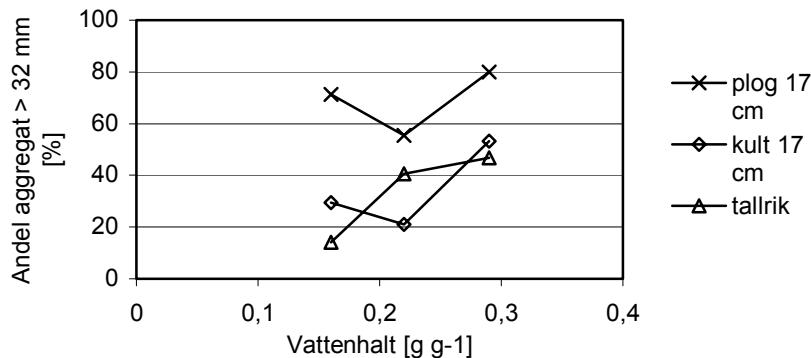


Fig. 15. Andel aggregat > 32 mm vid olika vattenhalt och bearbetning vid mätplats Ån.

7.8 Energibehovet för sönderdelning

Energibehovet för sönderdelning skiljde sig åt mellan redskapen och bearbetningstillfällena. Totalt sett fanns inga signifikanta skillnader mellan plog och kultivator utan de hade i genomsnitt ungefär samma energibehov för sönderdelning. Tallriksredskapet hade den högsta sönderdelningsgraden i förhållande till energiinsatsen, se fig. 16.

För Ån skiljde sig sönderdelningsenergin signifikant åt mellan bearbetningstillfällena och det lägsta energibehovet uppstod under fuktiga förhållanden, se fig. 16. Det fanns ett visst samspel mellan led och vattenhalt och det verkar som om vattenhalten hade

mindre betydelse för sönderdelningsenergin hos tallriksredskapet. På den lättare jorden var mönstret mindre tydligt. Detta kan förklaras av skillnader mellan de tre mätplatserna, vilket inte gör dem riktigt jämförbara.

Energibehovet för sönderdelning var alltid lägre på den lättare jorden än på den styvare jorden, se fig. 16. Den styvare jorden var mer benägen att bilda stora kokor än den lättare jorden. Energiinsatsen för sönderdelning för samtliga led visas i tabell 8. Sällningsdata saknades för hastigheterna 1 och 3, 2001 och skillnaderna i sönderdelningsenergi för olika hastigheter 2002 blev inte signifikanta.

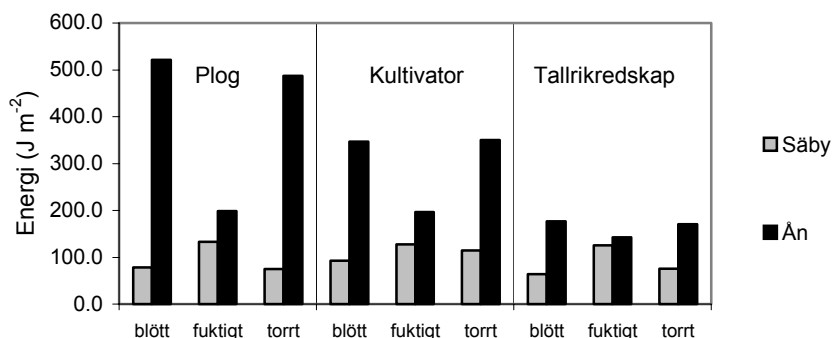


Fig. 16. Energibehovet för sönderdelning för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt. (hastighet 6 km/h, inställt bearbetningsdjup 17 cm för plog och kultivator)

Tabell 8. Energibehov för sönderdelning ($J m^{-2}$)

		Ån (styv jord)			Säby (lätt jord)		
Redskap och inställt djup		blött	fuktigt	torrt	blött*	fuktigt	torrt
Plog	13	259.1	189.1	263.4bc	79.1	131.5	79.4b
	17	521.4	198.6	487.4a	78.5	133.1	75.1b
	21	348.8	192.7	233.7c	65.3	126.6	77.9b
Kultivator	9		238.9			103.0	
	13	258.3	233.2	274.8bc	63.0	116.8	88.8b
	17	346.8	196.3	350.0b	93.1	127.5	114.9a
	21	298.7	249.3	456.3a	75.1	121.6	120.9a
gåsfötter	13		206.7			94.7	
Tallrik		177.0	142.8	176.5c	63.9	125.9	75.5b
Sign		P=0,09	P=0,10	***	n.s.	***	

* Endast ett block representativt för lätt jord, ingen statistisk analys utförd

7.9 Kohesionens inverkan på specifika dragkraftbehovet

Det uppmätta specifika dragkraftbehovet för plöjning till ca 20 cm på olika platser som funktion av kohesionen vid samma tillfälle, visas i fig. 17. En rät linje kunde anpassas till punkterna som fick ett R^2 -värde på 0,63. Sambandet är tydligt, specifika dragkraftbehovet steg med ökad

kohesion och förhållandet gällde oavsett jordart eller vattenhalt.

7.10 Vattenhaltens betydelse för kohesionen

Kohesionen för de olika jordarna som funktion av vattenhalten vid samma tillfälle visas i fig. 18. Samtliga R^2 -värden blev höga.

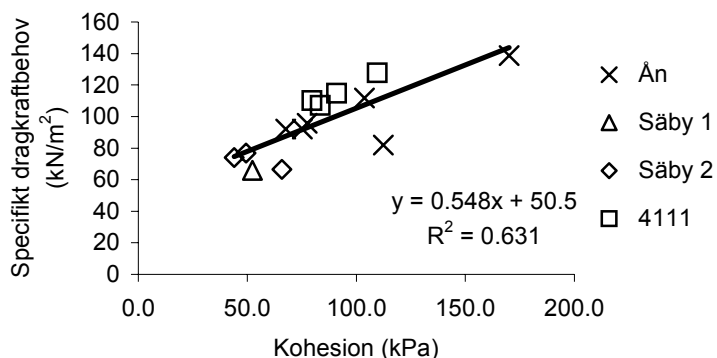


Fig. 17. Specifikt dragkraftbehov vid plöjning som funktion av jordens kohesion.

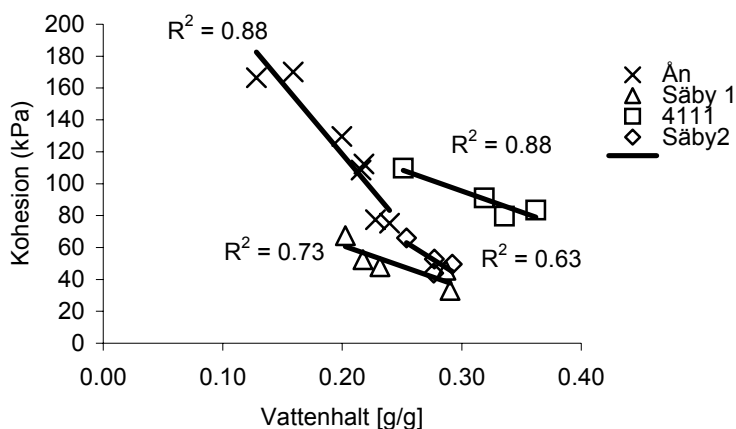


Fig. 18. Kohesion som funktion av jordens vattenhalt för de olika mätplatserna.

Kohesionen sjönk då vattenhalten ökade. För Ån sker detta mycket snabbt inom det aktuella vattenhaltsområdet och linjen får en brant lutning. För Säby 1 och Säby 2 var kohesionen mycket lägre och förändringarna var små inom det uppmätta vattenhaltsområdet. Sambandet mellan kohesion och vattenhalt var platsspecifikt, vilket syns tydligt på hur linjerna ligger på olika nivåer i diagrammet.

7.11 Vattenhaltens inverkan på specifika dragkraftbehovet

Specifika dragkraftbehovet för plöjning till ca 20 cm vid Ån och 4111 som funktion av vattenhalten vid körtillfället visas i fig. 19.

R^2 -värdena blev höga för båda platserna. Specifika dragkraftbehovet minskade då vattenhalten ökade, vilket stämmer överens med hur kohesionen påverkades av vattenhalten.

7.12 Penetrationsmotståndets inverkan på specifika dragkraftbehovet

Specifika dragkraftbehovet för plöjning till ca 20 cm som funktion av penetrationsmotståndet visas i fig. 20. Sambandet blev otydligt med ett lågt R^2 -värde.

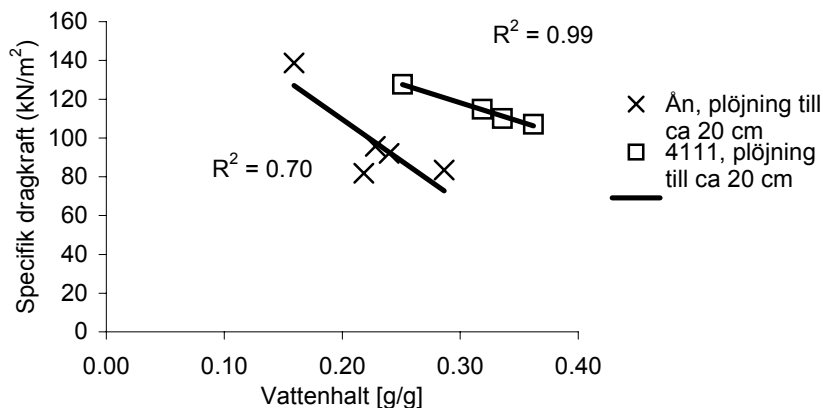


Fig. 19. Specifikt dragkraftbehov vid plöjning som funktion av jordens vattenhalt.

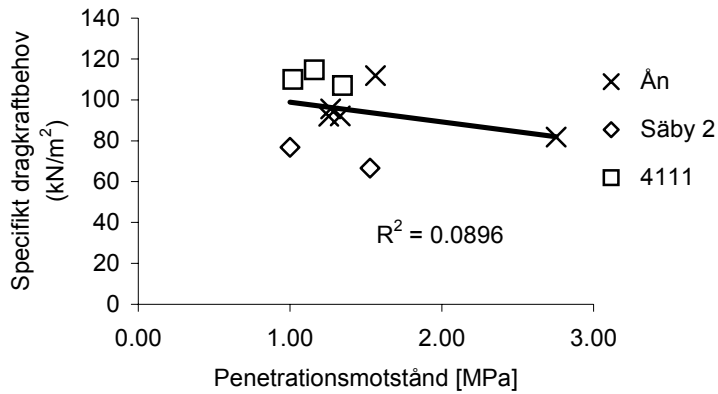


Fig. 20. Specifikt dragkraftbehov vid plöjning som funktion av jordens penetrationsmotstånd.

7.13 Drop-shattertest

Resultatet från drop-shattertestet visade att andelen stora aggregat blev högre ju blötare jorden var (fig. 21). För de jordklumpar som hade sprayats med vatten skedde ingen sönderdelning alls, men för

vissa bildades sprickor genom jordklumpen. Vid samma vattenhalt bildade jorden från "Ån Norr" med lägre lerhalt en större andel stora aggregat än jorden från "Ån Syd".

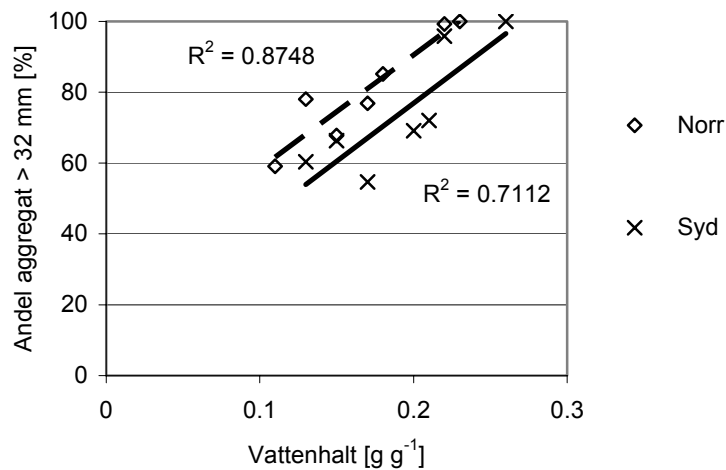


Fig. 21. Andel stora aggregat (>32mm) vid olika vattenhalt, resultat från drop-shattertest. Jorden hämtades vid Ån från två olika platser där Norr hade något lägre lernehåll än Syd.

8. Diskussion

Specifikt dragkraftbehov

Det specifika dragkraftbehovet blev lägre i de plöjda leden än i de kultiverade. Detta förklaras till stor del av att plogen bröt upp jorden på ett mindre energikrävande sätt än kultivatoren. Det verkliga arbetsdjupet för plogen stämde väl överens med det inställda. För kultivatoren var det verkliga arbetsdjupet alltid lägre än det inställda. När det inställda djupet ökades skedde inte en motsvarande ökning av det verkliga djupet för kultivatoren. Detta kan vara en av förklaringarna till varför det specifika dragkraftbehovet ökade med djupet för kultivatoren. Det finns även studier som visar att jordens kohesion ökar med djupet, vilket också kan bidra till ett ökat specifikt dragkraftbehov. Denna effekt borde dock vara liten i de fall där det verkliga bearbetningsdjupet inte ökat nämnvärt. Då det inställda djupet ökades ökade även jordmotståndet och kraften på pinnen. Detta innebär troligen att pinnen fjädrade bakåt varpå angreppsvinkeln ökade. En större angreppsvinkel medför ett ökat dragkraftbehov och detta kan vara ytterligare en anledning till varför det specifika dragkraftbehovet ökade med inställt djup.

Flera faktorer kan ha påverkat att kultivatoren inte bearbetade till inställt arbetsdjup. Plogen och kultivatoren skiljer sig åt i sitt sätt att bryta upp jorden. Plogen arbetar med en mycket liten angreppsvinkel och skär loss jorden längs bearbetningsbotten. Jorden bryts upp lika brett som skärets bredd, sk. tvådimensionell uppbyggnad. Kultivatorpinnen arbetar med en större angreppsvinkel och bryter loss jorden tredimensionellt, d.v.s. över en större vidd än pinnens bredd. Brottet sker från pinnens spets i en V-form snett upp mot ytan, vilket medför att bearbetningsdjupet sällan blir lika stort över hela bearbetningsbredden. Detta innebär att även om pinnens spets

går ner till inställt djup kommer det genomsnittliga bearbetningsdjupet att bli lägre. Effekten blir ännu större om pinnen arbetar under det kritiska bearbetningsdjupet. Jorden under det djupet kommer över huvud taget inte att brytas upp. Detta kan förklara varför det verkliga djupet ibland inte verkade öka fastän det inställda djupet ökades. Pinnen kunde inte bryta upp mer jord än ner till kritiskt djup.

Tallriksredskapet begränsades främst av om marken var hård, vilket gjorde det svårt för redskapet att gå ner. Därför blev det specifika dragkraftbehovet också högt på den styvare jorden under torra förhållanden. Detta berodde främst på att väldigt lite jord bearbetades av tallriksredskapet.

Gåsfötterna sänkte det specifika dragkraftbehovet något, men inte signifikant. De hade inte heller någon större inverkan på den bearbetade jordvolymen. En förklaring till detta kan vara att de satt monterade bakom samma spets som användes i de övriga kultivatorleden. De hade därför ingen inverkan på angreppsvinkeln, vilken annars brukar vara lägre för gåsfötter och därmed minska dragkraftbehovet (Payne & Tanner, 1959). Gåsfötterna var placerade en bit ovanför spetsen och jämförelsen skedde endast under fuktiga förhållanden då pinnen klarade av att bryta upp mycket jord. Båda dessa faktorer medför troligen att gåsfötterna inte fick någon större breddande inverkan på bearbetningsytan. Enligt Godwin & Spoor (1978) har vingar en reducerande inverkan på det specifika dragkraftbehovet genom att öka den bearbetade volymen. I deras studie var dock bearbetningsdjupen betydligt större, vilket kan vara en förklaring till varför vingskären hade en positiv inverkan. Under de fuktiga förhållandena och för de

bearbetningsdjup som användes i denna studie, begränsades troligen inte den bearbetade jordvolymens storlek av ett kritiskt djup. Tillsammans med vingarnas placering gjorde detta att vingarna inte fyllde någon funktion eftersom de gick i den redan bearbetade jorden.

Diagonalkörningen medförde inte att bearbetningsdjupet ökade tillräckligt för att ge ett lågt specifikt dragkraftbehov. Den svaga ökningen av bearbetningsdjupet gjorde istället att det specifika dragkraftbehovet blev mycket högt. Sällningsdata visade inte heller på någon ökad sönderdelning efter diagonalkörningen, vilket indikerar att den tillförda energin inte kommit till nytta. Den första överfarten lämnade en viss andel jord obearbetad eller bara delvis uppbruten. Den andra överfarten bidrog till att dessa bröts loss och därmed blev andelen stora aggregat oförändrad eller till och med större än efter första bearbetningen. Den typ av bearbetning i två steg som diskuteras av Godwin och Spoor (1978) där en grundare bearbetning följs av en djupare har troligen sitt största användningsområde i samband med djup bearbetning som alvluckring.

Under torra förhållanden fick kultivatoren ett mycket högt specifikt dragkraftbehov. Under dessa förhållanden inverkade troligen den fjädrande kultivatorpinnen negativt på dragkraftbehovet. Det höga jordmotståndet fick troligen pinnen att fjädra bakåt, vilket leder till en ökad angreppsvinkel och därmed ett ökat specifikt dragkraftbehov, samt en minskad jordsökning.

Generellt verkade det som det specifika dragkraftbehovet ökade med ökad hastighet. Sambandet var tydligast för plog på Säby. Detta beror troligen på att ploget var det redskap som bäst höll det inställda bearbetningsdjupet, samt att traktorn bäst höll den önskade hastigheten på den lättare jorden. Dragkraftsökningen beror på jordens ökade acceleration, men kan även

påverkas av en ökad hållfasthet hos jorden vid en högre deformationshastighet. Även om en ökad hastighet bidrar till ett ökat dragkraftbehov kan tidsbesparing och bearbetningsresultat ändå motivera val av högre hastighet.

Totalt dragkraftbehov

Det totala dragkraftbehovet (kraften per meter arbetsbredd) är direkt kopplat till effektuttaget från traktorn. Vid en jämförelse mellan plog och kultivator verkar då kultivatoren gå mycket lättare än ploget. Ofta sker plöjning till ett större inställt djup än kultivering och kultivatoren har som tidigare visats svårt att uppnå full bearbetning till det inställda bearbetningsdjupet. En ”vanlig” jämförelse mellan redskapen skulle därför kunna illustreras av plöjning till 21 cm och kultivering till 13 cm. I den jämförelsen är dragkraftbehovet för plöjning ungefär dubbelt så högt som för kultivering. Den största skillnaden ligger dock i att kultivatoren inte bearbetar lika mycket jord som ploget. Med andra ord kan även ploget få ett lågt totalt dragkraftbehov genom att minska bearbetningsdjupet.

Slirning

Vid Ån var dragkraftbehovet (både det totala och specifika) så högt under torra förhållanden att detta gav upphov till den högsta slirningen. Dessutom var jorden så hård att däckets nabbar ej förmådde tränga ner i marken. På den lättare jorden är det svårt att göra samma jämförelse eftersom mätplatserna skiljde sig åt. Slirningen blev lägre för plöjning än för kultivering, vilket tyder på att fästet var bättre i fåran än på markytan. Under 2002 var försöksplatsen vid Ån bevuxen med en vallinsådd. Detta skulle kunna ha bidragit till ett sämre fäste och en ökad slirning på markytan.

Hastighetens inverkan på andelen stora aggregat

En ökad hastighet innebär en ökad energiinsats som bl.a. kan resultera i ett ökat specifikt dragkraftbehov. Om sönderdelningen ökar i motsvarande grad som energiinsatsen förloras dock ingen energi genom ”onödigt” arbete. Energiförluster kan ske genom att jorden t.ex. kastas längre. Vid mättillfällena observerades en skillnad mellan de olika hastigheterna. De högre hastigheterna såg ut att producera en jämnare yta samt ett finare bruk, vilket även stämmer överens med tidigare rapporter (Davies m.fl., 1993). Detta framkom dock inte lika tydligt ifrån sållningsdata då endast små skillnader fanns mellan leden. En förklaring till detta kan vara att sönderdelningen faktiskt inte förändrades särskilt mycket, men att den högre hastigheten producerade en jämnare yta som för ögat såg ut att vara mer sönderdelad än en mer ojämn yta. En ökad hastighet kan troligen löna sig ändå, även då det inte innebär en ökad sönderdelning. Detta beror på hur tidsmässiga vinster värderas.

Redskapens, bearbetningsdjupets och vattenhaltens inverkan på andelen stora aggregat

Både tallriksredskapet och kultivatoren lämnade en lägre andel stora aggregat än plogen. Plogen arbetar med en mindre angreppsvinkel än både kultivatoren och tallriksredskapet. Detta innebär att jorden i större utsträckning kommer att brytas upp genom sprickbildning för plogen, medan skjuvningsbrott lättare uppstår för kultivatoren och tallriksredskapet. Då jorden bryts genom sprickbildning bildas ofta större aggregat än om skjuvningsbrott sker och storleken på aggregaten beror på jordens hållfasthet. Hög hållfasthet hos jorden gynnar sprickbildning och ger stora aggregat. Jordens hållfasthet vid ”Säby blött” och ”Säby torrt” var tillräckligt låg för att tillåta en hög sönderdelning. Dessa platser hade lägre lerhalt än ”Säby fuktigt”

och lägre värden på kohesionen. Skillnaden i bearbetningsresultat mellan olika redskap är ofta större om jordens hållfasthet är hög (Gill & Vanden Berg, 1967). Vid låg hållfasthet kan olika redskap ge upphov till ungefär samma resultat. Detta stämmer väl överens med bearbetningsresultatet från ”Säby torrt” och ”Säby blött” där de olika bearbetningarna gav upphov till ungefär samma resultat. Vid ”Säby fuktigt” var lerhalten högre och där var andelen stora aggregat högre och skillnaden större mellan redskapen.

I de plöjda leden vid Ån blev andelen stora aggregat lägst vid det grunda bearbetningsdjupet. Eftersom plogen kunde hålla det inställda bearbetningsdjupet under i stort sett alla förhållanden begränsades aggregatstorleken åtminstone i vertikalled. Det är därför rimligt att andelen stora aggregat blev lägst vid det minsta bearbetningsdjupet. Enligt samma resonemang borde plöjning till 21 cm ha gett upphov till störst andel stora aggregat. Resultaten visar dock att andelen stora aggregat blev högst vid plöjning till 17 cm. Detta beror troligen på att plogens inställningar och/eller slitage gör att den ger ett sämre resultat vid det bearbetningsdjupet.

Andelen stora aggregat efter tallriksredskapet blev lägst under torra förhållanden. Detta kan förklaras av att tallriksredskapet hade svårt att gå ner då marken var hård och därför endast bearbetade en liten jordvolym. Storleken på aggregaten begränsades på så sätt av att bearbetningsdjupet var mycket litet.

Energibehovet för sönderdelning

Vid Ån erhöles det bästa energiutnyttjandet under fuktiga förhållanden för samtliga redskap. Under blöta förhållanden hade jorden svårt att falla sönder, medan den under torra förhållanden bildade en stor andel stora kokor. Jorden var med andra

ord mest bearbetbar under de fuktiga förhållandena. Detta visar att det finns en optimal vattenhalt (eller vattenhaltsområde) för bearbetning där energiförlusterna är låga och sönderdelningen är hög i förhållande till tillförd energi.

Den lättare jorden hade lägre hållfasthet och krävde en mycket lägre sönderdelningsenergi än den styvare jorden. För tallriksredskapet verkar inte vattenhalten haft samma betydelse som för kultivatoren och plogen. Sönderdelningsenergin blev något lägre under fuktiga förhållanden, men skillnaderna var små. Tallriksredskapet fick en bra energieffektivitet även då det inte bearbetade särskilt mycket jord som under torra förhållanden. Då väldigt lite jord bearbetades kunde inga större kokor bildas och eftersom redskapet hade svårt att gå ner gick det heller inte särskilt tungt.

Hållfasthet

Jordens hållfasthet är en viktig parameter då det gäller att uppskatta eller få en uppfattning om dragkraftbehovet för en viss bearbetning. Hållfastheten har dessutom stor betydelse för bearbetningsresultatet eftersom jordens uppbrytning och sönderdelning bl.a. bestäms av jordens hållfasthet. Kohesionen visade sig vara ett bra mått på jordens hållfasthet och kunde användas för att uppskatta dragkraftsbehov oavsett jordart eller vattenhalt.

Förhållandet mellan kohesionen och vattenhalten visar tydligt skillnaderna mellan försöksplatserna. Enbart ett mått på vattenhalten säger ganska lite om bearbetningsförhållandena om jordens egenskaper i övrigt inte är kända. Vid en vattenhalt på $0,22 \text{ g g}^{-1}$ var jorden vid Ån fuktig, medan jorden på Säby var torr vid samma vattenhalt. Detta kan inte förklaras med hjälp av skillnader i lerhalt även om en jord med en högre lerhalt i regel kan

innehålla mer vatten utan att vara blöt eller plastisk än en jord med en lägre lerhalt. Plasticitetsgränsen var dock högre för jorden på Säby än för jorden vid Ån, trots det lägre lerinnehållet. Detta beror troligen på en skillnad i mullhalt. På Säby var mullhalten dubbelt så hög som vid Ån och detta har stor inverkan på plasticitetsgränsen och därmed hur mycket vatten jorden kan innehålla innan den blir plastisk. Detta innebär att jorden på Säby kommer att vara bearbetbar även vid ganska höga vattenhalter.

Då kohesionen inte kan bli negativ följer den troligen en kurva som planar ut om vattenhalten ökar ytterligare. På samma sätt skulle kurvan för 4111 (fig. 18) troligtvis få en brantare lutning om vattenhalten minskade. Inom det vattenhaltsområde som uppmättes i försöket var det dock rimligt att anpassa räta linjer eftersom punkter saknas för mycket höga respektive låga vattenhalter.

Drop-shattertest

I drop-shattertestet ökade i stort sett sönderdelningen linjärt med sjunkande vattenhalt, även vid ganska låga vattenhalter. Detta stämmer inte överens med erfarenheter ifrån fält där sönderdelningen blivit lägre vid låga vattenhalter. Metoden verkar därför inte fungera särskilt väl för att bedöma en jords bearbetbarhet vid olika vattenhalter. Hadas och Wolf (1983) har använt drop-shattertestet i flera undersökningar och menar att testet främst är framtaget för att testa torr jord. Dessutom kan inte testet ses som en direkt spegling av verkligheten i fält eftersom krafterna som induceras genom testet skiljer sig från dem som orsakas av jordbearbetningsåtgärder.

Det kan även diskuteras hur resultatet påverkas av att jorden släpps flera gånger från en bestämd höjd, istället för att släppas från en högre höjd en gång. I fält kommer jorden bara att påverkas av krafterna från

redskapet en gång. Den kinetiska energin antas spridas sig inom jordklumpen vid kollisionen med underlaget och skapar nya sprickor i jorden samt förstör gamla (Hadas & Wolf, 1983). Energi kan "lagras" i jordklumpen och frigöras vid ytterligare en kollision. Detta medför att det kan vara effektivare att sönderdela en jord genom upprepade åtgärder med låg energi än en gång med hög energi.

Jorden som användes i drop-shattertestet torkade inte jämnt utan torkningen skedde från toppen och nedåt. För att utjämna vattenhalten fick jordklumpen ligga inplastad i kylrum i ca 7 veckor. Detta räckte dock inte för att få en jämn vattenhalt i hela jordklumpen utan en sida förblev något torrare. Det är svårt att säga hur detta påverkade drop-shattertestet, men torkningen borde ha skett annorlunda så att vattenhalten blev mer jämn i jordklumpen för att eliminera eventuella felkällor.

9. Slutsatser

För att göra en rättvis jämförelse av dragkraftbehovet för olika redskap måste hänsyn tas till det verkliga bearbetningsdjupet. Skillnader i bearbetningsdjup stod för en stor del av dragkraftskillnaderna mellan redskapen. Plogen bearbetade i stort sett alltid till inställt djup, medan det verkliga djupet för kultivatorn alltid var lägre än det inställda. Plogen hade det lägsta specifika dragkraftbehovet och kultivatorn det högsta av de provade redskapen.

Jordens hållfasthet och därmed även dragkraftbehovet skiljer sig mellan olika jordar och mellan olika vattenhaltsförhållanden. Jordens kohesion ger en god uppfattning om hållfastheten och dragkraftbehovet vid ett visst tillfälle och kan lätt mätas i fält med ett vingborr.

Det specifika dragkraftbehovet kan ibland vara otillräckligt för att jämföra de

olika redskapen eftersom det inte säger något om sönderdelningsgraden. Om målet med bearbetningen är en hög sönderdelning kan därför energibehovet för sönderdelning ge en bättre bild av de olika redskapen. Detta säger hur stor sönderdelningsgraden blir i förhållande till tillförd energi. En högre energiinsats eller specifikt dragkraftbehov kan därmed accepteras om detta leder till en ökad sönderdelningsgrad. Tallriksredskapet hade det signifikant lägsta energibehovet för sönderdelning, medan skillnaderna mellan plog och kultivator inte var signifikanta. Eftersom målet med bearbetningen kan variera kan inget av redskapen entydigt utpekas som det mest effektiva.

Vattenhalten har stor betydelse för dragkraftbehovet och bearbetningsresultatet. Dragkraftbehovet minskade då vattenhalten ökade, men energibehovet för sönderdelning blev som lägst under "fuktiga" förhållanden. Andelen stora aggregat blev också lägst under fuktiga förhållanden för plogen och kultivatorn. Även en ökad hastighet tenderade att minska andelen stora aggregat. Resultaten tyder på att bearbetning vid en vattenhalt nära eller strax under plasticitetsgränsen utgör den bästa kompromissen för att uppnå ett lågt dragkraftsbehov och ett gott bearbetningsresultat.

Litteratur

- Aluko, O. B. & Sieg, D. A. 2000. *An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting*. Soil and Tillage Research. 57 143-157.
- Baver, L.D., Gardner, Walter H. & Gardner, Wilford R. 1972. *Soil Physics*, 4th ed. s 74-99.
- Bengough, A. G. & Mullind, C. E. 1990. *Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses*. Journal of Soil Science, 41, 341-358.
- Dexter, A. R. & Arvidsson, J. (2002). *Soil Mechanics: theory and applications in agriculture*. Kursmaterial från Jordbearbetning och Hydroteknik, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.
- Davies, B. m.fl., 1993. *Soil management*, 5:th ed. Kap 9-10 125-161.
- Desbiolles, J. M. A., Godwin, R. J. Kilgour, J. & Blackmore, B. S. 1997. *A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine*. J. Agric. Res. 66, 295-309.
- Dexter, A. R. 1973. *Review of soil mechanical properties*. Proceedings of the Subject Day on Mechanical Behaviour of Agricultural Soils. NIAE Report no 7.
- Dexter, A.R., 1988. *Advances in characterization of soil structure*. Soil & Tillage Research 11: 199-238.
- Flenniken, J. M., Hefner, R. E., Weber, J. A. 1977. *Dynamic soil strength parameters from unconfined compression tests*. Trans. A.S.A.E., 20 (1) 21.
- Gill, W.R. & McCreery, W. F. 1960. *Relation of size of cut to tillage tool efficiency*. Agricultural Engineering. 41. 372-374, 381.
- Gill, R.W. & Vanden Berg, G.E., 1967. *Soil dynamics in tillage and traction*. Agricultural handbook No. 316. U.S. Department of agriculture.
- Godwin, R. J., Seig, D. A. T. & Allot, M. 1985. *The development and evaluation of a force prediction model for agricultural discs*. In: Proceedings of the International conference on soil Dynamics, Auburn, AL. 250-263.
- Hadas, A. & Wolf, D. 1983. *Energy efficiency in tilling dry clod-forming soils*. Soil and Tillage Research, 3 (1) 47-59.
- Hadas, A. & Wolf, D. 1987. *Determining efficiencies of various mouldboard ploughs in fragmenting and tilling air-dry soils*. Soil and Tillage Research, 10 (2) 181-190.
- Hettiaratchi, D. R. P. & Alam, M. M. 1997. *Calulation, validation and simulation of soil reaction on concave agricultural discs*. J. Agric. Eng. Res. 68, 63-75
- Hettiaratchi, D. R. P. 1997. *Prediction of forces acting on concave agricultural discs*. J. Agric. Eng. Res. 68, 51-62
- McKyes, E. 1989. *Agricultural Engineering Soil Mechanics*. 207-212. Elsevier science publishing company inc. Canada.
- Kézdi, A. 1974. *Handbook of Soil Mechanics*. Vol 1 Soil Physics.
- Klenin, N. I., Popov, I. F. & Sakun, V. A. 1985. *Agricultural Machines*. Translated from Russian and published for the United States Department of Agriculture. 55-60
- Koolen, A. J. & Kupiers, H. 1983. *Agricultural SoilMechanics*. Advanced series in agricultural sciences nr 13 s 196.
- Payne, P. C. J. 1956. *The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements*. J. Agric. Eng. Res. 1 (1) 23-50
- Payne, P.C.J. & Tanner, D.W., 1959. *The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements*. J. Agric. Eng. Res., 4, 312-325.
- Saleque, U. M. & Jangiev, A. A., 1990. *Optimization of the operational parameters of a wheeled tractor for tillage operation*. Transactions of the ASAE. v.33(4) s 1027-1032.

- Sirjacobs, D., Hanquet, B., Lebeau, F. och Destain, M. F. 2002. *On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture*. Soil and Tillage Research, 64 3-4, 231-242.
- Spoor, G. 1975. *Fundamental aspects of cultivations*. Technical Bulletin 29, 128-144.
- Spoor, G. & Godwin, R. J. 1978. *An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines*. J. Agric. Eng. Res. 23, 243-258.
- Stafford, J. V. 1979. *The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed*. Journal of agricultural engineering research. 24, 41-56.
- Yong, R. N. & Warkentin, B. P., 1975. *Soil properties and behaviour*. Developments in geotechnical engineering Nr 5. s 62-68.

Appendix. Simulering av skjuvhållfasthet och dragkraftsbehov i försök på lerjord på Ultuna

Inledning

Den idealiska vattenhalten för grundbearbetning kan sägas utgöra en kompromiss mellan bearbetningsresultat och dragkraftsbehov. Resultat i litteraturen liksom resultat i denna rapport pekar på att den mest lämpliga vattenhalten är strax under plasticitetsgränsen. Genom att simulera vattenhalten i marken från markegenskaper och väderdata är det möjligt att beräkna när på året bearbetningen helst bör ske. I detta appendix ges ett första exempel på en sådan beräkning, men detta arbete kommer att fortsätta.

Material och metoder

Skjuvhållfasthet och dragkraftsbehov

För en lerjord på Ultuna (försöksplatsen i serie R2-4111, 58 % ler) simulerades skjuvhållfastheten i matjorden och dragkraftsbehovet vid plöjning till 20 cm. Både skjuvhållfastheten och dragkraftsbehov mättes vid flera tillfällen under hösten 2002, dvs vid olika vattenhalter. Samband mellan vattenhalt och skjuvhållfasthet (kohesion) respektive dragkraftsbehov för försöksplatsen visas i figur 18 och 19 i denna rapport. Dessa samband kunde sedan användas för att beräkna skjuvhållfasthet och dragkraftsbehov utifrån de simulerade vattenhalterna.

Skjuvhållfastheten σ_S (kPa) beräknades ifrån den simulerade vattenhalten $\theta_{m,4-16cm}$ (vol.-%) av skikten 4-9 och 9-16 cm (skjuvhållfasthet i fält uppmättes på 5-15 cm djup) enligt den linjära regressionen

$$\sigma_S = -1,9946\theta_{m,4-16cm} + 175,05$$
$$R^2 = 0.89 \quad (1)$$

Dragkraftsbehovet vid plöjning till 20 cm, $F_{Plöjning,20cm}$ (kN m⁻²), beräknades ifrån

vattenhalten $\theta_{m,4-25cm}$ (vol.-%) av skikten 4-9, 9-16 samt 16-25 cm enligt den linjära regressionen

$$F_{Plöjning,20cm} = -1,4472\theta_{m,4-25cm} + 175,88$$
$$R^2 = 0.99 \quad (2)$$

Simuleringar gjordes bara för hösten 2002, eftersom uppmätta data (skjuvhållfasthet och dragkraftsbehov) fanns för samma tidsperiod. Relationen mellan skjuvhållfastheten respektive dragkraftsbehovet och vattenhalten skulle troligen vara annorlunda under våren och sommaren på grund av både växande grödor (rotutveckling) och förändringar i skrymdensitet som båda påverkar markens hållfasthet.

Resultat och diskussion

Simulerad skjuvhållfasthet var mellan 80 och 130 kPa under perioden augusti till december 2002 (Fig. 1). Simulerat dragkraftsbehov vid plöjning till 20 cm (Fig. 2) var mellan 110 och 140 kN m⁻² för samma period. Generellt är skillnaderna mellan simulerade värden och uppmätta värden relativt små och simuleringarna följer trenden från en torr, hållfast jord i augusti till en mindre hållfast jord i december. Både simulerad skjuvhållfasthet och simulerat dragkraftsbehov är dock lite för höga jämfört med uppmätta värden. Både simulerad skjuvhållfasthet och simulerat dragkraftsbehov följer förstås simulerad vattenhalt enligt ekvationer 1 och 2. Differenser mellan uppmätta och simulerade värden beror alltså direkt på kvaliteten av vattenbalansmodellen, dvs differenser mellan uppmätt och simulerad vattenhalt samt osäkerheten i de linjära regressionslinjerna (ekvationer 1 och 2).

I figur 3 visas både vattenhalt, bearbetningsgränser enligt Dexter och Bird (2001) samt dragkraftsbehov på Ultuna för

hösten 2001. Vattenhalten var inom bearbetningsgränserna mellan 27 augusti och 8 oktober, alltså under sex veckor. Det simulerade dragkraftsbehovet sjönk under samma period med knappt 15 kN m^{-2} . Vattenhalten var optimal för bearbetning kring den 10 september. Dragkraftsbehovet för plöjning till 20 cm simulerades då till 120 kN m^{-2} .

Flera mätningar av skjuvhållfasthet och dragkraftsbehov i relation till vattenhalt behövs för att förbättra simuleringarna som visas i Fig. 1-3. Det kan vara intressant att simulera dragkraftsbehovet för olika jordar och för olika redskap och jämföra till exempel plog med kultivator och

tallriksredskap på olika jordar. Ifrån sådana simuleringar av dragkraftsbehovet kan bränsleförbrukningen per hektar beräknas som kan ingå i ekonomiska kalkyler.

Bestämning av bearbetningsgränserna som visas i Fig. 3. behöver verifieras ytterligare i fältförsök för olika jordar. Principen är dock intressant. Sensitivitetsanalyser kan genomföras för att studera hur antalet dagar inom bearbetningsgränserna varierar för olika jordar, och hur antalet dagar varierar mellan åren och påverkas av till exempel markpackning eller klimatförändring.

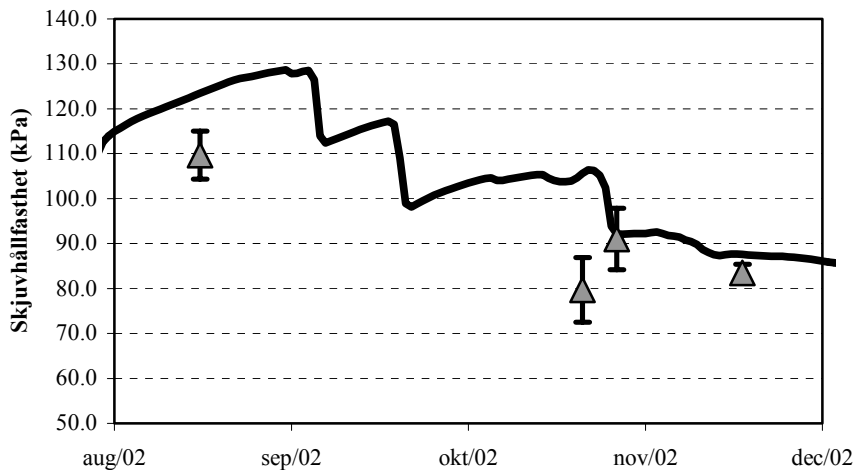


Fig. 1. Uppmätt skjuvhållfasthet på 5-15 cm djup (trianglar) och simulerad skjuvhållfasthet för skiktet 4-16 cm djup (svart kurva) på Ultuna under hösten 2002. Medelvärde och medelfel.

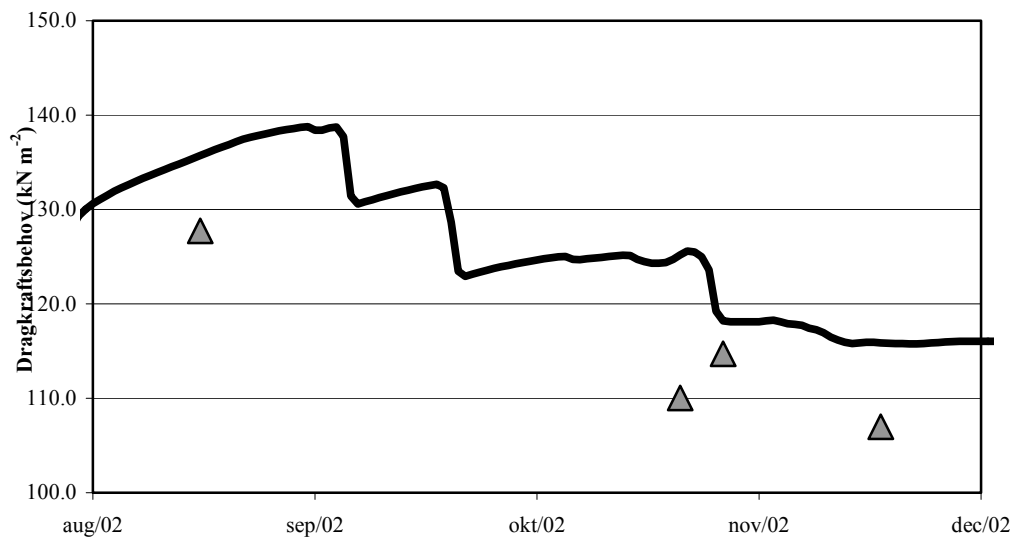


Fig. 2. Uppmätt dragkraftsbehov vid plöjning till 20 cm (trianglar) och simulerat dragkraftsbehov (svart kurva) på Ultuna under hösten 2002.

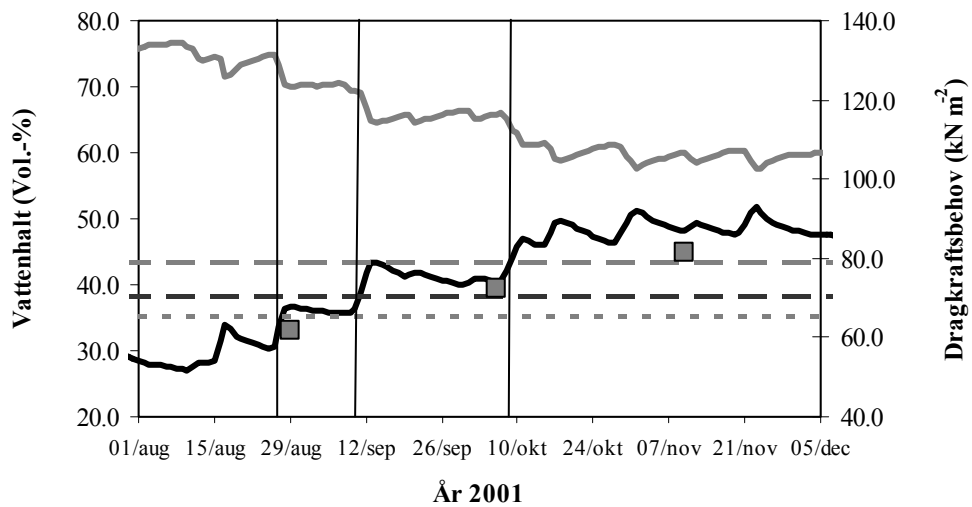


Fig. 3. Uppmätt vattenhalt på 15 cm djup (rutor), simulerad vattenhalt för skiktet 9-25 cm (svart kurva), undre bearbetningsgräns (grå punkterad horisontell linje), optimal vattenhalt för bearbetning (svart streckad horisontell linje) och övre bearbetningsgräns (grå streckad horisontell linje), samt simulerat dragkraftsbehov vid plöjning till 20 cm (grå kurva) på Ultuna för hösten 2001.

RAPPORTER FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

Nr	År	
1	1968	Inge Håkansson. Fysikalisk och kemisk beskrivning av markprofiler från 8 platser i Uppland och Västergötland. 128s.
2	1968	Inge Håkansson. Några synpunkter på forskning och försöksverksamhet i jordbearbetning. 6s.
3	1968	Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson. Försök med harvning till vårsäd 1941-1959. 29s. <i>Field trials with harrowing to spring-sown cereals 1941-1959. 29pp.</i>
4	1968	Åke Huhtapalo, Reijo Heinonen. Inledande försök med gödsel radmyllning kombinerat med sådd 1964-1966. 37s.
5	1968	Lennart Henriksson. Orienterande försök med bearbetning till höstvet. 7s.
6	1968	Lennart Henriksson. Försök med olika sätider. 7s.
7	1968	Reijo Heinonen. Berättelse över studieresa till Sovjet den 11-26 Juli 1967. 13s.
8	1968	Inge Håkansson. Markfysikaliska studier i ett växtföljdsförsök på Ås den 15-16 juli 1966. 13s.
9	1968	Bo Thente. Luftpermeabilitetsmätning som markfysikalisk undersökningsmetod. 41s.
10	1968	Reijo Heinonen, Åke Huhtapalo. Besvarade och obesvarade frågor om radmyllning av kvävegödsel. 13s.
11	1968	Lennart Fergedal. Försök med jordpackning vid olika tidpunkter på våren. År 1967. 9s.
12	1968	Nils M. Nilsson, Lennart Henriksson. Alvluckningsförsök 1937-1963. 32s.
13	1968	Reijo Heinonen. Tidig vårsådd. Växtfysiologiska och ekologiska synpunkter på aktuella tendenser i såbäddsberedning och sådd av stråsäd. 19s.
14	1968	Erik Jakobsson. Plöjningsförsök med olika tiltbredder och vändskiveformer. 10s.
15	1968	Lennart Henriksson. Försök med grund plöjning. 9s.
16	1968	Stig Ledin. Olika halmnedbrukningsmetoders verkan på kvickrot och på några frögräs. 21s.
17	1969	Inge Håkansson, Börje Gillberg. Lufttrycket i traktordäcken under fältarbeten. En stickprovsundersökning hösten 1968. 32s. <i>Investigation into the inflation pressure of the tires of Swedish tractors engaged in field work. 32pp.</i>
18	1969	Göte Bertilsson. Studier över tryckets markpåverkan. 67s.
19	1969	Peter Edling, Nils M. Nilsson, Inge Håkansson. Sju skånska försök med alvluckring och djupplöjning 1964-68. 26s. <i>Seven experiments with subsoiling and deep ploughing in Southwestern Sweden 1964-68. 26pp.</i>
20	1969	Bengt Reimersson, Gunnar Falk. Försök på Persbo gård 1968 med minskad jordpackning. 8s. <i>A field experiment with reduced soil compaction on a clay soil. 8pp.</i>
21	1970	Lennart Henriksson. Olika redskapstyper för stubbearbetning. Jämförelser av arbetssätt och arbetsresultat. 19s. <i>Different types of implements for stubblecultivation. A study of working methods and working results. 19pp.</i>
22	1970	Inge Håkansson, Lennart Fergedal. Försök med jordpackningens ackumulativa efterverkningar. Preliminär redogörelse. 21s.

- Experiments with the accumulative after-effects of soil compaction. Preliminary report. 21pp.*
- 23 1971 Göran Kritz, Inge Håkansson. Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovsundersökning 1969-70. 43s.
- Investigation into seedbed preparation and properties of the seedbed on spring sown fields in Sweden, 1969-1970. 43pp.*
- 24 1971 Lennart Henriksson. Tilljämning av plogtiltan på hösten. Försök med höstharvning och tillsatsredskap till plogen. 68s.
- 25 1971 Ann Pettersson. Nya redskap för gödselplacering och sådd. 50s.
- 26 1971 Lennart Fergedal. Jordpackning med traktor vid olika tider för vårsådd. 140s.
- 27 1971 Göran Kritz. Jordbearbetningsforskning i Europa. Rapport från en studieresa. 16s.
- 28 1972 Helmut Frese. Zur Frage spezialisierter oder interdisziplinärer Forschung am Boden. 15s.
- 29 1972 Inge Håkansson, Sven Alvelid. Två försök i Kalmar län med halmnedplöjning för att minska vinderosionen. 4s.
- 30 1972 Ann Pettersson, Sten Wikström. Inledande undersökningar om radmyllning till potatis. 50s.
- 31 1972 Peter Edling, Lennart Fergedal. Modellförsök med jordpackning 1968-69. 71s.
- 32 1973 Åke Huhtapalo, Ann Wikström, Sten Wikström. Försök med kombisåmaskiner 1971-72. 46s.
- 33 1973 Inge Håkansson. Tung körning vid skörd av slåttervall. Tre försök på Röbäcksdalen. 1969-72. 20s.
- Effect of heavy machinery when harvesting ley crops. Three field experiments in northern Sweden 1969-72. 20pp.*
- 34 1973 Göran Kritz. Såbäddens utformning på vårsådda fält. Stickprovsundersökning 1969-72. Maskinanvändningen på provplatserna. 76s.
- 35 1973 Lennart Henriksson. Redskap för såbäddsberedning. Undersökningsmetoder och inledande studier. 35s.
- Implements for seedbed preparation. Methods of investigation and preliminary studies. 35pp.*
- 36 1973 Inge Håkansson, Jozsef von Polgár. Försök åren 1969 och 1970 med en maskin för kombinerad såbäddsberedning och sådd (Svenska Sockerfabriks AB:s vårbrukningsmaskin). 26s.
- Experiments in the years 1969 and 1970 with a machine for combined seedbed preparation and sowing. 26pp.*
- 37 1974 Lennart Engström. Intervjuundersökning om extremt tidig sådd våren 1973. 33s.
- A sampling study into extremely early spring sowing in Sweden in 1973. 33pp.*
- 38 1974 Lennart Henriksson. Studier av några jordbearbetningsredskaps arbetsätt och arbetsresultat. 144s.
- Studies of the mode of working and the working results of some soil tillage implements. 144pp.*
- 39 1975 Tomas Rydberg. Plöjningsfri odling i Sverige. En intervjuundersökning 1974. 21s.
- 40 1975 Ulf Olsson. Redskap för såbäddsberedning, arbetsätt och arbetsresultat. 55s.
- Implements for seedbed preparation; studies of the mode of working and the working results. 55pp.*
- 41 1975 Inge Håkansson. Rapport över studieresa till USA hösten 1974. 15s.

- 42 1976 Inge Håkansson. Elva försök med alvluckring och djupplöjning i Syd- och Västsverige 1964-1975. 35s.
Eleven Swedish field experiments with subsoiling and deep ploughing 1964-1975. 35pp.
- 43 1976 Peter Edling. Redskap och intensitet vid vårbruk till potatis. Resultat av 11 försök i Norrland 1965-1969. 10s.
Eleven experiments in northern Sweden with spring tillage for potatoes. 10pp.
- 44 1976 Göran Kritz. Såbäddens utformning på vårsådda fält III. Stickprovsundersökning 1969-72. Primärdata för 300 provplatser. 76s.
Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden III. Sampling investigation 1969-72. Primary results from 300 investigated places. 76pp.
- 45 1976 Proceedings of the 7th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, ISTRO.
- 46 1976 Inge Håkansson, Jozsef von Polgar. Modellförsök med såbäddens funktion. I. Såbädden som skydd mot avdunstning. 52s.
Model experiments into the function of the seedbed. I. The seedbed as a protective layer against drought. 52pp.
- 47 1976 Lars Gunnar Nilsson. Texturanalys och jordartsklassifikation. Rapport från ett NJF-symposium i Uppsala 1976-03-09. 26s.
- 48 1976 Inge Håkansson. Olika grödors känslighet för packningsgraden i matjorden. Två försök med vallväxter 1971-74. 17s.
The sensitivity of different crops to the degree of compactness in the plough layer. Two field experiments with forage crops 1971-74. 17pp.
- 49 1976 Göran Kritz. Såbäddens utformning på vårsådda fält IV. Stickprovsundersökning 1969-72. En översiktlig studie av några viktiga faktorer. 33s.
Seed bed preparation and properties of the seed bed in spring sown fields in Sweden IV. Sampling investigation 1969-72. A general survey of some important factors. 33pp.
- 50 1977 Såbäddsberedning och sådd. Uppsatser presenterade vid Lantbrukshögskolans försöksledarmöte 1977.
- 51 1977 Lennart Henriksson. Stubbearbetningsredskapens arbetsresultat med hänsyn till mark- och halmförhållandena. 32s.
The results given by implements for stubble cleaning with regard to different soil- and straw conditions. 32pp.
- 52 1977 Arne Ljungars. Olika faktorerers betydelse för traktorernas jordpackningsverkan. Mätningar 1974-1976. 43s.
Importance of different factors on soil compaction by tractors. Measurements in 1974-1976. 43pp.
- 53 1977 Inge Håkansson, József von Polgár. Modellförsök med såbäddens funktion. II. Försök med skiktade och oskiktade såbäddar. 22s.
Model experiments into the function of the seedbed. II. Experiments with stratified and unstratified seedbeds. 22pp.
- 54 1978 Ulf Olsson. Harvens konstruktion och harvningens utförande - inverkan på bearbetningsresultatet. 28s.
Influence of harrow construction and harrowing on the tillage result. 29pp.
- 55 1978 Olle Wallbom, Kjell Wretler. Förekomsten av några viktiga växtskadegörare vid plöjningsfri odling. 29s.
Occurrence of some important plant diseases on ploughless cereal cropping. 29pp.

- 56 1978 Åke Huhtapalo. Kombisådd av kväve och fosfor till vårsäd. 27s.
Combi-drilling of nitrogen and phosphorus with spring cereals. 27pp.
- 57 1979 Inge Håkansson. Försök med jordpackning vid hög axelbelastning. Markundersökningar 1-2 år efter försökens anläggande. 15s.
Experiments with soil compaction at high axle load. Soil investigations 1-2 years after the experimental compaction. 15pp.
- 58 1979 Inge Håkansson, József von Polgár. Modellförsök med såbäddens funktion. III. Försök med syrebrist i såbädden. 17s.
Model experiments into the function of the seedbed. III. Experiments with oxygen deficiency in the seedbed. 17pp.
- 59 1980 Tomas Rydberg. Storparcellförsök med plöjningsfri odling, 1976-78. 21s.
Big-plot experiments with ploughless farming, 1976-78. 21pp.
- 60 1980 Working group on soil compaction by vehicles with high axle load. Report of meeting in Uppsala 1980. 56pp.
- 61 1981 Behovet av forskning och försök inom mark-teknikområdet. En inventering utförd av samarbetskommittén för mark-teknik vid Sveriges Lantbruksuniversitetets Lantbruksvetenskapliga fakultet. Sekreterare: Lennart Henriksson. 46s.
- 62 1981 Skördevariationerna i växtodlingen - orsaker och motåtgärder. Seminarium anordnat av Samarbetskommittén för Mark-Teknik på Ultuna 1981-04-09. 64s.
- 63 1981 Nils M. Nilsson. Plöjningsdjup och tiltbredder vid höstplöjning. 30s.
Ploughing depths and widths of furrow slice in autumns ploughing. 30pp.
- 64 1982 Jan Cederlund. Kombinerad bearbetning och sådd (harvsådd). Examenarbete. 54s.
- 65 1983 Göran Kritz. Såbäddar för vårstråsäd. En stickprovsundersökning. 187s.
Physical conditions in cereal seedbeds. A sampling investigation in Swedish spring-sown fields. 187pp.
- 66 1983 N.M. Nilsson. Höst- eller vårplöjning till vårsådd på kapillära jordar. Resultat från 12 fältförsök åren 1971-75. 57s.
Autumn- or spring ploughing before spring sowing on capillary soils. Results from 12 field trials during 1971-1975. 57pp.
- 67 1984 Berth Mårtensson. Harvsådd - Preliminära försöksresultat 1979-83. 20s.
Once-over sowing - Preliminary results of trials 1979-1983. 20pp.
- 68 1984 Mats Edh. Bandsådd - en studie av olika billar för bandsådd. Examenarbete. 44s.
- 69 1984 József von Polgár. Vältning efter vårsådd. 16s.
Rolling after spring sowing. 16pp.
- 70 1986 Tomas Rydberg. Markfysikaliska och markkemiska effekter av plöjningsfri odling i Sverige. 35s.
Effects of ploughless tillage on soil physical and soil chemical properties in Sweden. 35pp.
- 71 1986 Jordpackning: Skördepåverkan - Motåtgärder - Ekonomi. Rapport från NJF-seminarium i Sigtuna 28-30 oktober 1986. 187s.
Soil compaction: Effects - Counter-measures - Economy. 187pp.
- 72 1986 Bo Thunholm. Termiska egenskaper i åkermark skattade på grundval av den årliga temperaturvariationen. 18s.
Thermal properties of the subsoil estimated from annual temperature variations. 18pp.
- 73 1987 Lennart Henriksson. Försök med olika harvar 1977-1985. 32s.
Field trials with different harrows 1977-1985. 32pp.

- 74 1987 Tomas Rydberg, Torbjörn Öckerman. Plöjningsfri odling - Dess inverkan på rotutveckling och evaporation. 52s.
The effects of ploughless tillage on root development and evaporation. 52pp.
- 75 1987 Hans Svensson. Jordpackningens inverkan på sockerbetans rotutveckling och skördens storlek. 31s.
Effects of soil compaction on root development and yield of sugarbeets. 31pp.
- 76 1987 Tomas Rydberg. Studier i plöjningsfri odling i Sverige 1975-1986. 53s.
Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986. 53pp.
- 77 1988 Reduceret jordbearbejdning. Rapport från NJF-seminarium i Horsens, Danmark 9-11 februari 1988. 240s.
Reduced cultivation. 240pp.
- 78 1990 Inge Håkansson, Mary McAfee, Sixten Gunnarsson. Verkan av körning med traktor och vagn vid vallskörd. Resultat från 24 försöksplatser. 41s.
Effects of traffic during harvest on yield of grass leys. Results from field trials on 24 Swedish sites. 41pp.
- 79 1990 Krister Nilsson. Packningsskador vid konservärtskörd - ekonomiska konsekvenser och åtgärder för att minska packningen. 16s.
Estimation of the economic consequences of soil compaction when harvesting canning peas. 16pp.
- 80 1990 Tomas Rydberg, Mary McAfee, Börje Gillberg. Djupplöjning på lätta mineraljordar. 50s.
Effects of subsoiling on crop yields on light mineral soils. 50pp.
- 81 1992 Johan Arvidsson, Sixten Gunnarsson, Lena Hammarström, Inge Håkansson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg. 1991 års jordbearbetningsförsök. 58s.
- 82 1992 Johan Arvidsson, Inge Håkansson. En modell för att beräkna jordpackningens effekter på grödornas avkastning. 23s.
An empirical model for estimating the crop yield losses caused by machinery induced soil compaction. 23pp.
- 83 1992 Maria Stenberg, Reynaldo A. Comia, Tomas Rydberg, Inge Håkansson, Sixten Gunnarsson. Harvsådd i konventionella och plöjningsfria bearbetningssystem. 18s.
Soil and crop responses to different tillage systems. 18pp.
- 84 1992 Johan Arvidsson, Lena Hammarström, Maria Stenberg, Tomas Rydberg, Mats Tobiasson, Hans Pettersson, Sixten Gunnarsson, Ararso Etana, Inge Håkansson, Ingrid Karlsson, Karin Blombäck. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1992. 86s.
- 85 1994 Johan Arvidsson, Inge Håkansson. Finns packningsskador kvar efter plöjning? Resultat från 21 långliggande fältförsök. 31s.
Do effects of soil compaction persist after ploughing. Results from 21 Swedish long-term field experiments. 31pp.
- 86 1994 Johan Arvidsson, Lena Hammarström, Tomas Rydberg, Maria Stenberg, Hans Pettersson, Jörgen Lidström, Lars Olsson, Barbro Beck-Friis, Sasa Ristic, Inge Håkansson, Ararso Etana, Eva Salomon. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1993. 88s.
- 87 1994 Thomas Grath. Inverkan av jordpackning och anaeroba markförhållanden på grödornas näringsupptagning samt på rotröta och utveckling hos ärter. 61s.
Influences of soil compaction and anaerobic soil conditions on crop nutrient uptake and on root rot and growth of peas. 61pp.
- 88 1995 Johan Arvidsson, Lena Hammarström, Tomas Rydberg, Maria Stenberg,

- Eva Salomon, Staffan Steineck, Ingrid Karlsson, Sixten Gunnarsson, Daniel Johansson, Åse Littorin-Johansson. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1994. 77s.
- 89 1996 Ingrid M. Karlsson. Sportgräsytor etablering och skötsel - erfarenheter från ett markbyggnadsförsök. 94s.
Establishment and maintenance of grassed sports fields - experience from a field experiment on soil construction alternatives. 94pp.
- 90 1996 Johan Arvidsson, Helena Elmquist, Sixten Gunnarsson, Daniel Johansson, Susanne Johansson, Ingrid M. Karlsson, Tomas Rydberg, Eva Salomon, Maria Stenberg, Johan Bengtsson, Calle Blackert, Rickard Ivarsson, Anna Lena Carlsson, Sasa Ristic. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1995. 80s.
- 91 1997 Johan Arvidsson, Helena Elmquist, Sixten Gunnarsson, Daniel Johansson, Tomas Rydberg, Eva Salomon, Maria Stenberg. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1996. 80s.
- 92 1997 Johan Arvidsson. Tidig sådd - ett system för reducerad bearbetning vid vårsådd. Slutrapport för fältförsök 1992-1996. 45s.
Early sowing - a reduced tillage system for spring sowing. Final report for field experiments 1992-1996. 45pp.
- 93 1998 Johan Arvidsson, Helena Elmquist, Sixten Gunnarsson, Daniel Johansson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg, Andreas Trautner, Thomas Wildt-Persson. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1997. 74s.
- 94 1998 Daniel Johansson. Radhackning med och utan efterredskap i stråsäd. Slutrapport för fältförsök 1995-1997. 49s.
Row hoeing in cereals with and without tools behind. Final report for field experiments 1995-1997. 49pp.
- 95 1998 Maria Stenberg, Göran Bergkvist, Helena Aronsson. Jordbearbetningsstrategi och etableringsteknik till höstraps för att minska risken för kväveläckage. 18s.
Soil tillage strategy and winter oil-seed rape establishment techniques to reduce the risk for nitrogen leaching. 18pp.
- 96 1999 Johan Arvidsson, John Löfkvist, Tomas Rydberg, Erika Sjöberg, Maria Stenberg, Urban Svantesson, Andreas Trautner. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1998. 68s.
- 97 2000 Ararso Etana, Tomas Rydberg och Inge Håkansson. Markfysikaliska studier i långliggande försök med reducerad jordbearbetning. 29s.
Studies of soil physical properties in long-term experiments with reduced tillage. 29pp
- 98 2000 Johan Arvidsson, Ararso Etana, John Löfkvist, Magnus Melin, Lars Pålsson, Tomas Rydberg, Maria Stenberg, Urban Svantesson, Andreas Trautner. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1999. 76s.
- 99 2000 Inge Håkansson. Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning – effekter- motåtgärder. 123 s.
- 100 2000 Johan Arvidsson, Jan van den Akker, Rainer Horn (redaktörer). Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European community. Proceedings of the 3rd workshop of the Concerted Action ” Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent compaction”, 14-16 June, Uppsala, Sweden.
- 101 2001 Johan Arvidsson, Thomas Keller, John Löfkvist, Åsa Myrbeck, Nina Nordström, Tomas Rydberg, Fredrik Sassner, Urban Svantesson, Andreas Trautner. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 2000. 67s.
- 102 2001 Johan Arvidsson, Andreas Trautner, Erika Sjöberg. Alvpäckning av tunga

- betupptagare. Slutrapport från försök 1995-2000. 56 s.
- 103 2002 Johan Arvidsson, Fredrik Andersson, Elisabeth Bölenius, Johan Karlsson, Thomas Keller, John Löfkvist, Åsa Myrbeck, Tomas Rydberg, Urban Svantesson, Torgil Svensson, Alfredo de Toro, Andreas Trautner. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 2001. 86s.
- 104 2003 Johan Arvidsson, Maria Ehrnebo, Ararso Etana, Karin Gustafsson, Thomas Keller, John Löfkvist, Åsa Myrbeck, Tomas Rydberg, Urban Svantesson, Andreas Trautner. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 2002. 78s.
- 105 2003 Åsa Myrbeck, Johan Arvidsson, Thomas Keller. Plöjningstidpunktens inverkan på markstruktur, växtproduktion och kväveutlakning på lerjord. Slutrapport från försök 1999-2002. 44 s.
- 106 2003 Karin Gustafsson, Johan Arvidsson, Thomas Keller. Dragkraftsbehov för plog, kultivator och tallriksredskap vid olika markvattenhalter. 41 s.