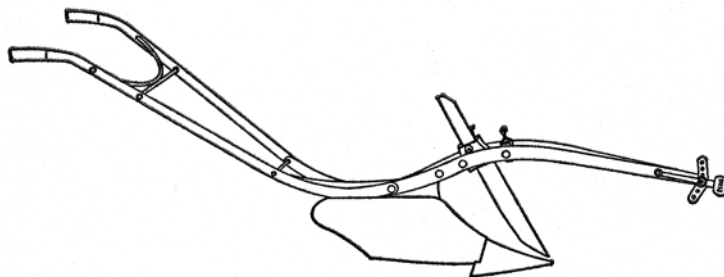




Institutionen för
Markvetenskap
Uppsala

MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

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



Nr 45

2003

Karin Gustafsson

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

*Draught requirement with moldboard plough,
chisel plough and disc harrow at different soil
moisture contents*

ISSN 1102-6995
ISRN SLU-JB-M--45--SE

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	3
SUMMARY.....	4
1. INLEDNING.....	5
2. JORDENS HÅLLFASTHET OCH DEFORMATION.....	5
2.1 NORMAL- OCH SKJUVSPÄNNINGAR	6
2.2. SKJUVHÅLLFASTHET	6
2.3 PENETRATIONS MOTSTÅND	8
2.4 KONSISTENSGRÄNSER	8
2.4.1 <i>Bearbetbarhet</i>	9
2.4.2 <i>Plasticitet</i>	9
3. REDSKAPENS ARBETSSÄTT.....	10
3.1 OLIKA BROTT	10
3.1.1 <i>Skjuvningsbrott</i>	10
3.1.2 <i>Plastisk deformation</i>	11
3.1.3 <i>Sprickbildning</i>	12
3.2 TVÅDIMENSIONELLT BROTT	12
3.3 TREDIMENSIONELLT BROTT	12
3.4 ANGREPPSVINKEL	14
3.5 PLOG	15
3.6 KULTIVATOR.....	16
3.7 TALLRIKSREDSKAP.....	16
4. HASTIGHET OCH BEARBETNINGSDJUP	17
4.1 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ DRAGKRAFTBEHOVET	17
4.2 ARBETSDJUPETS INVERKAN PÅ DRAGKRAFTBEHOVET	18
5. BEARBETNINGENS SYFTE.....	18
5.1 AGGREGATSTORLEKAR/ SÖNDERDELNING	18
5.1.1 <i>Olika breda blad</i>	19
5.1.2 <i>Hastighet</i>	19
6. SYFTE EXAMENSARBETE.....	19
7. MATERIAL OCH METODER	20
7.1 FÖRSÖKSPLATSER	20
7.2 FÖRSÖKSLED	21
7.3 MÄTNING OCH BERÄKNING AV EFFEKTBEHOV	21
7.3.1 <i>Mättraktor</i>	21
7.3.2 <i>Slirning och rullningsmotstånd</i>	22
7.4 BERÄKNING AV DRAGKRAFTBEHOV	23
7.4.1 <i>Verkligt bearbetningsdjup</i>	23

7.5 BEARBETNINGSRISULTAT	23
7.5.1 Sönderdelningsgrad	23
7.5.2 Energibehov för sönderdelning	23
7.6 MÄTNING AV JORDENS HÄLLFASTHET	24
7.6.1 Kohesionsmätningar	24
7.6.2 Penetrationsmotstånd	24
7.7 EXTRA KÖRNINGAR	25
7.8 DROP-SHATTER TEST	25
8. RESULTAT	27
8.1 SPECIFIKT DRAGKRAFTBEHOV	27
8.2 INSTÄLLT OCH VERKLIGT BEARBETNINGSDJUP	28
8.3 TOTALT DRAGKRAFTBEHOV	29
8.4 SLIRNING	29
8.5 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	32
8.6 HASTIGHETENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT	32
8.7 REDSKAPENS, BEARBETNINGSDJUPETS OCH VATTENHALTENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT	32
8.8 ENERGIBEHOVET FÖR SÖNDERDELNING	34
8.9 KOHESIONENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	36
8.10 VATTENHALTENS BETYDELSE FÖR KOHESIONEN	36
8.11 VATTENHALTENS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	36
8.12 PENETRATIONS MOTSTÅNDETS INVERKAN PÅ SPECIFIKA DRAGKRAFTBEHOVET	36
8.13 DROP-SHATTERTEST	38
9. DISKUSSION	39
SPECIFIKT DRAGKRAFTBEHOV	39
TOTALT DRAGKRAFTBEHOV	40
SLIRNING	41
HASTIGHETENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT	41
REDSKAPENS, BEARBETNINGSDJUPETS OCH VATTENHALTENS INVERKAN PÅ ANDELEN STORA AGGREGAT	41
ENERGIBEHOVET FÖR SÖNDERDELNING	42
HÄLLFASTHET	42
DROP-SHATTERTEST	43
10. SLUTSATSER	44
LITTERATUR	45

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 pto-effekten 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}]. 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.

Summary

Because of fuel consumption, machinery and labour costs, tillage involves high expenses. In a project that was carried out in the autumn of 2001 and 2002, energy consumption and draught were studied for three tillage implements on a lighter and a heavier soil under wet, moist and dry conditions. Furthermore, aggregate size distribution and energy requirement for fracturing the soil were measured. The tillage implements used were mouldboard plough, chisel plough and disc cultivator. The effects of driving speed and depth of tillage were also studied. Soil strength was measured with both a penetrometer and a shear vane apparatus.

The tractor used was a Valmet 6600 (100 hp) with equipment for measuring fuel consumption. The equipment was calibrated to give the PTO effect for any combination of fuel consumption and engine speed, and this was assumed to be the same as the effect available at the tractor wheels. The “towbar power” was calculated by subtraction of power losses through wheel slip and rolling resistance. Average actual working depth was calculated by measuring bulk density before tillage and then weighing the cultivated soil. On the basis of the tillage depth and PTO effect measurements, it was possible to calculate energy requirement per kg cultivated soil and specific draught. The latter is defined as force per cross-sectional area cultivated soil [kN/m²]. After sieving samples of the cultivated soil, the approximate surface area of the fragmented soil and the energy requirement for fracturing were computed.

Specific draught was lowest for the mouldboard plough, while the highest values were obtained for the chisel plough. Specific draught decreased with increasing soil water content. The lowest values of energy requirement for fracturing were measured under moist conditions for all tillage implements, and the disc cultivator produced the highest fracturing in relation to energy input. Both specific draught and energy requirement for fracturing were lower for the lighter soil.

With the disc cultivator, specific draught increased with working depth, while depth had no influence on specific draught when the mouldboard plough was used. Some of these differences can be explained by differences in geometry between the tools.

There was a tendency for specific draught to increase with increased driving speed. This was most obvious on the lighter soil and for the mouldboard plough. The increased draught can be explained by a higher acceleration of soil particles and by increased soil strength because of higher deformation rate.

Soil strength and thereby draught requirement differed between soils and moisture contents. There was a strong correlation between soil cohesion and draught requirement, and cohesion was easily measured in the field with a shear vane. The penetrometer measurements did not correlate with draught measurements.

Specific draught was lowest for the mouldboard plough. When considering the overall results of tillage, no one implement can be identified as being the most effective. Tillage at a water content close to the plastic limit seems to be a good compromise as regards draught requirement and tillage result.

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, et al. 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. Efterföljande avsnitt handlar om redskapets arbets sätt och hur olika faktorer inverkar på dragkraftbehovet. Avslutningsvis behandlas 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 ren 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, et al. 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 (Spoor, 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).

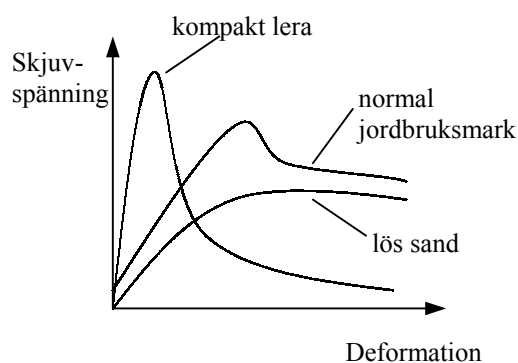


Fig 1. Deformation och skjuvspänning för olika jordar (Spoor, 1975)

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 (Spoor, 1975). Kohesion är attraktionskrafter mellan jordpartiklar (Baver et. al., 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 vattenhållsförhållanden 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 et. al., 1972, Yong, 1975).

Förutom attraktion mellan partiklar finns attraktionskrafter mellan den flytande fasen till ytan på den fasta fasen (Baver et al., 1972). Dessa attraktionskrafter benämns adhesion. Vattenmolekylerna kan både attraheras till ytan på jordpartiklar och till t.ex. redskap som går genom jorden.

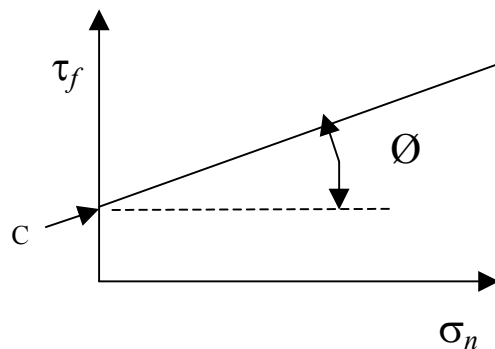


Fig 2. Coulombs modell över sambandet mellan normalspänning (σ_n) och jordens skjuvhållfasthet (τ_f). Då det inte verkar någon normalspänning är skjuvhållfastheten lika med jordens kohesion (C).

Payne (1956) fann att kohesionen är den parameter som har störst inverkan på dragkraftbehovet 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 dragkraftbehovet 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 & Warketin, 1975).

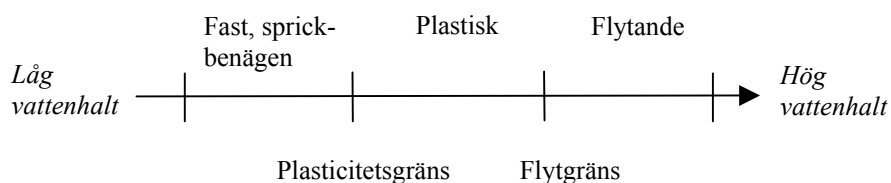


Fig 3. Schematisk bild över konsistensgränserna hos en jord vid olika vattenhalter (Dexter & Arvidsson, 2002).

2.4.1 Bearbetbarhet

En jords bearbetbarhet säger hur lätt det är att sönderdela jorden (Baver et. al., 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 et. al., 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 et. al., 1972., Yong & Warkentin, 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 et. al., 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 & Warkentin, 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 et. al., 1972). Både plasticitetsgränsen och plasticitetsindex ökar med ökande lerhalt.

De utbytbara katjonerna har en betydande inverkan på plasticiteten (Baver et. al., 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 et. al., 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 plasticitiesindex är oförändrat eller minskar (Baver et. al., 1972, Kézdi, 1974). Exempel finns från en jord vars mullhalt sjönk från 3,9 % till 2,6 % under en 60-årsperiod (Baver et. al., 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 arbetssätt

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).

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.

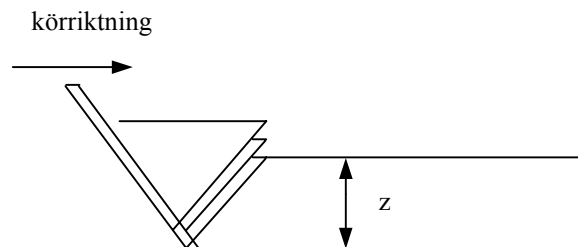


Fig 4. Skjuvningsbrott, jordbitarna som skjuvas loss glider längs pinnen och rör sig uppåt och framåt (Aluko & Sieg, 2000).

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 & Warkentin, 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.

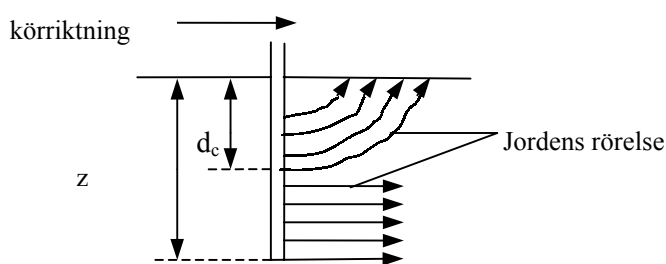


Fig 5. Vid plastisk deformation, under ett visst kritiskt djup, d_c , ändras jordens rörelse från uppåt framåt till en rörelse i sidled (Aluko & Sieg, 2000). Under det kritiska djupet trycks jorden ihop istället för att luckras.

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 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 uppbrytning 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 uppbrytning 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 V-formad från spetsen och uppåt. Om bearbetningsdjupet överstiger det kritiska djupet kommer tvärsnittsarean att bli V-formad ner till det kritiska djupet (fig 7).

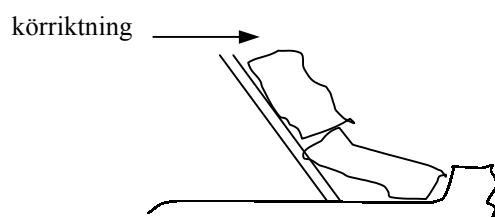


Fig 6. Sprickbildning, sprickorna uppträder relativt oregelbundet och uppstår där hållfastheten är som lägst.

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.

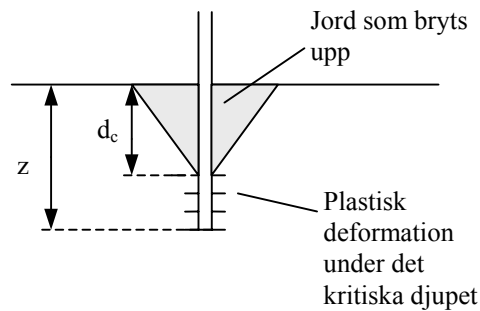


Fig 7. Jorden som bryts upp på sidorna av en pinne utgör en ganska stor andel av den uppbrutna jorden (Dexter & Arvidsson, 2002).

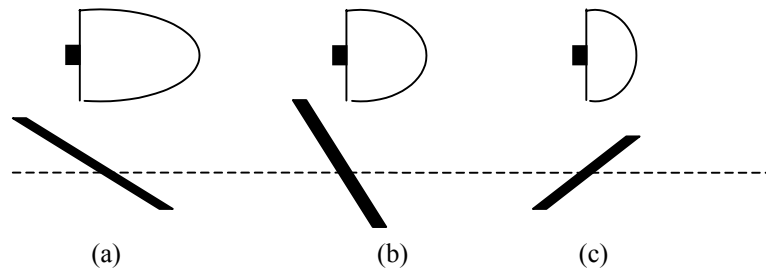


Fig 8. Schematisk bild över hur jorden bryts i form av en halvmåne framför pinnen (Payne & Tanner, 1959). Vid små angreppsvinklar (a) blir formen mer långsträckt än vid större angreppsvinklar (b), (c).

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 et al. 1993, Payne & Tanner, 1959). Vid små angreppsvinklar (mindre än 45°) kommer jorden att lyftas och partiklar separeras genom sprickbildning (Davies et al. 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 jordkotor (Davies et al. 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 kotor bättre än pinnar med liten angreppsvinkel. Exakt vilken angreppsvinkel som ger det lägsta dragkraftbehovet kan skilja sig mellan olika jordar (McKyes, 1989).

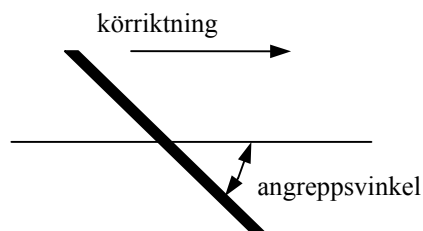


Fig 9. Angreppsvinkeln är vinkeln mellan pinnens del i marken och markytan.

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). 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 uppbrytning. 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). Uppbrytningen 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 uppbrytningen 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 uppbrytningen 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 uppbrytningen 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 uppbrytningen och vändningen.

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

3.6 Kultivator

Kultivatoren bearbetar även jorden på sidorna om pinnen, s.k. tredimensionellt och med en större angreppsvinkel än plogen. Uppbrytningen 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 uppbyggnad av en tallrik är mycket komplex och har inte undersökts i samma utsträckning som t.ex. pinnens (Godwin et al. 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 tallrikens 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 tallrikens kurvatur, samt av arbetsdjupet. Vid ett stort arbetsdjup kommer den kritiska skärvinkeln att vara större än vid ett mindre arbetsdjup. Vid bearbetning kommer varje tallrik att lämna en fåra i bearbetningsbotten samt mer eller mindre tydliga åsar mellan dessa (Klenin et al. 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 et al. 1985, Klenin et al. 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 et al. 1985). Penetrationsförmågan hos en tallrik ökar om denna lutar något från det vertikala planet (Klenin et al. 1985, Hettiaratchi & Alam, 1997). Vinkeln mellan vertikala planet och tallriken kallas för tiltvinkel.

Angreppsvinkeln hos en tallrik påverkas av arbetsdjup, skärwinkel, tiltwinkel, samt av tallrikenes kurvatur och är därför svår att bestämma exakt. Där angreppsvinkeln behövs i olika beräkningsmodeller används i regel en approximation (Godwin et al. 1985, Hettiaratchi, 1997)

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

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 et. al. 1993).

Största förklaringen till att dragkraftbehovet ökar med ökad hastighet ligger i att jordens hållfasthet ökar med ökad deformationshastighet (Flenniken, et. al. 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.

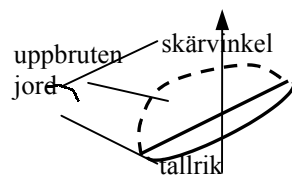


Fig 10. Skärwinkel hos en tallrik (Godwin et al. 1985).

Deformationshastigheten påverkar även vilken typ av deformation som sker (Flenniken et. al. 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 et. al., 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 uppbrytningen 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 et al., 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. Syfte examensarbete

Examensarbetet 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.

7. Material och metoder

7.1 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. På den lättare jorden gjordes mätningarna på tre olika platser: SVA, Säby 1 och Säby 2. 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 tillsammans 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.

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	0,219 g g ⁻¹
2001-09-14	SVA	blött	0.18 g g ⁻¹	-
2002-10-30	Säby 2	fuktigt	0.28 g g ⁻¹	0,266 g g ⁻¹
2002-08-15	Säby 1	torrt	0.22 g g ⁻¹	0,269 g g ⁻¹

Tabell 2. Kornstorleksfördelning (g 100g⁻¹)

	Klass	Ler	Fmj*	Gmj*	Fmo*	Gmo*	Ms*	Gs*	Mull
Ån 2001	mfSL	41.7	13.4	11.6	8.9	14.5	4.8	0.7	1.5
Ån 2002	mfML	29.45	10.1	10.05	10.5	26.2	8.3	1.15	1.8
SVA	mflSa	13.5	4.5	4	5.6	28.1	40.3	1.6	1.2
Säby 1	mmhLL	19.7	6.1	9.5	30.4	27.7	0.4	0.2	4.1
Säby 2	mmhLL	23.3	6.8	10.6	32.9	20.1	0.5	0.3	3.4

*Fmj=finmjäla, Gmj=grovmjäla, Fmo=finmo, Gmo=grovmo, Ms=Mellansand, Gs=grovsand.

7.2 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 mätillfällen, vilket framgår av tabellen. För alla led 2001 och för led B och E 2002 jämfördes tre olika hastigheter:

$$1 = 4 \text{ km h}^{-1}$$

$$2 = 6 \text{ km h}^{-1}$$

$$3 = 9 \text{ km h}^{-1}$$

7.3 Mätning och beräkning av effektbehov

7.3.1 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 motorvarvtal och bränsleförbrukning mättes kontinuerligt. Utifrån dessa mätningar och med hjälp av sk multipel linjär regressionsanalys togs en formel fram där en effekt motsvarande pto-effekten kunde räknas fram utifrån de registrerade värdena. Uträkningarna skedde i dataprogrammet Easy View.

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

Parametrarna registrerades kontinuerligt i loggern under körning och pto-effekten kunde beräknas för olika moment. 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_{slim}) och rullningsmotstånd (P_{rull}) räknades den nyttiga ”dragkrokseffekten” ut. Pto-effekten minskades med slirningen i procent enligt:

$$P_{pto} - P_{slim} = P_{pto} \left(1 - \frac{S}{100} \right) \quad (\text{Saleque, 1990})$$

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 pto-effekten 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: $f = \frac{k}{G}$

7.4 Beräkning av dragkraftbehov

7.4.1 Verkligt bearbetningsdjup

Före bearbetningen togs cylindrar ut i rutorna för bestämning av den blöta skrymdensiteten. En stålram med ytan 0,25 m² slogs ner i varje ruta efter bearbetning och 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 extradjupe som diagonalkörningen bidrog till användes för dragkraftberäkningarna.

7.5 Bearbetningsresultat

7.5.1 Sönderdelningsgrad

Från varje ruta togs en hink med lös jord från den bearbetade jordvolymen. Jorden 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.

7.5.2 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.

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

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

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 antogs 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.

7.6 Mätning av jordens hållfasthet

7.6.1 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:

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

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.

7.6.2 Penetrationsmotstånd

För att undersöka hur markens penetrationsmotstånd inverkade 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.

7.7 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.

7.8 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, 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 $E = E^* / m$ ($J\ kg^{-1}$). 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 jordkolor och inte för att jämföra olika vattenhalter. Ursprungligen är testet framtaget för att testa hållfastheten hos kol (Gill & McCreery, 1960). Drop-shatter-metoden mäter inte totalenergi 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 $<16 \text{ mm}$.

8. Resultat

8.1 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 4 och fig 11.

Bearbetningsdjupets inverkan på det specifika dragkraftbehovet var inte lika tydligt. För plogen har bearbetningsdjupet inte inverkat mycket på det specifika dragkraftbehovet. Det är bara för "Ån blött" som skillnaderna är signifikanta, se tabell 4. 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 dragkraftbehovet ökade i regel med ökat bearbetningsdjup, se tabell 4.

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 kultivatoren på diagonalen var i samtliga fall signifikant högre än för de övriga bearbetningarna. Den grunda bearbetningen med kultivatoren till 9 cm krävde lägre specifikt dragkraftbehov än de djupare bearbetningarna, men skillnaden var inte signifikant.

Tabell 4. Specifikt dragkraftsbehov [kN/m^2]

		Ån			Säby		
Redskap och inställt 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
diagonal	17		331.0a	560.4a		508.3a	
gåsfötter	13		138.5b			64.6b	
Tallrik		70.3d	87.8c	214.2de	52.8	74.2b	78.2c
Sign		***	***	***	***	***	***

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

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 vid SVA och 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.

8.2 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 5. För kultivatoren var det verkliga bearbetningsdjupet som högst under blöta förhållanden vid SVA 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.

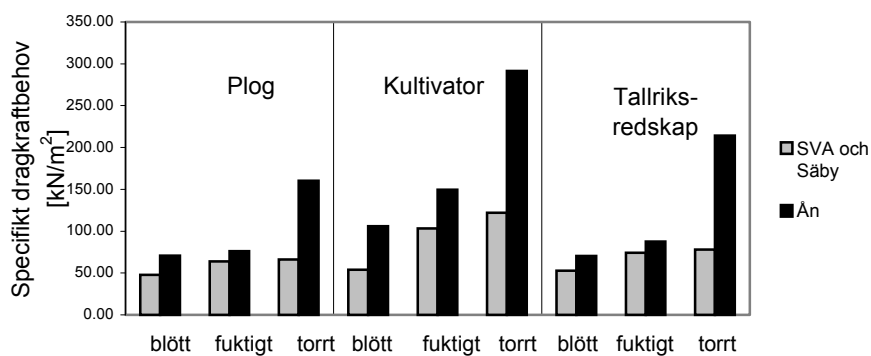


Fig 11. Specifikt dragkraftbehov för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt (hastighet 6 km/h, inställt bearbetningsdjup 17 cm för plog och kultivator).

Tabell 5. Inställt och verkligt bearbetningsdjup [cm] för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt

Redskap och inställt djup	Ån			Säby			
	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.

8.3 Totalt dragkraftbehov

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

8.4 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. Skillnaderna mellan mätplatserna försvårar dock en jämförelse.

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

		Ån			Säby		
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		***	***	***		***	***

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

Tabell 7. Slirning [%] för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt

		Ån			Säby		
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		***	***	***		***	***

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

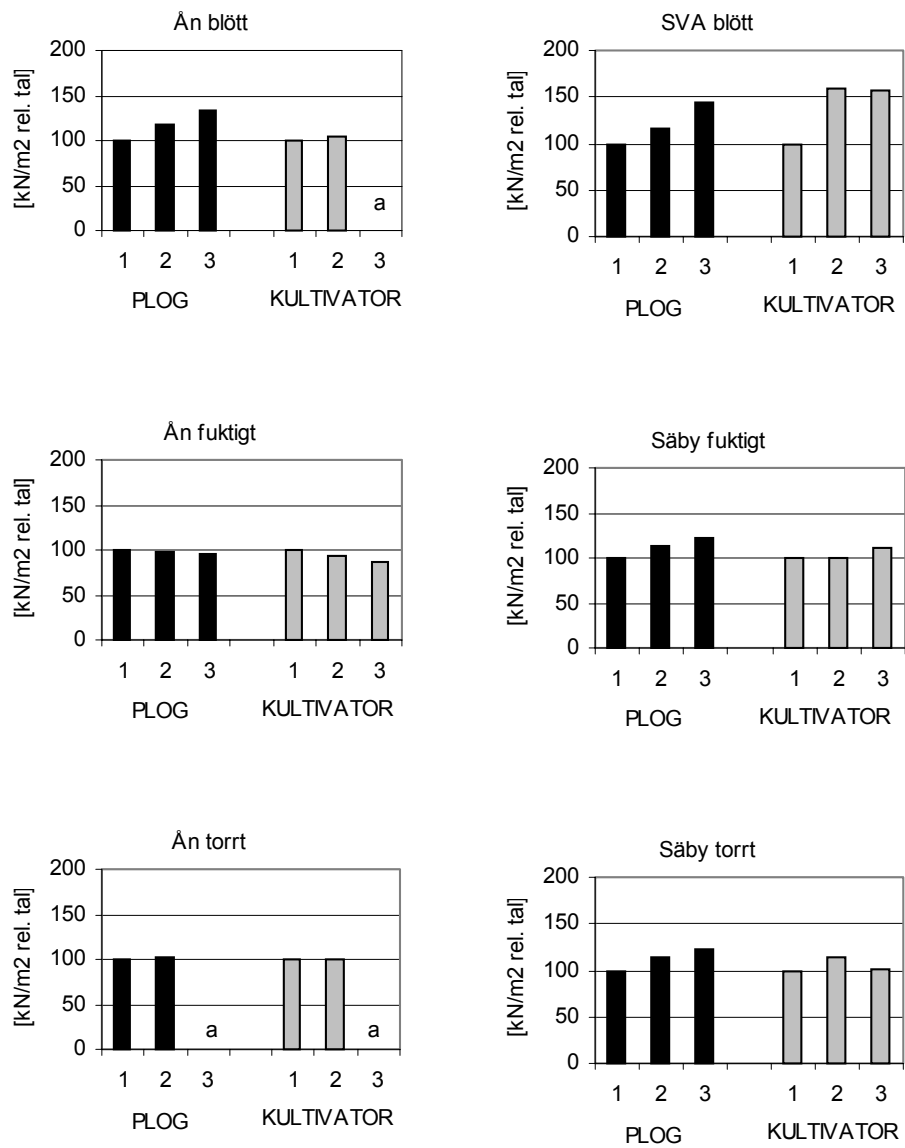


Fig 12. Hastighetens inverkan på det specifika dragkraftbehovet uttryckt som relativa tal där hastighet 1 är satt till 100 för både plojen och kultivatorn. Siffrorna står för de önskade hastigheterna som var: 4km/h=1, 6km/h=2 och 9km/h=3 Några staplar saknas (a) där hastigheten sjönk kraftigt under hela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

8.5 Hastighetens inverkan på specifika dragkraftbehovet

Generellt ökade det specifika dragkraftbehovet med ökad hastighet. Sambandet var tydligast för plog på SVA och 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 som relativa tal för varje tillfälle i figur 12.

8.6 Hastighetens inverkan på andelen stora aggregat

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

8.7 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 kultivatorn finns inget liknande mönster. Försöksplatserna SVA (blött) och Säby (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.

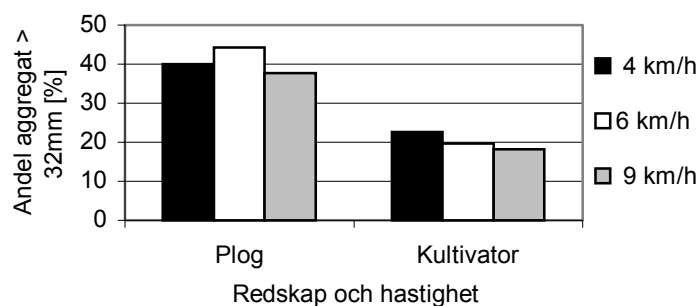


Fig 13. Andelen aggregat > 32mm vid olika körhastighet för plog och kultivator. Medel från samtliga körningar 2002, bearbetningsdjup 17 cm.

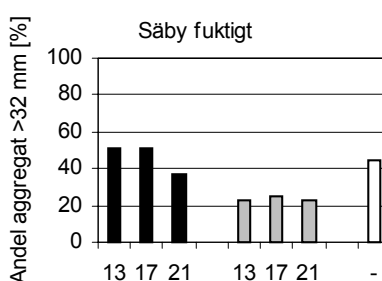
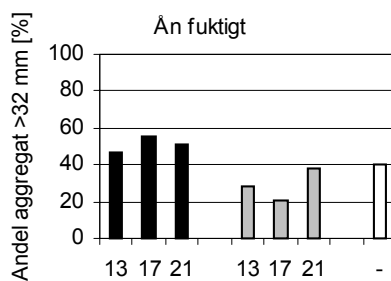
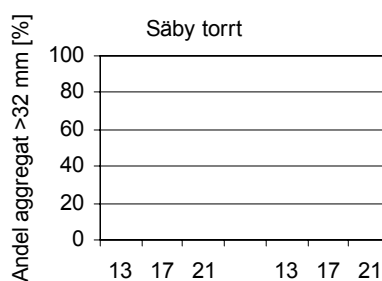
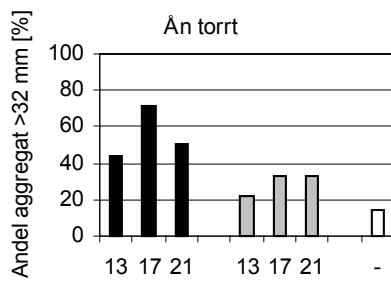
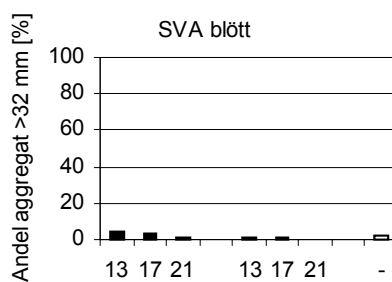
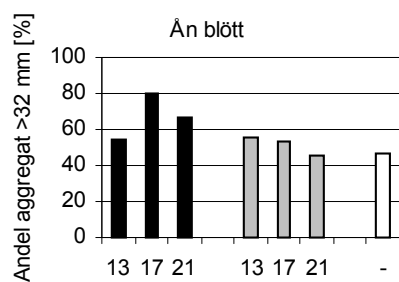


Fig 14. Andel stora aggregat vid olika jordart, vattenhalt, redskap, samt bearbetningsdjup. Svarta staplar = plog, grå staplar = kultivator och vita staplar = tallriksredskap, siffrorna står för inställt arbetsdjup.

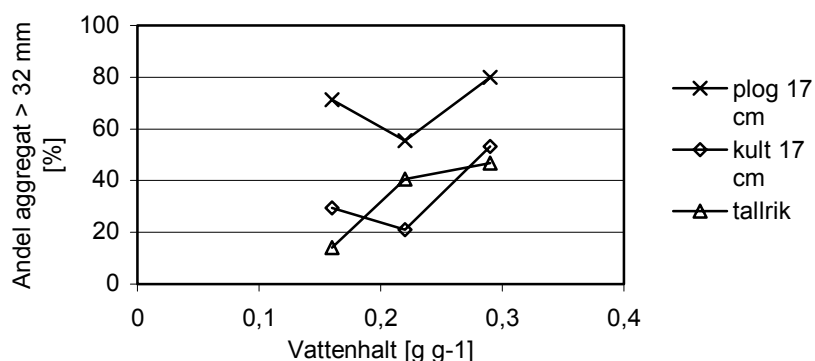


Fig 15. Andel aggregat > 32 mm vid olika vattenhalt och bearbetning vid mätplats Ån.

8.8 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.

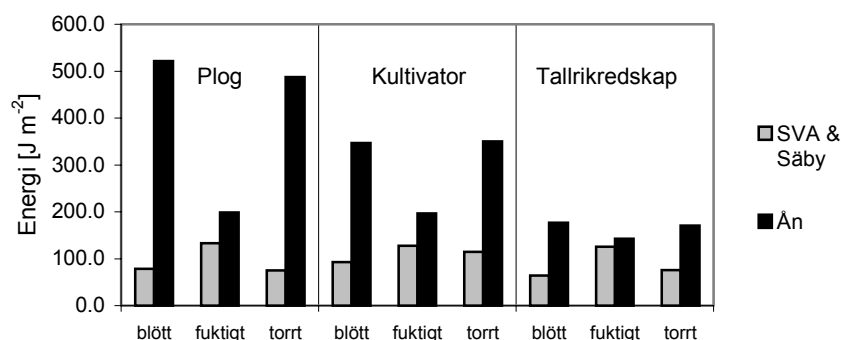


Fig 16. Energibehovet för sönderdelning för olika redskap på lätt resp. styv jord vid olika vattenhalt. (hastighet 6 km/h, inställt bearbetningsdjup 17 cm för plog och kultivator)

Energiinsatsen för sönderdelning för samtliga led visas i tabell 8. Sållningsdata saknades för hastigheterna 1 och 3, 2001 och skillnaderna i sönderdelningsenergi för olika hastigheter 2002 blev inte signifikanta.

Tabell 8. Energibehov för sönderdelning [$J m^{-2}$]

Redskap och inställt djup		Ån			Säby		
		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
<i>gåsfötter</i>	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.	***

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

8.9 Kohesionens inverkan på specifika dragkraftbehovet

Det uppmätta specifika dragkraftbehovet för plöjning till ca 20 cm på olika platser plottades mot den uppmätta kohesionen vid samma tillfälle, se 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.

8.10 Vattenhaltens betydelse för kohesionen

Kohesionen för de olika jordarna plottades mot vattenhalten vid samma tillfälle och räta linjer anpassades till punkterna, se fig. 18. Samtliga R^2 -värden blev höga. 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 plats-specifikt, vilket syns tydligt på hur linjerna ligger på olika nivåer i diagrammet.

8.11 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.

8.12 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.

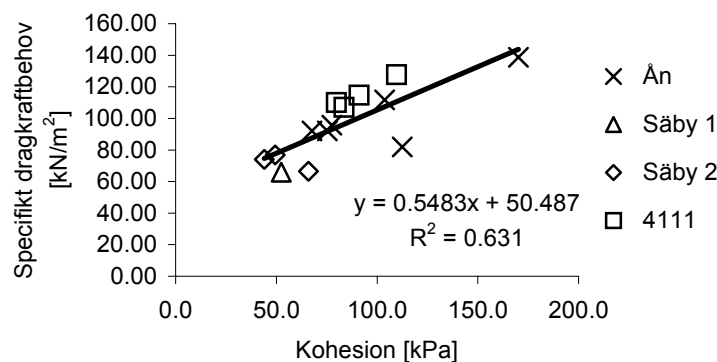


Fig 17. Specifikt dragkraftbehov för plöjning som funktion av jordens kohesion.

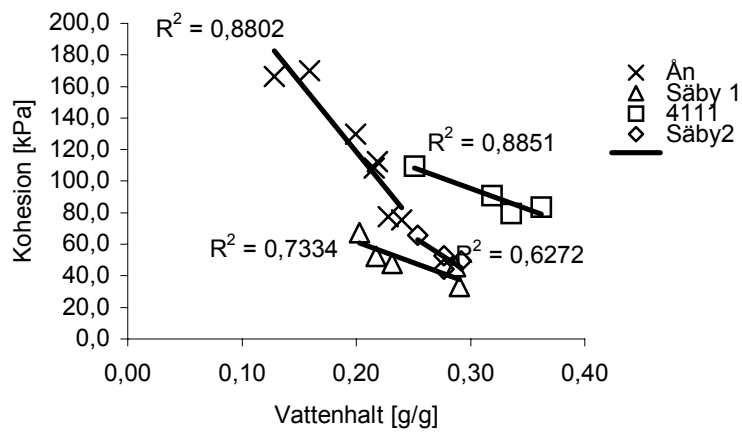


Fig 18. Kohesion som funktion av jordens vattenhalt för de olika mätplatserna.

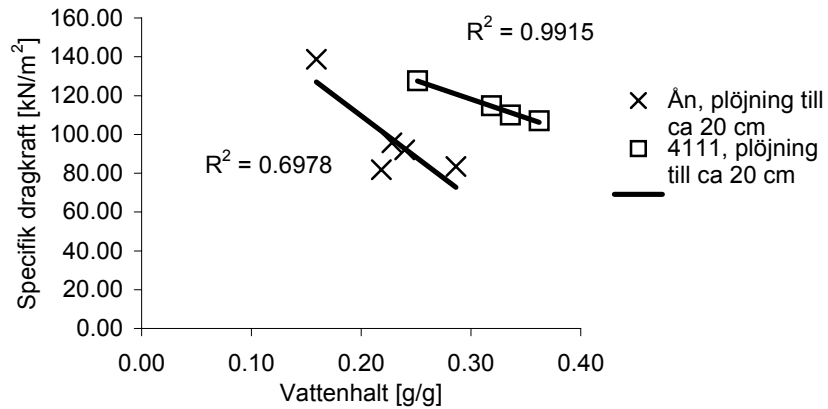


Fig 19. Specifikt dragkraftbehov för plöjning som funktion av jordens vattenhalt.

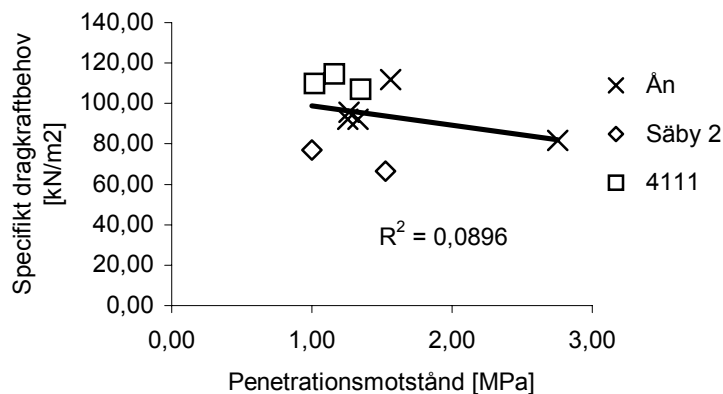


Fig 20. Specifikt dragkraftbehov för plöjning som funktion av jordens penetrationsmotstånd.

8.13 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".

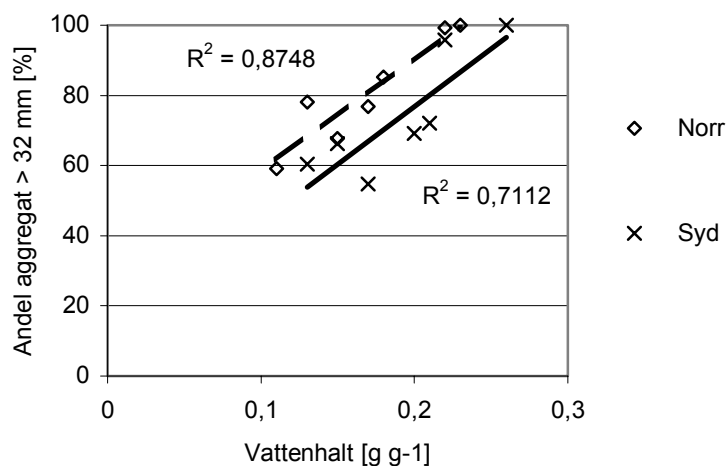


Fig 21. Andel stora aggregat (>32mm) vid olika vattenhalt, resultat från drop-shattertest. Jorden hämtades vid Ån från två olika platser där Norr hade något lägre lerinnehåll än Syd.

9. Diskussion

Specifikt dragkraftbehov

Det specifika dragkraftbehovet blev lägre i de plöjda leden än i de kultiverade. Detta förklaras till stor del av att plojen bröt upp jorden på ett mindre energikrävande sätt än kultivatoren. Det verkliga arbetsdjupet för plojen 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 innebar 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. Plojen och kultivatoren skiljer sig åt i sitt sätt att bryta upp jorden. Plojen arbetar med en mycket liten angreppsvinkel och skär loss jorden längs bearbetningsbotten. Jorden bryts upp lika brett som vändskivans 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 kultivatorn 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 SVA och Säby. Detta beror troligen på att plogen 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 kultivatorn gå mycket lättare än plogen. Ofta sker plöjning till ett större inställt djup än kultivering och kultivatorn 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 två till tre gånger så högt som för kultivering. Den största skillnaden ligger dock i att kultivatorn inte

bearbetar lika mycket jord som plogen. Med andra ord kan även plogen 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 måttillfällena 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 et. al., 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 ”SVA 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 ”SVA 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 betydelse för bearbetningsresultatet eftersom jordens uppbyggnad 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 g g⁻¹ var jorden vid Ån fuktig, medan jorden på Säby 1 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 troligen kohesionen 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.

Skillnaden mellan platserna "Ån Norr" och "Ån Syd" där andelen stora aggregat var högre för "Ån Norr" än för "Ån Syd" vid samma vattenhalt kan förklaras med att platserna har olika lerhalt. Lerinnehållet var högre för "Ån Syd", vilket innebär att jorden kan innehålla mer vatten utan att vara blöt än en jord med ett lägre lerinnehåll. Vid samma vattenhalt kan därför jorden från "Ån Norr" anses blötare än den från "Ån Syd", vilket därmed leder till en högre sönderdelning för "Ån Syd" vid drop-shattertestet.

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.

10. 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. et. al. 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. *Calculation, 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 Soil Mechanics*. 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.