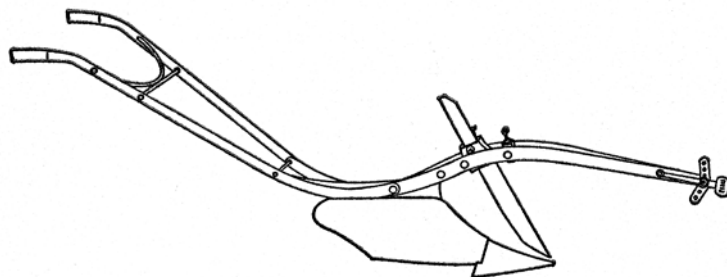




Institutionen för  
Markvetenskap  
Uppsala

# MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

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



Nr 51

2006

Olov Hillerström

**Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat  
för olika kultivatorspetsar**

*Draught requirement and tillage result for different  
cultivator shares*

ISSN 1102-6995

ISRN SLU-JB-M--51--SE



## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
Summary .....	5
1 Inledning .....	7
2 Jorden .....	7
2.1 Hållfasthet .....	7
2.2 Skjuvhållfasthet och kohesion .....	8
2.3 Penetrationsmotstånd.....	9
2.4 Bearbetbarhet .....	9
3 Jordbearbetning .....	9
3.1 Bearbetningens syfte .....	9
3.2 Sönderdelning .....	10
3.3 Angreppsvinkel.....	11
3.4 Olika brott.....	11
3.4.1 Skjuvningsbrott.....	12
3.4.2 <i>Plastisk deformation och kritiskt arbetsdjup</i> .....	12
3.4.3 <i>Sprickbildning</i> .....	13
3.4.4 <i>Tvådimensionellt brott</i> .....	14
3.4.5 <i>Tredimensionellt brott</i> .....	14
3.5 Plogkroppar .....	15
3.6 Kultivatorpinnar och gåsfötter .....	15
4 Modeller för beräkning av dragkraft .....	16
5 Examensarbetets syfte .....	18
6 Material och metoder .....	19
6.1 Mättraktor .....	19
6.2 Mätutrustning.....	19
6.3 Försöksplatser.....	21
6.3.1 <i>Olika typer av spetsar</i> .....	21
6.3.2 <i>Olika bredd spetsar</i> .....	21
6.4 Försöksled .....	21
6.4.1 <i>Olika typer av spetsar</i> .....	21
6.4.2 <i>Redskap i försök med olika typer av spetsar</i> .....	22
6.4.3 <i>Olika bredd spetsar</i> .....	24
6.4.4 <i>Redskap i försök med olika bredd spetsar</i> .....	24
6.5 Mätning av jordens hållfasthet .....	24
6.5.1 <i>Kohesion</i> .....	24
6.6 Bestämning av bearbetningsdjup .....	25
6.7 Sönderdelning .....	25
6.8 Halminblandning mätt med bildanalys .....	26
6.9 Halminblandning bedömt visuellt .....	27
6.10 Beräkning av dragkraftbehov .....	27
6.10.1 <i>Rullningsmotstånd</i> .....	27
6.10.2 <i>Slirning</i> .....	28
6.10.3 <i>Dragkrokseffekt</i> .....	28
6.10.4 <i>Totalt dragkraftbehov</i> .....	28
6.10.5 <i>Specifikt dragkraftbehov</i> .....	29

6.10.6	<i>Beräkning av dragkraft med modeller</i> .....	29
<b>7</b>	<b>Resultat</b> .....	<b>30</b>
7.1	Bearbetningsdjup .....	30
7.1.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	30
7.1.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	31
7.2	Specifikt dragkraftbehov .....	31
7.2.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	31
7.2.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	31
7.3	Totalt dragkraftbehov .....	33
7.3.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	33
7.3.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	33
7.4	Aggregatstorleksfördelning .....	35
7.4.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	35
7.4.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	35
7.5	Yta per kilo bearbetad jord .....	37
7.5.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	37
7.5.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	37
7.6	Energibehov för sönderdelning .....	39
7.6.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	39
7.6.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	39
7.7	Halminblandning mätt med bildanalys .....	41
7.7.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	41
7.8	Halminblandning bedömt visuellt .....	42
7.8.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	42
7.9	Dragkraftbehov beräknat med modeller .....	44
7.9.1	<i>Olika typer av spetsar</i> .....	44
7.9.2	<i>Olika bredd spetsar</i> .....	45
<b>8</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>46</b>
8.1	Bearbetningsdjup .....	46
8.2	Specifikt dragkraftbehov .....	46
8.3	Totalt dragkraftbehov .....	47
8.4	Aggregatstorleksfördelning .....	48
8.5	Halminblandning .....	48
8.6	Dragkraftbehov beräknat med modeller .....	49
<b>9</b>	<b>Källförteckning</b> .....	<b>50</b>
<b>10</b>	<b>Bilaga</b> .....	<b>52</b>

## Sammanfattning

Reducerad bearbetning är något som ökar bland de svenska lantbrukarna idag, mycket på grund av den allt sämre lönsamheten i växtodlingen. Inom den reducerade bearbetningen används ofta någon typ av kultivator. Det finns en mängd olika sorters kultivatorspetsar att välja mellan.

För att underlätta valet av spetsmodell utfördes under hösten 2005 försök där dragkraftbehov och bearbetningsresultat studerades för olika typer av spetsar.

Ett försök med olika typer av spetsar utfördes på en styv jord med 50 % ler och på en lätt jord med 19 % ler. De testade spetsarna var rak spets, 80 mm bred, sliten 80 mm, 80 mm med vingskår, 210 mm och gåsfot. Några av spetsarna kördes med olika djupinställningar. Dessutom ingick körning med en kultivator med fjädrande pinnar och en plog.

I det andra försöket jämfördes spetsar med olika bredd, och utfördes på styv jord.

I varje led studerades specifikt dragkraftbehov (kraft per tvärsnittsarea) och totalt dragkraftbehov (kraft per meter arbetsbredd). Alla körningar gjordes med en Massey Ferguson 6290 utrustad med ett bränslemätningssystem. En datalogger registrerade kontinuerligt traktorns PTO-effekt, hastighet, motorvarvtal m.m. För att få fram dragkrokseffekten fick det registrerade värdet justeras genom att dra ifrån effektförluster för slirning och rullningsmotstånd. Med hjälp av den verkliga hastigheten (mätt med radar) räknades dragkrokseffekten om till dragkraft. Det verkliga bearbetningsdjupet mättes genom att en stålram med arean  $0,25 \text{ m}^2$  placerades i försöksrutorna och all lös, bearbetad jord vägdes. Skrymdensiteten mättes och därefter kunde djupet räknas fram.

När det verkliga bearbetningsdjupet, redskapens arbetsbredd och dragkraften var kända, kunde det specifika dragkraftbehovet räknas fram.

Jord sparades från alla led och sållades senare till sex fraktioner, för att kunna räkna fram den sammanlagda partikelytan per kg jord. Därav gavs ett mått på redskapens och spetsarnas sönderdelning. Energibehovet för sönderdelning räknades också fram med hjälp av den sammanlagda partikelytan. Halminblandningen bedömdes visuellt och mättes med bildanalys. I försöket med olika breda spetsar gjordes ingen bedömning av halminblandning.

Några av de uppmätta värdena på dragkraftbehovet jämfördes med värdena uträknade med hjälp av modeller.

På den styva jorden blev det verkliga bearbetningsdjupet grundare än det inställda för alla leden utom det grunda gåsfotledet och det plöjda ledet. När det gäller den lätta jorden hade det plöjda ledet, det grunda gåsfotledet och ledet med 210 mm bred spets ett större verkligt bearbetningsdjup än det inställda. Det visade sig att det verkliga bearbetningsdjupet ökade med en ökad spetsbredd.

80 mm och 210 mm spetsarna hade det största specifika dragkraftbehovet på den styva jorden. Plogen och det grunda gåsfotsledet hade det minsta specifika dragkraftbehovet. På den lätta jorden var det den slitna 80 mm som hade det största

specifika dragkraftbehovet. Det grunda ledet med gåsfoten hade det minsta. Det specifika dragkraftbehovet ökade med en ökad spetsbredd.

Plogen brukade ner halmen bäst, sämst var det grunda gåsfotsledet.

Jämförelserna mellan mätta värden på dragkraftbehov och beräknade stämde inte särskilt bra. Modellen överskattade dragkraftbehovet för plogen och underskattade det för kultivatorn.

Undersökningen visade att både dragkraftsbehov och bearbetningsresultat varierade kraftigt mellan spetstyperna. Fortsatta undersökningar skulle därför vara av stort värde, både för maskintillverkare och för jordbrukare.

## Summary

Reduced tillage is increasing among Swedish farmers, much caused by a poor profitability in cropping. In many cases the mouldboard plough is replaced by a shallow tillage implement, often a stubble cultivator. The cultivator has got tines, which consist of a shank and a share. There are many different kind of shares to choose from.

To make the decision of the share model easier, a project was performed during the autumn of 2005 where draught requirement and tillage outcomes were studied for different kinds of shares. In a first project, different kinds of shares were tested on one heavy soil (50 % clay) and on one light soil (19 % clay). The tested shares were 80 mm, worned 80 mm, 80 mm winged, 210 mm and sweep. The remaining treatments were a stubble cultivator with vibrating tines and one mouldboard plough.

In the second project shares with different width were compared on heavy soil (50 % clay).

In all tests the specific ( $\text{kN/m}^2$ ) and total ( $\text{kN/m}$ ) draught requirement was determined. Every test was done with a Massey Ferguson 6290 equipped with a fuel measuring system. A data logger continually registered the PTO-effect, wheel speed, radar speed and engine speed. The drawbar power was calculated by subtracting power losses through wheel slip and rolling resistance. The draught requirement was calculated by dividing with the actual (radar) speed. The total draught requirement was calculated by dividing the draught with the working width. The actual working depth was measured by the help of a metal frame, with an area of  $0,25 \text{ m}^2$ , which was placed in the tilled plot, and in which all of the tilled soil was weighed. By measuring the bulk density the actual working depth could be calculated.

When the actual working depth, the working width of the implement and the draught force were known the specific draught requirement could be calculated. From each treatment soil was collected and sieved into six fractions to be able to calculate the total particle surface per kg soil. By doing this a measure of the fraction capacity of the shares could be detected. The energy requirement for fracturing could now also be calculated. The straw remaining on the soil surface was estimated visually and determined by image analysis.

Some of the measured draught requirement values were compared with values predicted by models.

On the heavy soil the actual working depth became smaller than the pre-set depth for every treatment except for the shallow sweep treatment and the mouldboard ploughed treatment. On the light soil the mouldboard ploughed treatment, the shallow sweep treatment and the 210 mm share treatment had an actual working depth larger than the depth that was pre-set. It was shown that the actual working depth was increasing with an increasing share width.

The 80 mm and 210 mm shares had the largest specific draught requirement on the heavy soil. The mouldboard plough and the shallow sweep treatment had the smallest

specific draught requirement. On the light soil the worn 80 mm share had the largest specific draught requirement and the shallow sweep treatment had the smallest. The specific draught requirement was increasing with an increasing share width.

The mouldboard plough buried the residual best while the shallow sweep left most straw on the soil surface.

The correlation between measured and calculated values were generally low. Draught requirement for the mouldboard plough was generally overestimated by the model and values for the cultivator underestimated.

The results show that both draught requirement and tillage outcome was very different between the share types. Further research would be valuable for both machinery manufacturers and farmers.



## 1 Inledning

Reducerad bearbetning är något som diskuteras mycket idag inom det svenska jordbruket. Plöjning har i många år varit den dominerande primärbearbetningen i Sverige. Efterhand som marginalerna minskar, måste kostnaderna minskas. Jordbearbetning är en stor kostnadspost inom växtodling idag, därför efterlyses alternativa bearbetningssystem. Framförallt är det alternativ till den kostsamma plöjningen som efterlyses.

Det finns idag en uppsjö av redskap som är tänkta att ersätta plojen inom den primära bearbetningen.

Kultivatorn är ett redskap som tidigare användes mest som bearbetningsredskap inför plöjning. Kultivatorerna kan indelas i två kategorier beroende på pinnens konstruktion, fjädrande och stel pinne. Det finns olika typer av spetsar att montera på kultivatorn. Spetsvalet beror på vilket ändamål man har med bearbetningen. Är det luckring man är ute efter, är det onödigt att köra med en spets som gör en stor inblandning, eftersom det är energikrävande. Genom mätning av olika typer av spetsars dragkraftbehov och bearbetningsresultat kan riktlinjer för val av spets tas fram. För att få ett jämförbart värde på dragkraftbehovet mellan olika spetsar, redskap och arbetsbredder används det specifika dragkraftbehovet ( $\text{kN/m}^2$ ).

Rapporten behandlar dels ett försök med olika typer av spetsar utförda på en styv och en lätt jord, dels ett försök där endast bredden på spetsarna skiljer, utfört på styv jord. Resultat som verkligt bearbetningsdjup, totalt dragkraftbehov, specifikt dragkraftbehov, sönderdelning och halminblandning redovisas i rapporten.

## 2 Jorden

### 2.1 Hållfasthet

Jordens hållfasthet definieras som det motstånd som måste övervinnas för att deformera jorden (Sirjacobs, et al., 2002). En hög hållfasthet är bra för att det ökar jordens bärförmåga, men ur bearbetningssynpunkt vill man inte ha alltför hög hållfasthet för det ökar dragkraftbehovet och sönderdelningen blir inte så god.

I mark talar man om krafter för ett plan, vilket innebär kraft per ytenhet ( $\text{N/m}^2$  eller Pa). Kraft per ytenhet är enheten för tryck, ofta talar man om tryck i marken, men den korrekta benämningen är spänning. Det finns två typer av spänningar i marken, normalspänning som verkar vinkelrätt mot ett plan och skjuvspänning som är parallell med ett plan (Arvidsson, 2001).

## 2.2 Skjuvhållfasthet och kohesion

Vid körning med en traktor eller bearbetning med ett redskap, utsätts jorden för krafter. Krafterna kommer att bygga upp skjuvspänningar i marken, tills ett maximum nås för en viss deformation. Hur stor deformationen blir beror på vilken typ av jord det är och hur de fysikaliska förutsättningarna är. Det tidigare nämnda maximum kallas för jordens skjuvhållfasthet (Spoor, 1975).

Skjuvhållfasthet kan mätas genom att man anbringar en kraft från sidan (skjuvspänning), alltså längs med planet, på exempelvis en jordcylinder. Man mäter kraften som behövs för att skjuva jorden i sidled. Kraften ökar till ett visst läge, där jorden brister. Vid bristningstillfället är skjuvhållfastheten som störst och är normalt det värde som används vid beräkning av hållfastheten. Med en ökad normalspänning följer en ökad skjuvhållfasthet. Skjuvhållfastheten delas upp i två komponenter, kohesion och intern friktionsvinkel. Kohesion är detsamma som skjuvhållfastheten utan normalspänning (fig. 1), den interna friktionsvinkeln beskriver hur skjuvhållfastheten ändras vid ändrad normalspänning (Arvidsson, 2001).

Skjuvhållfastheten kan beskrivas med följande formel:

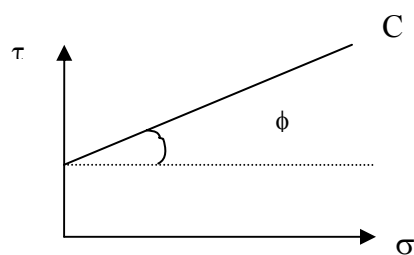
$$\tau = C + \sigma_n * \tan \phi \quad (\text{Arvidsson, 2001})$$

där:  $\tau$  = skjuvhållfasthet

$C$  = kohesion

$\phi$  = intern friktionsvinkel

$\sigma_n$  = normalspänning



Figur 1. Skjuvhållfastheten som funktion av normalspänningen.

Kohesionen beror dels på bindningar mellan partiklar, t.ex. elektrostatiska bindningar mellan lerpartiklar och dels på vattnets bindningstryck vid uttorkning (Arvidsson, 2001). Partikelstorleken har betydelse när man talar om bindningskrafter, ju mindre partiklar desto större bindningskrafter. Lerjordar har betydligt större kohesion än sandjordar, därför kallas lerjordar för kohesionsjordar.

Ökad skjuvhållfasthet vid ökad normalspänning beror på att friktionen mellan markpartiklarna ökar. En ökad friktion mellan partiklarna gör det svårare att förflytta dem i sidled. Sandjordar har små elektrostatiska bindningar vilket medför en liten

kohesion. Därför är sandjordars skjuvhållfasthet helt beroende av normalspänningen och kallas därför för friktionsjordar (Arvidsson, 2001).

### **2.3 Penetrationsmotstånd**

Jordens penetrationsmotstånd är också ett mått på hållfastheten. Mätningarna utförs relativt enkelt med en penetrometer, vilken består av en metallstång med en konisk spets som trycks ner i marken till önskat djup. Vilken spetsvinkel spetsen har beror på vilket syfte man har med mätningarna (Håkansson, 2000). Penetrometern mäter kraften som krävs för att trycka ner spetsen i marken och penetrationsmotståndet brukar anges i kPa eller Mpa. En nackdel med penetrometermätningar är att faktorer som t.ex. skjuvhållfasthet, kompressionsförmåga, friktion och adhesion påverkar mätresultaten. De nämnda faktorerna påverkar resultatet olika mycket beroende på vilken jordart det är och vilken vattenhalt jorden har vid mätningen, detta medför ofta svårtolkade resultat (Dexter & Arvidsson, 2002).

### **2.4 Bearbetbarhet**

Bearbetbarhet definieras som hur lätt det är att sönderdela jorden för att åstadkomma en såbädd (Dexter, 1988). Det går inte att säga att en jord är optimal att bearbeta vid en viss tidpunkt. Det är mycket beroende av t.ex. jordens vattenhalt, hur vädret varit tidigare under året och vilken gröda man bearbetar efter. Den optimala vattenhalten vid bearbetning är enligt Dexter (1988) vid cirka 90 % av plasticitetsgränsen, oavsett jordtyp. När vattenhalten överstiger plasticitetsgränsen är jorden inte bearbetbar, om vattenhalten är för låg kommer det att bildas kokor med ett dåligt bearbetningsresultat som följd.

## **3 Jordbearbetning**

### **3.1 Bearbetningens syfte**

Huvudsyftet med jordbearbetning är att skapa en så gynnsam miljö som möjligt för de odlade växterna (Weidow, 2000). Det går inte att säga hur bearbetningen generellt ska gå till. Man måste anpassa bearbetningen till rådande markförhållanden. För att välja en bearbetningsmetod måste man veta vad man vill åstadkomma med bearbetningen, för att sedan välja metod beroende på gröda, vattenhalt i marken, ogräsförekomst, halmmängder osv.

Några krav man kan ställa på bearbetningsredskapen: De ska luckra jorden, en kompakt jord är inte gynnsam för växtrötterna. Plogen är det effektivaste redskapet för luckring. Skörderester ska blandas in väl för minskad risk för spridning av patogener till nästkommande gröda. Vid en god inblandning av växtresterna sätter nedbrytningen igång snabbare, vilket är bra, särskilt vid stora mängder växtrester. Bryts de inte ner finns det

en risk att de bildar kompakta skikt i jorden, vilket kan göra att kontakten mellan matjorden och alven störs. Vid varje bearbetning sker en ogräsbekämpning. Vid bekämpning av rotogräs måste bearbetningen ske till ett sådant djup att rötter och underjordiska stamdelar skärs av. Redskapet bör bearbeta hela arbetsbredden. Vid en första bearbetning efter tröskning vill man att fröogräsen ska gro, så att de förstörs vid nästkommande bearbetning. Efter de luckrande bearbetningarna kan en återpackning behöva göras för att få en gynnsam porstorleksfördelning. En återpackning underlättar växternas närings- och vattenupptag genom att en bättre kontakt skapas mellan jordpartiklarna. Återpackning direkt efter sådd kan göras för att öka kontakten mellan fröna och den fuktiga jorden (Weidow, 2000).

### 3.2 Sönderdelning

För att skapa gynnsamma förhållanden för kommande gröda får inte bearbetningsresultatet bestå av för stora aggregat, särskilt i nedre delen av såbädden (Weidow, 2000).

Vid bearbetning av en kohesionsjord, bryts jorden upp i aggregat. Aggregaten kan ha varierande storlek beroende på vilket redskap jorden har bearbetats med, vilket djup bearbetningen sker till och vilken typ av jord det är. Hur stora aggregat det bildas efter ett visst redskap är lättast att jämföra vid torra förhållanden, eftersom det vid våta förhållanden oftast inte blir så stor skillnad i aggregatstorlek mellan olika redskap. Detta p.g.a. att vid våta förhållanden är hållfastheten betydligt lägre än vid torra förhållanden.

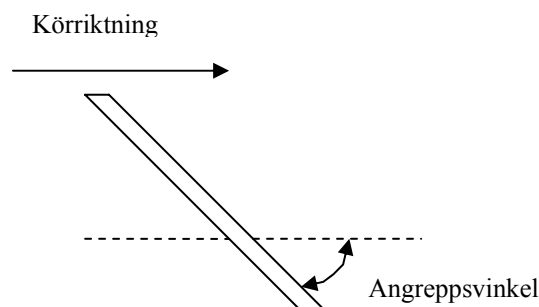
Genom att räkna ut hur stor yta aggregaten i ett visst prov har, kan man se hur effektivt redskapet utnyttjar den tillförda energin för sönderdelning. Ju större yta, desto mindre aggregat (Gill & McCreery, 1960). Genom att sålla provet från bearbetningen till olika fraktioner, kan varje fraktions yta räknas ut med följande formel:

$$A_i = (6 * W_i) / (\rho (\phi_i * \phi_{i+1})^{1/2}) \quad (\text{Hadas \& Wolf, 1983})$$

- där
- $A_i$  = ytan för varje sållningsfraktion ( $m^2$ )
  - $W_i$  = massan hos den sållade fraktionen (kg)
  - $\rho$  = skrymdensitet hos jorden ( $kg/m^3$ )
  - $\phi_i$  = undre fraktionsgräns
  - $\phi_{i+1}$  = övre fraktionsgräns

### 3.3 Angreppsvinkel

Angreppsvinkeln (fig. 2) på en pinne har stor betydelse för hur uppbyggnaden av jorden sker. Även pinnens dragkraftbehov påverkas mycket av angreppsvinkeln. Pinnar med liten angreppsvinkel har mindre dragkraftbehov än pinnar med stor angreppsvinkel (Davies et al. 1993). Vid en liten angreppsvinkel, mindre än 45 grader, kommer jorden att brytas upp och sönderdelas genom sprickbildning, detta på grund av att pinnen utövar en uppåtriktad kraft på jorden (Koolen & Kupiers, 1983). Vid stora angreppsvinklar utövar pinnen nedåtriktade krafter på jorden, en kompression sker. Detta är bra vid såbäddsberedning, då man vill åstadkomma en god sönderdelning (Arvidsson & Dexter, 2004). En sladdplanka, vilken har en stor angreppsvinkel (mer än 90 grader) krossar effektivt jordklor, men bryter inte upp jord. När angreppsvinkeln blir större än 45 grader, ökar dragkraftbehovet betydligt fortare med en ökad angreppsvinkel än vad det gör mellan 20 och 45 grader. En av anledningarna till detta är att de nedåtriktade kompressionskrafterna är mindre vid mindre angreppsvinklar. Uppbyggnaden sker på olika sätt beroende på vilken angreppsvinkel pinnen har. Aluko & Sieg (2000) gjorde ett försök för att se när jorden ändrades från uppbyggnad genom skjuvningsbrott till uppbyggnad genom sprickbildning. De kom fram till att det var mest sannolikt att jorden bröts upp genom sprickbildning vid små angreppsvinklar och på jord med hög hållfasthet (Arvidsson & Dexter, 2004). Samma angreppsvinkel kan resultera i olika dragkraftbehov på olika jordar (McKyes, 1989).



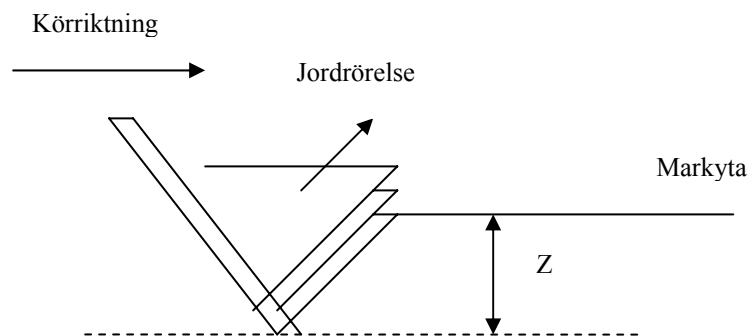
Figur 2. Angreppsvinkel för en pinne.

### 3.4 Olika brott

Jorden bryts upp olika vid bearbetning, mest beroende på jordens vattenhalt och vilken jordart som bearbetas, men uppbyggnaden är också beroende på redskapets utformning. Några olika typer av brott beskrivs nedan.

### 3.4.1 Skjuvningsbrott

När en t.e.x. en spets dras fram i jorden, utsätts jorden för kompressiva spänningar. Jorden kommer att deformeras, ett brott uppstår, då skjuvspänningen överstiger jordens skjuvhållfasthet (Aluko & Sieg, 2000). Jordblocken som lossnar framför spetsen p.g.a. spetsens framåtriktade rörelse, glider framåt och uppåt längs spetsen och den obearbetade jorden (fig. 3). Detta är något som upprepas hela tiden vid körning med spetsen i jorden, nya jordblock bryts loss allteftersom spetsen dras framåt. Hur stort avstånd det blir mellan skjuvningsplanen bestäms av hur kompressibel jorden är. Ju mer kompressibel jorden är desto större blir avståndet mellan skjuvningsplanen (Arvidsson & Dexter, 2004). Hade det inte varit något motstånd framför det uppbrutna jordblocket, hade det inte skett någon sönderdelning av det.



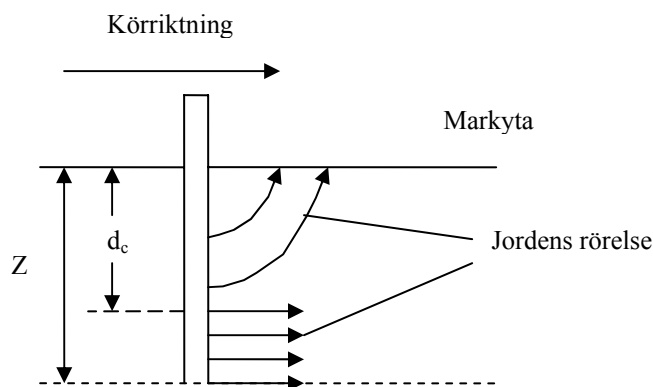
**Figur 3.** Skjuvningsbrott, där  $Z$  är arbetsdjupet. Jordblock skjuvas loss och glider uppåt, framåt längs spetsen (Aluko & Sieg, 2000).

### 3.4.2 Plastisk deformation och kritiskt arbetsdjup

Enligt Spoor & Godwin (1978) finns det ett kritiskt arbetsdjup för stela pinnar. Under detta arbetsdjup kommer inte jorden längre att skjuvas och röra sig uppåt och framåt, utan istället röra sig framåt och åt sidorna. Detta kallas för plastisk deformation. Jorden pressas samman och flyter runt pinnen istället för att pressas uppåt och luckras (fig. 4). Det kritiska arbetsdjupet varierar beroende på jordart, jordens vattenhalt och på pinnens utformning. Med en högre vattenhalt följer ett grundare kritiskt bearbetningsdjup. Pinnens angreppsvinkel spelar en stor roll vid bestämning av det kritiska bearbetningsdjupet. En pinne med en liten angreppsvinkel har ett större kritiskt bearbetningsdjup än en pinne med stor angreppsvinkel (McKyes, 1989).

Vid mätning av dragkraftbehovet för en viss typ av pinne, kommer det inte bli så stor skillnad i det totala dragkraftbehovet (kraften per meter arbetsbredd), om bearbetningen görs till ett större djup än det kritiska arbetsdjupet eller bearbetningen görs till samma djup vid torrare förhållanden. Däremot om man tittar på det specifika

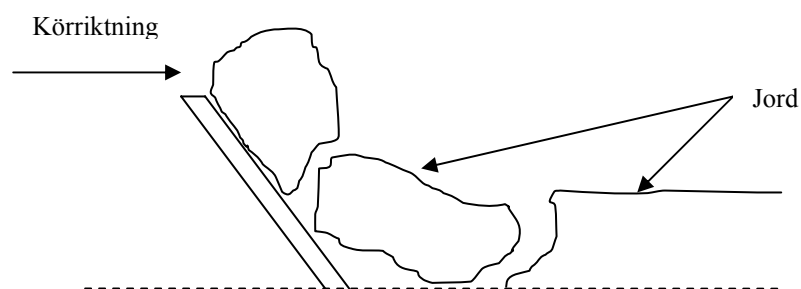
dragkraftbehovet, ökar det markant vid bearbetning under det kritiska djupet. Det specifika dragkraftbehovet räknas som kraft per tvärsnittsarea bearbetad jord. Jorden under det kritiska djupet kommer inte att bearbetas, därmed blir tvärsnittsarean liten. Detta medför att det specifika dragkraftbehovet kan bli större vid våta förhållanden jämfört med bearbetning till samma djup vid torrare förhållanden (McKyes, 1989).



**Figur 4.** Under ett visst kritiskt djup,  $d_c$ , ändras jordens rörelse från uppåt och framåt till en rörelse i sidled (Aluko & Sieg, 2000). En plastisk deformation sker.

### 3.4.3 Sprickbildning

Ett tredje sättet för jorden att brytas upp vid bearbetning är genom sprickbildning. För att detta ska inträffa måste jorden ha relativt hög hållfasthet (Aluko & Sieg, 2000). Sprickorna uppträder där hållfastheten är som lägst, mellan aggregaten (Payne, 1956). Sprickbildningen börjar vid redskapets spets och växer snabbt tills sprickan når markytan där en jordkoka lossnar (fig. 5). (Aluko & Sieg, 2000). Vid uppbrytning genom sprickbildning sker varken skjuvning eller sammanpackning av jorden.



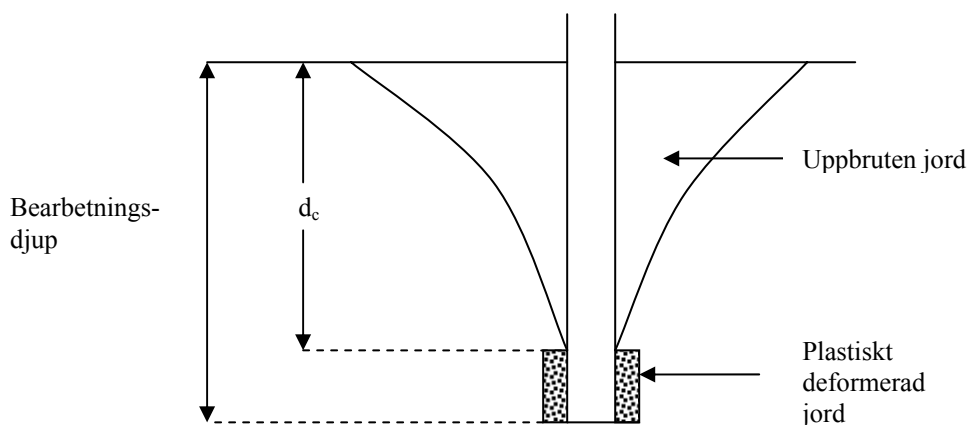
**Figur 5.** Sprickbildning (Aluko & Sieg 2000). Sprickorna bildas där hållfastheten är som lägst.

### 3.4.4 Tvådimensionellt brott

Ett tvådimensionellt brott innebär att uppbygningen vid sidan om spetsen är försumbar, uppbygningen sker huvudsakligen framåt och vertikalt (Aluko & Sieg, 2000). För att åstadkomma tvådimensionell uppbygning måste spetsen som går i marken vara bredare än vad den går djupt, förhållandet bör minst vara 10:1. Rent mekaniskt sett är det så ett schaktblad arbetar, uppbygning sker lika brett som bladet (McKyes, 1989).

### 3.4.5 Tredimensionellt brott

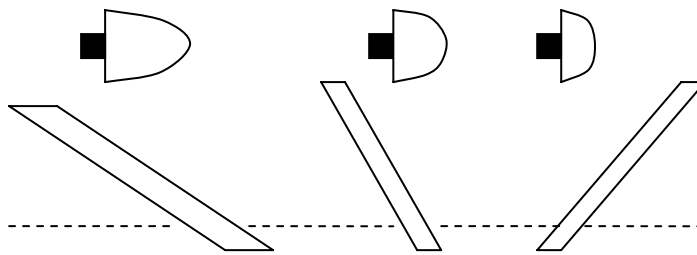
Vid körning med smala spetsar, förflyttas en stor mängd jord ut till kanterna på spetsen, vilket medför att en icke försumbar bearbetning sker sidan om spetsen. Definitionen för en smal spets är enligt Payne (1956) när förhållandet mellan djup och bredd ligger mellan 25:1 och 1:1. Uppbygningen vid körning med en smal spets kan beskrivas med en tredimensionell modell. Uppbygningen sedd framifrån får en V-formad tvärsnittsarea (fig. 6). När bearbetningsdjupet är större än det kritiska bearbetningsdjupet, slutar V-formationen vid det kritiska bearbetningsdjupet. Tvärsnittsarean är den samma som spetsens tvärsnittsarea under det kritiska djupet (Arvidsson & Dexter, 2004).



**Figur 6.** En smal spets bryter upp jorden, uppbygningen sker betydligt bredare än vad spetsen är bred (Arvidsson & Dexter, 2004).

Om man betraktar det tredimensionella brottet uppfifrån, kan man se att jorden framför pinnen bryts upp i form av en halvmåne (fig. 7). Precis framför pinnen bildas det en typ av kil, vilken hela tiden byggs på underifrån. Kilen pressas samman och uppåt längs pinnen, när den når markytan faller den sönder (Payne, 1956). Halvmånens form beror på pinnens angreppsvinkel (Payne & Tanner, 1959).





**Figur 7.** Jorden framför pinnen bryts upp i form av en halvmåne, formen beror på vilken angreppsvinkel pinnen har (Payne & Tanner, 1959).

### 3.5 Plogkroppar

Plogen är ett redskap som vänder och luckrar jorden mycket effektivt. Vid plöjning skärs hela arbetsbredden av och jorden vänds upp och ner.

En plogkropp består av många delar, men det är framförallt skäret som står för avskärningen (Koolen & Kuipers, 1983). Uppbrytningen sker med ett tvådimensionellt brott, det är endast ytan där skäret går fram som skärs av, ingen uppbyggnad sker åt sidorna. Även om det är skäret som står för den huvudsakliga avskärningen är det spetsen som utför det primära brottet. Både spets och skär har en liten angreppsvinkel. När skäret har skurit loss jorden, trycks jorden längs en vändskiva som vänder den mellan 120 och 150 grader. Vid vändningen sker en brytning av jorden vilket medför en sönderdelning. Hur stor sönderdelningen blir beror bl.a. på vändskivans utformning, hållfastheten i jorden och körhastigheten.

Uppbrytningen vid plöjning sker oftast genom sprickbildning, vilket medför en relativt liten sönderdelning (Aluko & Sieg, 2000, Davies et. al., 1993). Aluko & Sieg (2000) har visat att om förhållandena är sådana att uppbyggnaden sker genom skjuvningsbrott, minskar storleken på aggregaten. Detta sker genom att de uppbrutna jordblocken gnids mot varandra och blir på så sett mindre. När jorden har en hög vattenhalt sker ofta en plastisk deformation, sönderdelningen blir då väldigt liten. Den uppbrutna tiltan håller ihop under hela vändningsförloppet, inte förrän tiltan lämnar vändskivan kan en liten sönderdelning ske. Hur stor den sönderdelningen blir bestäms av hur mycket tiltan har försvagats under vändningsförloppet.

### 3.6 Kultivatorpinnar och gåsfötter

Till skillnad från en plogkropp bearbetar kultivatoren även jorden sidan om pinnen. Uppbyggnaden sker tredimensionellt, i en V-formation sett framifrån, snett uppåt och utåt från pinnen. Enligt Payne (1956) kan uppbyggnaden uppifrån sett ske i en halvmåneform. Kultivatorpinnens angreppsvinkel är betydligt större än plogens. Angreppsvinkeln har mycket stor betydelse när det gäller dragkraftbehovet för en pinne. Till skillnad från plogen har kultivatoren ett kritiskt bearbetningsdjup. Det är

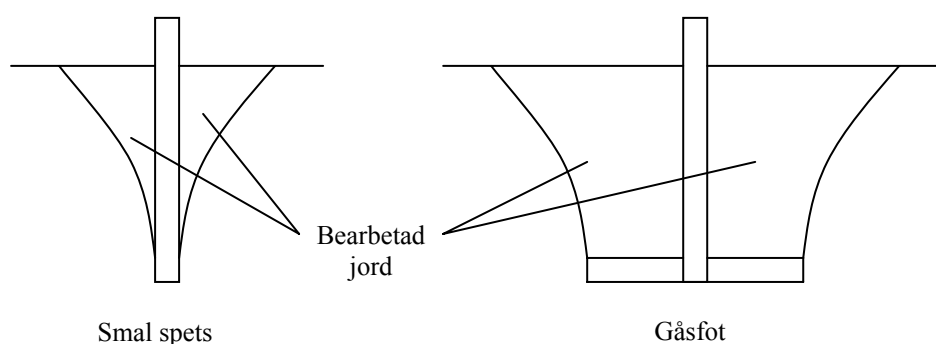
endast över det kritiska bearbetningsdjupet man får en effektiv bearbetning, under sker det en plastisk deformation (Spoor & Godwin, 1978). Med en pinndelning över 25 cm får man oftast inte en full bearbetning av hela arbetsbredden med en överfart (Davies et. al., 1993). Vid bearbetning med två överfarter görs de lämpligen diagonalt över fältet.

För att åstadkomma en full genomskärning av hela arbetsbredden kan kultivatorpinnarna utrustas med vingskär eller gåsfötter. Vingskär monteras på pinnens båda sidor.

För att detta ska fungera bra, bör pinnens konstruktion vara rakare och relativt stel.

Spoor & Godwin (1978) visade att det kritiska arbetsdjupet ökar när man använder gåsfötter eller vingskär (fig. 8).

Det specifika dragkraftbehovet (kraft per tvärsnittsarea) minskar vid användning av gåsfötter, om bearbetningen sker under det kritiska arbetsdjupet, jämfört med en smal spets. Spoor & Godwin (1978) gjorde försök som bevisar detta. En konventionell spets hade ett specifikt dragkraftbehov på  $208 \text{ kN/m}^2$ . Med vingskär monterade på samma kultivator och bearbetning till samma djup var det specifika dragkraftbehovet endast  $143 \text{ kN/m}^2$ . Det beror på att den bearbetade jordvolymen ökar mer än dragkraftbehovet. Det specifika dragkraftbehovet minskar även med vingskäreans eller gåsfötternas bredd. Gåsfötternas och vingskäreans angreppsvinkel har även betydelse för dragkraftbehovet (Spoor & Godwin, 1978).



**Figur 8.** En smal spets jämfört med en gåsfot. Gåsfoten bearbetar en större volym jord.

#### 4 Modeller för beräkning av dragkraft

Istället för att mäta vilket dragkraftbehov en viss pinne eller ett redskap har, kan det beräknas genom att sätta in ett antal faktorer i en modell. Payne (1956) och Payne & Tanner (1959) har gjort många försök där uppbyggnad genom skjuvning framför smala pinnar beskrivs. Många har försökt att översätta beskrivningen av uppbyggnaden till matematiska formler som kan användas i modeller.

Godwin & Spoor (1977) tog fram en modell, *Single Tine*, för att förutspå dragkraftbehovet för redskap vid olika markförhållanden. Modellen bygger på laboratorieförsök med smala pinnar. Formeln ser ut enligt följande:

$$P = \gamma z^2 N_\gamma + czN_c + c_a z N_a + qzN_q$$

där  $P$  = totalt dragkraftbehov (kN/m)

$\gamma$  = skrymdensitet

$z$  = bearbetningsdjup

$c$  = kohesion

$c_a$  = friktion mellan pinne och jord beroende på angreppsvinkel

$q$  = tryck från överliggande jord

$N$  = konstanter beroende på adhesion, inre friktionsvinkel och angreppsvinkel

Modellen tar inte hänsyn till hur pinnarna samverkar på ett bearbetningsredskap.

Dragkraftbehovet för en pinne varierar beroende på vilken hastighet pinnen dras fram med. Godwin & Spoor (1977) beaktade inte det i modellen ovan.

McKyes (1985) tog fram en modell, *Dynamic force predictions*. Modellen räknar ut dragkraftbehovet för en pinne beroende på hastighet, spetsbredd m.m. Formeln ser ut enligt följande:

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + cdN_c + c_a d N_{c_a} + qdN_q + \gamma v^2 d N_a)w$$

där  $P$  = totalt dragkraftbehov (kN/m)

$\gamma$  = skrymdensitet

$d$  = bearbetningsdjup

$v$  = hastighet

$c$  = kohesion

$c_a$  = friktion mellan pinne och jord beroende på angreppsvinkel

$q$  = tryck från överliggande jord

$N$  = konstanter beroende på adhesion, inre friktionsvinkel och angreppsvinkel

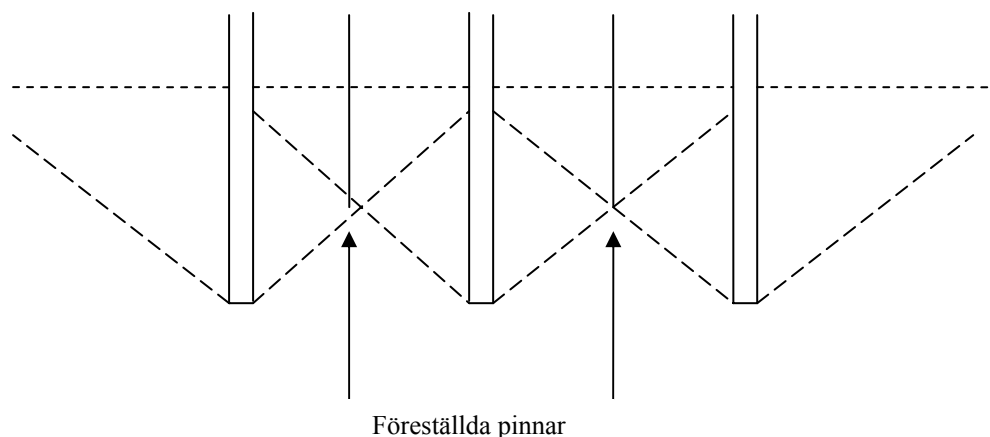
$w$  = spetsbredd

I denna modell tas ingen hänsyn till hur pinnarna i ett bearbetningsredskap samverkar.

Wheeler & Godwin (1996) tog fram en modell som beaktar hur pinnarna i ett redskap samverkar. Modellen kallas *Soil Dynamics of Single and Multiple Tines at Speeds up to 20 km/h*. Den bygger på en modifiering av modellen, *Single Tine* som Godwin & Spoor (1977) tog fram.

För att Wheeler & Godwins (1996) modell skulle ta hänsyn till hastighetseffekter kopplades den samman med McKyes modell, *Dynamic force predictions*. För att ta hänsyn till den samverkande bearbetning pinnarna i ett redskap gör, beroende av pindelning, satte Wheeler & Godwin (1996) in "föreställda" pinnar i modellen (fig. 9). Vid beräkning subtraheras den kraft som åtgår för de "föreställda" pinnarna. Med

en tätare pinndelning räknar modellen med att de ”föreställda” pinnarna går djupare än vid en glesare pinndelning och därför blir det totala dragkraftbehovet också mindre. I modellen sätts uppmätta värden på kohesion, djup, körhastighet, skrymdensitet, pinndelning, spetsbredd och antal pinnar in. Modellen finns att tillgå i form av ett kalkylark.



**Figur 9.** Föreställda pinnarna (Wheeler & Godwin, 1996)

R. J. Godwin har också tagit fram en modell för beräkning av dragkraftbehovet för vändskiveplogar, *Mouldboard plough forces*. Modellen finns att tillgå i form av ett kalkylark. Värden på kohesion, djup, körhastighet, skrymdensitet, vänskivelängd, skärbredd, spetsbredd och ett antal vinklar sätts in i modellen.

De matematiska modeller som idag finns framtagna är otillräckliga för att göra en rättvis jämförelse mellan olika redskap. Modellerna tar inte hänsyn till bearbetningsresultatet, vilket är den viktigaste faktorn vid val av redskap.

## 5 Examensarbetets syfte

Syftet med examensarbetet var att jämföra dragkraftbehovet och bearbetningsresultatet för olika typer av kultivatorspetsar. Plogen var med mest som en referens. För att se hur jordarten påverkade dragkraftbehovet och bearbetningsresultatet utfördes försöken både på en styv jord och en lätt jord.

Avsikten är att kunna bedöma vilken spets som är mest optimal, beroende på syftet med bearbetningen.

## 6 Material och metoder

### 6.1 Mättraktor

För samtliga körningar användes en Massey Ferguson 6290. Traktorn var tillverkad år 2001 och hade gått ca 1450 timmar. Tekniska specifikationer redovisas i tabell 1.

**Tabell 1.** Tekniska specifikationer för Massey Ferguson 6290

Motoreffekt, hk ( kW) vid 2200 rpm	135 (99,3)
Max vridmoment, Nm	547
Bakhjul ( Michelin XM 108 )	650/65R38
Framhjul ( Michelin XM 108 )	540/65R28
Vikt, kg	5500

Växellådan bestod av åtta mekaniska växlar och fyra powershiftsteg, detta gav totalt 32 växlar. Fram-backväxellådan är av kopplingsfri typ.

Vid alla dragkraftsmätningar eftersträvades ett motorvarvtal på 2050 rpm. Inför mätningarna provades en lämplig växel ut för att kunna hålla varvtalet relativt konstant. Alla led utfördes med samma växel förutom det plöjda ledet, detta kördes med en lägre växel vilket minskade hastigheten med ca 1 km/h. Samma växlar användes på både lätt och styv jord.

Körningarna utfördes med ringtrycket 0,9 bar i både fram och bakhjul. Frontvikter användes endast i de plöjda leden.

### 6.2 Mätutrustning

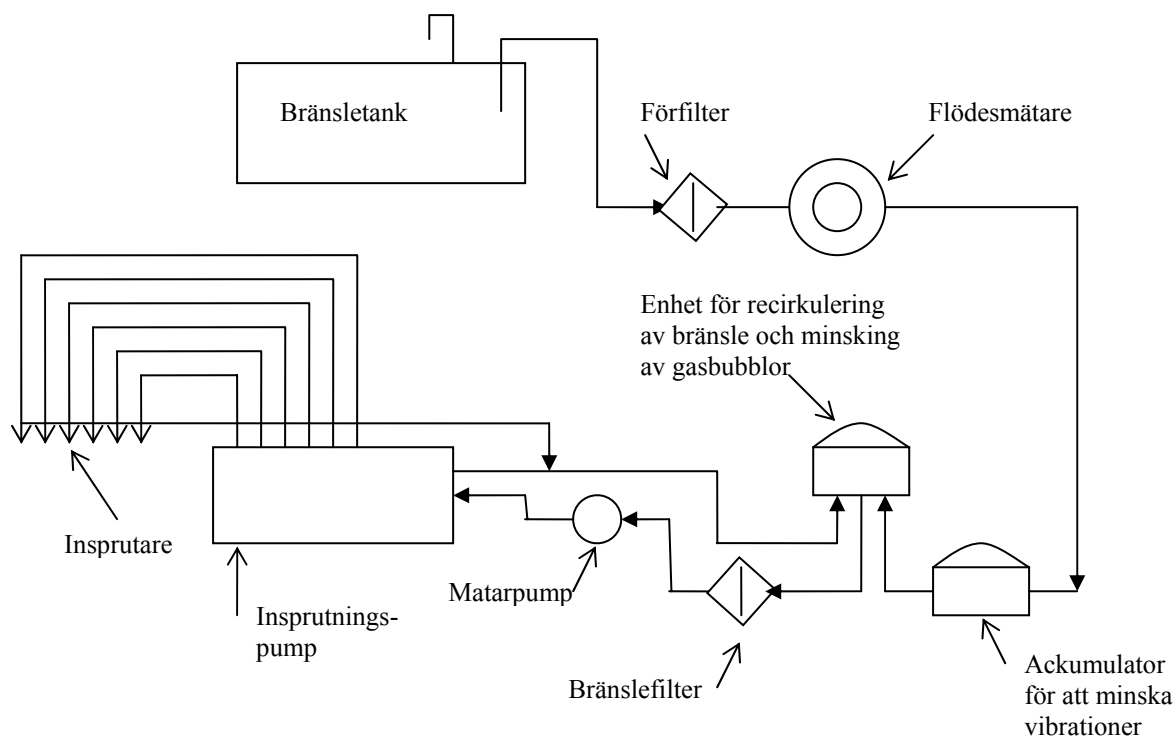
I båda försöken användes en traktor utrustad med ett system för bränslemätning. Mätutrustningen är utvecklad av JTI (Pettersson et. al., 2002).

I en dieselmotor cirkulerar normalt en mycket större mängd diesel än vad motorn förbrukar. Den diesel som motorn inte konsumerar pumpas tillbaka till bränsletanken via returledningen. Bränsleförbrukningen mäts normalt genom att en flödesmätare mäter flödet från pumpen och att en flödesmätare mäter flödet i returledningen. Förbrukningen räknas ut genom att returflödet subtraheras från flödet från pumpen. Mätarna måste kunna mäta inom ett stort mätområde.

Vid beräkning av nettoförbrukningen blir mätfelelen stora eftersom förbrukningen är låg jämfört med det totala bränsleflödet.

Mätsystemet som användes i försöken är ett så kallat enkelrörsystem. Det mäter endast den volym diesel som motorn förbrukar. Det medför att mätare med ett snävare mätområde kan användas, så att mätfelelen minskas. Mätområdet i det här fallet är mellan 0 och 40 l/h med en upplösning på 250 pulser/ml. Vilket är anpassat till

storleken på traktorn. För att minska pulseringen i bränslesystemet har en ackumulator monterats. Bränslesystemet har kompletterats med ett extra bränslefilter, en Tigerloop som recirkulerar returbränslet och minskar antalet bubblor, temperaturmätare vilken mäter bränslets temperatur samt en temperaturmätare som mäter intagsluftens temperatur. Systemet illustreras nedan (fig.10).



**Figur 10.** Bränslesystem utrustat med mätsystem (Pettersson et. al., 2002).

På traktorn fanns det även utrustning för mätning av motorvarvtal, hjulhastighet och radarhastighet. En datalogger med en frekvens av 1 Hz sparar de uppmätta värdena och ett telefonmodem möjliggör överföring till en stationär dator.

Mätutrustningen är kalibrerad mot en kraftuttagsbroms. Loggern har ”lärt sig” känna av vilken pto-effekt en viss kombination av motorvarvtal och bränsleförbrukning ger. Pto-effekten gäller vid stillastående traktor. Vid exempelvis mätning av dragkraftsbehovet för ett visst redskap måste effekten för slirning och rullmotstånd beräknas och minskas med loggerns uppmätta effekt.

Behandling av uppmätta data från loggern gjordes i programmet Easy View.

## 6.3 Försöksplatser

### 6.3.1 Olika typer av spetsar

Försöken utfördes på två platser, en lätt jord och en styv jord. Försöket på den styva jorden gjordes den 16 september 2005 och den 27 september 2005 på den lätta jorden. Båda platserna var belägna på Säby. Ingen bearbetning hade skett efter tröskningen. Halmen hackades vid tröskningen och kvarstående stubb var ca 15-20 cm hög. Tre block lades ut per plats. Rutbredden var sex meter vilket medförde att två drag per ruta kördes med kultivatorerna och tre drag med plogen.

Rutlängden var 30 meter på den styva och 20 meter på den lätta platsen.

Jordprover togs på platserna. Markdata presenteras i tabell 2 och 3.

### 6.3.2 Olika bredd spetsar

Försöket utfördes endast på styv jord på Säby den 7 oktober 2005. Ingen bearbetning hade skett efter tröskningen. Halmen hackades vid tröskningen och kvarstående stubb var ca 15-20 cm hög. Fyra block lades ut. Rutbredden var även här sex meter vilket medförde att två drag per ruta kördes. Rutlängden var 30 meter. Markdata presenteras i tabell 2 och 3.

Tabell 2. Kornstorleksfördelning (g/100g jord)

Plats	Ler	Fmj*	Gmj*	Fmo*	Gmo*	Ms*	Gs*	Mull
Styv	50,0	14,2	9,8	8,2	10,6	4,1	3,0	3,2
Lätt	19,3	5,5	9,2	32,5	32,8	0,5	0,2	5,1

\*Fmj = finmjåla, Gmj = grovmjåla, Fmo = finmo, Gmo = grovmo, Ms = mellansand, Gs = grovsand

Tabell 3. Markdata

	Styv	Lätt	Olika bredd spetsar
Skjuvhållfasthet (kPa)	37,7	34,4	55,7
Torr skrymdensitet (g/cm <sup>3</sup> )	1,17	1,10	1,30
Vattenhalt (%)	22,5	23,0	23,0

## 6.4 Försöksled

### 6.4.1 Olika typer av spetsar

Försöken innehöll nio led vilka framgår av tabell 4.

Redskapen bestod av en treskärig växelplog, kultivator med styva pinnar och en kultivator med fjädrande pinnar. Styvpinnekultivatoren kördes med olika typer av spetsar. Några av spetsarna kördes med olika djupinställningar. Plog och kultivator med fjädrande pinne kördes endast på ett djup. Hastigheten varierades inte mellan leden förutom plogledet som kördes ca 1 km/h långsammare.

**Tabell 4.** Försöksled olika typer av spetsar

Led	Bearbetningsmetod	Inställt djup (cm)
A	Plog	~ 20
B	80 mm. Djupt	~ 20
C	80 mm. Grunt	~ 10
D	80 mm med vingskär. Grunt	~ 10
E	Sliten 80 mm. Grunt	~ 10
F	210 mm. Grunt	~ 10
G	Gåsfot. Djupt	~ 15
H	Gåsfot. Grunt	~ 6
I	Fjädrande. Grunt	~ 10

#### **6.4.2 Redskap i försök med olika typer av spetsar**

##### *Plog*

I försöket med olika typer av spetsar bestod ett led av plöjning. Plogen som användes var en Överum Vari Flex CX. Det är en treskärig växelplog med hydraulisk tiltbreddsreglering. Vid körningarna var tiltbredden inställd på 16 tum, det gav en total arbetsbredd på 1,2 meter. Plogen var utrustad med skivrister och förplogar på samtliga skär.

##### *Styppinnekultivator*

De olika modellerna på spetsar som testades monterades på en Väderstad Cultus tillverkad år 2005. Det är en prototyp. Den bestod av nio styva pinnar med mekanisk stenulösning (fig. 11). Pinnarna var monterade på fyra axlar. Bakom pinnarna satt det utjämningsstallrikar. Kultivatoren bars upp av två främre stödhjul och en hjulpackare monterad längst bak. Arbetsbredden är 2,05 meter. I alla körningar förutom med gåsfötterna satt det en typ av kastvinge ovanför spetsarna.

De olika spetsarna, vilka monterades på kultivatoren var 80 mm (fig. 11), slitna 80 mm spetsar (fig. 11), 80 mm i kombination med vingskär (fig. 11), 210 mm (fig. 11), och 260 mm gåsfötter (fig. 11). De slitna spetsarna var inte naturligt slitna, utan var vanliga 80 mm spetsar vilka hade kapat av. Den totala bredden var 300 mm när vingskären var monterade.

Samtliga spetsar som testades från Väderstad var av rak typ, dvs motsatsen till den traditionella vridna spetsen. Den initiala angreppsvinkeln var ca 18 grader. Men p.g.a. den böjda formen på spetsarna ökade angreppsvinkeln snabbt ju längre upp på spetsen man kom. Den slitna spetsen hade en initial angreppsvinkel på ca 36 grader. Alla Väderstadspetsar monterades med en bult på pinnen.



Gåsfötterna (fig. 11) är tillverkade av Nichole, USA, tillhandahålls i Sverige av Moholms maskiner. De har en bredd av 260 mm och monterades med en liten nedåt riktad vinkel, för att åstadkomma en viss jordsökning. Gåsfötterna hade en typ av snappfäste, de slogs av och på med en hammare.



**Figur 11.** Några av de använda spetsarna och den mekaniska stenutlösningen. 80 mm (a), sliten 80 mm (b), 80 mm med vingskår (c), gåsfot (d), 210 mm (e) och stenutlösningfjäder (f).

### *Fjädrande pinne*

I ledet med fjädrande pinne användes en Väderstad Cultus 13. Det är en kultivator med 13 fjädrande pinnar monterade på tre axlar. Den har 3,10 meters arbetsbredd. Djupet hålls med traktorns trepunktslyft och två stödhjul. Kultivatoren är utrustad med CS-mixer, ett efterredskap för tilljämning av ytan.

Inför försökskörningarna demonterades fyra pinnar, två på varje sida, för att kunna köra två drag i rutorna. Arbetsbredden blev då 2,18 meter. Spetsarnas angreppsvinkel var ca 20 grader.

### 6.4.3 Olika bredd spetsar

Försöket bestod av fyra led, skillnaden mellan leden var bredden på spetsarna. De olika spetsarna monterades på styvpinnekultivatoren. Leden framgår av tabell 5. Djupinställningen var densamma för alla leden. Alla körningarna utfördes med samma växel och varvtal.

Tabell 5. Försöksled olika bredd spetsar

Led	Bearbetningsmetod	Inställt djup (cm)
A	50 mm. Grunt	~ 10
B	65 mm. Grunt	~ 10
C	80 mm. Grunt	~ 10
D	120 mm. Grunt	~ 10

### 6.4.4 Redskap i försök med olika bredd spetsar

Alla leden i försöket kördes med en styvpinnekultivator. Kultivatoren var en Väderstad Cultus, vilken finns beskriven ovan.

Skillnaden mellan leden var bredden på spetsarna, i övrigt var spetsarna identiskt utformade. De olika leden bestod av 50 mm, 65 mm, 80 mm och 120 mm breda raka spetsar, samma typ som ovan.

## 6.5 Mätning av jordens hållfasthet

### 6.5.1 Kohesion

Kohesionsmätningar gjordes samma dag som körningarna i försöken utfördes. Mätningarna gjordes i obearbetad jord på två djup ( 0-0,1 & 0,1-0,2 m ). Tjugo mätningar per försöksplats gjordes och ett medelvärde per plats räknades ut och användes för vidare beräkningar.

Mätinstrumentet var ett så kallat vingborr. Vingborret bestod av en metallstång med fyra vingar i ena änden och ett handtag med en visare i andra änden. Stången med vingarna slås ner i marken till önskat djup, vid vridning skjuvas en cylinder ut med radien 0,025 m och höjden 0,100 m och det maximala vridmomentet mäts och avläses med hjälp av visaren på handtaget. Därefter räknades skjuvhållfastheten ut med följande formel:

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

där:  $\tau_f$  = skjuvhållfasthet  
 $T$  = vridmoment  
 $r_v$  = jordcylinderns radie  
 $h$  = jordcylinderns höjd

Normalspänningen antogs vara försumbar och därför kunde värdet på skjuvhållfastheten direkt användas som ett mått på jordens kohesion.

## 6.6 Bestämning av bearbetningsdjup

Försöksplatserna anlades så att det fanns plats att provköra och ställa in arbetsdjup innan försökskörningarna påbörjades. Innan varje försökskörning kördes ett par drag vid sidan om försöket, arbetsdjupet mättes med tumstock och inställningarna justerades tills önskat bearbetningsdjup uppnåddes. Det inställda arbetsdjupet är inte alltid det verkliga arbetsdjupet och kunde därför inte användas för vidare beräkningar. Istället mättes det verkliga arbetsdjupet genom att en stålram med ytan 0,25 m<sup>2</sup> placerades i de olika rutorna, all lös, bearbetad jord ner till bearbetningsbotten inom stålramen lades i hinkar och vägdes. Tre upprepningar per ruta gjordes.

I varje försök togs sammanlagt åtta cylindrar på två djup (0-10 och 10-20 cm) ut. Cylindrarna togs ut i obearbetad jord. Utifrån cylinderproverna kunde skrymdensitet och vattenhalt bestämmas.

Med hjälp av den våta skrymdensiteten och den bearbetade jordmassan kunde det verkliga bearbetningsdjupet beräknas.

$$D = m / ( \rho * A )$$

där  $D$  = verkligt bearbetningsdjup (m)  
 $m$  = bearbetad jordmassa (kg)  
 $\rho$  = våt skrymdensitet (kg/m<sup>3</sup>)  
 $A$  = arean på stålramen (m<sup>2</sup>)

Ett medelvärde på bearbetningsdjupet per ruta räknades fram. Även ett medelvärde över alla block räknades fram, vilket används vid jämförelse mellan de olika leden.

## 6.7 Sönderdelning

Från varje ruta sparades två slumpvis utvalda hinkar med jord. Upptagningen av jorden skedde i samband med utgrävning för mätning av arbetsdjupet. Hinkarna stod inomhus i en kall maskinhall i ungefär en månad vilket medförde en viss torkning av jorden. För att få ett mått på hur bra de olika spetsarna sönderdelade jorden sållades varje hink med jord för sig i en sållmaskin med sex olika såll, 64 mm, 32 mm, 16 mm,

8 mm och 4 mm. De olika fraktionerna vägdes var för sig. Ett medelvärde per ruta och fraktion räknades ut. Fraktionerna som var större än 32 mm jämfördes mellan de olika leden.

Med hjälp av dessa data räknades ytan för varje fraktion ut enligt följande formel:

$$A_i = (6 * W_i) / (\rho (\phi_i * \phi_{i+1})^{1/2}) \quad (\text{Hadas \& Wolf, 1983})$$

där  $A_i$  = ytan för varje sållningsfraktion ( $m^2$ )  
 $W_i$  = massan hos den sållade fraktionen (kg)  
 $\rho$  = skrymdensitet hos jorden ( $kg/m^3$ )  
 $\phi_i$  = undre fraktionsgräns  
 $\phi_{i+1}$  = övre fraktionsgräns

Vid beräkning av ytan på de största aggregaten antogs en övre gräns på 128 mm och på de minsta en undre gräns på 2 mm.

Ytorna från de olika sållningsfraktionerna summerades för att få den totala ytan av den bearbetade jorden. En stor andel småaggregat ger en stor yta. En jämförelse gjordes mellan de olika leden med avseende på yta per kilo jord.

När den totala ytan på jorden var känd räknades sönderdelningsenergin ut från följande formel:

$$E_f = (E_m * \sum W_i) / \sum A_i \quad (\text{Hadas \& Wolf, 1983})$$

där  $E_f$  = sönderdelningsenergi ( $J/m^2$ )  
 $E_m$  = tillförd energi per kilo jord ( $J/kg$ )  
 $\sum W_i$  = sammanlagd massa för fraktionerna (kg)  
 $\sum A_i$  = sammanlagd yta för fraktionerna ( $m^2$ )

Energibehovet för sönderdelningen gavs därmed.

## 6.8 Halminblandning mätt med bildanalys

Andelen halm på ytan i de olika leden mättes i försök med olika typer av spetsar, inte vid test av olika breda spetsar. Mätningarna utfördes med hjälp av bildanalys.

Efter alla körningar vattnades tre små områden ( $0,5 m^2$ ) per ruta, detta för att få bra kontrast mellan halm och jord. Ett kamerastativ placerades på det vattnade området, och en bild per område togs.

Bilderna konverterades till TIF-format. TIF bilderna bestod av tre färgkanaler, röd, grön, och blå. Av de färgkanalerna utnyttjades bara informationen i den röda kanalen

vilket innebär att bilden då bara innehåller röd färgintensitet. Därefter formaterades bilderna om till 8-bitars svart-vitt.

Tröskelvärde för bilderna bestämdes manuellt, gråvärde högre än det bestämda ansågs vara halm. Resten räknades som bakgrund (jord). Bilderna kördes sedan i ett datoriserat bildbehandlingsprogram. Detta medförde att andelen halm på markytan kunde beräknas.

## **6.9 Halminblandning bedömt visuellt**

En visuell bedömning av hur stor andel av markytan som var täckt med halm gjordes. Efter körningarna gjordes tre bedömningar per ruta. En ram med ytan 0,25 m<sup>2</sup> placerades på marken och hur stor andel av ytan som var täckt med halm bedömdes visuellt.

## **6.10 Beräkning av dragkraftbehov**

Vid körning i rutorna slogs en strömbrytare i traktorn till och dataloggern registrerade den effekt motorn utvecklade, hjul- och radarhastighet. Radarhastigheten är den verkliga framkörningshastigheten.

Dragkrokseffekten får man genom att beräkna och dra ifrån effektförlusterna för rullningsmotstånd och slirning.

### **6.10.1 Rullningsmotstånd**

Hur stor effektförlust traktorn har på grund av rullningsmotstånd räknas ut enligt följande:

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

där  $P_{\text{rull}}$  = effektförlust på grund av rullningsmotståndet (kW)

$f$  = koefficient för traktorns rullningsmotstånd

$G$  = traktorns tyngd (N)

$V_H$  = hjulhastighet (m/s)

Koefficienten  $f$  har tagits från Magnusson, (2004).

### **6.10.2 Slirning**

Eftersom dataloggern registrerade både hjul och radarhastighet kunde slirningen räknas fram enligt följande:

$$\delta = ((V_H - V_R) / V_H) * 100$$

där  $\delta$  = slirning (%)  
 $V_H$  = hjulhastighet (km/h)  
 $V_R$  = radarhastighet (km/h)

Effektförlusterna på grund av slirning räknades ut enligt följande:

$$P_{slir} = P_{pto} * (\delta / 100) \text{ (Saleque, 1990)}$$

där  $P_{slir}$  = effektförlust på grund av slirning (kW)  
 $P_{pto}$  = uppmätt effekt (kW)  
 $\delta$  = slirning (%)

### **6.10.3 Dragkrokseffekt**

När effektförlusten på grund av rullningsmotstånd och slirning är kända räknas dragkrokseffekten ut enligt följande:

$$P_D = P_{pto} - P_{rull} - P_{slir}$$

Där:  $P_D$  = dragkrokseffekt (kW)  
 $P_{pto}$  = uppmätt effekt (kW)  
 $P_{rull}$  = effektförlust på grund av rullningsmotståndet (kW)  
 $P_{slir}$  = effektförlust på grund av slirning (kW)

### **6.10.4 Totalt dragkraftbehov**

Det totala dragkraftbehovet är ett mått på vilket dragkraftbehov ett redskap har per meter arbetsbredd vid ett givet djup. Redskapets dragkraftbehov räknas ut enligt följande:

$$F_{\text{tot}} = P_D * V_R$$

Där:  $F_{\text{tot}}$  = redskapets dragkraftbehov (kN)  
 $P_D$  = dragkrokseffekt (kW)  
 $V_R$  = radarhastighet (m/s)

När  $F_{\text{tot}}$  är känt räknas det totala dragkraftbehovet ut med hjälp av följande formel:

$$T_D = F_{\text{tot}} / b$$

Där:  $T_D$  = Totalt dragkraftbehov (kN/m)  
 $F_{\text{tot}}$  = redskapets dragkraftbehov (kN)  
 $b$  = redskapets arbetsbredd (m)

### **6.10.5 Specifikt dragkraftbehov**

Specifikt dragkraftbehov definieras som kraften per bearbetad tvärsnittsarea. Detta räknas fram med hjälp av det verkliga bearbetningsdjupet, redskapets arbetsbredd och redskapets dragkraftbehov enligt följande:

$$S_D = F_{\text{tot}} / ( b * d_v )$$

Där:  $S_D$  = redskapets specifika dragkraftbehov (kN/m<sup>2</sup>)  
 $F_{\text{tot}}$  = redskapets dragkraftbehov (kN)  
 $b$  = redskapets arbetsbredd (m)  
 $d_v$  = verkligt bearbetningsdjup (m)

### **6.10.6 Beräkning av dragkraft med modeller**

För beräkning av dragkraftbehovet användes två olika modeller båda framtagna av R.J. Godwin. Uppmätta värden på kohesion, djup, körhastighet, skrymdensitet, pinndelning, spetsbredd och antal pinnar sattes in i modell kallad *Soil Dynamics of Single and Multiple Tines at Speeds up to 20 km/h*. För att modellen skulle räkna med samma djup som det uppmätta verkliga bearbetningsdjupen i försöken, räknades djupet fram genom att anta att uppbyggnaden vid sidan om pinnarna skedde med 45 graders vinkel. Dessutom gjordes en beräkning av det specifika dragkraftbehovet med mindre än 45 graders uppbyggnadsvinkel genom att dividera det specifika dragkraftbehovet med 0,6. I detta fall antogs att den verkliga bearbetade tvärsnittsarean var 0,6 x arean med 45 graders uppbyggnadsvinkel (Wheeler & Godwin, 1996).

I modellen för beräkning av dragkraftsbehovet för vändskiveplogar kallad *Mouldboard plough forces*, sattes uppmätta värden på kohesion, djup, körhastighet,

skrymdensitet, vänskivelängd, skärbredd och spetsbredd in. De olika vinklarna som användes i modellerna uppskattades. Modellerna testades och jämfördes med några av de uppmätta värdena för dragkraft. Jämförelserna gjordes mellan led A (Plog), B (80 mm, djupt), C (80 mm, grunt), G (gåsfot, djupt), H (gåsfot, grunt) och I (fjädrande, grunt) i försök med olika typer av spetsar. I försöket med olika breda spetsar jämfördes alla leden med modellberäkningarna.

Modellerna kan hämtas på <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/caee/tinemodels.htm>

## 7 Resultat

### 7.1 Bearbetningsdjup

#### 7.1.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

Bearbetningsdjupen redovisas i tabell 6.

För alla leden, förutom led A (plog) och H (gåsfot, grunt) där det verkliga bearbetningsdjupet blev djupare än det inställda, har ett grundare verkligt bearbetningsdjup visats föreligga.

Lätt jord

Bearbetningsdjupen redovisas i tabell 6.

När det gäller försöket gjort på lätt jord visade det sig att led A (plog), H (gåsfot, grunt) och F (210 mm, grunt) hade ett djupare verkligt bearbetningsdjup i förhållande till det inställda.

**Tabell 6.** Inställt och verkligt bearbetningsdjup

Led	Inställt Djup (cm)	Styv jord (cm)	Lätt jord (cm)
A. Plog	20	23,1	23,6
B. 80 mm. Djupt	20	13,2	13,0
C. 80 mm. Grunt	10	8,1	7,2
D. 80 mm vingskär. Grunt	10	5,9	6,9
E. Sliten 80 mm. Grunt	10	8,8	7,6
F. 210 mm. Grunt	10	9,3	10,4
G. Gåsfot. Djupt	15	13,3	13,8
H. Gåsfot. Grunt	6	6,9	7,8
I. Fjädrande. Grunt	10	7,0	7,5



### 7.1.2 Olika bredd spetsar

Bearbetningsdjupen redovisas i tabell 7.

När det gäller försöket med spetsar av olika bredd, ökade det verkliga djupet med ökad spetsbredd.

Tabell 7. Inställt och verkligt bearbetningsdjup

Led	Inställt Djup (cm)	Verkligt Djup (cm)
A. 50 mm. Grunt	10	8,1
B. 65 mm. Grunt	10	8,2
C. 80 mm. Grunt	10	8,9
D. 120 mm. Grunt	10	9,5

## 7.2 Specifikt dragkraftbehov

### 7.2.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

Led C (80 mm, grunt) och led F (210 mm, grunt) krävde störst specifik dragkraft (fig. 12) men var inte signifikant skilda från led B (80 mm, djupt), D (80 mm vingskär, grunt) och E (sliten 80 mm, grunt).

Led A (plog) och H (gåsfot, grunt) krävde minst specifik dragkraft och var signifikant skilda från de övriga leden i försöket. Att lägga märke till var att gåsfoten hade betydligt lägre specifikt dragkraftbehov än vad övriga typer av kultivatorspetsar hade.

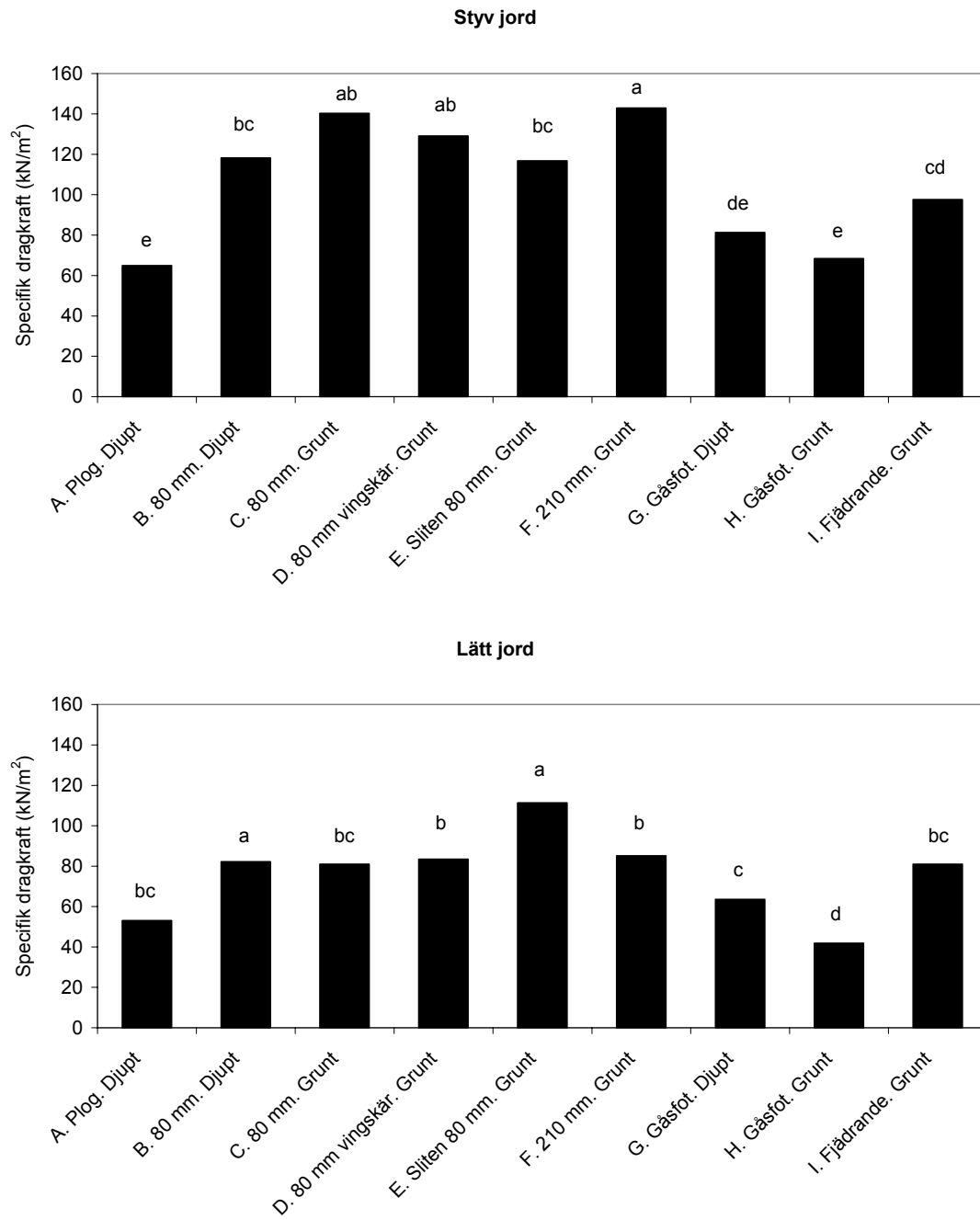
Lätt jord

Störst specifik dragkraft krävde led E (sliten 80 mm, grunt), men var inte signifikant skilt från led B (80 mm, djupt). Minst specifik dragkraft krävde led H (gåsfot, grunt), vilket var signifikant skilt från övriga led i försöket (fig. 12).

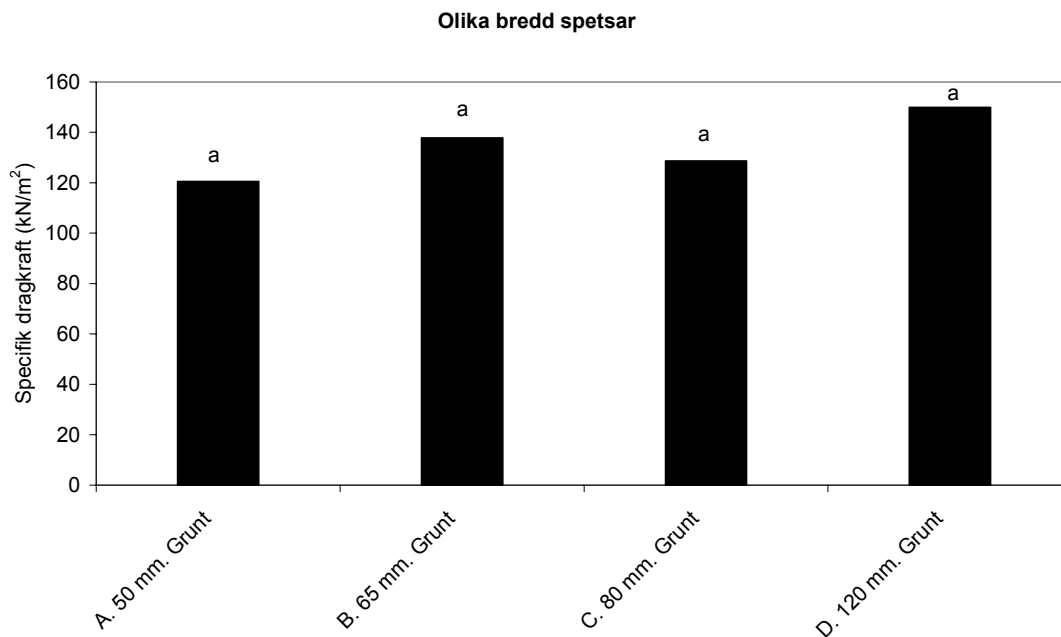
Det specifika dragkraftbehovet var högre på den styva jorden jämfört med den lätta jorden för samtliga spetsar och redskap.

### 7.2.2 Olika bredd spetsar

Det specifika dragkraftbehovet skilde sig inte signifikant åt mellan de olika leden (fig. 13), men i försöket hade led A (50 mm, grunt) lägst specifik dragkraft och led D (120 mm, grunt) störst.



**Figur 12.** Specifik dragkraft. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.



**Figur 13.** Specifik dragkraft. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.

## 7.3 Totalt dragkraftbehov

### 7.3.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

Led B (80 mm, djupt) krävde störst total dragkraft (fig. 14), men var inte signifikant skilt från led A (plog). Minst total dragkraft krävde led H (gåsfot, grunt) vilket också var signifikant skilt från de övriga leden.

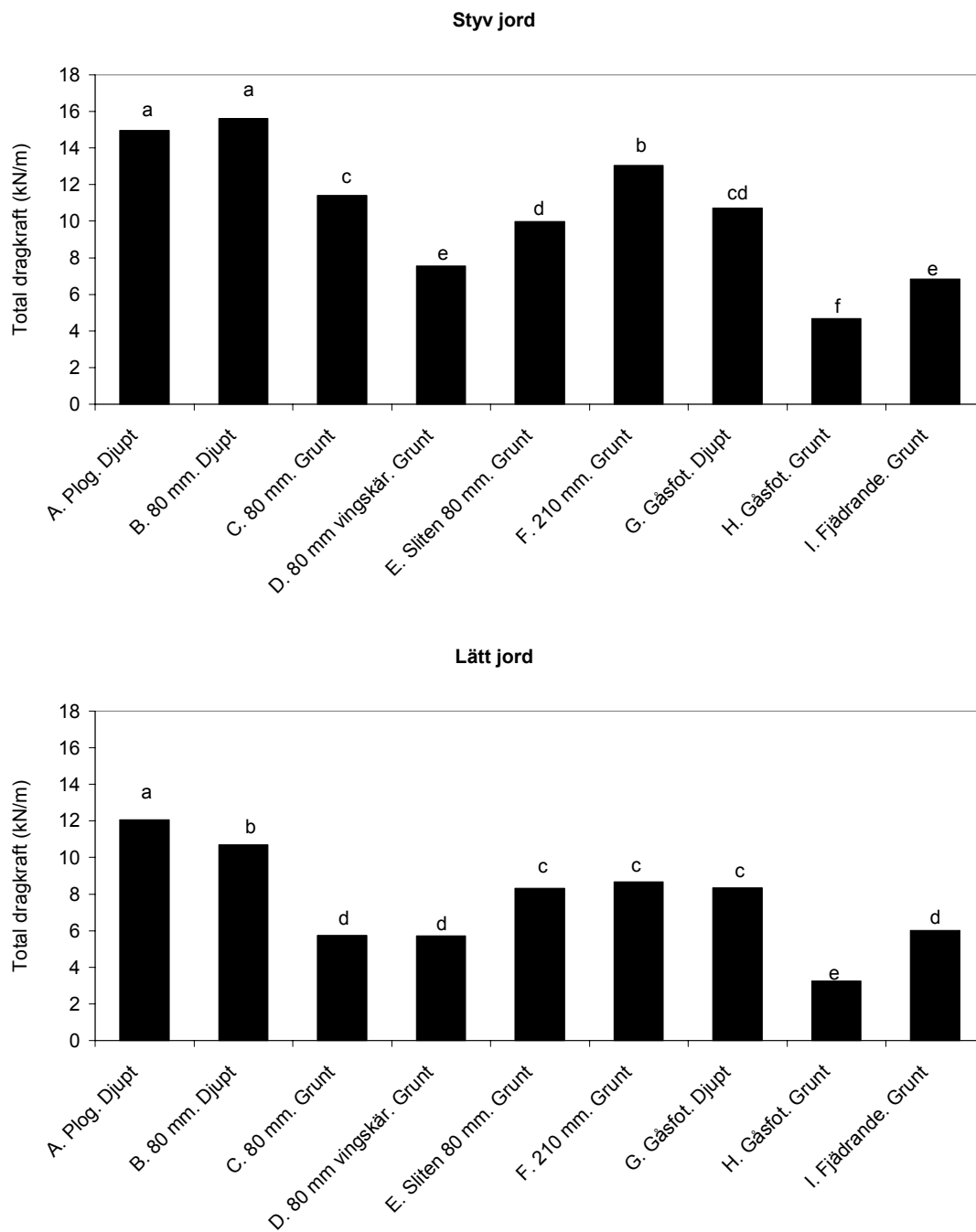
Lätt jord

När det gäller försöket på lätt jord krävde led A (plog) störst total dragkraft (fig. 14) och var signifikant skilt från de övriga leden. Minst total dragkraft krävde led H (gåsfot, grunt) och var signifikant skilt från de övriga leden.

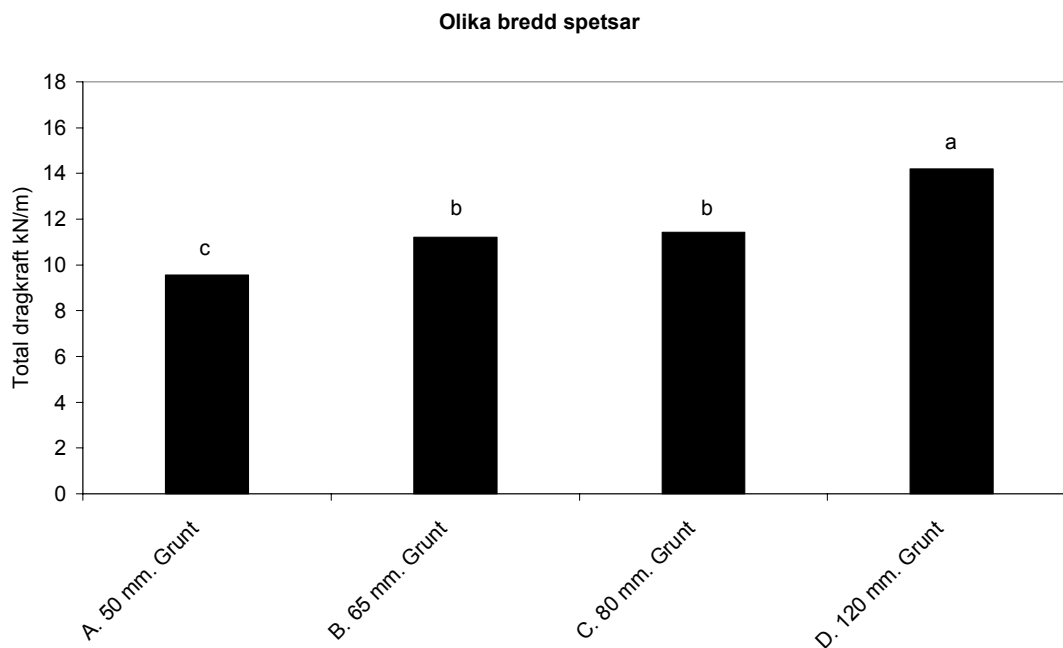
Det totala dragkraftbehovet var högre på den styva jorden jämfört med den lätta jorden för samtliga spetsar och redskap.

### 7.3.2 Olika bredd spetsar

Störst total dragkraft krävde led D (120 mm, grunt) och minst krävde led A (50 mm, grunt), skillnaden var signifikant (fig. 15). Mellan led B (65 mm, grunt) och C (80 mm, grunt) fanns däremot inte någon signifikant skillnad.



**Figur 14.** Totalt dragkraftbehov (kraft per meter arbetsbredd). Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.



**Figur 15.** Totalt dragkraftbehov (kraft per meter arbetsbredd). Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.

## 7.4 Aggregatstorleksfördelning

### 7.4.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

Led A (plog) gav störst andel stora aggregat (fig. 16), någon signifikant skillnad kunde emellertid inte urskiljas från led D (80 mm vingskär, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), G (gåsfot djupt) och H (gåsfot, grunt). Minst andel stora aggregat gav led I (fjädrande, grunt) dock fanns ingen signifikant skillnad från led C (80 mm, grunt).

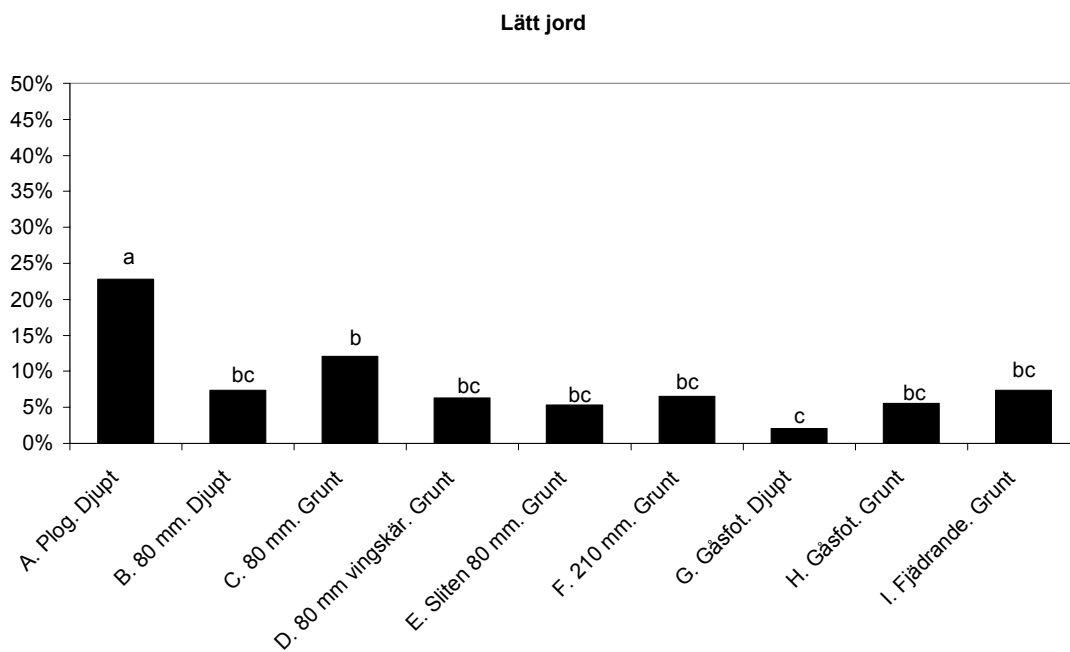
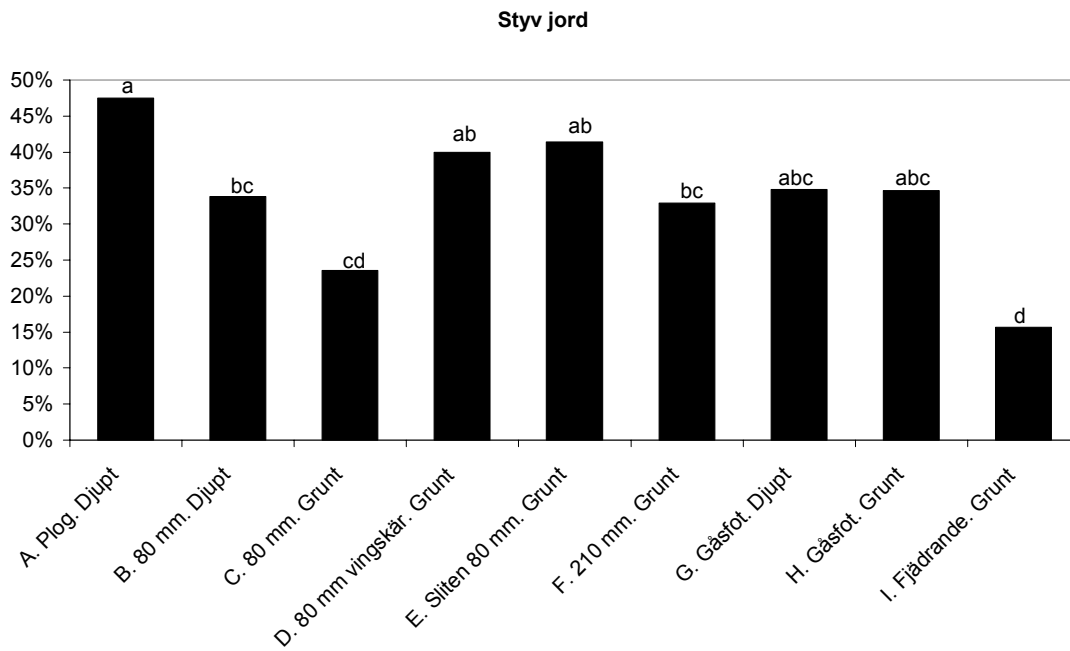
Lätt jord

Störst andel stora aggregat gav led A (plog), vilket skilde sig signifikant åt från de övriga leden (fig. 16). Led G (gåsfot, djup) gav minst andel stora aggregat, men skilde sig inte signifikant åt från led B (80 mm, djupt), D (80 mm vingskär, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), F (210 mm, grunt), H (gåsfot, grunt) och I (fjädrande, grunt).

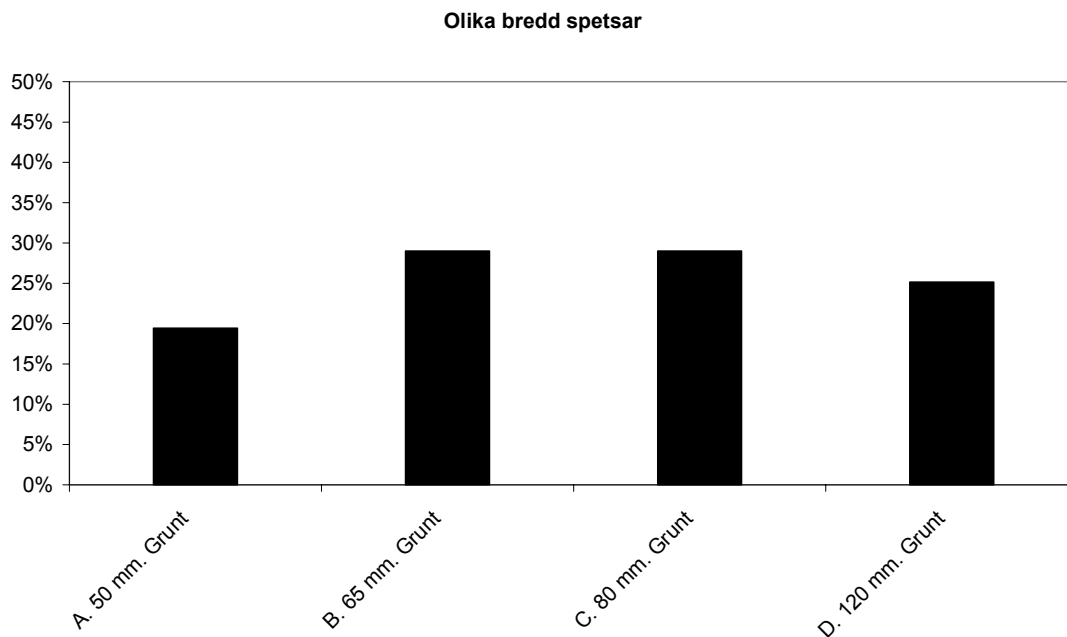
Alla typer av spetsar och redskap gav mindre andel stora aggregat på den lätta jorden jämfört med den styva jorden.

### 7.4.2 Olika bredd spetsar

Led B (65 mm, grunt) och C (80 mm, grunt) gav störst andel stora aggregat (fig. 17), minst andel stora aggregat gav led A (50 mm, grunt), men någon signifikant skillnad fanns inte jämfört med de övriga leden.



**Figur 16.** Aggregatstorleksfördelning, aggregat större än 32 mm. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.



**Figur 17.** Aggregatstorleksfördelning, aggregat större än 32 mm. Inga ledskillnader var statistiskt signifikanta.

## 7.5 Yta per kilo bearbetad jord

### 7.5.1 Olika typer av spetsar

#### Styv jord

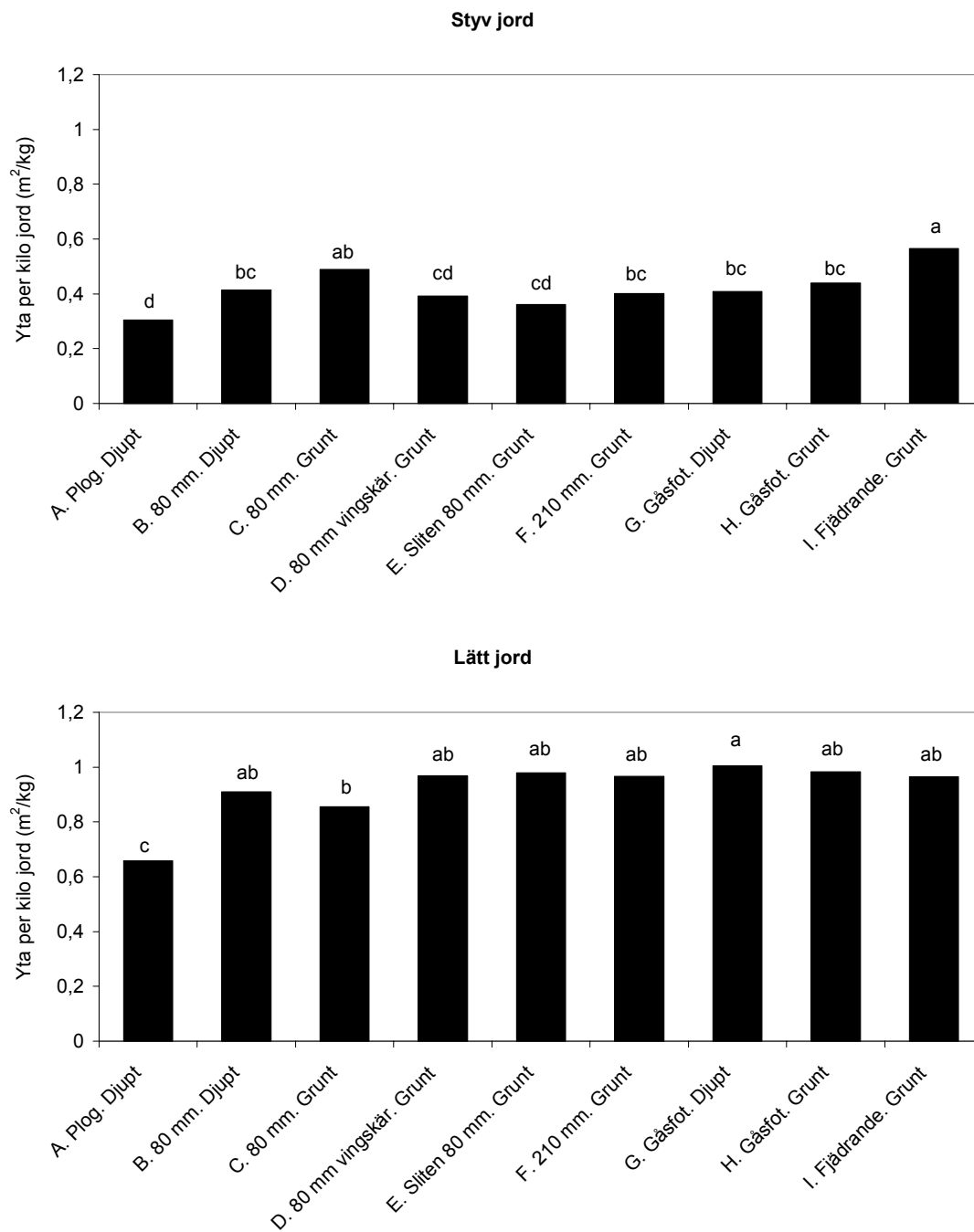
Störst yta per kilo bearbetad jord gav led I (fjädrande, grunt), men detta skilde sig inte signifikant åt (fig. 18) från led C (80 mm, grunt). Minst yta per kilo bearbetad jord gav led A (plog), men det fanns emellertid ingen signifikant skillnad från led D (80 mm vingskär, grunt) och led E (sliten 80 mm, grunt).

#### Lätt jord

Led G (gåsfot, djupt) gav störst yta per kilo bearbetad jord (fig. 18), någon signifikant skillnad kunde dock inte urskiljas från led B (80 mm, djupt), D (80mm vingskär, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), F (210 mm, grunt), H (gåsfot, grunt) och I (fjädrande, grunt). Minst yta per kilo bearbetad jord gav led A (plog), vilket skilde sig signifikant åt från de övriga leden. Alla typer av spetsar och redskap gav större yta per kilo bearbetad jord på den lätta jorden jämfört med den styva jorden.

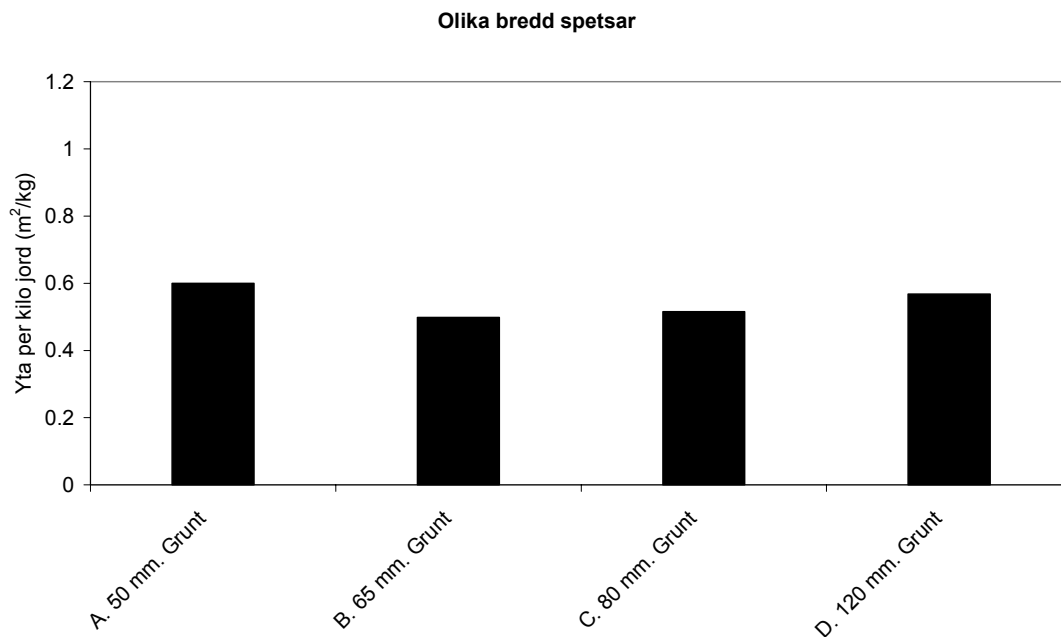
### 7.5.2 Olika bredd spetsar

Störst yta per kilo bearbetad jord gav led A (50 mm, grunt), någon signifikant skillnad från de övriga leden fanns inte (fig. 19). Minst yta per kilo bearbetad jord gav led B (65 mm, grunt) men inte heller här var skillnaden signifikant.



**Figur 18.** Yta per kg bearbetad jord. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda





**Figur 19.** Yta per kg bearbetad jord. Inga ledskillnader var statistiskt signifikanta.

## 7.6 Energibehov för sönderdelning

### 7.6.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

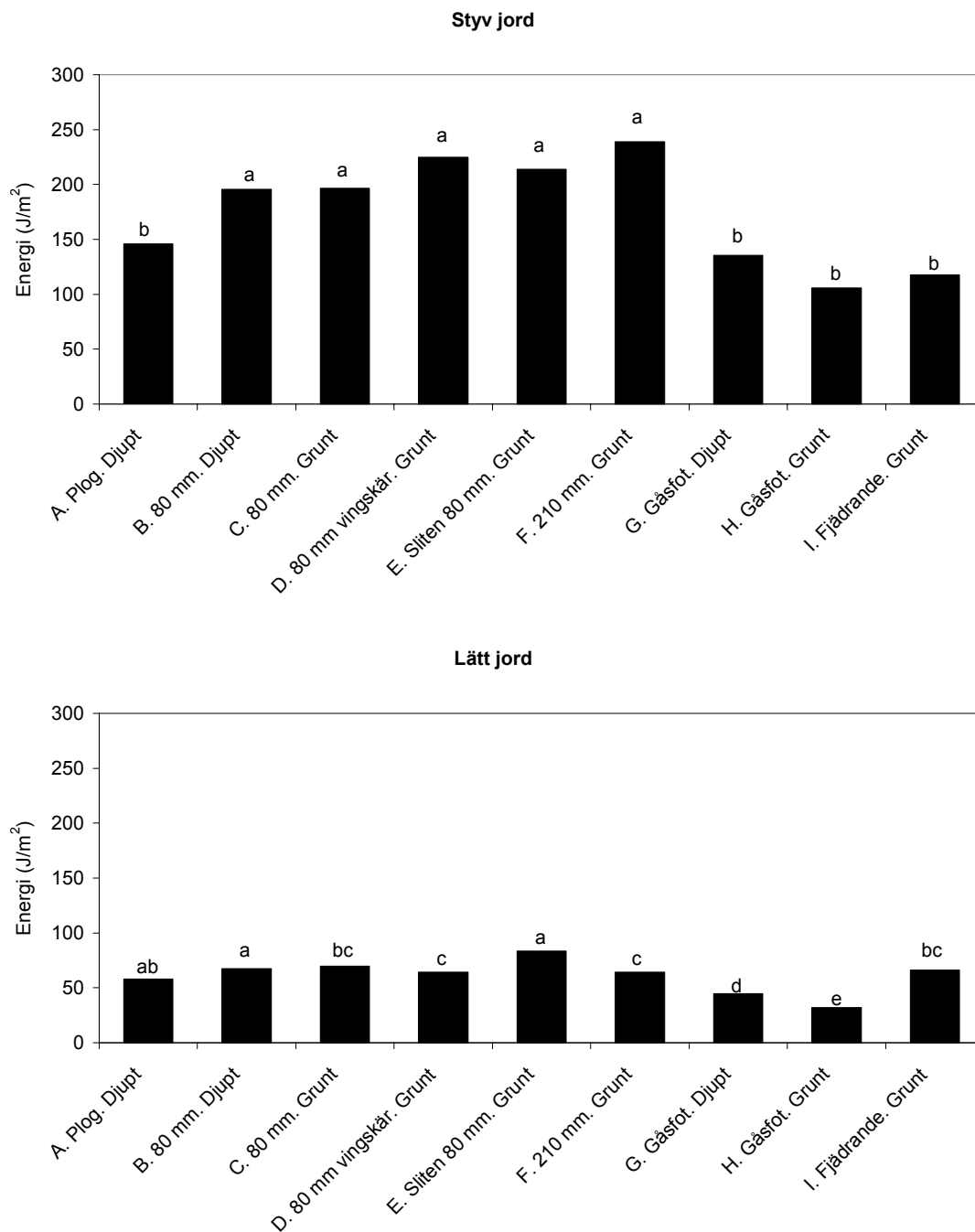
Högst energiåtgång för sönderdelning (fig. 20) hade led F (210 mm, grunt), det var dock inte signifikant skilt från led B (80 mm, djupt), C (80 mm, grunt), D (80 mm vingskär, grunt) och E (sliten 80 mm, grunt). Lägst energiåtgång för sönderdelning hade led H (gåsfot, grunt), men det var inte signifikant skilt från led A (plog), G (gåsfot, djupt) och I (fjädrande, grunt).

Lätt jord

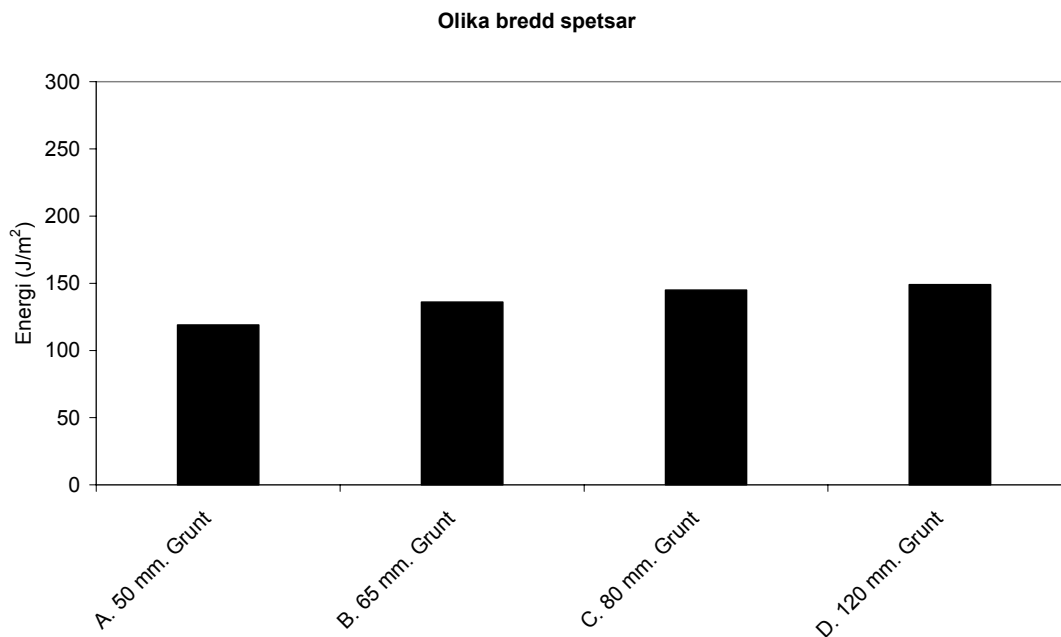
Led E (sliten 80 mm, grunt) hade högst energiåtgång för sönderdelning (fig. 20) men var inte signifikant skilt från led A (Plog) och B (80 mm, djupt). Minst energiåtgång hade led H (gåsfot, grunt), skillnaden var signifikant jämfört med övriga led. Alla typer av spetsar och redskap krävde mindre energi för sönderdelning på den lätta jorden jämfört med den styva jorden.

### 7.6.2 Olika bredd spetsar

Inga signifikanta skillnader mellan leden påvisades (fig. 21) men i försöket krävde led D (120 mm, grunt) mest energi och led A (50 mm, grunt) minst energi för sönderdelning.



**Figur 20.** Energibehov för sönderdelning. Ju lägre energi desto mer effektivt utnyttjar spetsar och redskap den tillförda energin för sönderdelning. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.



**Figur 21.** Energibehov för sönderdelning. Ju lägre energi desto mer effektivt utnyttjar spetsar och redskap den tillförda energin för sönderdelning. Inga ledskillnader var statistiskt signifikanta.

## 7.7 Halminblandning mätt med bildanalys

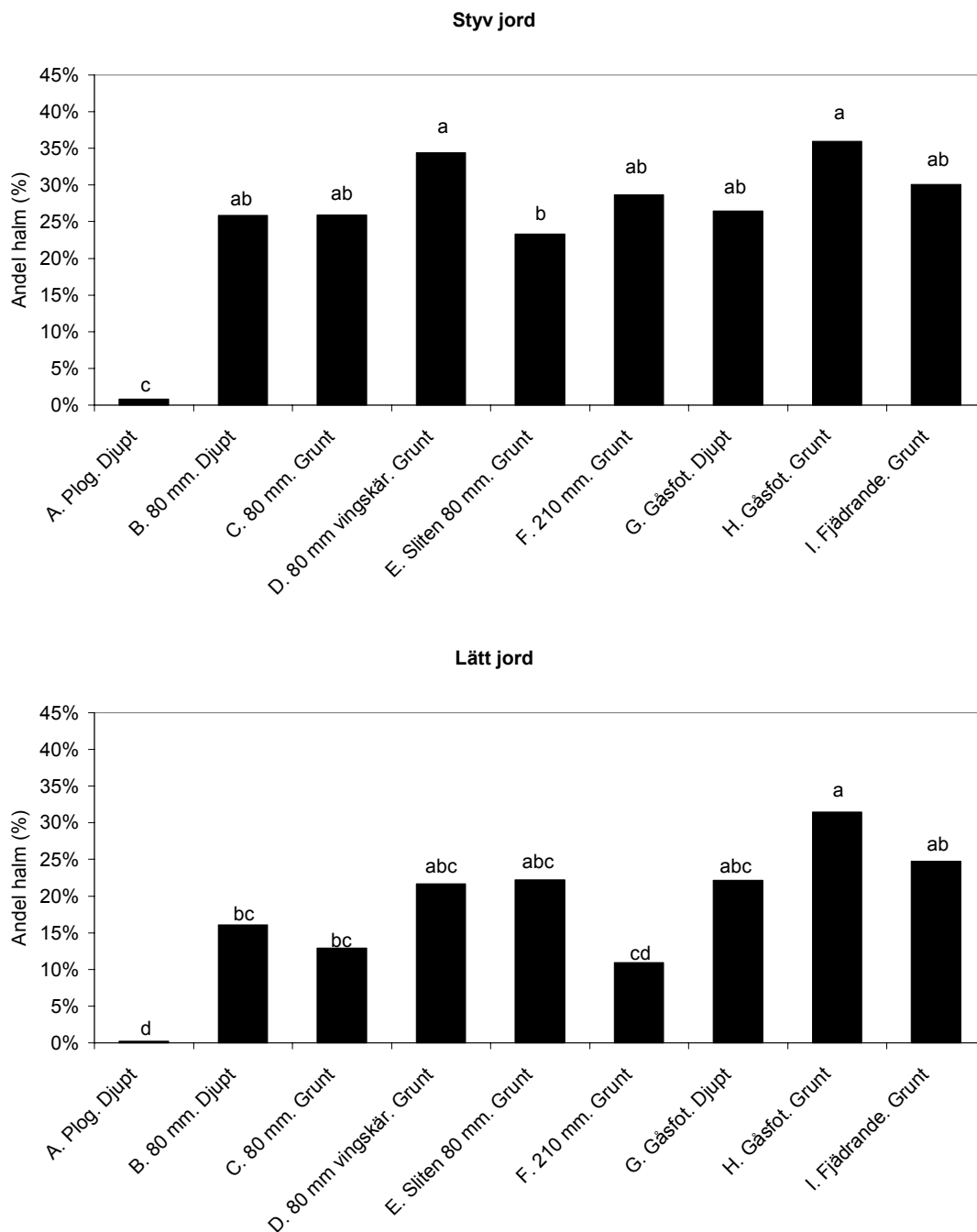
### 7.7.1 Olika typer av spetsar

Styv jord

Mest halm på markytan efter bearbetning gav led H (gåsfot, grunt), vilket skilde sig signifikant åt från led A (plog) och E (sliten 80 mm, grunt) (fig. 22). Led A (plog) gav minst halm på markytan efter bearbetning och skilde sig signifikant åt från övriga led. Att lägga märke till är, när det gäller de olika kultivatorleden, att led E (sliten 80 mm, grunt) gav minst halm på markytan efter bearbetning.

Lätt jord

Försöket visar att led H (gåsfot, grunt) gav mest halm på markytan efter bearbetning (fig. 22). Någon signifikant skillnad från led D (80 mm vingskär, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), G (gåsfot, djupt) och I (fjädrande, grunt) fanns dock inte. Minst halm på markytan efter bearbetning gav led A (plog), vilket inte skilde sig signifikant åt från led F (210 mm, grunt). Minst halm på markytan efter bearbetning, när det gällde de olika kultivatorleden, gav led F (210 mm, grunt).



**Figur 22.** Andel av markyta täckt med halm efter bearbetning, mätt med bildanalys. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.

## 7.8 Halminblandning bedömt visuellt

### 7.8.1 Olika typer av spetsar

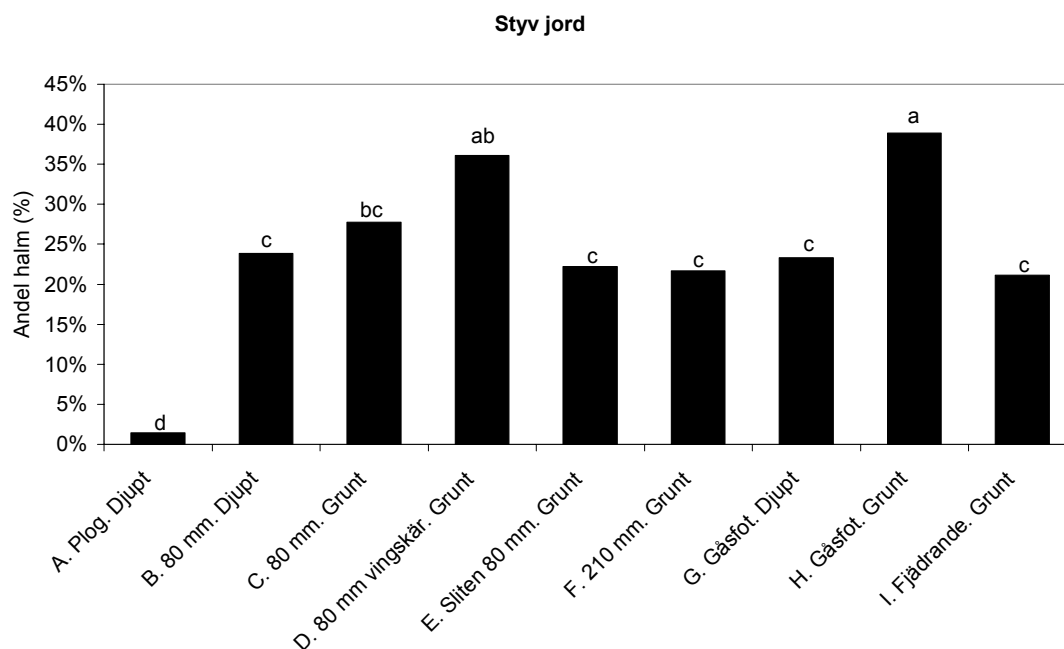
#### Styv jord

Mest halm på markytan efter bearbetning gav led H (gåsfot, grunt), men skilde sig inte signifikant åt från led D (vingskär, grunt). Led A (plog) gav även här minst halm på markytan efter bearbetning och skilde sig signifikant åt från övriga led i försöket.

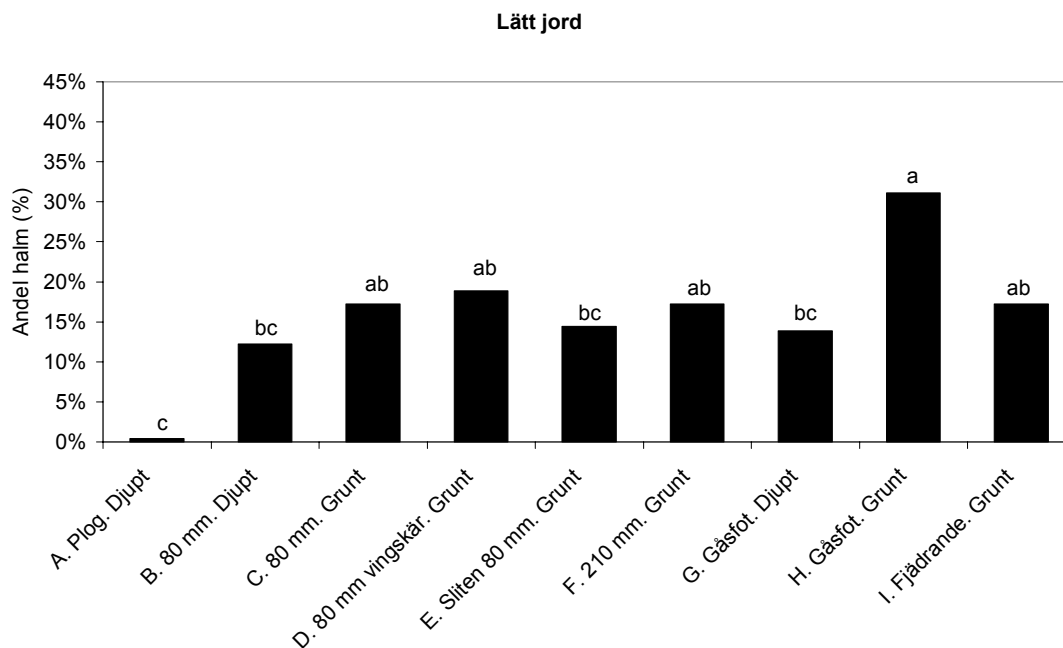
Av kultivatorleden gav led I (fjädrande, grunt) minst halm på markytan efter bearbetning (fig. 23) men skilde sig dock inte signifikant åt från led B (80 mm, djupt), C (80 mm, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), F (210 mm, grunt) och G (gåsfot, djupt).

#### Lätt jord

Led H (gåsfot, grunt) lämnade mest halm på markytan efter bearbetning (fig. 24), men skilde sig inte signifikant åt från led D (80 mm vingskär, grunt). Minst halm på markytan efter bearbetning gav led A (plog), ledet skilde sig signifikant åt från övriga led. Av kultivatorleden lämnade led B (80 mm, djupt) minst halm på markytan efter bearbetning, men skilde sig inte signifikant åt från led C (80 mm, grunt), D (vingskär, grunt), E (sliten 80 mm, grunt), F (210 mm, grunt) G (gåsfot, djupt) och I (fjädrande, grunt).



**Figur 23.** Andel av markytan täckt med halm efter bearbetning, bedömt visuellt. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.



**Figur 24.** Andel av markytan täckt med halm efter bearbetning, bedömt visuellt. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.

## 7.9 Dragkraftbehov beräknat med modeller

### 7.9.1 Olika typer av spetsar

#### Styv jord

Resultat redovisas i tabell 8.

Vid beräkning med mindre än 45 graders uppbnrytningsvinkel, kom de beräknade värdena närmare de mätta, dock inte för gåsfotleden och ledet med fjädrande pinne. De beräknade värdena stämde bättre för det totala dragkraftbehovet än för det specifika dragkraftbehovet vid jämförelse med de mätta värdena. För alla spetsar var det beräknade värdet lägre än det mätta. För plogen däremot var de beräknade värdena högre än de mätta.

#### Lätt jord

Resultat redovisas i tabell 9.

De beräknade värdena för totalt och specifikt dragkraftbehov var högre än de mätta värdena för det plöjda ledet. För gåsfotleden var alla beräknade värde lägre än de mätta. För led B (80 mm, djupt) och led C (80 mm, grunt) kom värdena som var beräknade med mindre än 45 graders uppbnrytningsvinkel närmare de mätta värdena.

### 7.9.2 Olika bredd spetsar

Resultat redovisas i tabell 10.

Beräknade värde för totalt dragkraftbehov blev högre än de mätta för samtliga led vid beräkning med 45 graders uppbyggningsvinkel. Vid beräkning av det totala dragkraftbehovet med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel blev värdena för alla led utom led D (120 mm, grunt) högre än de mätta värdena. De beräknade värdena för det specifika dragkraftbehovet kom närmare de mätta vid beräkning med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel, men var fortfarande lägre.

**Tabell 8.** Jämförelse mellan mätt och beräknat dragkraftbehov, styv jord

Led	<sup>1</sup> Mätt (kN/m)	<sup>2</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>3</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>4</sup> Mätt (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>5</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>6</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )
A. Plog. Djupt	15	20		65	71	
B. 80 mm. Djupt	16	8	14	118	27	44
C. 80 mm. Grunt	11	5	9	140	23	38
G. Gåsfot. Djupt	11	5	5	81	17	17
H. Gåsfot. Grunt	5	2	2	68	16	16
I. Fjädrande. Grunt	7	5	9	98	22	36

<sup>1</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>2</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>3</sup> Totalt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel.

<sup>4</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>5</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>6</sup> Specifikt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel.

**Tabell 9.** Jämförelse mellan mätt och beräknat dragkraftbehov, lätt jord

Led	<sup>1</sup> Mätt (kN/m)	<sup>2</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>3</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>4</sup> Mätt (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>5</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>6</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )
A. Plog. Djupt	13	19		53	65	
B. 80 mm. Djupt	11	8	13	82	50	83
C. 80 mm. Grunt	6	4	7	81	41	68
G. Gåsfot. Djupt	8	5	5	64	33	33
H. Gåsfot. Grunt	3	2	2	42	31	31
I. Fjädrande. Grunt	6	5	9	81	42	70

<sup>1</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>2</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>3</sup> Totalt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel.

<sup>4</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>5</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>6</sup> Specifikt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbyggningsvinkel.

**Tabell 10.** Jämförelse mellan mätt och beräknat dragkraftbehov, olika bredd spetsar

<b>Led</b>	<sup>1</sup> Mätt (kN/m)	<sup>2</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>3</sup> Beräknat (kN/m)	<sup>4</sup> Mätt (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>5</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )	<sup>6</sup> Beräknat (kN/m <sup>2</sup> )
A. 50 mm. Grunt	10	14	13	121	63	104
B. 65 mm. Grunt	11	15	14	138	66	111
C. 80 mm. Grunt	11	16	13	129	69	114
D. 120 mm. Grunt	14	16	11	150	71	118

<sup>1</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>2</sup> Totalt dragkraftbehov.

<sup>3</sup> Totalt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbrytningsvinkel.

<sup>4</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>5</sup> Specifikt dragkraftbehov.

<sup>6</sup> Specifikt dragkraftbehov, beräknat med mindre än 45 graders uppbrytningsvinkel.

## 8 Diskussion

### 8.1 Bearbetningsdjup

När det gäller försöken på lätt och styv jord kan man se att det verkliga bearbetningsdjupet stämmer bra överens med det inställda djupet för plog och gåsfot. Det beror på att dessa redskap skär igenom hela arbetsbredden, vilket inte gäller för övriga spetsar. Uppmärksammas kan värdena för 210 mm, grunt, på den lätta jorden där stämmer det verkliga bearbetningsdjupet bra överens med det inställda. Att det inte gör det på den styva jorden kan bero på att kultivatorpinnen hade fjädrar, vilkas funktion är till för stenulösning. Hade dessa pinnar haft en ännu starkare fjäder, borde troligtvis 210 mm spetsens verkliga bearbetningsdjup ha kommit närmare det inställda djupet även på den styva jorden.

Att den slitna 80 mm spetsens verkliga bearbetningsdjup kommer närmare det inställda djupet än vad en ny 80 mm spets gör, behöver inte bero på att spetsens vinkel har ändrats när den har blivit sliten. Eftersom den slitna spetsen är kortare än en ny spets, fick försökskörningarna göras med en annan djupinställning på kultivatorn.

I försöket med olika bredd på spetsar ses en ökning av bearbetningsdjupet i takt med ökad spetsbredd. Detta innebär också att med ökad spetsbredd följer en jämnare bearbetningsbotten, men bara så länge pinnen inte löser ut.

### 8.2 Specifikt dragkraftbehov

Plogen hade ett litet specifikt dragkraftbehov vid djup plöjning, detta kan förklaras med att den bryter upp jorden tvådimensionellt och har en liten angreppsvinkel (McKyes, 1989). Skillnaden mellan plog och gåsfot var väldigt liten. En förklaring till



detta kan vara att gåsfoten också hade en väldigt liten angreppsvinkel. Att gåsfoten hade ett mindre dragkraftbehov än övriga spetsar kan förklaras med försök som Spoor & Godwin (1978) gjorde. De mätte dragkraftbehov pinnar med och utan vingskår. När vingskår monterades på en konventionell pinne minskade det specifika dragkraftbehovet från 208 till 143 kN/m<sup>2</sup>. 80 mm spetsen, vid grund bearbetning, hade det näst största specifika dragkraftbehovet på lerjorden, anledningen till att den hade större specifikt dragkraftbehov än 80 mm djupt kan bero på skillnader i jordens kohesion på olika djup. Generellt hade alla typer av kultivatorspetsar ett större specifikt dragkraftbehov än plogen. Kultivatorspetsens initiala angreppsvinkel var inte mycket större än plogens, men spetsens angreppsvinkel ökar snabbt när man kommer högre upp på spetsen. Hade inte kultivatorspetsarna haft en så stor angreppsvinkel hade inte jorden kastats runt lika mycket i redskapet, vilket hade medfört en mindre sönderdelning. Plogens angreppsvinkel ökar inte på samma sätt och det var en anledning till att det specifika dragkraftbehovet var lägre än för kultivatorn. Gåsfoten hade det minsta specifika dragkraftbehovet i försöket på lättjord, vilket kan förklaras av att gåsfoten har en väldigt liten angreppsvinkel. Ett intressant samband mellan spetsbredd och specifikt dragkraftbehov kan man se i försöket med olika breda spetsar. Enligt Payne & Tanner (1959) kan man anta att dragkraftbehovet för en spets ökar linjärt med en ökad spetsbredd. Detta stämmer dock inte helt i försöket, 65 mm spetsen har större specifikt dragkraftbehov än 80 mm spetsen. Eftersom den smala spetsen trots sin ringa bredd gav ett så pass stort verkligt bearbetningsdjup tyder det på att det hade skett en bra uppbyggnad vid sidan av spetsen. Uppbyggnaden borde kräva mindre energi än att dra fram en bredare spets. Hade det inte skett en stor uppbyggnad i sidled hade det verkliga bearbetningsdjupet blivit mindre vilket hade medfört ett större specifikt dragkraftbehov.

Trots den höga lerhalten i försöket på styv jord var dragkraftbehovet relativt lågt för alla led.

### **8.3 Totalt dragkraftbehov**

Den djupa körningen på styv jord med 80 mm spetsen hade det största totala dragkraftbehovet i försöket med olika typer av spetsar, men på den lätta jorden var det plogen som hade det största totala dragkraftbehovet. Den grunda körningen med gåsfoten hade på både lätt och styv jord litet totalt dragkraftbehov. Uppmärksammas bör att det totala dragkraftbehovet i försöket med olika breda spetsar följer ett liknande mönster som för det verkliga bearbetningsdjupet, nämligen att 50 mm spetsen hade det minsta dragkraftbehovet och 120 mm det största.

## 8.4 Aggregatstorleksfördelning

Fördelningen av aggregat mindre än 32 mm var relativt lika mellan de olika leden, därav valde jag att jämföra fördelningen av aggregat större än 32 mm. Plogen var det redskap som hade störst andel aggregat större än 32 mm. Plogens sönderdelning sker till största delen genom sprickbildning vilket medför en mindre effektiv sönderdelning (McKyes, 1989, Koolen & Kupiers, 1983). Att plogens bearbetning skedde till ett större djup jämfört med övriga redskap kan också vara en anledning till den större andelen stora aggregat. Vid en grund bearbetning bryts det inte upp så stora aggregat därför att spetsen bryter inte upp jord under bearbetningsdjupet. Kultivatorns uppbrytning sker till stor del genom skjuvning, vilket ger en större sönderdelning. Den fjädrande pinnen gav minst andel stora aggregat på den styva jorden, detta beror troligtvis på att pinnen var fjädrande, vibrationerna eller pinnens rörelser hjälper effektivt till att sönderdela jorden. Davies et. al. (1993) skriver i sin rapport att fjädrande pinnar ger mindre andel stora aggregat jämfört med styva pinnar.

Överlag föll jorden sönder mer än förväntat på den styva jorden, vilket beror på de fysikaliska förhållanden som rådde vid försökstillfället, men också på hur förhållandena har varit tidigare under året.

## 8.5 Halminblandning

Vid en jämförelse av resultaten från den visuella bedömningen och mätningen gjord med bildanalys, ser man att resultaten stämmer ganska väl överens. Resultaten kan användas för en jämförelse mellan de olika leden, men varken värdena från den visuella bedömningen eller från bildanalysen ska ses som några absoluta värden. Det största problemet vid utförandet av bildanalysen var själva bilderna, skuggor och solreflektioner från leraggregat gjorde att bildanalysprogrammet missade en del av halmen. När ett aggregat blänkte blev aggregatet ljust och programmet uppfattade aggregatet som halm. Det var större problem med blänkande aggregat på den styva jorden än på den lätta jorden. För att få en förbättring av problemet med blänkande aggregat gjordes bilderna om till svart-vita bilder och ett tröskelvärde bestämdes för varje bild. Tröskelvärdet bestämdes genom att ändra värdet och se var bilden blev så rättvisande som möjligt, alltså att det som var halm var ljust och resten av bilden var mörkt och räknades som jord. Detta ledde till en stor felkälla eftersom bestämningen av tröskelvärdet skedde visuellt.

En slutsats av detta är att med bättre bilder är bildanalys en bra metod för mätning av hur stor andel av markytan som är täckt med halm.

## 8.6 Dragkraftbehov beräknat med modeller

När det fanns uppmätta värden på dragkraftbehovet för olika typer av spetsar kunde det vara intressant att jämföra de uppmätta värdena med teoretiska värden framräknade med hjälp av modeller. Modellerna byggde på att data om jorden, spetsarna, pinndelning och körhastighet m.m sattes in modellen.

En stor felkälla var att kohesionen inte mättes med samma metod som modellen var uppbyggd efter. Alla vinklar som sattes in i modellerna var uppskattade, vilket också kan vara ett bidrag till de dåliga resultaten. Modellen för beräkning av dragkraftbehovet för kultivatorer räknade med att spetsarna bröt upp jorden med en 45 gradig vinkel åt sidorna, vilket inte alls behöver stämma. Därför gjordes ännu en beräkning där uppbrytningsvinkeln antogs vara mindre än 45 grader. Det beräknade dragkraftbehovet ändrades då till högre värden och kom närmare de uppmätta, men stämmer ändå inte särskilt bra. För gåsfoten ändrades inte värdena när uppbrytningsvinkeln ändrades, det beror på att gåsfoten är så bred att den åstadkommer full genomskärning av arbetsbredden.

Som man kan se stämmer inte det beräkande dragkraftbehovet särskilt bra med det uppmätta, enligt Wheeler & Godwin (1996) stämmer modellen bra i den lägre regionen av hastighetsområdet som modellen beaktar och i den högre regionen. Men i mitten av hastighetsområdet (ca 10 km/h) stämmer inte modell beräkningarna riktigt lika bra. Vid beräkning av dragkraftbehoven användes samma hastighet som vid mätningarna, ca 8 km/h.

Undersökningarna visade att både dragkraftbehov och bearbetningsresultat varierade kraftigt mellan spetstyperna. Fortsatta undersökningar skulle därför vara av stort värde, både för maskintillverkare och jordbrukare.

## 9 Källförteckning

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 & Tillage Research, nr 57, sid 143-157.

Arvidsson, J., 2001. *Markmekanik I jordbruket – en intruduktion*. Kurslitteratur till Jordbearbetning och hydroteknik, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.

Arvidsson, J. & Dexter, T., 2004. *Fundamental aspects of tillage*. Kurslitteratur till Jordbearbetning, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.

Davies, B. et. al., 1993. *Soil management*, 5<sup>th</sup> ed. Kap 9-10, sid 125-161.

Dexter, A. R., 1988. *Advances in Characterization of Soil Structure*. Soil & Tillage Research, nr 11, sid 199-238.

Dexter, A. R. & Arvidsson, J., 2002. *Soil Mechanics: theory and applictions in agriculture*. Kursmaterial till Jordbearbetning och Hydroteknik, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.

Gill, W.R. & McCreey, W. F., 1960. *Relation of size of cut to tillage tool efficiency*. Agricultural Engineering, nr 41, sid 372-374, 381.

Godwin, R. J. & Spoor, G., 1977. *Soil failure with narrow tines*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 22, sid 213-288.

Hadas, A. & Wolf, D., 1983. *Energy efficiency in tilling dry clod-forming soils*. Soil & Tillage Research, nr 3(1), sid 47-59.

Håkansson, I., 2000. *Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning-Effekter-motåtgärder*. Rapporter Från Jordbearbetningsavdelningen, nr 99, sid 49, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.

Koolen, A. J. & Kupiers, H., 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences, nr 13.

McKeyes, E., 1989. *Developments in Agricultural Engineering 10:Agricultural Engineering Soil Mechanics*. Elsevier Science Publishing Company, Canada.

McKeyes, E., 1985. *Developments in Agricultural Engineering 7: Soil Cutting and Tillage*, sid 71. Elsevier Science Publishing Company, Canada.

Payne, P. C. J., 1956. *The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 1, sid 23-50.

Payne, P. C. J. & Tanner, D.W., 1959. *The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 4, sid 312-325.

Pettersson, O., Noren, O., Hansson, P.A. & Lindgren, M., 2002. *A system for on board determination of engine power by measuring fuel consumption at 1 Hz*. EurAgEng Budapest 2002. Paper Number 02-PM-024.

Saleque, U. M. & Jangiev, A. A., 1990. *Optimization of the operational parameters of a wheeled tractor for tillage operations*. Transactions of the ASAE. v.33 (4) s 1027-1032.

SirJacobs, D., Hanquet, B., Lebeau, F. & Destain, M. F., 2002. *On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture*. Soil & Tillage Research, nr 64 3-4, sid 231-242.

Spoor, G., 1975. *Fundamental Aspects of Cultivations*. Technical Bulletin, nr 29, sid 128-144.

Spoor, G. & Godwin, R. J., 1978. *An experimental investigation into the looseing of soil by rigid tines*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr23, sid 243-257.

Weidow, B., 2000. *Växtodlingens grunder*. LT, Stockholm.

Wheeler, P. N. & Godwin, R. J., 1996. *Soil Dynamics of Single and Multiple Tines at Speeds up to 20 km/h*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr63, sid 243-250.

## 10 Bilaga

Bilagan innehåller tabeller på resultat redovisade med figurer i rapporten.

### Specifikt dragkraftbehov

Tabell 11. Specifikt dragkraftbehov, olika typer av spetsar

Led	Styv jord (kN/m <sup>2</sup> )	Lätt jord (kN/m <sup>2</sup> )
A. Plog	65	53
B. 80 mm. Djupt	118	82
C. 80 mm. Grunt	140	81
D. 80 mm vinskär. Grunt	129	83
E. Sliten 80 mm. Grunt	117	111
F. 210 mm. Grunt	143	85
G. Gåsfot. Djupt	81	64
H. Gåsfot. Grunt	68	42
I. Fjädrande. Grunt	98	81

Tabell 12. Specifikt dragkraftbehov, olika bredd spetsar

Led	(kN/m <sup>2</sup> )
A. 50 mm. Grunt	121
B. 65 mm. Grunt	138
C. 80 mm. Grunt	129
D. 120 mm. Grunt	150

### Totalt dragkraftbehov

Tabell 13. Totalt dragkraftbehov, olika typer av spetsar

Led	Styv jord (kN/m)	Lätt jord (kN/m)
A. Plog	15	12
B. 80 mm. Djupt	16	11
C. 80 mm. Grunt	11	6
D. 80 mm vinskär. Grunt	8	6
E. Sliten 80 mm. Grunt	10	8
F. 210 mm. Grunt	13	9
G. Gåsfot. Djupt	11	8
H. Gåsfot. Grunt	5	3
I. Fjädrande. Grunt	7	6

**Tabell 14.** Totalt dragkraftbehov, olika bredd spetsar

Led	(kN/m)
A. 50 mm. Grunt	10
B. 65 mm. Grunt	11
C. 80 mm. Grunt	11
D. 120 mm. Grunt	14

### Aggregatstorleksfördelning

**Tabell 15.** Aggregatstorleksfördelning, olika typer av spetsar

Led	Styv jord, andel aggregat större än 32mm (%)	Lätt jord, andel aggregat större än 32mm (%)
A. Plog	47	23
B. 80 mm. Djupt	34	7
C. 80 mm. Grunt	24	12
D. 80 mm vinskär. Grunt	40	6
E. Sliten 80 mm. Grunt	41	5
F. 210 mm. Grunt	33	7
G. Gåsfot. Djupt	35	2
H. Gåsfot. Grunt	35	6
I. Fjädrande. Grunt	16	7

**Tabell 16.** Aggregatstorleksfördelning, olika bredd spetsar

Led	Andel aggregat större än 32mm (%)
A. 50 mm. Grunt	19
B. 65 mm. Grunt	29
C. 80 mm. Grunt	29
D. 120 mm. Grunt	25

## Yta per kilo bearbetad jord

Tabell 17. Yta per kilo jord, olika typer av spetsar

Led	Styv jord, total yta per kg (m <sup>2</sup> /kg)	Lätt jord, total yta per kg (m <sup>2</sup> /kg)
A. Plog	0,30	0,66
B. 80 mm. Djupt	0,41	0,91
C. 80 mm. Grunt	0,49	0,85
D. 80 mm vinskär. Grunt	0,39	0,97
E. Sliten 80 mm. Grunt	0,36	0,98
F. 210 mm. Grunt	0,40	0,97
G. Gåsfot. Djupt	0,41	1,01
H. Gåsfot. Grunt	0,44	0,98
I. Fjädrande. Grunt	0,57	0,96

Tabell 18. Yta per kilo jord, olika bredd spetsar

Led	Total yta per kg (m <sup>2</sup> /kg)
A. 50 mm. Grunt	0,60
B. 65 mm. Grunt	0,50
C. 80 mm. Grunt	0,52
D. 120 mm. Grunt	0,57

## Energibehov för sönderdelning

Tabell 19. Energibehov för sönderdelning, olika typer av spetsar

Led	Styv jord, energi (J/m <sup>2</sup> )	Lätt jord, energi (J/m <sup>2</sup> )
A. Plog	146	58
B. 80 mm. Djupt	196	67
C. 80 mm. Grunt	196	70
D. 80 mm vinskär. Grunt	225	64
E. Sliten 80 mm. Grunt	214	83
F. 210 mm. Grunt	239	64
G. Gåsfot. Djupt	135	45
H. Gåsfot. Grunt	106	32
I. Fjädrande. Grunt	118	66



**Tabell 20.** Energibehov för sönderdelning, olika bredd spetsar

<b>Led</b>	<b>Energi (J/m<sup>2</sup>)</b>
A. 50 mm. Grunt	119
B. 65 mm. Grunt	136
C. 80 mm. Grunt	145
D. 120 mm. Grunt	149

### Halminblandning mätt med bildanalys

**Tabell 21.** Halminblandning mätt med bildanalys

<b>Led</b>	<b>Styv jord, andel av markytan täckt med halm (%)</b>	<b>Lätt jord, andel av markytan täckt med halm (%)</b>
A. Plog	1	0
B. 80 mm. Djupt	26	16
C. 80 mm. Grunt	26	13
D. 80 mm vinskär. Grunt	34	22
E. Sliten 80 mm. Grunt	23	22
F. 210 mm. Grunt	29	11
G. Gåsfot. Djupt	26	22
H. Gåsfot. Grunt	36	31
I. Fjädrande. Grunt	30	25

### Halminblandning bedömt visuellt

**Tabell 22.** Halminblandning bedömt visuellt

<b>Led</b>	<b>Styv jord, andel av markytan täckt med halm (%)</b>	<b>Lätt jord, andel av markytan täckt med halm (%)</b>
A. Plog	1	0
B. 80 mm. Djupt	24	12
C. 80 mm. Grunt	28	17
D. 80 mm vinskär. Grunt	36	19
E. Sliten 80 mm. Grunt	22	14
F. 210 mm. Grunt	22	17
G. Gåsfot. Djupt	23	14
H. Gåsfot. Grunt	39	31
I. Fjädrande. Grunt	21	17