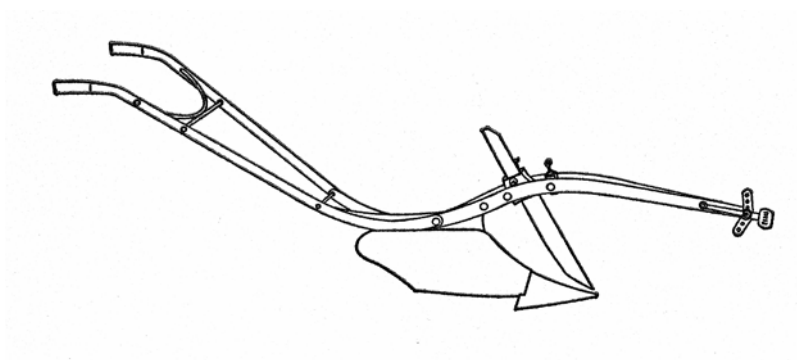




Institutionen för
Markvetenskap
Uppsala

MEDDELANDEN FRÅN JORDBEARBETNINGSAVDELNINGEN

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



Nr 47

2004

Marcus Magnusson

**Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat
för olika redskap och bearbetningssystem
vid höstsådd**

*Draught requirement and tillage result for different
implements and tillage systems for autumn
sowing*

ISSN 1102-6995

ISRN SLU-JB-M--47--SE

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	4
Summary	6
1 Inledning	8
2 Jorden	8
2.1 Hållfasthet	8
2.2 Skjuvhållfasthet och kohesion	9
2.3 Penetrationsmotstånd.....	10
2.4 Plasticitet och bearbetbarhet	10
3 Jordbearbetning	11
3.1 Syfte med jordbearbetning	11
3.2 Sönderdelning	11
3.3 Olika brott	12
3.3.1 <i>Skjuvningsbrott</i>	12
3.3.2 <i>Plastisk deformation och kritiskt arbetsdjup</i>	12
3.3.3 <i>Sprickbildning</i>	13
3.3.4 <i>Tvådimensionellt brott</i>	14
3.3.5 <i>Tredimensionellt brott</i>	14
3.4 Angreppsvinkel	15
3.5 Redskapens arbetssätt	16
3.5.1 <i>Plogkroppar</i>	16
3.5.2 <i>Kultivatorpinnar och gåsfotsskär</i>	17
3.5.3 <i>Tallrikar</i>	18
4 Dragkraft	18
4.1 Mätning med dynamometer.....	19
4.2 Modeller för dragkraft	20
5 Examensarbetets syfte	21
6 Material och metoder	22
6.1 Mättraktor	22
6.2 Mätutrustning	22
6.3 Test av mätutrustningen	24
6.4 Försöksplatser	24
6.5 Försöksled.....	24
6.6 Redskapen i försöken	25
6.6.1 <i>Konventionell plog</i>	25
6.6.2 <i>Grundplog</i>	26
6.6.3 <i>Kultivator</i>	26
6.6.4 <i>Gåsfotskultivator</i>	26
6.6.5 <i>Tallriksredskap</i>	26
6.6.6 <i>Grundbearbetande tallriksredskap</i>	27
6.6.7 <i>Bearbetande vält</i>	27
6.6.8 <i>Såmaskin</i>	27

6.7	Mätning av jordens hållfasthet.....	27
6.7.1	<i>Penetrationsmotstånd</i>	27
6.7.2	<i>Kohesion</i>	28
6.8	Bestämning av bearbetningsdjup.....	28
6.9	Sönderdelning.....	29
6.10	Halminblandning.....	30
6.11	Beräkning av dragkraftbehov.....	30
6.11.1	<i>Slirning</i>	31
6.11.2	<i>Rullningsmotstånd</i>	31
6.11.3	<i>Specifikt dragkraftbehov</i>	32
6.11.4	<i>Totalt dragkraftbehov</i>	33
6.12	Energiförbrukning.....	33
7	Resultat.....	34
7.1	Test av mätutrustning.....	34
7.2	Bearbetningsdjup.....	34
7.3	Specifikt dragkraftbehov för grundbearbetning.....	35
7.4	Totalt dragkraftbehov för grundbearbetning.....	36
7.5	Aggregatstorleksfördelning.....	39
7.6	Yta per kilo bearbetad jord.....	41
7.7	Energibehov för sönderdelning.....	41
7.8	Totalt dragkraftbehov för såbäddsberedning och sådd.....	44
7.9	Halmrester på markytan.....	46
7.10	Energiförbrukning.....	46
8	Diskussion.....	49
8.1	Test av mätutrustning.....	49
8.2	Bearbetningsdjup.....	49
8.3	Konventionell plog.....	49
8.4	Grundplog.....	50
8.5	Kultivator.....	51
8.6	Gåsfotskultivator.....	52
8.7	Tallriksredskap.....	53
8.8	Grundbearbetande tallriksredskap.....	53
8.9	Sammanfattande diskussion.....	54
	Litteraturlista.....	56

Förord

Detta projektet ingår i ett större, långliggande projekt, finansierat av SLF, där dragkraftbehov och energiförbrukning ska studeras i hela bearbetningssystem på olika jordarter. Med dragkraftbehovet som utgångspunkt ska beräkningar av bearbetningskostnader beräknas och ett kalkylprogram för rådgivning tas fram.

Sammanfattning

I dag ligger det stort fokus på att minska kostnaderna för de svenska lantbrukarna eftersom inkomsterna tenderar att minska. En post som utgör en stor kostnad för varje lantbrukare är kostnader för jordbearbetning. Minskad maskinkostnad, bränsleförbrukning och arbetstid per hektar minskar den totala kostnaden för jordbearbetning. Men samtidigt måste man fortfarande uppfylla vissa krav i bearbetningsresultatet.

Hösten 2003 startades ett större försök där dragkraften och bearbetningsresultatet studerades för olika redskap och bearbetningssystem vid höstsådd på en styvare och en lättare jord. Redskapen som studerades var konventionell plog, grundplog, kultivator, gåsfotskultivator, tallriksredskap och grundbearbetande tallriksredskap. Olika bearbetningsdjup och en respektive två överfarter utfördes med redskapen. Efter grundbearbetningen utfördes såbäddsberedning med grundbearbetande tallriksredskap och bearbetande vält innan sådd med en bearbetande såmaskin.

I varje led studerades specifikt dragkraftbehov (kraft per bearbetad tvärsnittsarea) och totalt dragkraftbehov (kraft per meter arbetsbredd). För att detta skulle vara möjligt användes en traktor (Massey Ferguson 6290) utrustat med ett bränslemätningssystem. En datalogger registrerade kontinuerligt motorns effekt motsvarande PTO-effekten. Genom att ta hänsyn till effektförluster på grund av slirning och rullningsmotstånd kunde den nyttiga dragkrokseffekten räknas fram. Med hjälp av hastigheten, som också registrerades, kunde dragkrokseffekten sedan räknas om till dragkraft. Det verkliga bearbetningsdjupet räknades fram genom att mäta skrymdensiteten samt väga den bearbetade jorden på en bestämd yta. Utifrån det verkliga bearbetningsdjupet, redskapens arbetsbredd och dragkraften kunde det specifika dragkraftbehovet för varje körning räknas fram. Från det totala dragkraftbehovet för grundbearbetningen, såbäddsberedningen och sådden kunde till sist dieselförbrukningen per hektar räknas fram för de olika bearbetningssystemen.

Jord från varje led sparades och sållades i olika fraktioner för att kunna räkna fram den sammanlagda partikelytan per kilo bearbetad jord. Detta gav ett mått på varje redskaps sönderdelning av jorden. Vidare beräknades energibehovet för sönderdelning (sönderdelning i relation till insatt energi). Efter sådd togs bilder av markytan för att beräkna hur stor del av markytan som bestod av halm. Detta gav ett mått på hur effektivt de olika redskapen brukade ner skörderester.

Den konventionella plogen och grundplogen bearbetade i stort sett till inställt djup medan övriga redskap bearbetade grundare än inställt bearbetningsdjup.

Den konventionella plogen och grundplogen hade lägst specifikt dragkraftbehov. På den lättare jorden skiljde sig inte det specifika dragkraftbehovet mellan de övriga redskapen åt så mycket. På den styvare jorden krävde kultivatoren och gåsfotskultivatoren störst specifikt dragkraftbehov. Andraöverfarterna krävde större specifik dragkraft än förstaöverfarterna med respektive redskap beroende på att lite ny jord bearbetades.

Den konventionella plogen och grundplogen sönderdelade jorden sämst. Mellan de övriga redskapen var skillnaderna små, men sönderdelningen var något större för tallriksredskapet och det grundbearbetande tallriksredskapet. På den lättare jorden blev skillnaderna i sönderdelning mindre mellan alla redskapen än på den styvare jorden. En andra överfart gav inte mycket extra sönderdelning för något redskap.

Skillnaderna i halmnedbrukningen mellan de oplöjda leden var små på båda försöksplatserna. Men konventionell plog och grundplog utmärkte sig genom att bruka ner halmen bäst och det direktsådda ledet lämnade mest halm kvar på markytan.

De plöjda leden förbrukade mest diesel. Det beror till stor del på att behovet av såbäddsberedning var större än för övriga led. Direktsådd förbrukade minst diesel, följt av en överfart med tallriksredskap och grundbearbetande tallriksredskap.

Om man ska ta hänsyn till alla studerade parametrar är det svårt att peka ut vilket system som är bäst. Valet av system kommer att bero på de rådande förhållandena på fältet som ska höstsås. Om det finns mycket skörderester som behöver brukas ned är konventionell plöjning eller grundplöjning att föredra. Då bör man sträva efter att plöja grunt, om man inte har stort luckringsbehov. Resultaten visar att grund plöjning med konventionell plog eller grundplog (ca 11 cm) kräver mindre diesel, ger bättre sönderdelning och försämrar inte halminblandningen. Om skörderesterna inte är ett problem kan istället ett system med grundbearbetande tallriksredskap eller gåsfotskultivator vara att föredra. De ger en bra sönderdelning av jorden och skär av hela arbetsbredden vilket ger en god ogräsbekämpning.

Summary

Tillage involves great expense for many farmers today. Lowering machinery costs, fuel consumption and working hours per hectare can reduce total costs. However, this must be achieved without compromising the results of tillage.

In a project carried out in the autumn of 2003, draught requirement and tillage outcomes were compared for different tillage implements during autumn sowing on a light soil and a heavy soil. The tillage implements used were mouldboard plough, shallow plough, stubble cultivator, heavy duty stubble cultivator with wing shares, tandem disc harrow and heavy disc harrow designed for shallow tillage. Except for the mouldboard plough, one and two passes were investigated for each implement. After primary tillage, the seedbed was prepared with a disc harrow for shallow tillage and a roller adapted for cultivation. Seed was drilled using a combi-drill with discs for shallow tillage.

For each implement the fuel consumption was measured using an adapted tractor (Massey Ferguson 6290) with equipment for measuring fuel consumption. The equipment was calibrated to give the PTO effect for any combination of fuel consumption and engine speed. This effect was assumed to be equal to the effect available at the wheels. The drawbar power was calculated by subtracting power losses through wheel slip and rolling resistance. The draught requirement was calculated by dividing the drawbar power by the actual speed, which was measured during work. The actual working depth was calculated by measuring bulk density before tillage and then weighing the cultivated soil from a specific area. On the basis of the tillage depth, the working width and the draught requirements, it was possible to calculate the specific draught (force per cross-sectional tilled area, kN/m^2). The draught per metre working width (kN/m) was also calculated and used to calculate the fuel consumption per hectare for the different systems.

Some of the cultivated soil from each line was sieved into different fractions, allowing the approximate surface area of the tilled soil (m^2/kg) and the energy requirement for fracturing (J/m^2) to be calculated. After drilling, the soil surface was photographed and the images were analysed to calculate how much of the soil surface was covered with straw from the previous crop.

To make a fair comparison of draught between different tillage implements, the actual working depth must be taken into consideration. The pre-set working depth is not an adequate parameter because the different implements do not leave equally uniform tillage bases. Therefore they till different volumes of soil at a particular pre-set working depth. The

mouldboard plough and the shallow plough nearly always worked to the pre-set depth while the other implements always tilled to a shallower level than the pre-set depth.

The mouldboard plough and the shallow plough had the lowest specific draught requirement. On the light soil, the specific draught did not differ much between the other implements. On the heavy soil, however, the specific draught was highest for the stubble cultivator and the heavy duty stubble cultivator with wing shares. The specific draught for the second pass was higher than that for the first pass for each implement because the actual working depth became very shallow.

The mouldboard plough and the shallow plough were least effective at fracturing the soil, while there was little difference between the other implements. However, the tandem disc harrow and the heavy disc harrow designed for shallow tillage fractured the soil most effectively. The fracturing did not increase much after the second pass with any of the implements.

The mouldboard plough and the shallow plough buried the straw best, while the direct drilling treatment left most straw on the soil surface. The differences between the other implements were low. The second pass did not seem to decrease the amount of straw on the soil surface.

The tillage systems with the mouldboard plough and the shallow plough consumed the most fuel. Much of the fuel used in the overall tillage process is consumed in seedbed preparation. Both the tillage systems with the plough required more seedbed preparation than the other systems and that was one of the reasons why the fuel consumption was higher. The direct drilling system required the lowest amount of fuel. Of all the cultivation systems, those with one pass with the tandem disc harrow and the heavy disc harrow for shallow tillage consumed the least fuel.

On the basis of all the parameters studied here, it is hard to identify an optimal tillage system. The choice depends on the prevailing conditions in the field in question. If there is a large amount of straw from the previous crop that is likely to cause problems, the mouldboard plough or the shallow plough are preferable because in such cases it is important to bury the straw well and this can justify the higher fuel consumption. The results of this study show that shallow ploughing (~11cm) with either of the two ploughs requires a lower amount of fuel, fractures the soil better and buries the straw as well as deep ploughing (~20cm). If the straw from the previous crop is not a problem, the system with the heavy disc harrow for shallow tillage or the heavy duty stubble cultivator with wing shares is preferable since both these implements give high soil fracturing and slicing across the entire working width, killing weeds effectively.

1 Inledning

Med dagens jordbrukspolitik tenderar lantbrukarnas inkomster att ständigt minska. Därför går utvecklingen inom jordbruket mot att minska kostnaderna, för att bibehålla lönsamheten. En stor post bland kostnaderna är kostnader för jordbearbetning. Minskning av bränsleförbrukning och tidsbesparing är två sätt att minska kostnaderna för jordbearbetningen. Men samtidigt måste man uppfylla vissa krav i bearbetningsresultatet.

Beroende på vad syftet med bearbetningen är kommer kraven på bearbetningsresultatet att ändras. Om man vill minimera antalet överfarter efter grundbearbetningen bör man sträva efter att sönderdela jorden så mycket som möjligt och bruka ner så mycket skörderester som möjligt redan vid grundbearbetningen. Är syftet istället att bekämpa ogräs eller att luckra jorden kan en stor sönderdelning vara ett slöseri med energi. Därför bör man välja ett bearbetningssystem som uppfyller de krav man eftersträvar med så liten energiinsats som möjligt. Genom mätning och undersökning av olika redskaps dragkraftbehov och bearbetningsresultat kan riktlinjer för val av bearbetningssystem tas fram.

För att jämföra dragkraftbehovet mellan redskap med olika geometri, arbetsbredd och arbetsdjup krävs att det specifika dragkraftbehovet används. Det definieras som dragkraften per tvärsnittsarea bearbetad jord (Gill & Vanden Berg, 1967, Spoor & Godwin, 1978).

I rapporten behandlas hur jorden påverkar dragkraftbehovet, de olika redskapens arbetssätt och hur man kan förutsäga dragkraftbehovet. Vidare redovisas dragkraft, bearbetningsresultat och dieselförbrukning från ett försök med olika bearbetningssystem vid höstsådd.

2 Jorden

2.1 Hållfasthet

Jordens hållfasthet definieras som det motstånd som måste överskridas för att jorden ska deformeras (Sirjacobs, et al. 2002). I marken anges krafter oftast för ett plan, det vill säga som kraft per ytenhet (N/m^2 eller Pa). Detta motsvarar enheten för tryck men i marken talar man oftast om spänningar (Arvidsson, 2001).

Om man studerar ett plan i marken verkar två sorters spänningar, normalspänningar och skjuvspänningar, i det studerade planet. Normalspänningarna verkar vinkelrätt, och skjuvspänningar verkar parallellt, i förhållande till planet.

För att få en bearbetning av jorden måste jordens motstånd överskridas. Hur stort detta motstånd är har stor betydelse för hur stor dragkraft som går åt för att bearbeta jorden. Ett högt motstånd kommer att medföra stort dragkraftsbehov och kommer dessutom att försämra bearbetningsresultatet genom att sönderdelningen minskar.

2.2 Skjuvhållfasthet och kohesion

När man kör på marken med till exempel en traktor, eller ett redskap bearbetar jorden, utsätter man jorden för krafter. Skjuvspänningar kommer, på grund av dessa krafter, att byggas upp tills ett maximum nås för en viss deformation. Detta maximum kallas för jordens skjuvhållfasthet (Spoon, 1975).

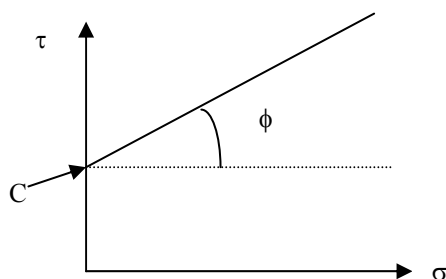
Överskrider detta maximum, det vill säga jordens skjuvhållfasthet, kommer skjuvning att uppstå. Med skjuvning menas att jorden deformeras längs ett plan (skjuvningsplan). Ytorna längs planet kommer då att glida mot varandra och förskjutas i sidled.

Skjuvhållfastheten beror på två samverkande krafter, kohesionskrafter och friktionskrafter, vilket kan beskrivas med följande formel:

$$\tau = C + \sigma_n * \tan \phi \quad (\text{Barnes, 2000})$$

där: τ = skjuvhållfasthet
 C = kohesion
 ϕ = intern friktionsvinkel
 σ_n = normalspänning

Den interna friktionsvinkeln beskriver hur hållfastheten ändras vid ändrad normalspänning. Egentligen är det lutningen på kurvan när skjuvspänningen plottas mot normalspänningen, se figur 1.



Figur 1. Skjuvhållfastheten som funktion av normalspänningen. När normalspänningen är noll, är skjuvhållfastheten lika med jordens kohesion.

Kohesionen beror på bindningskrafter mellan partiklar och vattnets bindningstryck vid uttorkning (Arvidsson, 2001). Bindningskrafterna mellan partiklarna är starkt beroende av partikelstorleken, mindre partiklar ger större bindningskrafter. Därför har lerjordar betydligt större kohesion än sandjordar. Därav kallas lerjordar för kohesionsjordar.

2.3 Penetrationsmotstånd

Ett annat mått på jordens hållfasthet är penetrationsmotståndet. Detta kan anses som fördelaktigt att använda eftersom det är enkelt att undersöka i fält. Det mäts genom att en konisk spets trycks ner i marken och kraften som krävs för detta mäts. Penetrationsmotståndet anges som kraften per areaenhet. En nackdel är att många faktorer, till exempel skjuvhållfasthet, friktion, kompressionsförmåga och adhesion, påverkar penetrationsmotståndet. Eftersom faktorerna påverkar olika mycket i olika jordar och vid olika vattenhalter kan det vara svårt att tolka resultaten från penetrationsmätningarna (Budhu, 2000).

2.4 Plasticitet och bearbetbarhet

Jordens vattenhalt har stor betydelse för dragkraftbehovet och bearbetbarheten. Ett vanligt begrepp när det gäller jordens vattenhalt är plasticitet. Plasticitetsindex definieras som det vattenhaltsspann där jorden är i plastiskt tillstånd. Den undre gränsen för plastiskt tillstånd, plasticitetsgränsen, definieras som den vattenhalt då jorden börjar spricka när den rullas till en cylinder med en diameter på 3 mm. Den övre gränsen för plastiskt tillstånd, flytgräns, definieras som den vattenhalt då jorden börjar flyta. Detta undersöks genom att en liten stålskål fylls med jord och en standardiserad skåra tas ut i jorden. Skålen släpps sedan 25 gånger från en standardiserad höjd. Den vattenhalt då skåran sluts efter precis 25 gånger definieras som jordens flytgräns (McKyes, 1989). Plasticitetsindex fås sedan enligt följande:

$$PI = LL - PL \quad (\text{McKyes, 1989})$$

där PI = plasticitetsindex
LL = flytgräns
PL = plasticitetsgräns

Plasticitetsindex beror bland annat på hur stor vattenhållande förmåga en jord har. Finkorniga jordar, till exempel lerjordar, har högt plasticitetsindex medan grovkorniga jordar, till exempel sandjordar, har lågt plasticitetsindex.

För att få ett gott bearbetningsresultat bör jorden ha en vattenhalt som gör att jorden är smulbar och lucker. Då är kohesionen låg och vattenhalten

tillräckligt låg så att jorden inte är plastisk. Den optimala vattenhalten ligger nära plasticitetsgränsen. Oavsett jordtyp är den optimala vattenhalten för bearbetning cirka 90 % av plasticitetsgränsen (Dexter, 1988). Är vattenhalten för låg kommer kokor att bildas vid bearbetningen vilket resulterar i ett dåligt bearbetningsresultat och om vattenhalten överstiger plasticitetsgränsen är jorden inte bearbetningsbar.

3 Jordbearbetning

3.1 Syfte med jordbearbetning

Det främsta målet med jordbearbetning är att skapa en gynnsam miljö för de odlade växterna (Weidow, 2000). För att uppnå detta krävs att redskapen som används utför följande. De ska luckra jorden. Skörderester ska blandas in väl i jorden så att man minimerar spridning av patogener till den följande grödan. Genom att blanda in skörderester jämnt i jorden påskyndas även nedbrytningen. Ogräsen ska bekämpas. Varje bearbetning utför en ogräsbekämpning. För att bekämpa rotoogräs effektivt är det önskvärt att så stor del som möjligt av marken blir genomskuren. Detta sker effektivast med en plog vilken skär av hela arbetsbredden. Det finns även andra redskap som skär av hela arbetsbredden, till exempel gåsfotskultivatorer. För att bekämpa örtogräs krävs det att dessa täcks med jord. Alltså bör hela markytan bearbetas och jord dras upp underifrån och hamna på markytan för att begrava ogräs. För att få en gynnsam porstorleksfördelning krävs oftast någon återpackning av den bearbetade jorden. Med återpackning underlättas växternas vatten- och näringsupptag genom att de får bättre kontakt med jordpartiklarna (Weidow, 2000).

3.2 Sönderdelning

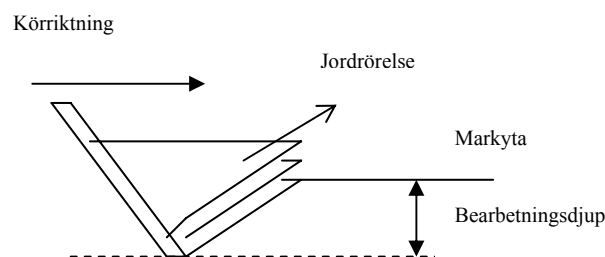
Graden av sönderdelning vid bearbetning beror på jordens hållfasthet. När jordens hållfasthet är låg kan bearbetning med olika redskap sönderdela jorden likvärdigt och ge samma bearbetningsresultat. Men är hållfastheten hög kan skillnaderna mellan redskap bli väldigt stora. Genom att sålla den bearbetade jorden i olika stora fraktioner kan man få ett mått på hur stor sönderdelningen är. Desto större andel små aggregat, desto större del av den tillförda energin har kommit till nytta för sönderdelning (Gill & Vanden Berg, 1967, Gill & McCreery, 1960).

3.3 Olika brott

Beroende på markförhållanden, främst vattenhalten, och redskapets utformning och egenskaper kommer jorden att brytas upp olika vid bearbetning. Nedan behandlas olika brott som kan uppstå och hur redskapens utformning påverkar detta.

3.3.1 Skjuvningsbrott

Enligt Aluko & Seig (2000) utsätts jorden för kompressiva spänningar när ett redskaps bearbetningsorgan rör sig genom marken. Detta ger upphov till skjuvningsbrott. Brott uppstår när den pålagda skjuvspänningen blir större än jordens skjuvhållfasthet. Ett jordblock lossnar då och glider uppåt och framåt längs redskapet och den fortfarande obearbetade jorden. Därefter byggs skjuvspänningar upp på nytt och när de på nytt överskrider jordens skjuvhållfasthet lossnar ett nytt jordblock. Detta upprepas om och om igen. Figur 2 visar förloppet. Det är hur kompressibel jorden är som bestämmer hur tätt brotten uppstår. Ju lättare det är att pressa samman jorden desto längre blir det mellan brotten.

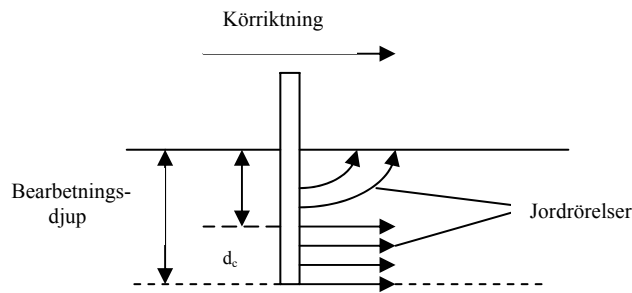


Figur 2. Skjuvningsbrott. Jordblock skjuvas och glider uppåt, framåt längs redskapet och den obearbetade jorden. Avståndet mellan brotten bestäms av hur kompressibel jorden är (Aluko & Seig, 2000).

När hastigheten ökar blir skjuvningsbrotten inte lika tydliga vilket resulterar i en bättre sönderdelning.

3.3.2 Plastisk deformation och kritiskt arbetsdjup

Spoor & Godwin (1978) visade att under ett visst bearbetningsdjup, kallat det kritiska bearbetningsdjupet, kommer jorden inte längre att skjuvas och röra sig uppåt och framåt. Jorden kommer istället att röra sig framåt och i sidled, så kallad plastisk deformation, se figur 3.



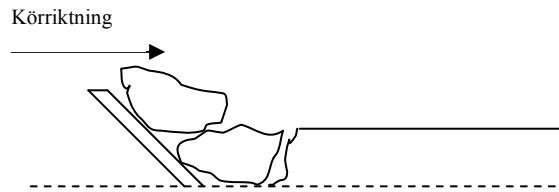
Figur 3. Kritiskt bearbetningsdjup. Under det kritiska bearbetningsdjupet, d_c , sker plastisk deformation. Jorden rör sig inte längre uppåt och framåt som vid skjuvningsbrott utan framåt och åt sidorna.

Vid plastisk deformation kommer jorden inte att luckras. Den kommer att flyta runt pinnen och därför istället bli sammanpackad. Det kritiska bearbetningsdjupet varierar mellan jordar men beror även på vattenhalten. Därför kommer det kritiska bearbetningsdjupet att variera på samma jord vid olika bearbetningstidpunkter. Om vattenhalten ökar kommer det kritiska bearbetningsdjupet att minska (Spoor & Godwin, 1978).

Vid bearbetning under det kritiska bearbetningsdjupet kommer inte dragkraftbehovet per meter arbetsbredd skilja sig nämnvärt jämfört med bearbetning till samma djup vid torrare förhållanden. Däremot kommer det specifika dragkraftbehovet att öka kraftigt. Detta beror på att det specifika dragkraftbehovet definieras som dragkraft per tvärsnittsarea bearbetad jord. Eftersom jorden under det kritiska bearbetningsdjupet inte bearbetas kommer tvärsnittsarean minska jämfört med bearbetning till samma djup vid torrare förhållanden (McKyes, 1989).

3.3.3 Sprickbildning

Det tredje sättet för jorden att brytas upp vid bearbetning är genom sprickbildning. Detta sker främst då jordens hållfasthet är relativt hög (Aluko & Seig, 2000). Sprickbildningen börjar vid bearbetningsorganets spets och växer snabbt upp mot markytan, se figur 4. Sprickorna växer fram mellan aggregat i marken. De uppträder ganska oregelbundet och främst där hållfastheten är som lägst. Sprickbildning resulterar i ett kokigt bearbetningsresultat. Hur stora kokorna blir bestäms av jordens hållfasthet. Brott genom sprickbildning ger varken skjuvning eller packning av jorden (Payne, 1956).



Figur 4. Sprickbildning. När jordens hållfasthet är hög spricker jorden från redskapets spets oregelbundet upp mot markytan. Bearbetningsresultatet blir kokigt.

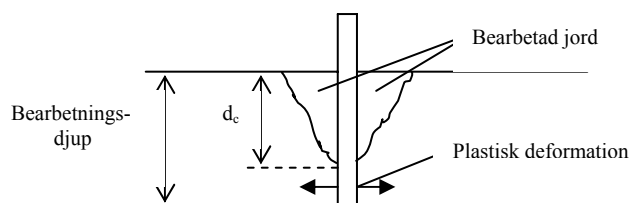
3.3.4 Tvådimensionellt brott

Brott i jorden kan beskrivas med hjälp av en tvådimensionell modell om bladet som går i marken är betydligt bredare än vad det är djupt. Förhållandet mellan bredd och djup bör vara minst 10:1 (McKyes, 1989). Bearbetning sker då i princip lika brett som bladets bredd och bearbetningen utanför bladets bredd kan försummas. Jorden rör sig då i huvudsak framåt och vertikalt.

3.3.5 Tredimensionellt brott

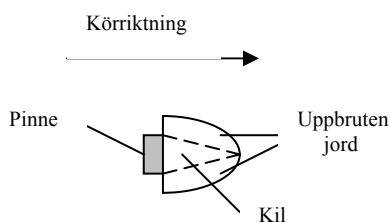
När man ska beskriva hur jorden bryts upp vid bearbetning med smala blad, eller pinnar, måste man ta hänsyn till jorden som bearbetas vid sidan om pinnarna. Med smala pinnar menas pinnar med ett förhållande mellan djup och bredd mindre än 1:1 (Payne, 1956). Jordens uppbyggnad av en smal pinne kan beskrivas med en tredimensionell modell. Detta krävs på grund av att jorden som bryts upp och rör sig vid sidan om pinnarna utgör en så stor del att den inte kan försummas. Jorden som bearbetas vid sidan om pinnen är oftast betydligt bredare än pinnens bredd (Dexter & Arvidsson, 2002).

Tvårsnittsåret av den bearbetade jorden kommer att vara formad som ett V, sett i körriktningen. Den kommer att vara lika med pinnens bredd längst ner vid spetsen, eller vid det kritiska djupet, och kommer att bli bredare och bredare upp mot markytan, se figur 5.



Figur 5. En smal pinne bryter upp och bearbetar jord betydligt bredare än dess egen bredd.

Sett uppifrån får jorden som bryts upp framför en pinne formen av en halvmåne. När pinnen förs framåt spricker jorden upp och en kil bildas på spetsens framsida, se figur 6.



Figur 6. Jorden framför pinnen bryts upp i form av en halvmåne. Halvmånen spricker upp och en kil av jord bildas på pinnen (Payne, 1956).

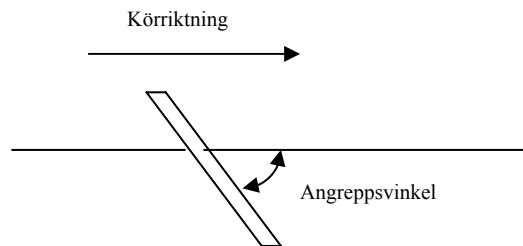
Den uppspruckna halvmånen kommer att röra sig uppåt och ut åt sidorna. Kilen på pinnen kommer att packas och långsamt tryckas upp längs pinnen och falla sönder. Den kommer hela tiden att byggas på med jord underifrån. Till skillnad från breda pinnar, där jorden främst utsätts för kompressiva krafter, kommer jorden här även att utsättas för sprickbildande påkänningar då jorden pressas ut åt sidorna (Aluko & Seig, 2000).

3.4 Angreppsvinkel

Jorden kommer att brytas upp olika beroende på redskapets angreppsvinkel, se figur 7. Angreppsvinkeln kommer även att påverka redskapets dragkraftbehov. När angreppsvinkeln är liten, mindre än 45° , kommer jorden att lyftas och sönderdelas genom sprickbildning på grund av att en uppåtriktad kraft från pinnen påverkar jorden (Davies et al. 1993, Koolen & Kupiers, 1983).

När angreppsvinkeln är stor, över 90° , blir effekten den omvända. Pinnen kommer då att trycka på jorden med en nedåtriktad kraft och kommer då inte att bryta upp jorden utan krossar istället kokor effektivt. Detta utnyttjas med en sladdplanka.

Dragkraften kommer att vara högre för större vinklar (Payne & Tanner, 1959). En tydlig gräns uppträder vid en angreppsvinkel mellan 45° och 50° . Vid högre angreppsvinklar än detta ökar dragkraftbehovet kraftigt. Detta beror på att mekanismen för jordens uppbrytning ändras och att den större angreppsvinkeln medför att en större area skjuvas (Aluko & Seig, 2000, Payne & Tanner, 1959).



Figur 7. Vinkeln mellan pinnen och markytan kallas för redskapets angreppsvinkel.

3.5 Redskapens arbetsätt

De olika redskapen som används i försöket har olika arbetsätt. Nedan kommer redskapens grundläggande arbetsätt att redovisas. Även redskapens bearbetningsresultat kommer att belysas.

3.5.1 Plogkroppar

Plogen används uteslutande för primärbearbetning. Den skär av jorden utmed hela arbetsbredden och vänder jorden upp och ner. Detta ger en effektiv ogräsbekämpning, luckring och myllning av skörderester.

Vid plöjning är den bearbetade bredden lika med bredden på de bearbetande bladen, det vill säga skären (Koolen & Kupiers, 1983). Plogen bryter alltså jorden tvådimensionellt. Ingen jord bryts upp på sidorna av plogkroppen. Jorden skärs loss av skäret men det initiala brottet utförs av spetsen. Skäret, och spetsen, har oftast en väldigt liten angreppsvinkel för att minska dragkraftsbehovet. Därefter leds jorden upp mot vändskivan som vänder/vrider jorden mellan 120°-180°. Denna vändning av jorden gör att jorden bryts upp och sönderdelas. Hur mycket jorden sönderdelas beror på jordens hållfasthet, körhastighet och vändskivans utformning.

På grund av att angreppsvinkeln är liten sker uppbrytningen främst genom sprickbildning vilket medför att sönderdelningen oftast blir relativt liten (Aluko & Seig, 2000, Davies et. al., 1993). Men sönderdelningen kan ändå bli ganska stor vid plöjning. Om förhållandena är sådana att skjuvning uppstår ökar sönderdelningen. Detta beror på att de skjuvade jordklumparna då gnids mot varandra och därmed sönderdelas under vändningen. Även när jorden bryts upp genom sprickbildning kan sönderdelningen bli betydande. Då fortsätter jorden ofta att spricka upp under vändningen. Men sönderdelningen blir ofta lägre än vid skjuvning och ett kokigare bruk fås. När vattenhalten är hög sker ofta en plastisk deformation. Då håller tiltan ihop genom hela vändningen och sönderdelningen blir liten. Till slut kan en

viss sönderdelning ske när tiltan lämnar vändskivan. Denna sönderdelning beror på hur mycket tiltan försvagats vid vändningen.

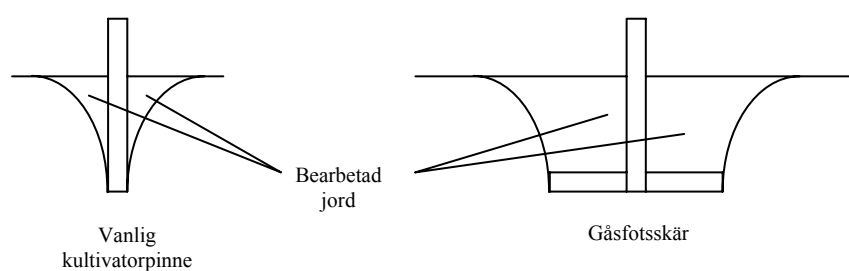
3.5.2 Kultivatorpinnar och gåsfotsskär

Kultivatorer används främst för stubbearbetning. Men med dagens bearbetande såmaskiner har det blivit allt vanligare att de används som enda bearbetningsredskap innan sådd.

Kultivatorpinnen bearbetar även jord vid sidan om pinnen. Det uppstår ett tredimensionellt brott. Kultivatorpinnen arbetar med en betydligt större angreppsvinkel än vad plojen gör. Jorden bryts snett uppåt och utåt från pinnen (Payne, 1956). På grund av jordens rörelse upp och runt pinnen uppstår både skjuvning och sprickbildning. Vid kultivering får det kritiska arbetsdjupet stor betydelse. Det är endast över det kritiska arbetsdjupet man får en effektiv bearbetning. Då bryts jorden upp i en V-form ut och uppåt från pinnspetsen (Godwin & Spoor, 1977).

För att få en effektivare bearbetning med kultivatorn kan man utrusta pinnarna med gåsfotsskär. Det har blivit allt vanligare med speciella gåsfotskultivatorer. Dessa har ofta en betydligt kraftigare konstruktion än konventionella kultivatorer. Pinnarna har en rakare konstruktion med betydligt mindre fjädring. Detta gör att arbetsdjupet hålls mer konstant och större gåsfötter kan monteras utan att jordsökningen försämras.

Genom att pinnarna är utformade som gåsfötter ökar man det kritiska arbetsdjupet och ökar varje pinnes arbetsbredd, se figur 8.



Figur 8. Vanlig kultivatorpinne jämfört med gåsfotsskär. Med gåsfotsskär ökas den genomskurna ytan och varje pinnes bearbetade jordvolym.

Med gåsfotsskär minskas även det specifika dragkraftbehovet. Genom att den bearbetade jordvolymen ökar, minskar det specifika dragkraftbehovet med gåsfötternas bredd (Spoor & Godwin, 1978). Gåsfotsskären medför

även en genomskärning av en större del av arbetsbredden vilket ger en bättre bekämpning av roto gräs.

3.5.3 Tallrikar

Liksom kultivatorer används tallriksredskap främst för stubbearbetning. Men även dessa kan idag användas som enda redskap innan sådd.

Jordbrottet som sker vid bearbetning med tallrikar är tredimensionellt. Men det är inte symmetriskt, som det är vid bearbetning med en pinne. Jorden framför tallriken bryts upp i en halvmåne, precis som för en pinne. Halvmånens storlek varierar med tallrikens skärvinkel. Skärvinkeln är vinkeln mellan färdriktningen och tallrikens plan. Halvmånen blir störst när skärvinkeln är 90° och minst när den är 0°. Tallriken kommer att lämna en skåra efter sig i marken. Den konvexa sidan av tallriken kommer att ha kontakt med jorden. Hur stor jordkontakten är kommer också att variera med skärvinkeln. Desto större skärvinkel desto mindre jordkontakt. Bearbetningsbotten kommer att bestå av åsar, en mellan varje tallrikspår. Åsens storlek beror på tallriksdiameter, tallriksavstånd och skärvinkel (Culpin, 1986).

Vid en viss kritisk skärvinkel kommer tallrikens konvexa sida att förlora kontakten med jorden. Vid skärvinklar mindre än det kommer en vertikal kraft att verka uppåt på tallriken (Godwin et. al., 1985). Detta betyder att jordsökningen försvinner vid små skärvinklar.

Skärvinkeln påverkar även det totala dragkraftbehovet hos ett tallriksredskap. Med minskad skärvinkel minskar det totala dragkraftbehovet. Däremot kommer det specifika dragkraftbehovet att öka med minskad skärvinkel på grund av att en mindre mängd jord bearbetas. Lägst specifik dragkraftbehov kommer att uppträda vid en viss skärvinkel, som varierar med markförhållandena. Det specifika dragkraftbehovet kommer sedan att öka svagt med ökad skärvinkel (Godwin et. al., 1985).

4 Dragkraft

För att kunna utföra något arbete med en traktor måste dieseln energiinnehåll omvandlas i traktorn till dragkraft. Dieseln innehåller kemisk energi som, i motorn, omvandlas till rörelseenergi (Malmström & Wetterblad, 1996).

Motorns vridande moment överförs via frikoppling, växellåda, differential och slutväxel till drivhjul. Däcken utvecklar då en dragkraft mot marken.

På vägen från dieselns kemiska energi till hjulens dragkraft kommer en hel del av energin att försvinna genom förluster. Först och främst har motorn en verkningsgrad. En effektiv dieselmotor kan vid gynnsamma förhållande omvandla omkring 40 % av dieselns energi till nyttig rörelseenergi (Malmström & Wetterblad, 1996). Vidare kommer förluster i traktorns kraftöverföring och växellåda att minska den dragkraft som kan utnyttjas.

Den verkliga dragkraften som kan fås vid ett visst tillfälle kommer sedan att avgöras av markgreppet, slirning och rullningsmotståndet. Förluster på grund av slirning och rullningsmotstånd behandlas i ett senare avsnitt.

4.1 Mätning med dynamometer

I den litteratur som studerats fanns det inte mycket information om försök där man studerat dragkraftbehovet för olika redskap i fält. Men en undersökning, gjord av Madsen (1998), hittades. I den undersöktes dragkraftbehovet för några redskap genom mätning med dynamometer.

Man använde en mindre traktor (MF 3070), vilken var i friläge, för att bära redskapen. Den drogs i sin tur av en större traktor (Valmet 2105). Man bogserade med en kedja som var utrustad med en dynamometer. Dynamometern var kopplad till en datalogger som kontinuerligt registrerade kraften. Även hastighet och arbetsdjup registrerades.

För att marken inte skulle vara packad vid bearbetningen hade man en kultivator efter den större traktorn som luckrade jorden.

Man mätte dragkraften över en sträcka om 70 m med redskapen i. Därefter mätte man dragkraften med redskapen lyfta. Skillnaden i dragkraft mellan dessa körningar gav nettodragkraftbehovet för redskapen.

Nettodragkraftbehovet för de olika redskapen kan läsas i tabell 1.

Tabell 1. Nettodragkraft för olika redskap enligt Madsen (1998)

Redskap	Arbetsdjup (cm)	Nettodragkraft (kN)	Totalt dragkraftbehov (kN/m)
4-sk plog	10	10,35	6,4
	20	16,65	10,2
Kultivator 3m	5	9,90	3,3
	10	16,21	5,4

I fråga om dragkraftbehov per meter arbetsbredd ser man att plogen kräver större dragkraft än en kultivator. Men eftersom det inte framgår hur stort det verkliga arbetsdjupet är går det inte att räkna ut det specifika dragkraftbehovet.

Det ska påpekas att den dragkraft som uppmätts i detta fall endast är en nettodragkraft. Effektbehovet för att reglera redskapen med hydraulsystemet, slirning, framdrift av dragtraktorn och transmissionsförluster är inte beaktade. Dessutom kan det tänkas att rullningsmotståndet för den lilla traktorn skiljer sig åt vid lyft respektive sänkt redskap.

4.2 Modeller för dragkraft

De flesta framtagna modeller för att förutspå dragkraft är baserade på smala pinnar som bearbetar jorden. Viktiga undersökningar har till exempel gjorts av Payne (1956) och Payne & Tanner (1959). Där beskrivs uppbyggnaden genom skjuvning framför smala pinnar. Däremot finns det färre undersökningar för plogar och tallriksredskap. Detta beror på att matematiska modeller för dragkraftbehovet för dessa redskap blir mycket mer komplexa än för pinnar (McKyes, 1985, Gill et al, 1985, eftersom brotten blir asymmetriska och redskapens utformning är komplexa.

Hunt (1995) redovisar en formel för att räkna ut det specifika dragkraftbehovet för olika redskap enligt följande:

$$S = C_1 + C_2 * V^2$$

där S = specifikt dragkraftbehov (kN/m^2)
 V = hastighet (km/h)
 C_1, C_2 = koefficienter beroende på jordart och redskap

Det specifika dragkraftbehovet beror, enligt formeln, på jordart, redskap och hastighet. Det specifika dragkraftbehovet är alltså, enligt formeln, inte beroende av bearbetningsdjupet. Det kommer däremot det totala dragkraftbehovet att vara. Formeln som Hunt redovisar för det ser ut enligt följande:

$$D = K_1 * d + K_2 * V - K_3$$

där D = totalt dragkraftbehov (kN/m)
 d = bearbetningsdjup (cm)
 V = hastighet (km/h)
 K_1, K_2, K_3 = koefficienter beroende på jordart och redskap

De båda modellerna innehåller konstanter som är beroende av jordarten och redskapen. Konstanterna är framtagna genom en rad försök av olika redskap på olika jordarter. Men eftersom information saknas angående utformningen av redskapen och jordarterna är det svårt att veta hur väl konstanterna, och därmed även de uträknade resultaten, stämmer för ett specifikt redskap.

Den modell som oftast används för att förutse dragkraftbehovet för redskap vid olika markförhållande är framtagen av Godwin & Spoor 1977. Formeln de kom fram till 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)
 γ = skrymdensitet
 z = bearbetningsdjup
 c = kohesion
 c_a = friktion mellan redskap och jord beroende på angreppsvinkel
 q = tryck från överliggande jord
 N = konstanter beroende på adhesion, inre friktionsvinkel och angreppsvinkel

Formeln är framtagen genom laboratorieförsök med smala pinnar. Därför är det även här svårt att göra en koppling till hela jordbearbetningsredskap.

Dragkraftbehovet bör relateras till bearbetningsresultatet, till exempel sönderdelningen, för att en jämförelse ska bli relevant mellan olika redskap. Därför kommer de matematiska modeller som finns framtagna att bli otillräckliga. Ett sätt att kunna få med ett mått på bearbetningsresultatet är att utföra försöken i fält med bearbetningsredskap och en traktor med bränslemätningssystem. Då kan både dragkraftbehovet och bearbetningsresultatet studeras.

5 Examensarbetets syfte

Syftet med detta examensarbete var att jämföra dragkraftsbehov och bearbetningsresultat vid olika bearbetningsmetoder till höstsådd.

Dragkraftbehovet registrerades med en traktor, med därför monterad mätutrustning. Arbetsdjupets och jordartens påverkan på dragkraftbehovet och bearbetningsresultat studerades.

Bearbetningsresultaten studerades genom sönderdelningsgrad och halminblandning.

Avsikten är att resultaten ska leda till bättre rekommendationer för jordbruket vid val av bearbetningsmetod.

6 Material och metoder

6.1 Mättraktor

Traktorn som användes för samtliga körningar var en Massey Ferguson 6290. Traktordata framgår av tabell 2.

Tabell 2. Tekniska data för Massey Ferguson 6290

Motoreffekt, hk (kW) vid 2200 rpm	140 (103)
Max vridmoment, Nm	547
Framhjul	540/65R28
Bakhjul	650/65R38
Vikt, kg	6000

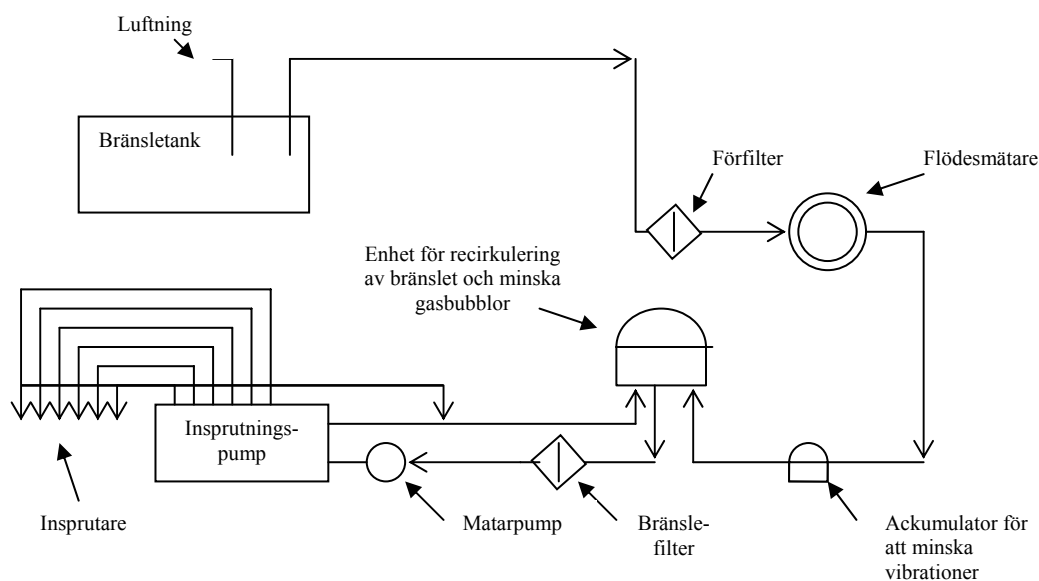
Traktorn har en effekt på ca 140 hk och tillhör därmed den traktorklass som är mest representerad i det svenska jordbruket.

Traktorn har åtta mekaniska växlar och fyra powershiftsteg vilket sammanlagt ger 32 växlar. Dessutom har den kopplingsfri fram-backväxel. Vid körningarna hölls motorvarvtalet konstant. Varvtalet 2050 rpm valdes då detta motsvarar 540 rpm på kraftuttaget. För redskapen lämplig hastighet reglerades med växelval.

6.2 Mätutrustning

Traktorn som användes vid försöket är utrustad med ett bränslemätningssystem utvecklat av JTI (Pettersson et. al., 2002).

Systemet är utformat så att det enbart mäter den mängd diesel som motorn konsumerar. I motorns dieselsystem cirkulerar nämligen mycket större bränslevolym än vad motorn konsumerar. Vanligtvis, vid bränslemätningar, används två flödesmätare. En som mäter huvudflödet, från bränsletanken, och en som mäter flödet i retursystemet. Bränsleförbrukningen blir då skillnaden i flöde mellan dessa. Detta medför ofta stora mätningssfel eftersom konsumtionen är låg jämfört med det totala flödet. Ett system som enbart mäter den bränslemängd som förbrukas blir därför mycket exaktare. Det system som är installerat i traktorn visas i figur 9.



Figur 9. Bränslesystem utrustat med mätsystem.

Systemet är ett enkelrörssystem med volymflödesmätare med mätområde mellan 0 och 40 l/h med en upplösning på 250 pulser/ml. Traktorns bränslesystem har även utrustats med ett extra bränslefilter, en Tigerloop som recirkulerar returbränslet, en ackumulator som minskar pulseringen av bränslet och dessutom temperaturmätare.

Dessutom finns, monterat på traktorn, en datalogger, telefonmodem och extra utrustning för att mäta motorvarvtal, lufttemperatur, hjulhastighet och radarhastighet.

De uppmätta värdena lagras i en datalogger med en frekvens av 1 Hz. Dataloggern kan fjärrstyras och informationen kan laddas ner till en stationär dator genom en GSM-telefon.

Mätutrustningen är kalibrerad mot en kraftuttagsbroms. Loggern har därmed ”lärt sig” vad en viss kombination av motorvarvtal och bränsleförbrukning betyder i angiven effekt. Den effekt som anges i loggern motsvarar alltså PTO-effekten. Vid körning, motsvarande de i försöken, betyder den uppmätta effekten den effekt som man stillastående tar ut på kraftuttaget. Därför måste effekten för slirning och rullningsmotstånd räknas ut och dras ifrån den uppmätta effekten.

Egentligen bör även effekten på grund av förluster i växellådan dras ifrån den uppmätta effekten. Detta har ej gjorts i försöket. Enligt Pettersson (2004) bör inte växellådsförlusterna skilja nämnvärt vid bearbetning med olika redskap om växelval och hastighet är densamma. Däremot om man använder differentialspär eller slirningen varierar kraftigt kan växellådsförlusterna bli betydande olika. Mätningar gjorda av tyska maskinprovningarna, DLG, visar på att dragkrokseffekten är omkring 14 %

lägre än PTO-effekten för en traktor med motsvarande växellåda som mättraktorn. Men mätningar utförda av OECD visar bara 6 % skillnad.

6.3 Test av mätutrustningen

Innan försöken kördes utfördes en test av mätutrustningen. Avsikten med denna test var att kontrollera om mätutrustningen gav olika värde beroende på hur långa drag som kördes.

Testet utfördes genom att plöja olika långa drag med identiska inställningar på plog och traktor. Fem olika draglängder användes; 80, 40, 20, 10 och 5 meter. Testet utfördes på Säby, för markdata se tabell 3. Tre upprepningar utfördes på samtliga draglängder. Det specifika dragkraftbehovet jämfördes sedan mellan draglängderna.

6.4 Försöksplatser

Mätningarna utfördes på två platser. Mätplatserna placerades på en styv jord (Ultuna) och en lättare jord (Säby). Tre block placerades ut, så att tre upprepningar kunde göras på de båda försöksplatserna. Markdata för försöksplatserna presenteras i tabell 3 och 4.

Tabell 3. Kornstorleksfördelning (g/100g jord)

Plats	Ler	Fmj*	Gmj*	Fmo*	Gmo*	Ms*	Gs*	Mull
Ultuna	41,7	13,4	11,6	8,9	14,5	4,8	0,7	1,5
Säby	22,0	6,8	10,5	32,0	22,8	0,3	0,0	4,0

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

Tabell 4. Markdata för försöksplatserna

	Ultuna	Säby, block I, II	Säby, block III
Penetrationsmotstånd (MPa)	1,87	2,31	3,51
Skjuvhållfasthet (kPa)	115,0	82,5	97,1
Torr skrymdensitet (g/cm ³)	1,41	1,28	1,26
Vattenhalt (%)	19,3	18,3	21,5

6.5 Försöksled

Försöket var uppdelat i sammanlagt femton led, vilka framgår av tabell 4. Redskapen som jämfördes var konventionell plog, grundplog, kultivator, gåsfotskultivator, tallriksredskap och grundbearbetande tallriksredskap. Dessutom direktsåddes ett led. Redskapen kördes med olika djupinställningar och/eller med en respektive två överfarer. På grund av tekniska problem blev bearbetningsresultatet i leden med grundplojen inte

tillfredsställande på den styva försöksplatsen (Ultuna). Därför ströks dessa led (C och D) och mätresultaten användes således inte.

För att få till ett bättre så bruk kördes samtliga oplöjda led över en gång med en bearbetande vält innan sådd. De plöjda leden kördes över en gång med ett grundbearbetande tallriksredskap innan sådd. På den styvare jorden kördes de även över en gång med en bearbetande vält.

Sådd av samtliga led skedde med en bearbetande såmaskin. Maskinen var utrustad med tallrikar som bearbetade grunt innan såbillarna. Även i det direktsådda ledet användes tallrikarna. Detta gör att ledet inte kan räknas som ett konventionellt direktsått led utan viss bearbetning skedde.

Bränslemätningar utfördes, förutom för de primära behandlingarna, även för såbäddsberedning och för sådd av samtliga led.

Tabell 5. Försöksled

Led	Behandling	Bearbetningsdjup
A	Konventionell plöjning	~ 20 cm
B	Konventionell plöjning	~ 13 cm
C	Grundplog	~ 13 cm
D	Grundplog	~ 7 cm
E	Kultivator, en överfart	~ 13 cm
F	Kultivator, två överfarter	~ 13 cm
G	Gåsfotskultivator, en överfart	~ 13 cm
H	Gåsfotskultivator, två överfarter	~ 13 cm
I	Gåsfotskultivator, en överfart	~ 7 cm
J	Gåsfotskultivator, två överfarter	~ 7 cm
K	Tallriksredskap, en överfart	~ 7 cm
L	Tallriksredskap, två överfarter	~ 7 cm
M	Grundbearbetande tallriksredskap, en överfart	~ 5 cm
N	Grundbearbetande tallriksredskap, två överfarter	~ 5 cm
O	Direktsådd	

6.6 Redskapen i försöken

6.6.1 Konventionell plog

I försöket användes två olika plogar. På Säby användes en Kverneland ES 85 fyrskärig växelplog med ställbar tiltbredd. Plöjningen utfördes med 16 tums tiltbredd. Den var utrustad med knivristar på de tre första skären och med skivrist på det sista skäret. Ingen form av förplog eller skumvinge användes.

På försöket vid Ultuna användes en Överum Vari Flex CX treskärig växelplog med ställbar tiltbredd. Även med denna plog plöjdes med 16 tums tiltbredd. Denna plogen var utrustad med skivristar och förplogar på samtliga skär.

6.6.2 Grundplog

I leden med grundplog användes olika plogar på de båda försöksplatserna. På Säby användes en sexskärig och på Ultuna användes en åttaskärig grundplog. På Ultuna blev det problem med djuphållningen, vilket ledde till att leden med grundplogen (C och D) fick strykas.

Den använda grundplogen är en plog som är framtagen just för grundplöjning. Man kan plöja mellan 6 och 18 cm djupt. Det som skiljer den från en konventionell plog är utformningen av plogkroppen. Den är betydligt kortare och lägre än en konventionell plogkropp. Dessutom är vändskivan mera tvärställd och har en mer cylindrisk form vilket ger en effektivare och snabbare vändning av jorden. Jorden vänds 180°, vilket är något mer än för en konventionell plog. Grundplogen används normalt tillsammans med en lätt tiltpackare. Men denna användes inte i försöket eftersom dragkraftbehovet specifikt för plogen skulle studeras.

6.6.3 Kultivator

Kultivatoren som användes var en Väderstad Cultus 13, en kultivator med 13 pinnar och 3,10 meters arbetsbredd. Den var utrustad med CS-mixer, ett efterredskap utformat som spadrullharvar vilka jämnar till ytan efter kultivatoren.

6.6.4 Gåsfotskultivator

De senaste åren har en rad företag tagit fram gåsfotskultivatorer som är menade att användas inom plöjningsfri odling. Det är meningen att en eller två överfarter med dessa ska räcka innan sådd.

Gåsfotskultivatoren vi använde var en HE-VA Doublet Mega-Dan MKII. Arbetsbredden var 3,85 meter, men då yttersektionerna inte användes blev arbetsbredden 3 meter. Kultivatoren var utrustad med sju kraftiga relativt stela pinnar. Efter pinnarna gick sex tallrikar som bearbetade och blandade in skörderester. Sist gick en kraftig ribbvält som återpackade jorden.

6.6.5 Tallriksredskap

I tallriksredskapsleden användes ett Väderstad XT tallriksredskap med 3,40 meters arbetsbredd och 60 cm tallriksdiameter. Redskapet är ett X-format tallriksredskap med ställbar skärvinkel. Vid körningarna användes ~ 20° skärvinkel.

6.6.6 Grundbearbetande tallriksredskap

I leden med grundbearbetande tallriksredskap användes en Väderstad Carrier 425, ett redskap framtaget speciellt för grund bearbetning. Modellen som användes hade en arbetsbredd på 4,25 meter.

Redskapet har två rader med tätt sittande, tandade tallrikar med en diameter på 30 cm vilka går att bearbeta med ned till ca 15 cm. Tallrikarna är placerade så att man ska få hela ytan genomskuren redan efter en överfart. Efter tallrikarna sitter en tung vält för återpackning. Redskapet har en vikt på ca 900 kg/meter arbetsbredd.

6.6.7 Bearbetande vält

Efter de primära bearbetningarna kördes de oplöjda och på Ultuna även de plöjda leden över en gång med en bearbetande vält. Välten var en Väderstad Rexius 650 med CrossKill-ringar. CrossKill-ringarna är utformade så att de, förutom återpackar, även bearbetar jorden. Välten var utrustad med en fjädrande sladdplanka, men för att inte skörderesterna skulle släpas med användes den inte i de oplöjda leden.

6.6.8 Såmaskin

Samtliga led såddes med en Väderstad Super-Rapid XL 300 C, vilket är en bearbetande kombisåmaskin med tre meters arbetsbredd.

Maskinen var utrustad med ett förredskap kallat SystemDisc, vilket är två rader med tallrikar liknande dem som sitter på Väderstad Carrier. Efter tallrikarna sitter en enkelrad fjädrande sladdplanka. Såmaskinen är utrustad med enkla skivbillar. Först en rad med gödningsbillar med ett avstånd på 24 cm och därefter två rader med såbillar.

6.7 Mätning av jordens hållfasthet

6.7.1 Penetrationsmotstånd

Jordens penetrationsmotstånd gav ett mått på hur kompakt och svårbrukad jorden var. För att kontrollera hur jordens penetrationsmotstånd påverkar det specifika dragkraftbehovet utfördes mätningar med en penetrometer. Penetrometern bestod av en konisk metallspets med 1 cm² tvärsnittsarea som var fäst på en metallstav, med mindre diameter än spetsen, som i andra ändan är fäst vid en logger. Metallspetsen trycktes ner i jorden till ca 40 cm

och kraften som krävdes för att göra detta registreras kontinuerligt i loggern. Penetrationsmotståndet för varje centimeter beräknas enligt följande:

$$Q_{pr} = F_{pr} / A_{pr} \quad (\text{Bengough \& Mullind, 1990})$$

där Q_{pr} = penetrationsmotståndet (N/cm²)
 F_{pr} = kraften (N)
 A_{pr} = metallspetsens tvärsnittsarea (cm²)

Mätningarna utfördes på diagonalen över varje block för att få representativa värde för varje block.

6.7.2 Kohesion

Kohesionsmätningar utfördes med ett så kallat vingborr. Vingborret bestod av en metallstång med fyra vingar längst ner. Dessa vingar slogs ner i marken och ett handtag med en skala för vridmomentet sattes på stången. Stången vreds runt vilket gjorde att en jordcylinder skjuvades ut. Det maximala vridmomentet utlästes på handtaget. Skjuvhållfastheten kunde därefter räknas ut enligt följande:

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

där: τ = skjuvhållfasthet
 T = vridmoment
 r = jordcylinderns radie
 h = jordcylinderns höjd

Vid mätningarna antogs normalspänningen vara försumbar. Därför blev skjuvhållfastheten lika med jordens kohesion.

Mätningarna gjordes på djupet 5 – 15 cm och mätningarna utfördes på en diagonal genom blocken för att få representativa värden.

6.8 Bestämning av bearbetningsdjup

Innan försöken kördes, ställdes önskat bearbetningsdjup in för de olika redskapen genom att provköra vid sidan om försöksytorna. Därefter mättes arbetsdjupet med tumstock. Olika inställningar provades tills dess att önskat djup och bearbetningsresultat uppnåts. Men det inställda arbetsdjupet kunde inte användas till vidare beräkningar. Därför måste det verkliga bearbetningsdjupet bestämmas för samtliga led.

Innan bearbetningarna utfördes togs cylindrar ut i samtliga block för att kunna bestämma markens skrymdensitet. Sammanlagt sex cylindrar togs ut från varje block på två olika djup (2-7 och 7-12 cm).

För att få det verkliga bearbetningsdjupet användes en stålram med ytan $0,25 \text{ m}^2$. Stålramen slogs ned i de bearbetade rutorna och all lös, bearbetad jord togs bort, ned till bearbetningsbotten, och vägdes. Med hjälp av vikten på den lösgjorda jorden och den våta skrymdensiteten kunde ett medelbearbetningsdjup, det verkliga bearbetningsdjupet, beräknas.

$$d = m / (\rho_v * a)$$

där d = bearbetningsdjup (m)
 m = den lösa jordens massa (kg)
 ρ_v = jordens våta skrymdensitet (kg/m^3)
 a = stålramens area (m^2)

Det verkliga bearbetningsdjupet gav ett rutvis mått på bearbetningsdjupet oberoende av hur ojämn bearbetningsbotten var och en rättvis jämförelse mellan redskapen kunde därmed göras. För varje ruta gjordes två mätningar.

För led med två överfarter beräknades skillnaden i bearbetningsdjup mellan den första och andra körningen ut. För den andra, diagonala överfarten användes endast det extradjup som den tillförde för vidare uträkningar.

6.9 Sönderdelning

För varje ruta sparades jorden från en av jordvägningarna. Jorden sållades senare för att få ett mått på hur bra de olika redskapen sönderdelat den bearbetade jorden. Jorden sållades i sex fraktioner; <4, 4-8, 8-16, 16-32, 32-64 och >64 mm. De olika fraktionerna vägdes sedan var för sig. Utifrån 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 = massan hos den sållade fraktionen (kg)
 ρ = jordens skrymdensitet (kg/m^3)
 ϕ_i = undre fraktionsgräns (m)
 ϕ_{i+1} = övre fraktionsgräns (m)

Den totala ytan för den bearbetade jorden erhöles genom summering av alla fraktionerna. En hög sönderdelning ger en stor andel små aggregat vilket ger stor total yta. En jämförelse i aggregatstorleksfördelning gjordes också mellan leden. Då summerades fraktionerna två och två så att det blev tre fraktioner (< 8 mm, 8 – 32 mm och >32 mm).

Vidare räknades även sönderdelningsenergin för de olika bearbetningarna ut enligt följande:

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

där E_f = sönderdelningsenergi (J/m²)
 E_m = tillförd energi per kilo jord (J/kg)
 $\sum W_i$ = sammanlagd massa för fraktionerna (kg)
 $\sum A_i$ = sammanlagd yta för fraktionerna (m²)

För led med två överfarter adderades den tillförda energin för de båda körningarna. Ett medelvärde för varje led räknades därefter ut.

6.10 Halminblandning

För att vidare kunna jämföra de olika redskapens bearbetningsresultat togs ett mått på halminblandningen fram. Detta gjordes genom att fotografera markytan i samtliga rutor efter sådd. Bilderna togs efter sådd eftersom det är halmresterna som ligger kvar på ytan efter sådd som främst kan sprida patogener till den efterföljande grödan.

Bilderna analyserades sedan i ett databaserat bildbehandlingsprogram. Genom att tilldela halmen vissa nyanser och markytan vissa nyanser kunde det beräknas hur stor del av markytan som var täckt med halm.

6.11 Beräkning av dragkraftbehov

Under körningarna registrerade loggern kontinuerligt effekten som traktorns motor utvecklade. Den registrerade även hjulhastigheten och en radaruppmätt hastighet, det vill säga den verkliga framfartshastigheten.

För att få fram dragkrokseffekten behövdes effektförlusterna för slirning och rullningsmotståndet räknas fram.

6.11.1 Slirning

Med hjälp av hjulhastigheten och den verkliga framfartshastigheten kunde slirningen räknas fram med följande formel:

$$S = ((V_H - V_V) / V_H) * 100$$

där S = slirning (%)
 V_H = hjulhastighet (km/h)
 V_V = verklig framfartshastighet (km/h)

Effektförlusten på grund av slirning räknades ut enligt följande:

$$P_{\text{slir}} = P_u * (S / 100) \quad (\text{Saleque, 1990})$$

där P_{slir} = effektförlust på grund av slirning (kW)
 P_u = uppmätt effekt (kW)
 S = slirning (%)

6.11.2 Rullningsmotstånd

Effektförlusterna på grund av traktorns rullningsmotstånd räknades ut enligt följande:

$$P_{\text{rull}} = f * G * V_H \quad (1)$$

där P_{rull} = effektförlust på grund av rullmotstånd (kW)
 f = koefficient för rullningsmotstånd
 G = traktorns tyngd (N)
 V_H = hjulhastighet (m/s)

För att kunna få fram koefficienten f gjordes ett antal transportkörningar med traktor och redskap på fältet. Då var slirningen minimal och kunde därför försummas. Effektbehovet under dessa körningar representerade då effektförlusterna på grund av rullningsmotståndet. Körningarna utfördes med varierande växelval och därmed hastigheter. Tre upprepningar utfördes.

Effektbehovet plottades därefter mot hjulhastigheten och en rät linje anpassades efter punkterna. Koefficienten för rullningsmotståndet kunde sedan bestämmas ur den räta linjens ekvation. Den räta linjens ekvation:

$$P_{\text{rull}} = k * V_H \quad (2)$$

där P_{rull} = effektförlust på grund av rullningsmotstånd (kW)
 k = den räta linjens lutning
 V_H = hjulhastighet (m/s)

Formlerna (1) och (2) ger:

$$f = k / G$$

Koefficienten sattes därefter in i formel (1) och effektförlusten på grund av rullningsmotståndet kunde därmed räknas ut.

6.11.3 Specifikt dragkraftbehov

Efter det att förlusterna på grund av slirning och rullningsmotstånd räknats ut drogs de bort från det uppmätta effektbehovet och dragkrokseffekten erhöles.

$$P_k = P_u - P_{\text{slir}} - P_{\text{rull}}$$

där P_k = dragkrokseffekt (kW)
 P_u = uppmätt effektbehov (kW)
 P_{slir} = effektförlust på grund av slirning (kW)
 P_{rull} = effektförlust på grund av rullningsmotstånd (kW)

Därefter kunde det specifika dragkraftbehovet bestämmas. Det specifika dragkraftbehovet definieras som kraften per bearbetad tvärsnittsarea. Därför måste dragkrokseffekten först omräknas till ett dragkraftbehov enligt följande:

$$F_{\text{tot}} = P_k / V_H$$

där F_{tot} = redskapets dragkraftbehov (kN)
 P_k = dragkrokseffekt (kW)
 V_H = hjulhastighet (m/s)

Sedan kunde det specifika dragkraftbehovet bestämmas med hjälp av det verkliga bearbetningsdjupet, redskapens arbetsbredd och redskapets dragkraftbehov.

$$S = F_{\text{tot}} / (d * b)$$

där S = specifikt dragkraftbehov (kN/m^2)
 F_{tot} = redskapets dragkraftbehov (kN)
 d = verkligt arbetsdjup (m)
 b = arbetsbredd (m)

6.11.4 Totalt dragkraftbehov

Ett annat sätt att jämföra redskapen är att räkna ut dragkraftbehovet per meter arbetsbredd, totalt dragkraftbehov. Det räknas ut enligt följande:

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

där D = totalt dragkraftbehov (kN/m)
 F_{tot} = redskapets dragkraftbehov (kN)
 b = arbetsbredd (m)

6.12 Energiförbrukning

Utifrån det totala dragkraftbehovet kunde energiförbrukningen (l diesel per hektar) uträknas. Detta blir inga exakta värden utan ger bara en jämförelse mellan de olika bearbetningssystemen. Följande formel användes:

$$Q = ((D * A) / E) / v$$

där Q = energiförbrukning (l/ha)
 D = totalt dragkraftbehov (N/m)
 A = 10000 (m^2)
 E = energiinnehåll för diesel (40 MJ/l)
 v = verkningsgrad (antagen till 20 %)

Verkningsgraden antogs till 20 %. Detta ska innefatta motorförluster, växellådsförluster, effektförluster för traktorns hjälputrustning och även tomkörning som sker på fältet genom vändningar osv.

7 Resultat

7.1 Test av mätutrustning

Det blev signifikanta skillnader mellan några av draglängderna vid de utförda testerna, se tabell 5. Med en draglängd på 5 m krävdes störst dragkraft. Resultaten därifrån är signifikant skilda från resultaten från 10 m draglängd, vilket krävde minst dragkraft.

Det blev inga signifikanta skillnader mellan 10 och 80 meters draglängd. Det blev inte heller några signifikanta skillnader mellan 5, 20 och 40 meters draglängd och inte mellan 20, 40 och 80 meters draglängd. Det bör påpekas att variationskoefficienten blev låg för samtliga draglängder

Tabell 6. Specifik dragkraft för plöjning vid olika draglängder

Draglängd (m)	Specifik dragkraft (kN/m ²)*	Variationskoefficient (%)
80	51bc	2.28
40	52ab	2.90
20	54ab	6.09
10	48c	0.22
5	55a	8.28

* Värde som ej följs av samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).

7.2 Bearbetningsdjup

En jämförelse mellan de inställda och verkliga bearbetningsdjupen kan ses i tabell 7. De verkliga bearbetningsdjupet blev inte alltid de samma som det avsedda, inställda bearbetningsdjupet. Plogen var det redskap där det inställda och det verkliga bearbetningsdjupet stämde bäst överens.

Tabell 7. Inställt och verkligt bearbetningsdjup för de olika redskapen

Led	Inställt djup (cm)	Ultuna (cm)	Säby (cm)
A. Plog	21	19,7	19,7
B. Plog	13	10,9	11,0
C. Grundplog	13	- ²	17,9
D. Grundplog	7	- ²	10,4
E. Kultivator 1ggr	13	4,5	6,3
F. Kultivator 2ggr ¹	13	2,6	4,9
G. Gåsfot 1ggr	13	6,3	9,1
H. Gåsfot 2ggr ¹	13	2,9	3,1
I. Gåsfot 1ggr	7	5,2	5,2
J. Gåsfot 2ggr ¹	7	1,4	2,6
K. Tallriksredskap 1ggr	7	1,9	4,6
L. Tallriksredskap 2ggr ¹	7	2,4	2,4
M. Carrier 1ggr	5	3,0	3,3
N. Carrier 2ggr ¹	5	0,7	1,0

¹ Värdena anger hur många cm bearbetningsdjupet ökade efter den andra överfarten. Det totala arbetsdjupet blir summan av föregående led och andra överfarten.

² Pga problem med djuphållningen fick leden strykas.

Att de verkliga bearbetningsdjupen för grundplojen blev djupare än de inställda kan bero på att marken var hårdare där inställningen gjordes än i provrutan eller på grund av att jord brutits upp från under den nivå skären gått.

7.3 Specifikt dragkraftbehov för grundbearbetning

Det specifika dragkraftbehovet blev högre på den styvare jorden än på den lättare jorden för samtliga redskap, se figur 10.

På båda försöksplatserna krävde djup konventionell plöjning, och på den lättare jorden även djup plöjning med grundplojen, minst specifik dragkraft och blev signifikant skilt från övriga led.

På den styvare jorden krävde den första överfarten med kultivator och tallriksredskap störst specifik dragkraft, men de skilde sig inte signifikant mot Carriern. På den lättare jorden krävde tallriksredskapet och Carriern störst specifik dragkraft.

Av de oplöjda leden på den styvare jorden krävdes minst specifik dragkraft för gåsfotskultivatoren medan det på den lättare jorden skilde det sig inte mycket mellan kultivator och gåsfotskultivator. Där var de inte heller skilda från grund plöjning med konventionell plog.

Den andra överfarten krävde större specifik dragkraft än den första för respektive redskap förutom för tallriksredskapet på den styvare jorden och för kultivatoren på den lättare jorden.

7.4 Totalt dragkraftbehov för grundbearbetning

Även det totala dragkraftbehovet blev högre för samtliga redskap på den styvare jorden än på den lättare, se figur 11.

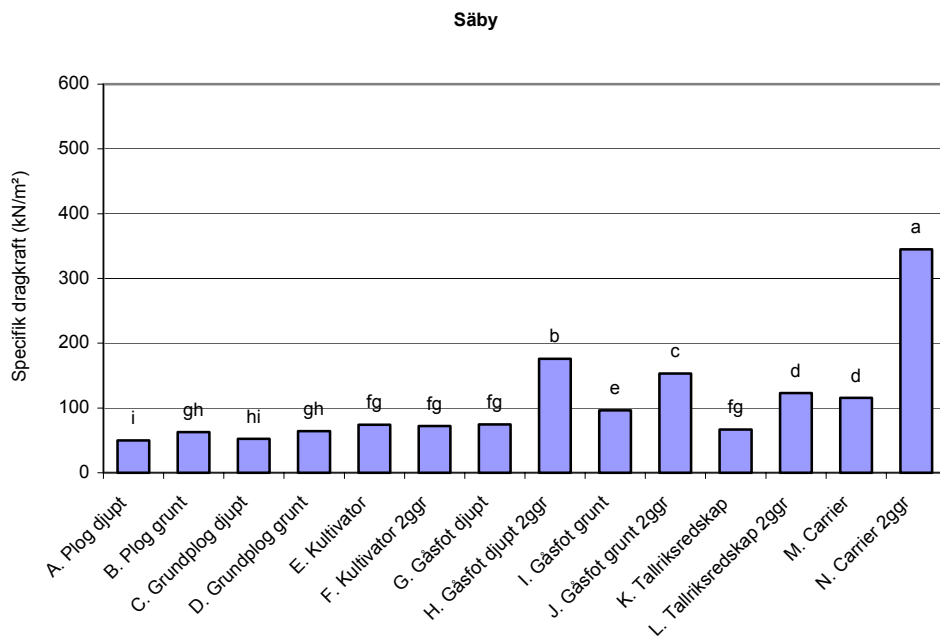
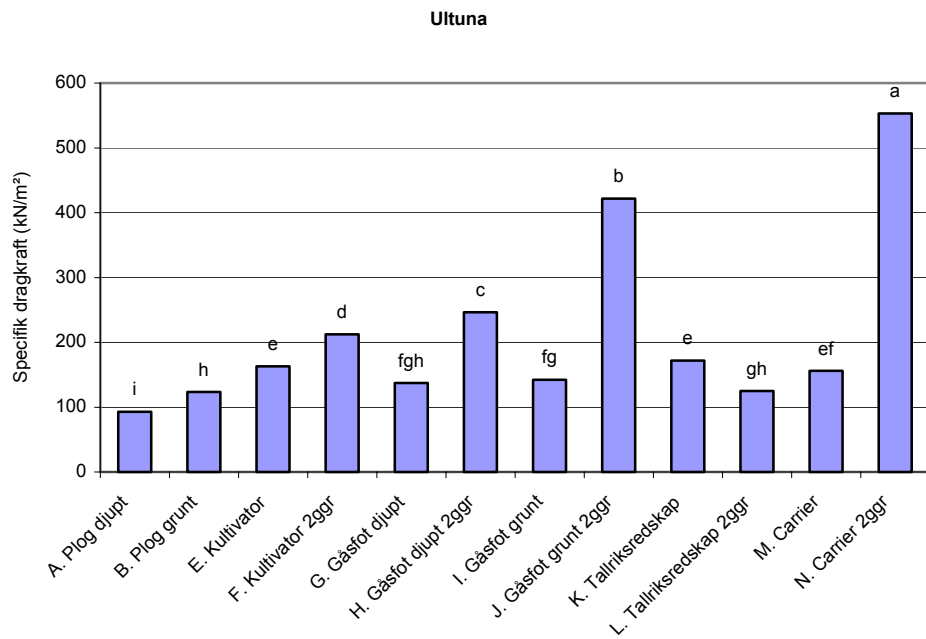
Plöjning krävde störst total dragkraft (dragkraft per meter arbetsbredd). Djup plöjning krävde signifikant mer än grund plöjning. Grund plöjning skilde sig signifikant från övriga bearbetningar förutom från djup gåsfotskultivering på den lättare jorden.

Det totala dragkraftbehovet skilde sig inte åt mellan grundplogen och den konventionella plogen.

Av de oplöjda leden krävde djup bearbetning med gåsfotskultivator störst total dragkraft. Vid grund bearbetning med gåsfotskultivatoren skilde sig inte det totala dragkraftbehovet från kultivatoren.

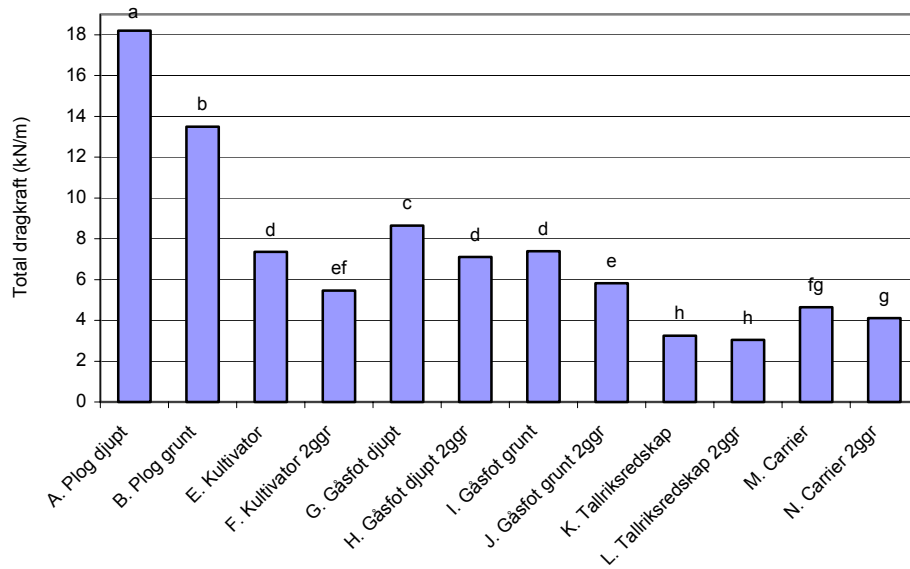
Tallriksredskapet var det redskap som krävde minst total dragkraft vid den första överfarten på båda försöksplatserna. Det blev signifikant skilt från de övriga redskapen.

Den andra överfarten med samtliga redskap krävde lägre total dragkraft än respektive första överfart.

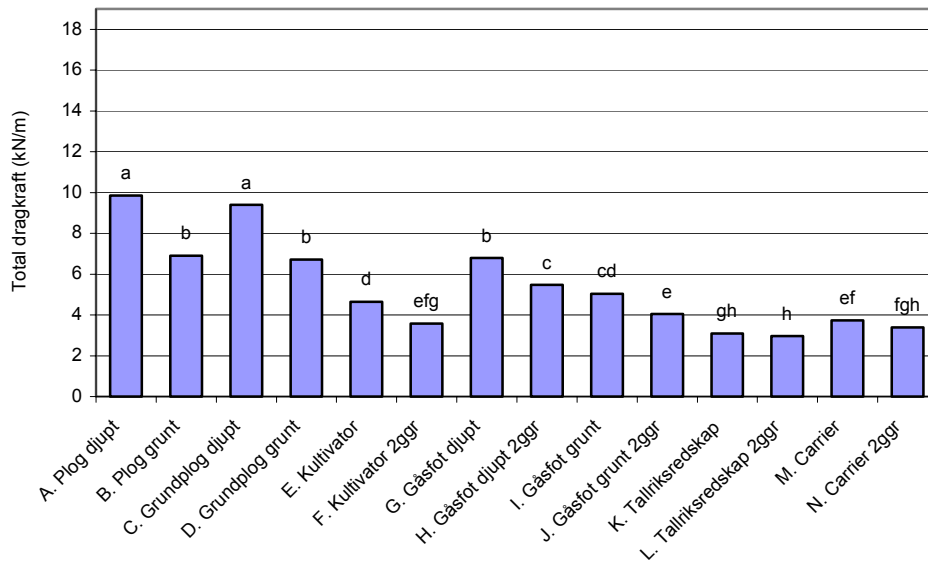


Figur 10. Specifik dragkraft för grundbearbetning. I led med två överfarter redovisas dragkraften för den andra överfarten. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).

Ultuna



Säby



Figur 11. Totalt dragkraftbehov (kraft per meter arbetsbredd) för grundbearbetning. I led med två överfarter redovisas bara dragkraften från den andra överfarten. De staplar som inte är märkta med lika bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).

7.5 Aggregatstorleksfördelning

Alla redskapen lämnade ett bruk med större andel små aggregat på den lättare jorden jämfört med den styvare, se figur 12.

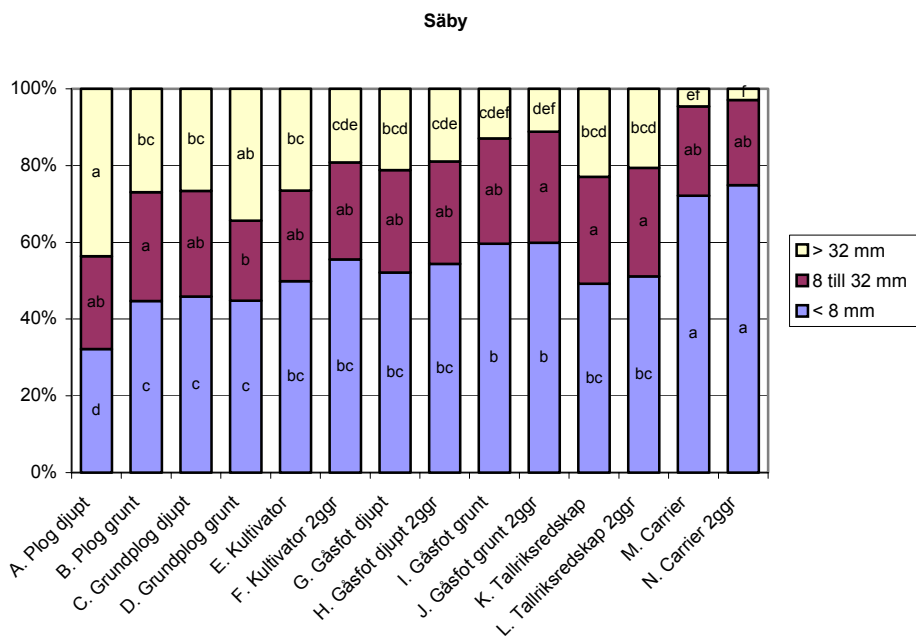
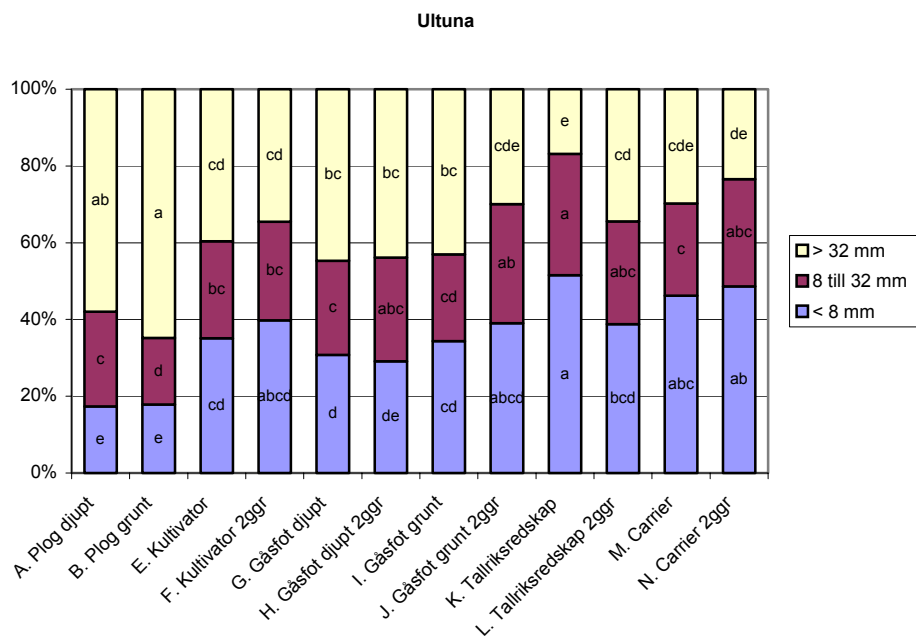
De plöjda leden gav större andel stora aggregat och mindre andel små aggregat än kultivator, gåsfotskultivator, tallriksredskap och Carrier på båda försöksplatserna.

Fraktionen med aggregat mellan 8 och 32 mm skilde sig inte mycket åt mellan redskapen på någon av försöksplatserna.

Aggregatstorleksfördelningen efter kultivatoren och gåsfotskultivatoren skilde sig inte mycket åt. Vid grund gåsfotskultivering blev det något mindre andel stora aggregat och något större andel små aggregat än för djup kultivering.

På den styvare jorden gav en överfart med tallriksredskapet och två överfarter med Carriern störst andel små aggregat, men de skilde sig inte signifikant från två överfarter med kultivator och två grunda överfarter med gåsfotskultivator. På den lättare jorden gav Carriern störst andel små aggregat av alla redskapen och skillnaden var signifikant gentemot övriga led.

Den andra överfarten ändrade inte aggregatstorleksfördelningen mycket med något av redskapen. På den styvare jorden gav dock en andra överfart med tallriksredskapet en större andel stora aggregat och grund körning med gåsfotskultivatoren en större andel små aggregat.



Figur 12. Aggregatstorleksfördelning efter grundbearbetning. De fraktionsstaplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$). Den statistiska analysen är gjord för varje fraktion för sig.

7.6 Yta per kilo bearbetad jord

Överlag blev ytan per kilo bearbetad jord större på den lättare jorden än på den styvare jorden. Skillnaderna mellan leden blev även mindre, se figur 13.

På den styvare jorden gav plogen minst sönderdelning av de testade redskapen. Både djup och grund plöjning gav minst yta per kilo bearbetad jord. Men djup plöjning skilde sig inte signifikant från två djupa överfarter med gåsfotskultivator.

En överfart med tallriksredskapet och de båda Carrierleden gav störst sönderdelning på den styvare jorden. De gav dock inga signifikanta skillnader från två överfarter med tallriksredskap, två kultivatoröverfarter och två grunda överfarter med gåsfotskultivator.

En andra överfart med kultivator, grunt med gåsfotskultivator och Carrier ökade ytan per kilo bearbetad jord något på den styvare jorden, men inte signifikant jämfört med första överfarten.

På den styvare jorden tenderade en andra överfart med tallriksredskapet och djup bearbetning med gåsfotskultivatorn att minska ytan per kilo bearbetad jord men skillnaderna var inte signifikanta.

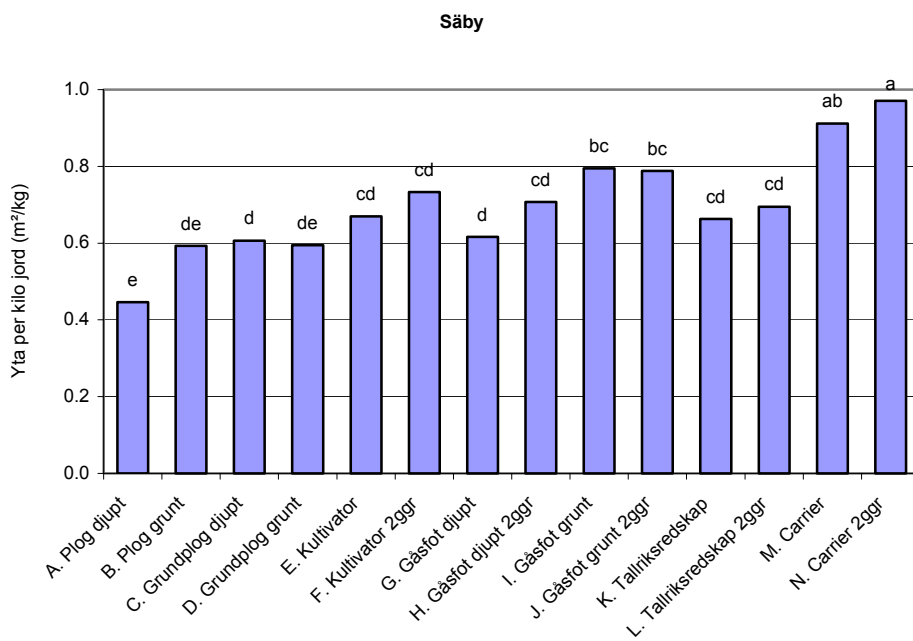
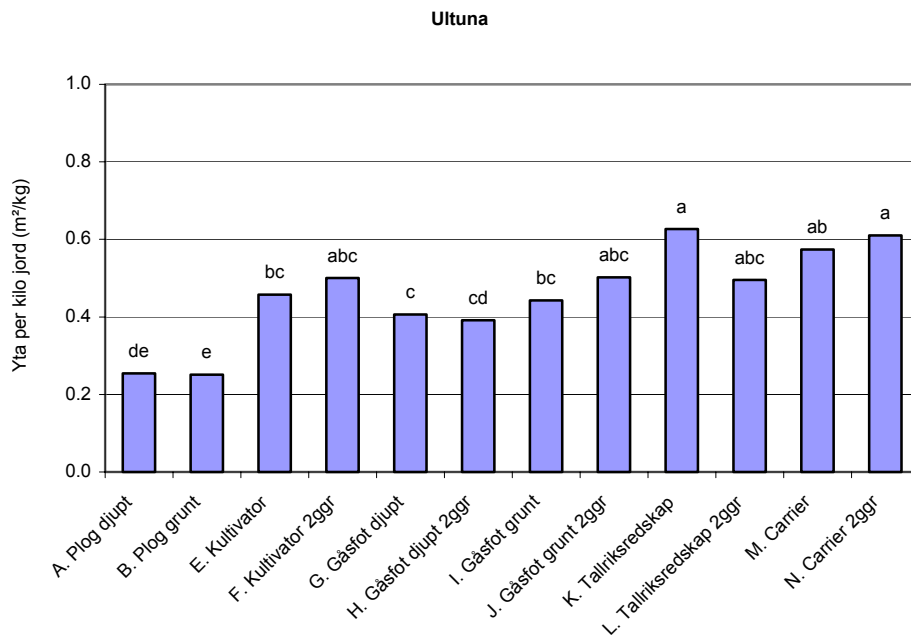
På den lättare jorden gav djup konventionell plöjning minst yta per kilo bearbetad jord, men resultatet skilde sig inte signifikant från grund konventionell plöjning och grund plöjning med grundplogen.

Carrieren gav störst yta per kilo bearbetad jord på den lättare jorden. Två överfarter med Carrier skiljde sig signifikant från alla led utom grund körning med gåsfotskultivator och en överfart med Carrieren.

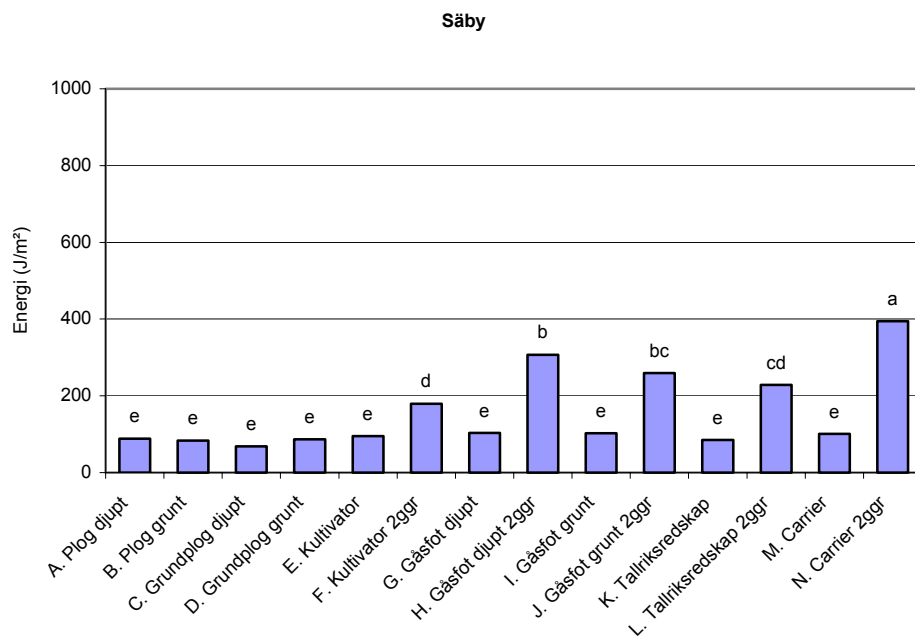
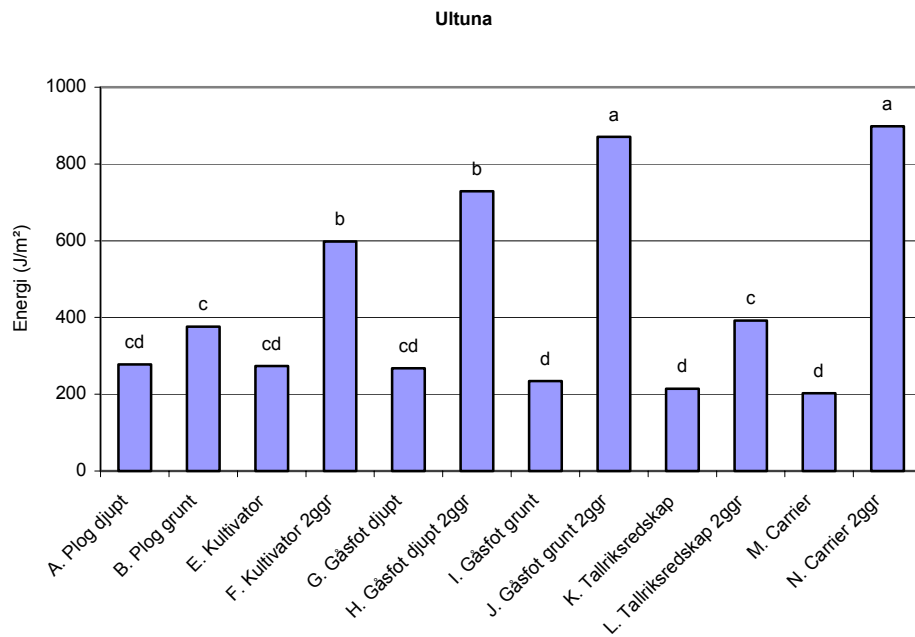
7.7 Energibehov för sönderdelning

På grund av att den andra överfarten över lag bara gav en liten extra sönderdelning blev energibehovet för sönderdelning väldigt högt i leden med två överfarter. Två överfarter med Carrier och gåsfotskultivatorn krävde störst energiinsats i förhållande till sönderdelningen, se figur 14. Två överfarter med kultivator gav även låg sönderdelning i förhållande till energiinsatsen och skilde sig signifikant från de övriga leden.

En körning med kultivator, gåsfotskultivator (djupt och grunt), tallriksredskap och djup konventionell plöjning skilde sig inte signifikant på den styvare jorden.



Figur 13. Partikelyta per kilo bearbetad jord efter grundbearbetningen. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).



Figur 14. Energibehov för sönderdelning vid grundbearbetningen. Desto lägre energi desto effektivare utnyttjar redskapet den tillförda energin för sönderdelning. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).

På den styvare jorden utnyttjades inte energin lika bra i det grunt plöjda ledet som i det djupt plöjda, men de skilde sig inte signifikant åt.

Skillnaderna mellan redskapen blev väldigt små på den lättare jorden. Det fanns inga signifikanta skillnader mellan leden med en överfart.

7.8 Totalt dragkraftbehov för såbäddsberedning och sådd

Såbäddsberedningarna krävde lägre total dragkraft på den lättare jorden än på den styvare, se figur 15.

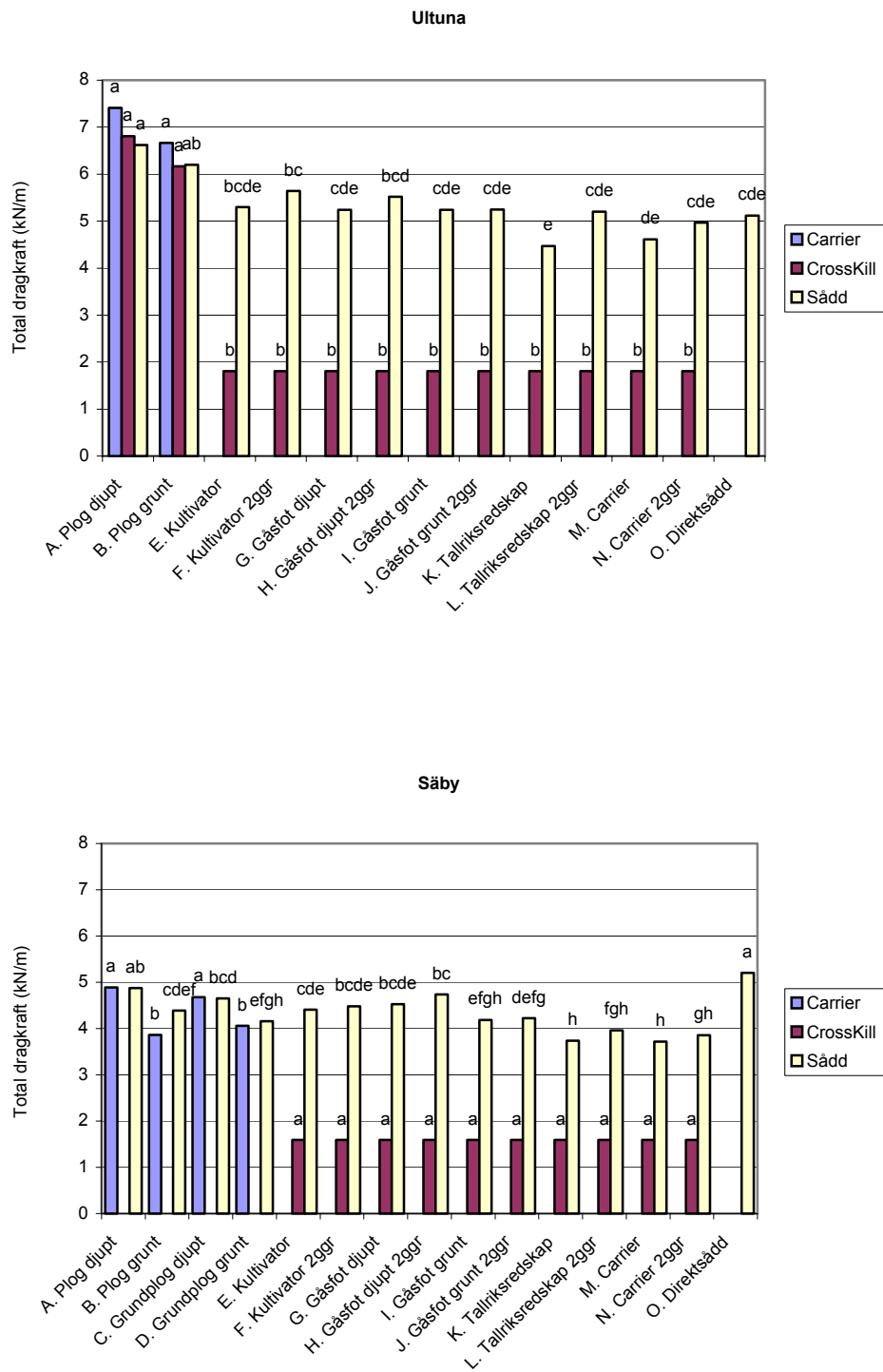
Överfarten med Carrier i de djupt konventionellt plöjda leden krävde större total dragkraft än i de grunt konventionellt plöjda leden på båda försöksplatserna, men på den styvare jorden blev de inte signifikant skilda åt.

Det blev ingen skillnad i total dragkraft för Carrier-överfarten mellan de konventionellt plöjda leden och de led som plöjdes med grundplojen.

Det totala dragkraftbehovet blev betydligt högre för CrossKill-vältning av de plöjda leden än för de oplöjda leden. Däremot blev det ingen skillnad i totalt dragkraftbehov för CrossKill-vältning mellan de oplöjda leden.

På den styvare jorden krävdes störst total dragkraft för sådd av det djupt konventionellt plöjda ledet, det blev signifikant skilt från sådd av övriga led. Mellan de övriga leden blev det inga stora skillnader i det totala dragkraftbehovet för sådd.

På den lättare jorden krävdes lägre totalt dragkraft för sådd än på den styvare jorden. Där krävde direktsådden störst total dragkraft. Men det blev inte signifikant skilt från sådd av det djupt plöjda ledet. Även på den lättare jorden blev det små skillnader i totalt dragkraftbehov för sådd mellan de oplöjda leden.



Figur 15. Totalt dragkraftbehov för såbäddsberedning och sådd. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$). Den statistiska analysen är gjord för varje operation för sig.

7.9 Halmrester på markytan

På den lättare jorden fanns betydligt mer skörderester efter förfrukten än på den styvare jorden. Detta resulterade i att det på den platsen blev större mängd halm kvar på markytan efter sådd, se figur 16.

I de plöjda leden fanns minst halm kvar på markytan efter sådd på den styvare jorden. I det grunt plöjda ledet fanns något mer än i det djupt plöjda, men det skilde sig inte signifikant. Däremot fanns en signifikant skillnad mellan de plöjda leden och alla de oplöjda leden.

Djup plöjning med grundplojen gav minst halmrester kvar på markytan på den lättare jorden. Men det blev inga signifikanta skillnader mot de konventionellt plöjda leden och de led som plöjdes grunt med grundplojen .

I det direktsådda ledet fanns mest halm kvar på markytan men skillnaden blev bara signifikant mot de andra leden på den styvare jorden.

Skillnaderna mellan de bearbetade, oplöjda leden blev små. Halmmängden på markytan skilde sig inte signifikant åt efter en jämfört med två överfarter med något redskap.

7.10 Energiförbrukning

Energiförbrukningen (l diesel per hektar) blev lägre på den lättare jorden än på den styvare jorden för respektive led, se figur 17.

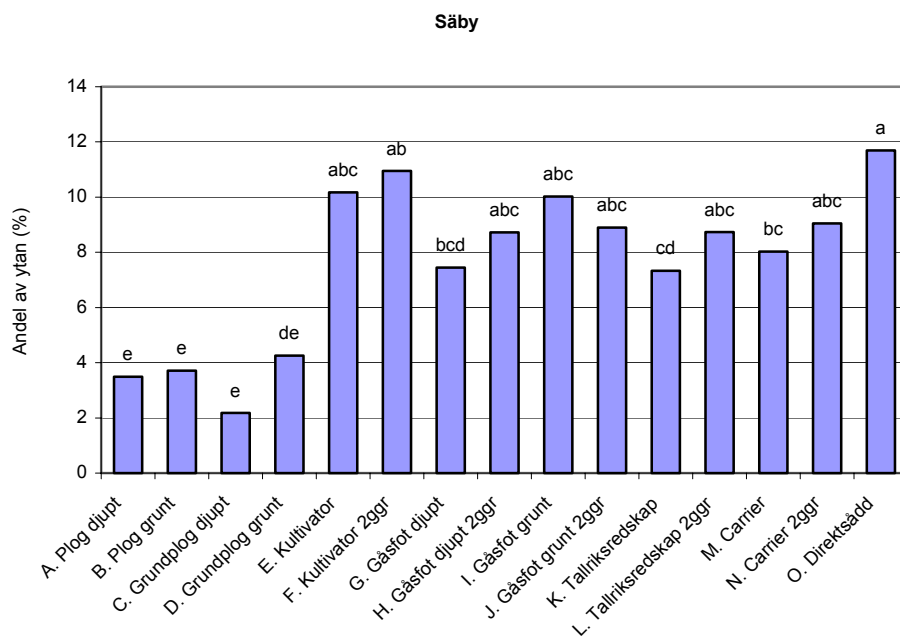
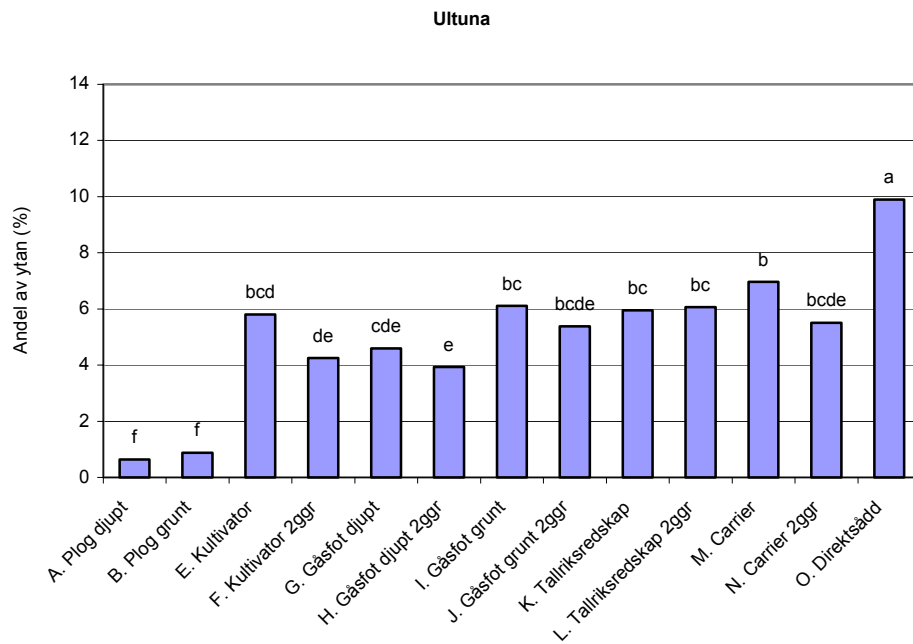
Led med två överfarter krävde, av naturliga skäl, mer energi än de led med endast en överfart till grundbearbetning. Ledet med två djupa överfarter med gåsfotskultivator krävde mest energi av de oplöjda leden.

På den styvare jorden krävde de plöjda leden mest energi. Det djupt plöjda ledet krävde något mer än det grunt plöjda. En betydande del av energin gick åt till såbäddsberedningen i de plöjda leden.

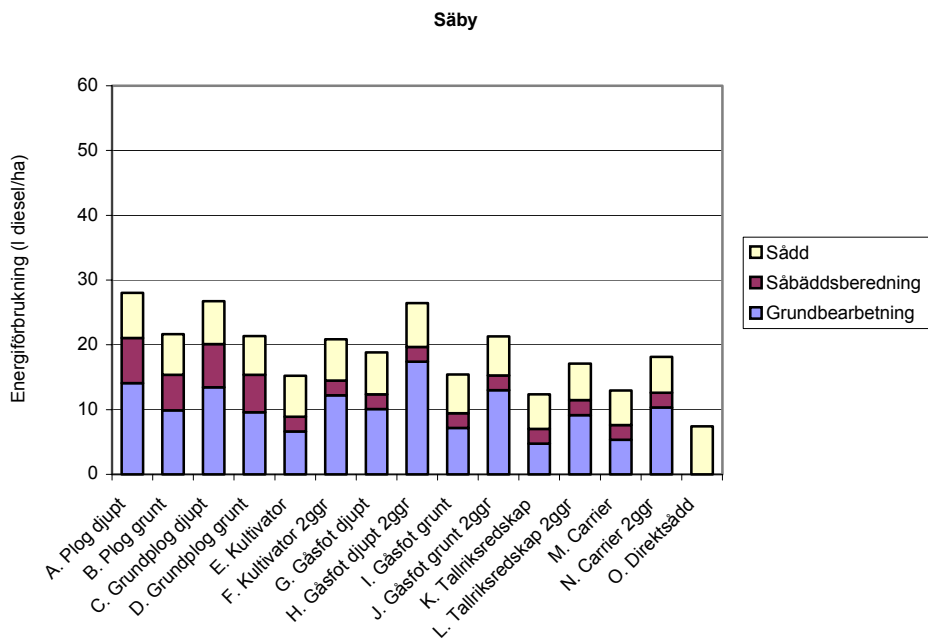
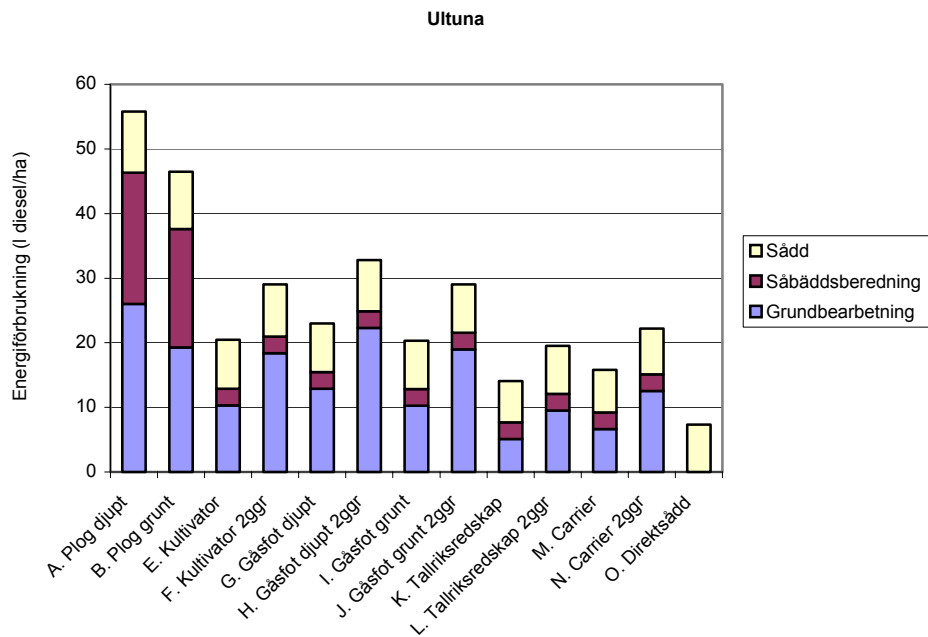
Det blev ingen större skillnad i energiförbrukning mellan konventionell plog och grundplog till samma bearbetningsdjup.

Grund bearbetning med gåsfotskultivator och bearbetning med kultivator förbrukade ungefär lika mycket energi.

Av de bearbetade leden förbrukades minst energi i de led med en överfart med Carrier eller tallriksredskap. Med två överfarter med tallriksredskap kan man få samma energiförbrukning som med en överfart med gåsfotskultivator.



Figur 16. Andel av markytan som var täckt med halm efter sådd. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda ($p < 0,05$).



Figur 17. Den totala energiförbrukningen (l diesel per ha) för de olika bearbetningssystemen. Energiförbrukningen är uppdelad i grundbearbetning, såbäddsberedning och sådd.

8 Diskussion

8.1 Test av mätutrustning

De utförda testkörningarna visade att det blev skillnad i uppmätt dragkraft beroende på draglängden. Detta är i sig något förvånande. Men att de kortaste dragen, om 5 meter, inte visar på samma värde som övriga kan förklaras med att det är en väldigt kort sträcka som allt måste göras på. Utrustningen fungerar så att man slår till en strömbrytare när man börjar en mätning och slår ifrån den när mätningen ska upphöra. Missar man lite när man slår till, eller ifrån, kommer mätningen inte att stämma i tid och man missar det verkliga draget. Loggern mäter kontinuerligt varje sekund och antagligen får man en fördröjning på en sekund (Pettersson et al, 2002) vilket kan ha en stor betydelse vid så korta draglängder.

Resultaten från 10 meters draglängd skiljer sig signifikant från 5, 20 och 40 meters draglängd. Detta betyder att för att få en säkerhet i de uppmätta värdena bör draglängden i varje fall vara längre än 10 meter. Resultaten från 20, 40 och 80 meters draglängder skiljer sig däremot inte signifikant åt. Detta betyder att draglängden inte behöver överstiga 20 meter för att resultaten ska bli säkra.

Variationskoefficienten för de olika draglängderna blev överlag låga. De varierar mellan 0,22 och 8,28 %. Resultaten från 5 meters draglängd fick högst variationskoefficient vilket styrker slutsatsen att det är för kort draglängd.

8.2 Bearbetningsdjup

Att det skilde så mycket mellan de inställda och verkliga bearbetningsdjupen beror bland annat på att inställningen gjordes för det maximala arbetsdjupet för de bearbetande organen. Bearbetningsbottnarna blev mer eller mindre ojämna därför att redskapen inte bröt upp jorden lika djupt över hela arbetsbredden. Eftersom de verkliga bearbetningsdjupen togs fram genom att väga den uppbrutna jorden på en viss yta, blev de verkliga bearbetningsdjupen grundare än de inställda. Fjädringen hos kultivatorpinnarna kan också ha minskat arbetsdjupet

8.3 Konventionell plog

Det mest utmärkande med den konventionella plogen är att den, tillsammans med grundplogen, har det lägsta specifika dragkraftbehovet av redskapen. Men när man plöjer grundare förlorar man lite av den effekten. Då kommer det specifika dragkraftbehovet att närma sig de andra redskapen. Det låga

dragkraftbehovet kan, bland annat, förklaras med att ploget har en mycket liten angreppsvinkel och att ploget bryter upp jorden tvådimensionellt, det vill säga lika brett som skärets bredd (McKyes, 1989).

Beroende på vilket bearbetningsresultat man är ute efter kommer ploget att passa olika bra till uppgiften. Av redskapen begraver den, även här tillsammans med grundploget, skörderester bäst. Men om syftet med bearbetningen är att sönderdela jorden så mycket som möjligt, med så få överfarter som möjligt, är ploget inte det bästa valet. Ploget ger det grövsta bruket av redskapen beroende på dess sätt att bryta upp jorden. Beroende på att ploget arbetar med liten angreppsvinkel kommer sönderdelningen främst att ske genom sprickbildning och kommer därmed att bli mindre effektiv (Davies et al. 1993, Koolen & Kupiers, 1983).

Eftersom ploget lämnar ett grovt bruk med ganska stora kokor efter sig krävs det vidare bearbetning för att få en tillfredställande såbädd. Detta återspeglade sig i jämförelsen av energiförbrukningen för de olika bearbetningssystemen. Genom att plöja grundare sjunker energiförbrukningen men bearbetningsresultatet skiljer sig inte, utan kravet på såbäddsberedning blir det samma.

Ett plöjt system kommer att passa bäst när man har stora mängder skörderester, eller ogräs, som kan ställa till problem om de inte brukas ner, eller ett stort luckringsbehov. För att minska energiförbrukningen kan man då minska plöjningsdjupet så pass att nedbrukningen av skörderesterna inte blir lidande.

8.4 Grundplog

Grundploget kunde, beroende på tekniska problem, bara användas på försöksplatsen med den lättare jorden. Därför är underlaget mindre för mätningarna med grundploget än för övriga redskap. Vanligtvis används grundploget i kombination med en, på ploget monterad, lätt tiltpackare. Denna användes inte i försöket eftersom en jämförelse specifikt för ploget ville göras.

Liksom för den konventionella ploget är det specifika dragkraftbehovet lågt för grundploget. Det totala dragkraftbehovet blev det samma som för den konventionella ploget vid bearbetning till samma djup.

Grundploget gav ett bruk med mindre aggregat än ploget, framför allt vid djupare bearbetning. Detta beror troligtvis på att grundploget har en tvärare vändskiva som vänder jorden mer och snabbare än den konventionella ploget och behandlar därmed jorden hårdare.

Energiförbrukningen för grundbearbetningen skiljde sig inte från plöjningen. För djup bearbetning ligger den alltså högt jämfört med de övriga redskapen. Bruket blev finare än det konventionellt plöjda men leden behandlades lika ändå. Därför har energiförbrukningen blivit i princip lika med plöjningen för respektive led. Vid grund bearbetning med grundplojen hamnar man på samma energiförbrukning som två bearbetningar med kultivator, och två grunda bearbetningar med gåsfotskultivator men lägre än för två djupa bearbetningar med gåsfotskultivator.

Grundplojen passar bäst att bearbeta grunt med. Men det gäller, precis som för plojen, att man bearbetar tillräckligt djupt så att skörderesterna blir ordentligt nedbrukade. Om tiltpackaren hade använts hade troligtvis den extra såbäddsberedningen inte behövts och då hade systemets energiförbrukning minskat betydligt.

8.5 Kultivator

Kultivatoren krävde större specifik dragkraft än den konventionella plojen och grundplojen. Det beror till stor del på skillnaden i uppbrytningsmekanismen. Kultivatoren har en betydligt större angreppsvinkel vilket ökar dragkraftbehovet (Payne & Tanner, 1959). Den bryter även upp jorden tredimensionellt, det vill säga bredare än pinnens bredd. Detta medför att bearbetningsdjupet inte blir lika stort över hela bearbetningsbredden (Dexter & Arvidsson, 2002).

Den andra överfarten krävde större specifik dragkraft än den första. Det beror på att mycket mindre jord bröts upp. På den lättare jorden bröts betydligt mer jord upp vid den andra överfarten än på den styvare jorden. Det visade sig tydligt på den specifika dragkraften. På den lättare jorden krävde den andra överfarten inte mer specifik dragkraft än den första.

Kultivatoren gav ett finare bruk än den konventionella plojen och grundplojen. Detta beror främst på det grundare bearbetningsdjupet. Men det kan också bero på att angreppsvinkeln är större än plogarnas vilket innebär att uppbrytningen till större del sker genom skjuvning, vilket ger större sönderdelning (Davies et al. 1993, Koolen & Kupiers, 1983).

Kultivator utnyttjade den tillförda energin för sönderdelning lika bra som de andra redskapen. Energin utnyttjades betydligt sämre vid den andra överfarten. Men jämfört med de andra redskapen utnyttjades den tillförda energin ganska bra vid två överfarter. Det är bara tallriksredskapet som utnyttjade energin bättre. Den effektivare sönderdelningen gör att behovet av efterföljande bearbetningar för att få såbruk blev mindre. Men däremot var kultivatoren inte så bra på att bruka ner halm. På den lättare jorden fanns det mest halmrester kvar på markytan efter sådd i de led som kultiverats av

samtliga bearbetade led. På den styvare jorden, med mindre skörderester, skilde resultaten sig inte mycket från övriga redskap.

Bearbetningssystemen med kultivator krävde betydligt mindre energi i form av diesel än de plöjda. Dels beroende på att själva grundbearbetningen förbrukade mindre energi och dels för att behovet av efterföljande såbäddsberedning var mindre. Med två överfarter med kultivator blev energiförbrukningen ungefär samma som för grund plöjning. Men eftersom det krävdes mindre såbäddsberedning kom det kultiverade systemet att få lägre energiförbrukning.

Bearbetningssystem med kultivator passar bäst när man har lite skörderester och på jordar där djupt luckringsbehov är litet. Den har en fördel jämfört med plöjda system genom att tidsåtgång och energiförbrukning minskar.

8.6 Gåsfotskultivator

På den styvare jorden krävde gåsfotskultivatoren mindre specifik dragkraft än den vanliga kultivatoren för den första överfarten. Det beror på att den lämnade en jämnare bearbetningsbotten än kultivatoren och bearbetade därmed en större jordvolym. Angreppsvinkeln var även mindre än kultivatorns. Vid grundare bearbetning bearbetas betydligt mindre jordvolym varför det specifika dragkraftbehovet ökar.

Andra överfarten krävde större specifik dragkraft än kultivatoren på båda jordarna. Det kan bero på att bearbetningsbotten blev ganska hård efter den första överfarten. Gåsfotsskären har stor understödsyta och detta kan ha gjort att den har fått problem att gå djupare än den gamla bearbetningsbotten.

Eftersom angreppsvinkeln är mindre än för kultivatoren sker uppbyggnaden i större utsträckning genom sprickbildning. Det kan förklara varför sönderdelningen blev sämre vid djupare bearbetning. Genom att uppbyggnaden sker genom sprickbildning medför det större bearbetningsdjupet att större kokor kan bildas (Payne, 1956).

Med djup bearbetning blev det något bättre halminblandning än vid grund bearbetning. Det förklaras enkelt med att en större jordvolym bröts upp och kunde täcka halmen.

Gåsfotskultivatoren blir ett intressant alternativ till kultivatoren om den körs med grunt bearbetningsdjup. Då blir energiförbrukningen den samma, eller lägre, men man får mer jord bearbetad och jämnare bearbetningsdjup. Dessutom får man något bättre halminblandning och hela arbetsbredden blir avskuren vilket ger en bättre ogräsbekämpning.

8.7 Tallriksredskap

Tallriksredskapet krävde ungefär samma specifika dragkraft som kultivatorn. Med tanke på utformning och uppbrytningsmekanism borde tallriksredskapet ha lägre specifikt dragkraftbehov än kultivatorn (Culpin, 1986). Men tallriksredskapet har dålig marksökning vilket resulterade i att det hade väldigt svårt att gå i på den styvare jorden. Den dåliga marksökningen beror på att tallriksredskapet har en stor angreppsvinkel (Godwin et. al., 1985). Vid förhållanden då markens hållfasthet är hög kommer tallrikarna att bryta upp jorden istället för att skära upp den.

Tallriksredskapet utmärkte sig genom att skillnaden i specifikt dragkraftbehov blev liten mellan första och andra överfarten. På den styvare jorden blev det till och med lägre än för första överfarten. Det beror på att tallriksredskapet gick bättre i vid andra överfarten när den hårda markytan brutits upp något.

Halminblandningen skilde sig inte så mycket för tallriksredskapet jämfört med de andra redskapen förutom mot plogen. Men det är ett av redskapen som lämnade mest halm kvar på ytan. En andra överfart med tallriksredskapet minskade inte mängden halm på markytan. Det kan bero på att tallriksredskapet hade svårt att skära igenom halmen och ville därför bära på halmen och lyfta upp den istället för att begrava den med jord.

Eftersom det totala dragkraftbehovet var lågt för tallriksredskapet blev även energiförbrukningen låg. För grundbearbetningen blev energiförbrukningen lägst för tallriksredskapet på båda platserna. Eftersom det inte krävdes mer såbäddsberedning än för de andra leden blev även den totala energiförbrukningen för systemen med tallriksredskapet lägst.

Tallriksredskapet har sin begränsning i att det har dålig jordsökning och att det inte klarar att blanda in för stora mängder skörderester. Men är förhållandena sådana att jorden är lättpenetrerad och man har måttligt med skörderester är ett bearbetningssystem med tallriksredskap ett bra alternativ.

8.8 Grundbearbetande tallriksredskap

Det grundbearbetande tallriksredskapet, Carriern, hade ett specifikt dragkraftbehov motsvarande tallriksredskapet på den styvare jorden. Men på den lättare jorden hade Carriern störst specifikt dragkraftbehov av alla redskapen. Detta beror till viss del på att Carriern är tung och välten sjönk på den lättare jorden vilket gjorde att dragkraften för att dra själva välten ökade. Den andra överfarten krävde väldigt stor specifik dragkraft. Det beror på att den andra överfarten bidrog med väldigt lite extra bearbetningsdjup och att välten gick tungt i den bearbetade jorden.

Det totala dragkraftbehovet skiljde sig inte mellan första och andra överfarten med Carriern.

Carriern gav ett bruk med stor andel små aggregat. Den gav ett finare bruk än tallriksredskapet vilket beror på att den har mindre tallrikar som är mer snedställda och mindre skålade vilket gör att de är mer brytande än tallrikarna på tallriksredskapet (Godwin et. al., 1985).

På den styvare jorden blev ganska mycket skörderester kvar på markytan efter en överfart. Men med en andra överfart minskade mängden. På den lättare jorden blandade den in halmen bättre vid första överfarten men tenderade att dra upp den till ytan igen vid den andra överfarten.

Energiförbrukningen i leden med en överfart med Carrier blev låg. Det var bara direktsådd och en överfart med tallriksredskap som hade lägre energiförbrukning. Med två överfarter ökade givetvis energiförbrukningen. Men jämfört med de andra leden med två överfarter var det bara tallriksredskapet som gav lägre energiförbrukning.

Carriern skar i princip av hela arbetsbredden vilket är positivt ur ogrässynpunkt. På grund av sin större vikt per meter arbetsbredd har den inte samma problem med att hålla arbetsdjupet som tallriksredskapet. Att tallrikarna är små, tandade och lutar något ifrån den konkava sidan bidrar även till att den lättare penetrerar jorden. Detta gör den mindre känslig för de rådande markförhållandena.

8.9 Sammanfattande diskussion

För att göra en rättvis jämförelse av dragkraftbehovet mellan olika redskap måste hänsyn tas till det verkliga bearbetningsdjupet. Det inställda bearbetningsdjupet räcker inte eftersom de olika redskapen inte lämnar lika jämna bearbetningsbottnar och därmed bearbetar de olika mycket jord vid samma inställda bearbetningsdjup. Den konventionella plogen och grundplogen bearbetar i stort sätt alltid till inställt bearbetningsdjup medan övriga redskap i verkligheten bearbetar grundare än det inställda bearbetningsdjupet. Därför ger det specifika dragkraftbehovet den bästa jämförelsen.

Men det specifika dragkraftbehovet räcker inte alltid till för att jämföra olika redskap. Man bör ta hänsyn till bearbetningsresultatet för att få en bättre jämförelse. Två viktiga parametrar på bearbetningsresultatet är sönderdelningsgraden och halminblandning. För att spara tid och minska energiförbrukningen är det önskvärt att få en acceptabel såbädd efter så få överfarter som möjligt. Därför bör den första grundbearbetningen ge en stor sönderdelning samtidigt som den brukar ner skörderester effektivt.

Beroende på de rådande förhållandena på fältet kommer de olika bearbetningssystemen att passa olika bra till höstsådd. Med stora halmmängder är det viktigt att bruka ner så mycket skörderester som möjligt för att minska patogentrycket. Då kan man kanske acceptera att grundbearbetningen inte sönderdelar jorden så mycket. Ett plöjt system, med konventionell plog eller med grundplog, brukar ner skörderester effektivast och passar därför bäst då. De plöjda systemen ökar behovet för såbäddsberedning vilket kommer att höja den totala energiförbrukningen för systemen. Men med plöjning, konventionellt eller med grundplog, vid goda förhållanden kan såbäddsberedningen minskas eller uteslutas helt om man använder en bearbetande såmaskin och därmed kan systemets energiförbrukning minskas.

Om mängden skörderester inte ses som något problem eller om förfrukten är sådan att risk för spridning av patogener till nästkommande gröda är liten blir behovet att bruka ner skörderesterna mindre. Då kan det tvärtom vara positivt att ha kvar skörderester i ytan som ett avdunstningsskydd och skydd mot igenslamning (Weidow, 2000). Då kan ett direktsått system med en bearbetande såmaskin vara tillräckligt. Men det ger ingen större sönderdelning och den mekaniska ogräsbekämpningen blir dålig. Carriern och gåsfotskultivatoren skär av hela bearbetningsbredden med en överfart vilket ger en effektiv mekanisk ogräsbekämpning. Man får även en sönderdelning av jorden vilket ger en bättre såbädd. Det kommer givetvis att krävas mer diesel men det kan kompenseras genom den bättre ogräseffekten och den bättre såbädden.

För att få en mer komplett jämförelse mellan de olika systemen bör en ekonomisk aspekt läggas till. Då krävs bland annat skördedata och studier av ogräs- och sjukdomstryck. Försöket kommer att drivas vidare till skörd och då kommer information om detta att fås.

Litteraturlista

Aluko, O. B. & Seig, 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 introduktion*. Kurslitteratur till Jordbearbetning och hydrateknik, Inst för markvetenskap, SLU, Uppsala.

Barnes, G. E., 2000. *Soil Mechanics – principles and Practice 2nd ed*. Macmillan Press, London.

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, nr 41, sid 341-358.

Budhu, M., 2000. *Soil Mechanics & Foundations*. John Wiley & Sons, New York.

Culpin, C., 1986. *Farm Machinery 11th ed*. Collins, London.

Davies, B. et. Al., 1993. *Soil Management, 5th ed*. Sid 125-161.

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

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

Eriksson, I. & Zetterberg, G., 1986. *Fältmaskiner i Jordbruket*. LTs förlag, Stockholm.

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

Gill, W. R. & 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*. Proceeding of the International Conference on Soil Dynamics, Auburn, AL, sid 250-263.

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 dry clod-forming soils*. Soil and Tillage Research, nr 3(1), sid 47-59.
- Koolen, A. J. & Kupiers, H., 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences, nr 13, sid 196.
- Madsen, N., 1998. *Trækkraft- og løftkraftbehov ved jordbehandlingsredskaber og såsystemer*. Grøn viden markbrug, nr 197.
- Malmström, L. & Wetterlund, B., 1996. *Fordonslära – Traktorer och redskapsbärare*. Natur och Kultur/LTs förlag, Stockholm.
- McKyes, E., 1989. *Developments in Agricultural Engineering 10: Agricultural Engineering Soil Mechanics*. Elsevier Science Publishing Company, Canada.
- Payne, P. C. J., 1956. *The relationship between the mechanical properties of soil and the performans 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., Norén, O., Hansson, P.A. & Lindgren, M., 2002. *A system for onboard 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), sid 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 and 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 loosening of soil by rigid tines*. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 23, sid 243-257.
- Weidow, B., 2000. *Växtodlingens grunder*. LT, Stockholm.