

Dragkraftsbehov och maskinkostnad för olika redskap och bearbetningssystem

Johan Arvidsson, Olov Hillerström, Thomas Keller, Marcus Magnusson, Daniel Eriksson

I. Bakgrund

Denna rapport innehåller en slutredovisning av projektet Dragkraftsbehov och maskinkostnad för olika redskap och bearbetningssystem, finansierat av SLF. Inom projektet genomfördes ett antal olika delprojekt, vilka redovisas som enskilda avsnitt. Projektet var relativt omfattande och därför redovisas här endast sammanfattningar av de olika delprojekten. En fullständig redovisning finns i rapport 117 från jordbearbetningen, SLU, Dragkraftsbehov och maskinkostnad för olika redskap och bearbetningssystem: som kan nås via www.slu.se/jbhy eller direkt på http://pub-epsilon.slu.se:8080/2437/01/arvidsson_j_etal_101027.pdf.

Syftet var framförallt att bestämma dragkraftsbehov för olika redskap och bearbetningssystem som underlag för att beräkna kostnader för jordbearbetning, och i förlängningen lönsamhet i växtodlingen. De olika avsnitt som ingår i denna rapport är följande:

- II. Dragkraftsbehov, maskinkostnader och energibalans för olika redskap och maskinsystem till höstsådd
- III. Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat för olika kultivatorspetsar
- IV. Dragkraftsbehov för primärbearbetning, sådd och såbäddsberedning
- V. Dragkraftsbehov vid plöjning som funktion av markens hållfasthet
- VI. JB-Maskinkalkyl - handledning till kalkylark för att beräkna maskinkostnader

Gemensamt för samtliga delprojekt är att dragkraftsbehovet för olika bearbetningsåtgärder mättes i försök på Ultuna, SLU. För samtliga körningar användes en traktor utrustad med ett system för bränslemätning. Mätutrustningen är utvecklad av JTI, och medger mycket noggrann mätning med hög frekvens. Traktorn var kalibrerad så att nyttig effekt kunde beräknas för varje given kombination av varvtal och bränsleförbrukning, också med hänsyn tagen till rullmotstånd och slirningsförluster. Dragkraftsbehovet kunde sedan beräknas indirekt från effektbehov och traktorns hastighet.

Gemensamt för de flesta av delprojekten är också att bearbetningsresultatet bestämdes genom sållning av jord och mätning av bearbetningsdjup. Därmed kunde energibehov för sönderdelning och specifikt dragkraftsbehov (dragkraft per bearbetad tvärsnittsytta) beräknas som mått på redskapens effektivitet.

II. Dragkraftsbehov, maskinkostnader och energibalans för olika redskap och maskinsystem till höstsådd

Under 2003, 2004 och 2006 gjordes mätningar av dragkraftsbehov och bearbetningsresultat i hela maskinsystem i två försök med höstvetete, ett på lätt och ett på styv jord, i serie R2-4050 (skördeår 2004, 2005 och 2007). Dessutom beräknades en energibalans där insatserna i odlingen jämfördes med energiinnehållet i skörden.

På den styva leran gav plöjning ett lägre specifikt dragkraftsbehov (dragkraft per bearbetad tvärsnittsytta) än kultivator, tallriksredskap och tallrikskultivator, men också en grövre struktur kopplat till det större arbetsdjupet. På den lättare jorden var det betydligt mindre skillnad i såväl specifikt dragkraftsbehov som bearbetningsresultat mellan olika redskap. På den styva jorden innebar ett plöjningsfritt system betydligt lägre energiåtgång och kostnader jämfört med plöjning, medan skillnaderna var relativt små på den lätta jorden (figur 1).

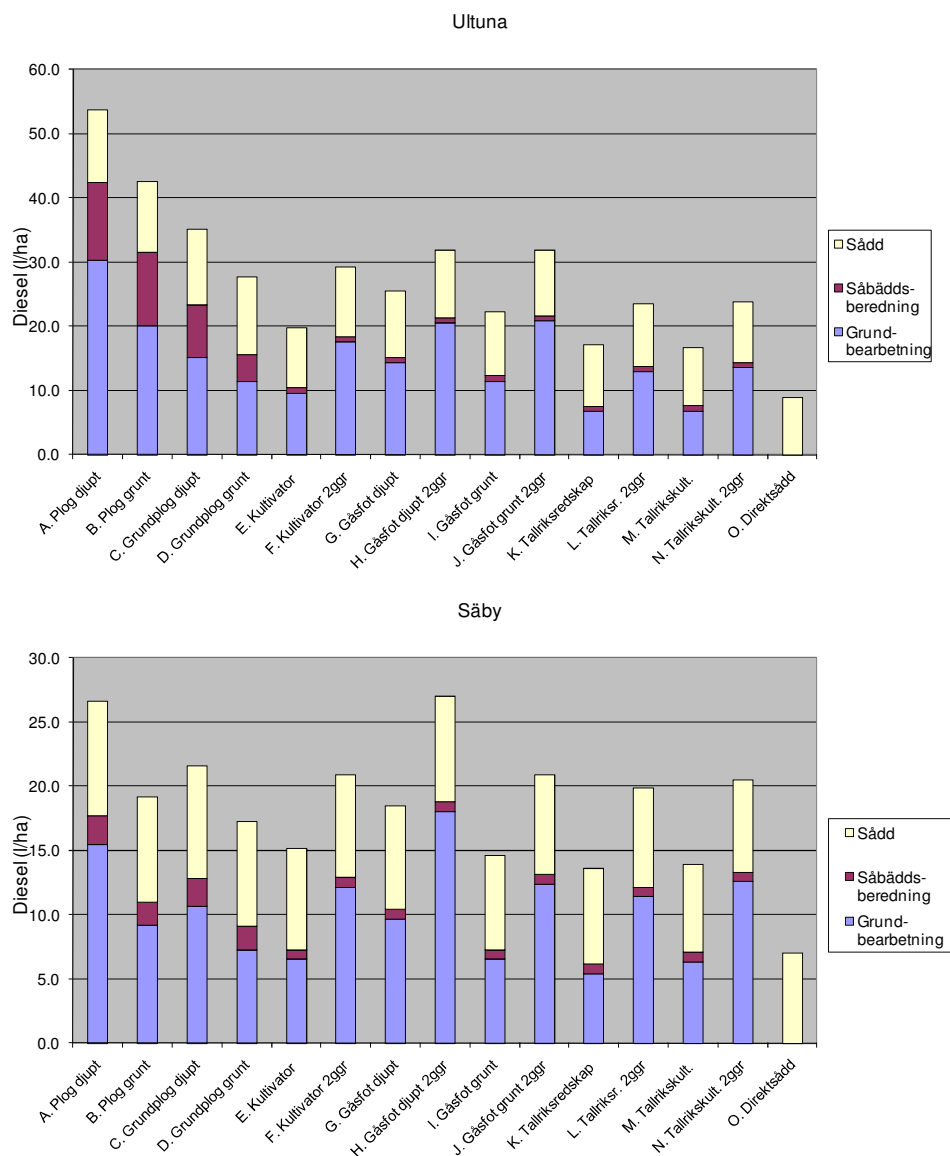


Fig. 1. Bränsleförbrukning för olika led. Ultuna=styv lera. Säby=lättlera.

Skörd för olika bearbetningssystem berodde framförallt på förfrukt och behandling av skörderester. Med höstvetete efter höstvetete, stora halmmängder och blöta förhållanden för bearbetning erhöles ökad skörd för djup bearbetning och fler överfarter. I de fall då växtresterna inte orsakade problem ökade inte skörden för djup bearbetning. Höstvetetes luckringsbehov förefaller därför vara litet och för bäst lönsamhet bör bearbetningsintensiteten främst styras av mängden skörderester (figur 2).

Beräkningen av energibalans visade att tillverkning av kvävegödselmedel, torkning och jordbearbetning var de största energiinsatserna. Jordbearbetningens andel av totala energiinsatsen varierade mellan 5 och 25 %. Energin till jordbearbetning var liten i förhållande till energin i skörden. Skördenivån blir därför helt avgörande för energiutbytet i odlingen, och påverkas i liten utsträckning av energiåtgången vid jordbearbetning (tabell 1 och 2).

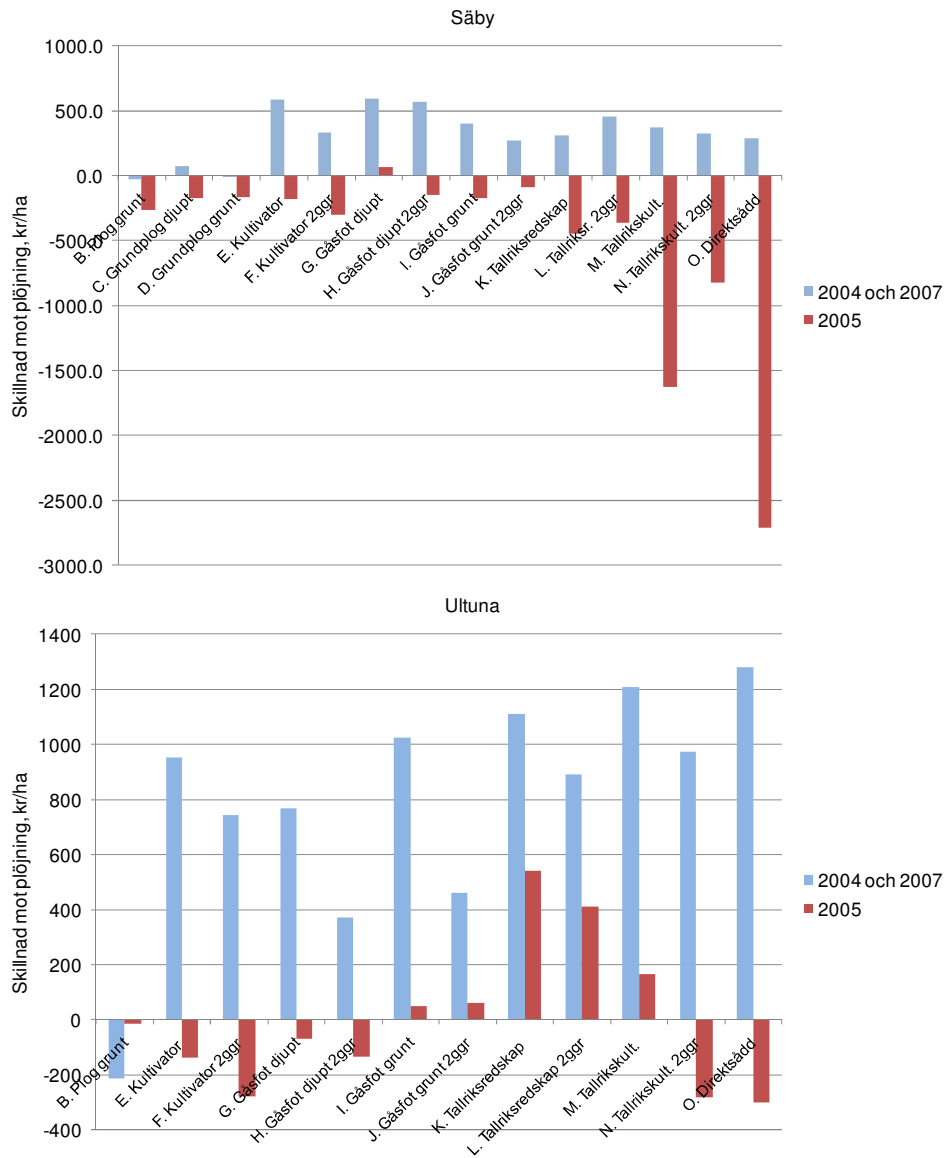


Fig. 2. Beräknad lönsamhet jämfört med plöjning, uppdelat på skördeår med vårsäd som förfrukt (2004 och 2007), och med höstsäd som förfrukt (2005). Ultuna=styv lera. Säby=lättilera.

Tabell 1. Energiinsats, energinetto (energi i skörd minus insatt energi), samt kvot skördad/insatt energi på Ultuna

	Energi bränsle GJ ha ⁻¹	Energi maskiner GJ ha ⁻¹	Total input GJ ha ⁻¹	Energi bearb./ %	Energi netto GJ ha ⁻¹	Energi netto rel. tal	Output/ Input
A. Plog djupt	2.2	0.6	11.0	25	75.7	100	7.9
B. Plog grunt	1.7	0.6	10.4	22	71.3	94	7.9
C. Grundplog djupt	1.4	0.5	10.1	19	73.5	97	8.3
D. Grundplog grunt	1.1	0.5	9.7	16	71.0	94	8.4
E. Kultivator	0.8	0.3	9.1	12	70.0	93	8.7
F. Kult. 2ggr	1.2	0.4	9.6	16	71.1	94	8.4
G. Gåsfot djupt	1.0	0.4	9.5	15	70.5	93	8.5
H. Gåsfot dj. 2ggr	1.3	0.4	9.9	18	71.8	95	8.3
I. Gåsfot grunt	0.9	0.3	9.3	13	72.1	95	8.7
J. Gåsfot gr 2ggr	1.3	0.4	9.7	17	70.8	94	8.3
K. Tallriksredskap	0.7	0.4	9.2	11	74.8	99	9.1
L. Tallrik 2ggr	0.9	0.5	9.7	15	76.3	101	8.9
M. Tallrikskult.	0.7	0.4	9.2	11	74.0	98	9.0
N. Tallriksk. 2ggr	1.0	0.5	9.7	15	73.5	97	8.6
O. Direktsådd	0.4	0.2	8.5	7	67.1	89	8.9

Tabell 2. Energiinsats, energinetto (energi i skörd minus insatt energi), samt kvot skördad/insatt energi på Säby

	Energi bränsle GJ ha ⁻¹	Energi maskiner GJ ha ⁻¹	Total input GJ ha ⁻¹	Energi bearb./ %	Energi netto GJ ha ⁻¹	Energi netto rel. tal	Output/ Input
A. Plog djupt	1.1	0.4	10.4	13.8	99.7	100	10.6
B. Plog grunt	0.8	0.3	10.0	11.1	96.9	97	10.7
C. Grundplog djupt	0.9	0.3	10.2	11.9	98.9	99	10.7
D. Grundplog grunt	0.7	0.3	9.9	10.2	98.7	99	10.9
E. Kultivator	0.6	0.3	9.8	9.1	97.9	98	11.0
F. Kult. 2ggr	0.8	0.3	10.1	11.6	98.1	98	10.7
G. Gåsfot djupt	0.7	0.3	10.1	10.6	100.8	101	11.0
H. Gåsfot dj. 2ggr	1.1	0.4	10.6	14.2	104.2	104	10.8
I. Gåsfot grunt	0.6	0.3	9.7	8.9	96.8	97	11.0
J. Gåsfot gr 2ggr	0.8	0.3	10.1	11.5	100.0	100	10.9
K. Tallriksredskap	0.5	0.3	9.7	9.1	94.0	94	10.7
L. Tallrik 2ggr	0.8	0.5	10.2	12.2	99.9	100	10.8
M. Tallrikskult.	0.6	0.4	9.6	9.7	89.0	89	10.3
N. Tallriksk. 2ggr	0.8	0.5	10.2	13.1	96.7	97	10.5
O. Direktsådd	0.3	0.2	8.7	5.5	77.4	78	9.9

III. Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat för olika kultivatorspetsar

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

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

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

I en annan typ av försök jämfördes spetsar med olika bredd. Detta utfördes enbart på styv jord.

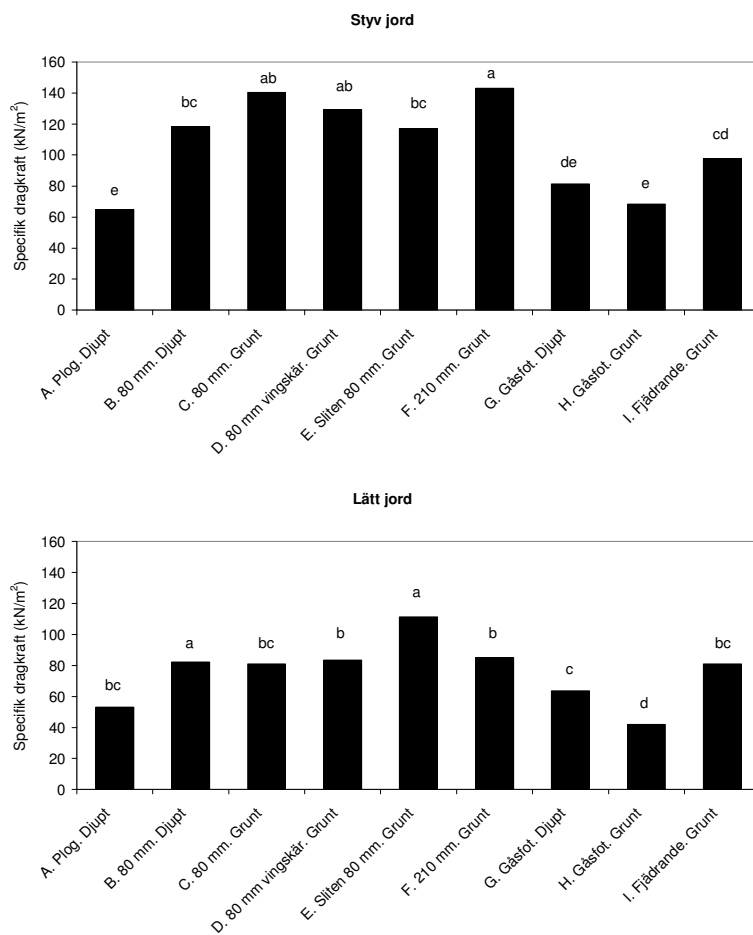
I varje led studerades specifikt dragkraftsbehov (kraft per tvärsnittsarea) och totalt dragkraftsbehov (kraft per meter arbetsbredd). Alla körningar gjordes med en Massey Ferguson 6290 utrustad med ett bränslemätningssystem. En datalogger registrerade kontinuerligt traktorns effekt, hastighet, motorvarvtal m.m. Det verkliga bearbetningsdjupet mättes genom att en stålram med arean 0,25 m² placerades i försöksrutan och all lös, bearbetad jord vägdes. Skrymdensiteten mättes och därefter kunde djupet beräknas.

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

De 80 mm breda spetsarna och det 210 mm breda skäret hade det största specifika dragkraftsbehovet på den styva jorden. Plogen och det grunda gåsfotsledet hade det minsta specifika dragkraftsbehovet (figur 3). På den lätta jorden var det den slitna 80 mm-spetsen som hade det största specifika dragkraftsbehovet. Det grunda ledet med gåsfoten hade det minsta. Fjädrande pinne hade lägre specifikt dragkraftsbehov och bättre sönderdelning än en stel pinne, och därmed också lägre energi för sönderdelning. Det specifika dragkraftsbehovet ökade med en ökad spetsbredd. Plogen brukade ner halmen bäst, sämst var det grunda gåsfotsledet.

Vingskår monterade på konventionella kultivatorpinnar gav inte någon sänkning av det specifika dragkraftsbehovet jämfört med enbart pinne, men en bättre halminblandning än gåsfoten.

Undersökningen visade att både dragkraftsbehov och bearbetningsresultat varierade kraftigt mellan spetsstyperna. Gåsfotsskäret var t.ex. effektivt för luckring och sönderdelning men gav dålig halminblandning. Fortsatta undersökningar skulle vara av stort värde, både för maskintillverkare och för jordbrukare.



Figur 3. Specifik dragkraft för olika typer av kultivatorspetsar. Staplar som inte är märkta med samma bokstav är signifikant skilda.

IV. Dragkraftsbehov för primärbearbetning, sådd och såbäddsberedning

Under 2003-2006 gjordes mätning av dragkraftsbehov och bränsleförbrukning i flera pågående serier med olika bearbetningssystem. Mätningar gjordes både vid primärbearbetning på hösten och vid sådd och såbäddsberedning på våren. Syftet var främst att ta fram generella värden på bränsleförbrukning för olika typer av bearbetningsåtgärder.

I serie R2-4027 gav två överfarter med kultivator till ett inställt arbetsdjup på 10 cm ungefär halva energiförbrukningen jämfört med plöjning. Motsvarande bearbetning med stel pinne till 20 cm krävde ca 3 gånger mer energi än bearbetning till 10 cm.

I serie R2-7115, med plöjning till ett inställt arbetsdjup på ca 12 cm, motsvarade en plöjning energimässigt ca 3 överfarter med kultivator. Dragkraftsbehovet var starkt jordartsberoende och ökade med ökande lerhalt. I denna serie ingick också led med olika ringtryck, som potentiellt skulle kunna ge upphov till strukturskillnader. Någon skillnad i dragkraftsbehov för led med olika marktryck uppmättes dock inte.

För såbäddsberedning och sådd fanns inga tydliga samband mellan lerhalt och dragkraftsbehov. Dragkraftsbehovet vid harvning var högst för den första överfarten, och högre efter plöjning än efter kultivering. Detta beror antagligen på att tilljämning är en effektkrävande del vid harvningen, och att bränsleförbrukningen därför blir högre då markytan är ojämn.

Mätningarna gav uppgifter om typiska värden på dragkraft och bränsleförbrukning vid jordbearbetning. Baserat på data från dessa och andra försök gjordes också en sammanställning för att mer generellt kunna uppskatta bränsleförbrukning vid olika typer av jordbearbetning (tabell 3).

Tabell 3. Dragkraftsbehovet och bränsleförbrukning för olika redskapstyper. Beräkningarna av bränsleförbrukningen är gjorda för 30 % lerhalt. Verkningsgraden (energi för att dra själva redskapet/energi i diesel) är satt till 20 %. I tabellen redovisas specifikt dragkraftsbehov (S) i kN/m² som funktion av lerhalten (x), totalt dragkraftsbehov (D) i kN/m vid ett visst bearbetningsdjup (d) i meter och bränsleförbrukning (q_t) i liter per hektar

Redskapstyp	S (kN/m ²)	d (m)	D (kN/m)	q _t (l/ha)
Plog	1,35x + 36	0,20	15,3	19,9
Kultivator	1,66x + 44	0,06	5,6	7,3
Tallriksredskap	1,65x + 44	0,06	5,6	7,3
Tallrikskultivator	2,18x + 58	0,04	5,0	6,4
Såbäddsharv	-	-	2,5	3,3
Såmaskin, rak bill, kombi	-	-	2,6	3,4
Såmaskin, skivbill, kombi	-	-	6,0	7,8

V. Dragkraftsbehov vid plöjning som funktion av markens hållfasthet

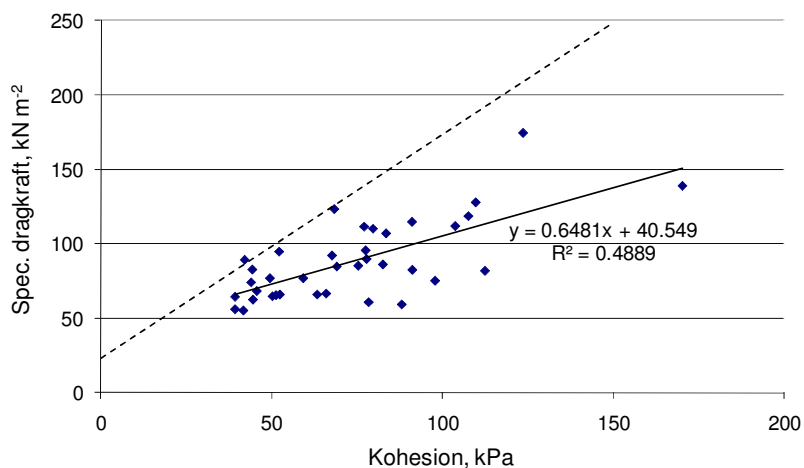
Modeller för att beräkna dragkraftsbehov är oftast utvecklade från klassisk markmekanik, där kohesion är den viktigaste parametern för att bestämma markens hållfasthet. Det finns också empiriska modeller där t.ex. penetrationsmotstånd används som mått på hållfastheten. Syftet med det arbete som presenteras här var att mäta specifika dragkraftsbehovet vid plöjning som en funktion av markens hållfasthet, och koppla resultatet till modeller för att beräkna dragkraftsbehovet.

Dragkraftsbehovet mättes vid 37 tillfällen på 15 olika platser med lerhalter mellan 13 och 56 %. Fyra av dessa platser plöjdes vid flera tillfällen på hösten för att erhålla olika vattenhalter. Vingborrsmätningar utfördes vid samtliga tillfällen och användes för att bestämma markens kohesion. Mätning av penetrationsmotstånd gjordes vid 21 tillfällen.

Markens hållfasthet var betydligt känsligare än dragkraftsbehovet för förändringar i markens vattenhalt. Därför överskattades också det beräknade dragkraftsbehovet vid höga värden på markens kohesion. En möjlig förklaring är att dragkraftsbehovet främst bestäms av hållfasthet mellan aggregat, medan kohesionen till stor del bestäms av hållfastheten inom enskilda aggregat. Sett till alla tillfällen, var korrelationen med dragkraftsbehov betydligt starkare för kohesion än för penetrationsmotstånd. Det fanns också ett klart samband mellan dragkraftsbehov och lerhalt.

Resultaten tyder på att varken vingborr- eller penetrationsmätningar är tillräckliga för att förutsäga dragkraftsbehov (figur 4), och att det vore önskvärt att utveckla enkla och

tillförlitliga fältmetoder för att göra detta. För generella uppskattningar av bränsleförbrukning räcker det antagligen att koppla dragkraftsbehovet till lerhalten (figur 5).



Figur 4. Specifikt dragkraftsbehov som funktion av kohesion, alla platser. Den streckade linjen i övre figuren visar beräknade värden på dragkraftsbehov.

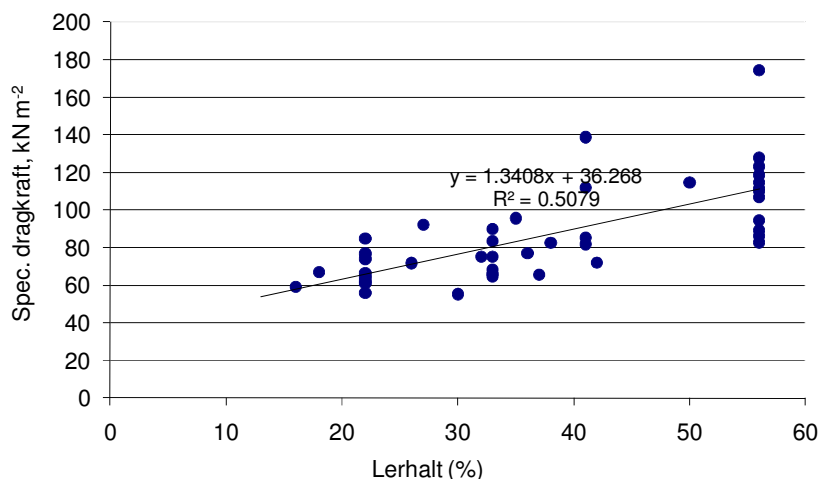


Fig. 5 Specifikt dragkraftsbehov som funktion av markens lerhalt.

VI. JB-Maskinkalkyl - kalkylark för att beräkna maskinkostnader

I ett delprojekt utvecklades kalkylark för att beräkna maskinkostnader, dels för enskilda redskap, dels för hela maskinsystem på gårdsnivå. I kalkylarken används resultaten från dragkraftsmätningarna också för att beräkna effektbehov och bränsleförbrukning vid bearbetning. Kalkylarken kan laddas ner kostnadsfritt via enhetens hemsida www.slu.se/jbhy, under fliken verktyg. De har bl.a. använts i undervisning för både agronomer och lantmästare. I ett samarbete med institutionen för energi och teknik samt JTI har ytterligare kalkylark utvecklats för att beräkna maskinkostnader, där också läglighetskostnader ingått (<http://www2.et.slu.se/maskinkalkyl>). Också i dessa används värden för mätning av

bränsleförbrukning som framtagits i detta projekt (tabell 3). Arken har laddats ner över 3000 gånger.

Publikationer

I vetenskapliga tidskrifter:

1. Keller, T., Arvidsson, J., Dexter, A.R., 2007. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*, 92, 1-2, 45-52.
2. Arvidsson, J., 2010. Energy use efficiency in different tillage systems for winter wheat on a clay and silt loam in Sweden. *European Journal of Agronomy*, 33, 250-256.
3. Arvidsson, J., Hillerström, O., 2010. Specific draught, soil fragmentation and straw incorporation for different tine and share types. *Soil and Tillage Research*, 110, 154-160.
4. Arvidsson, J., Keller, T., 2011. Comparing penetrometer and shear vane measurements with measured and predicted mouldboard plough draught in a range of Swedish soils. *Soil and Tillage Research*, 111, 219-223.

Konferensrapporter

5. Arvidsson, J., Keller, T. 2006. Draught requirement for different tillage implements. *Proceedings of the 17th International Conference of ISTRO*, 28 Aug-3 Sep, Kiel, Germany.
6. Keller, T., Arvidsson, J., Dexter, A.R., 2006. Prediction of the aggregate size distribution produced by tillage from the water retention curve. *Proceedings of the 17th International Conference of ISTRO*, 28 Aug-3 Sep, Kiel, Germany.

Bokkapitel skrivna i anslutning till projektet:

7. Arvidsson, J., Keller, T., 2010. Draught requirement during tillage. In: A.P. Dedousis and T. Bartzanas (Eds.), *Soil Engineering, Soil Biology 20*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
8. Keller, T., Arvidsson, J., 2010. Soil disturbance and soil fragmentation during tillage. In: A.P. Dedousis and T. Bartzanas (Eds.), *Soil Engineering, Soil Biology 20*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.

Meddelanden och rapporter från avdelningen för jordbearbetning (www.slu.se/jbhy)

9. Marcus Magnusson, 2004. Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat för olika redskap och bearbetningssystem. Meddelande 47, avd. för jordbearbetning, inst. för markvetenskap, SLU. http://pub.epsilon.slu.se/5350/1/magnusson_m_101104.pdf
10. Daniel Eriksson, 2005. Beräkning av maskinkostnader för jordbearbetning. Meddelande 49, avd. för jordbearbetning, inst. för markvetenskap, SLU. http://pub.epsilon.slu.se/5355/1/eriksson_d_101028.pdf
11. Olof Hillerström, 2006. Dragkraftsbehov och bearbetningsresultat för olika kultivatorspetsar. Meddelande 50, avd. för jordbearbetning, inst. för markvetenskap, SLU. http://pub.epsilon.slu.se/5364/1/hillerstrom_o_101026.pdf
12. Arvidsson, J., Hillerström, O., Keller, T., Magnusson, M., Eriksson, D., 2010. Dragkraftsbehov och maskinkostnad för olika redskap och bearbetningssystem. Rapport 117 från jordbearbetningen, inst. för mark och miljö. [http://pub-epsilon.slu.se:8080/2437/01/arvidsson_j_etal_101027.pdf](http://pub.epsilon.slu.se:8080/2437/01/arvidsson_j_etal_101027.pdf),

Andra publikationer

13. Arvidsson, J. 2005. Plogen luckrar effektivast. Svensk frötidning, nr 6, 2005.
14. Arvidsson, J., Eriksson, D., Gustafsson, K., Hillerström, O., Magnusson, M., 2005. Kalkylark för att beräkna dragkraftsbehov och maskinkostnader för olika redskap och maskinsystem. Medd. från Södra Jordbruksförsöks-distriktet, nr 56.
15. Arvidsson, J., 2007. Plogen luckrar effektivast, men plöjningsfri odling kan fungera också på lättare jordar. Hushållningssällskapens tidskrift 4/07.

Övrig resultatförmedling

Resultat från projektet har också publicerats årligen i avdelningen för jordbearbetnings årsrapport, vid flera tillfällen i tidningen Lantmannen, samt vid ett mycket stort antal föredrag riktade till framförallt jordbrukare och rådgivare. Projektet har också genomförts i samarbete med maskinindustrin, framförallt Väderstadverken AB, som bl.a. medverkade i det delprojekt som testade dragkraftsbehov för olika kultivatorspetsar. Projektet har medverkat till ett stort intresse från företagets sida att utveckla redskapstyper med ett lågt dragkraftsbehov. Efter projektets avslutande har företaget utvecklat egen metodik för att mäta dragkraftsbehov vid bearbetning.

Mätning av dragkraftsbehovet vid bearbetning har sammanfattningsvis varit ett otroligt värdefullt komplement till mer traditionella mätningar av t.ex. skörd och markfysikaliska egenskaper för olika bearbetningssystem. Resultaten har också använts i projekt vid andra institutioner, bl.a. vid livscykelanalys och beräkning av maskinkostnader vid institutionen för ekonomi institutionen för energi och teknik samt vid JTI.