



Bättre åtkomst till avverkningstrakter med anpassat marktryck från avverknings- maskinerna.

*” Increased harvesting possibilities with suitable ground pressure
from the harvesting machines”.*

Erik Andersson

**Arbetsrapport 276 2010
Examensarbete 30hp D
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Iwan Wästerlund**

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
901 83 UMEÅ
www.srh.slu.se
Tfn: 090-786 81 00



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-276-SE

Bättre åtkomst till avverkningstrakter med anpassat marktryck från avverknings- maskinerna.

*” Increased harvesting possibilities with suitable ground pressure
from the harvesting machines”.*

Erik Andersson

Examensarbete i skogshushållning med inriktning mot skogsteknik, 30hp
Jägmästarprogrammet
EX0492

Handledare: Iwan Wästerlund, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, teknologi
Examinator: Ola Lindroos, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2010

ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-276-SE

Förord

Detta examensarbete har skrivits vid institutionen för skoglig resurshushållning vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) i Umeå. Arbetet omfattar 30 poäng, vilket motsvarar 20 veckors studier på Jägmästarprogrammet. Syftet med examensarbetet var att studera avverkningsmaskinernas marktryck och den markskada de åstadkom för att komma fram till regler för ett traktanpassat maskinval. Examensarbetet har skrivits på uppdrag av Skogsägarföreningen Mellanskog där Mats Karnestrand har varit kontaktperson.Handledare på SLU har Professor Iwan Wästerlund varit.

Jag vill rikta ett stort tack till Iwan Wästerlund för utmärkt handledning, mycket bra och givande diskussioner. Jag vill även tacka Mats Karnestrand på Mellanskog för ett trevligt och positivt bemötande och givande synpunkter. Tack Sören Holm för hjälp med den statistiska analysen av datat i studien.

Umeå 2010-02-25

Erik Andersson

Sammanfattning

Den globala klimatförändringen innebär ökad medeltemperatur och nederbörd för Sverige, vilket leder till kortare perioder med tjälad mark och sämre bärighet i skogsmarken. Detta samtidigt som avverkningsmaskinerna tenderar att bli allt tyngre och kraftfullare. Industrin önskar ett så jämnt virkesflöde som möjligt, samtidigt som det är en förutsättning är att körskadorna minimeras.

De två viktigaste orsakerna till markskador och spårbildning är skogsmarkens bärighet och skogsmaskinens marktryck. Målet med examensarbetet var att komma fram till enkla regler för maskinval avseende marktryck vid avverkning på mark med dålig bärighet.

Ett fältförsök med en Valmet 890.3 - skotare genomfördes där olika marktryck testades på två olika marktyper. Data med avseende på spårdjup och marktyp från dessa två undersökningar kompletterades med data från två äldre studier. Därtill gjordes en inventering på trakter avverkade av Mellanskog. Marktrycket beräknades för de maskiner som använts på de aktuella trakterna.

Resultaten visar att såväl spårdjup som kompaktering blir betydligt mindre om marktrycket från maskinerna minskas med hjälp av band. För maskiner med högt marktryck (>80 kPa) är ökningen av spårdjupet markant vid körning på mjälamarker eller svagare.

Maskinvalsmodellen är således ett riktmärke för att kunna använda maskiner som passar skogsmarkens bärförmåga. Det är dock viktigt att inse att skogsmarken är komplex i sin sammansättning och att det därför är komplicerat att göra prognoser för förväntad skada. Kraftigt regn kan till exempel ge marken kraftigt försvagad bärighet.

Nyckelord: maskinval, körskador, spårdjup, kompaktering, konindex

Summary

The global climate-change means increasing mean-temperature and higher precipitation in Sweden, which leads to shorter periods of frozen ground in the forest. At the same time the harvesting machines are getting bigger and more powerful. The forest industry aim at an even wood flow, and the ground damage has to be as low as possible. The two biggest causes for ground-damage is the bearing capacity of the forest ground and the ground-pressure of the harvesting machines. The aim of this study was to find out some rules for the machine choice considering ground pressure, when harvesting on ground with low bearing capacity.

A field study, using a Valmet 890.3 forwarder, was carried out where different ground pressures and their effect on the ground were tested on two different types of ground. Additionally, an inventory of damaged harvesting grounds was made. The rut depth and soil density was measured and the ground pressure of the harvesting machines was calculated. These datas, as well as data from two previous studies was used to study a possible trend for the rut depth according to used ground-pressure.

The result shows that rut depth as well as soil compaction is less if the ground pressure from the forwarder is reduced by using tracks. For forwarders with high ground pressure (> 80 kPa), the rut depth raised significantly when operating on ground with cone-index (0.70 MPa) or softer. The model for machine-choice is a guideline for machine-use that fits the carrying capacity of the forest ground.

However it is important to point out that the forest ground is very complex in its composition, and that it is difficult to predict damage to it (e.g. rut depth). Heavy rain could for example lower the bearing capacity considerably.

Key words: Machine choice, ground damage, rut depth, soil compaction, cone index

Innehållsförteckning

Förord	2
Sammanfattning	3
Summary	4
1. Inledning.....	6
1.1 Bakgrund	6
1.2 Mål	7
2. Material och metoder	8
2.2 Fältförsöket i Sävar	8
2.3 Fälthinventeringar Södermanland	10
2.4 Genomgång formler, mätmetoder och mätinstrument	10
2.4.1 Konpenetrometern	11
2.4.2 Marktrycksformler	12
2.5 Övriga data till studien	13
3. Resultat.....	14
3.1 Resultat fältförsöket i Sävar	14
3.2 Resultat fälthinventeringen i Södermanland	17
3.3 Samband mellan marktryck, spårdjup och konindex	18
3.4 Maskinval	22
4. Diskussion	24
5. Slutsatser	26
Referenser.....	27

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Den globala uppvärmningen innebär klimatförändringar i Sverige i form av ökad medeltemperatur och nederbörd, och den utvecklingen spås fortsätta (Bergh et al. 2000). Detta leder till att perioden på året då marken är tjälad, och ingrepp i skogen är mest skonsamma mot marken, blir kortare (Fransila et al. 2005; Andersson & Westlund 2008). Industrin eftersträvar så jämna virkesflöden som möjligt (Jansson 2002), samtidigt som omvärlden ställer allt högre krav på skogsbruket att minimera skador och spårbildning vid avverkning (Froster 2008).

Dessutom blir avverkningsmaskinerna allt tyngre och kraftfullare (Horn et al. 2004). Många avverkningstrakter har dålig bärighet under tjällossningsperioden på våren och under delar av hösten vid ihållande regn. I dessa fall är det speciellt viktigt att planera vilka maskiner som skall användas vid avverkning, vad maskinerna skall ha för tillbehör; exempelvis band, CTI (Central Tire Inflation, ett system där lufttrycket på hjulen regleras) (Granlund 2006) och vilka tekniska lösningar man eventuellt kan använda (risning, kavelbroar etc.).

Hur stora markskador och spårbildning som uppstår beror på en rad orsaker. De två viktigaste kan dock anses vara skogsmarkens bärighet (jordart, jordens vattenhalt, rotförekomst, jordens textur etc.) och skogsmaskinens marktryck (Wågberg 2001). Antalet maskinpassager påverkar också omfattningen på körskadorna, i första hand spårdjupet och kompaktionen (Eliasson 2005).

Jansson & Johansson gjorde 1998 ett försök där markpåverkan undersöktes vid passager med band på maskinen och utan band. Slutsatsen vid det försöket var att efter passage med bara hjul gjordes mer skada på marken i form av djupare körspår, uppluckring av organiskt lager och rotlager. Studien påvisade också att fler passager ledde till att jordpackningen blev mer påtaglig (Jansson & Johansson 1998).

Användandet av risning för att förebygga körskador har studerats av bl.a. Eliasson & Wästerlund (2007). Deras studie pekar på att risning av stickvägar leder till att packningen av jorden minskar, särskilt i de översta tio centimetrarna som är viktiga för trädens tillväxt. Vad gäller spårdjupet fann man ingen skillnad mellan vägar som var risade och de som inte var risade.

I fallet då alltför tunga maskiner har använts på obärig skogsmark kan en rad olika markskador uppstå. Kompaktering av marken, dvs. att jorden pressats samman där maskinen kört leder till att porositeten minskar (Jansson 1998). Jordens aggregation förstörs och ytavrinningen ökar vilket i sin tur kan leda till erosion (Wågberg 2002). Kompakteringen av jorden kan också leda till betydande tillväxtförluster för nästa generation skog som anläggs på platsen (Eliasson & Wästerlund 2007).

Körspår leder främst till att vattenflöden kan brytas, vilket påverkar både den biologiska mångfalden (beskrivs nedan), och risken för erosion (Wågberg 2002).

Andra typer av skador och effekter kan vara:

Försämring av biologisk mångfald - Den främsta försämringen av den biologiska mångfalden uppstår om något vattendrag störts vid avverkningen. Effekten kan då bli förändrat flöde i vattendrag eller transport av slam som leder till att fiskens lekplatser blir förstörda (Wågberg 2002).

Estetisk påverkan - Enligt (Wågberg 2002) är ett av de vanligaste klagomålen på skogsbruket klagomål över sönderkörd terräng med djupa hjulspår. När det gäller en skogsägarförening är det rimligt att anta att skogsägarna vill undvika dessa skador på sin mark, varför det är ännu mer angeläget för skogsägarföreningarna att undvika skador vid drivningen då det inte är på bolagsmark den sker.

Rotskador - Är rotförekomsten riklig på trakten påverkar det bärigheten positivt, ända upp till 50% av markhållfastheten sägs kunna bero på rotförekomsten (Eliasson & Wästerlund 2007). Dock är det förenat med andra risker att gallra på trakter med riklig rotförekomst. Vid gallringen riskerar rötterna att skadas, vilket leder till försämrat närings- och vattenupptag, och risk för att beståndet drabbas av rotröta (Jansson 1998). Särskilt vid gallring av grantrakter är detta en risk då granens rötter ligger ytligt (inom 15 cm från markytan), och granen är mest känslig mot rotröteangrepp (Jansson 1998).

Idén till examensarbetet bottnar i att Mellanskog ser ett behov av att förbättra tillgängligheten på traktbanken och detta kan göras på olika sätt. En traktbank är ett register med skogstrakter färdiga för avverkning, och dess tillgänglighet beror till stor del på bärigheten i skogsmarken och skogsvägen (Jansson 2002). Avgränsningen för arbetet sträcker sig till vad som kan göras med hjälp av bättre planering av maskinval och nya tekniska lösningar.

Med bättre planering, val av resurser (läs maskinentreprenörer) och bättre kunskap om vilka marktryck olika maskinalternativ står för kan man kanske avverka trakter som man annars skulle ha fått lämna till vintern då marken är tjälad, eller på högsommaren då markerna är torra.

1.2 Mål

Målet med examensarbetet är att komma fram till enkla regler för maskinval avseende marktryck vid avverkning på mark med dålig bärighet. Med maskinval avses val av maskin, hjultillbehör och däck. Studien kommer att avgränsas till att mäta spårdjup och kompaktering.

2. Material och metoder

2.1 Sammanfattning av material och metoder

Ett fältförsök i Sävar utanför Umeå och en inventering på ett antal trakter som Mellanskog avverkat i Sörmland genomfördes. Det första, Umeåförsöket, genomfördes i samarbete med Olofsfors AB där en Valmet 890.3 med 15 tons last kördes. Försöket gjordes för att mäta maskinens nedsjunkning i underlaget och den kompaktering som uppstod med och utan band på maskinen. Vidare gjordes en jämförelse med och utan last för att få olika stor belastning på marken.

Vid inventeringen i Södermanland valdes 5 trakter med kraftiga körskador ut (3 slutavverkningar och 2 gallringar) tillsammans med handledaren på företaget. Avsikten med inventeringen var att undersöka hur stora körskadorna blivit på de aktuella trakterna och få reda på vilket marktryck från maskinerna som var orsaken till skadorna.

Vidare har data från två liknande studier analyserats där nedsjunkning och kompaktering undersökts. Av de olika datakällorna gällande markskador räknades medelvärden på de olika marktyperna fram. Olika maskiners marktryck räknades fram enligt RTG-formeln (Malmberg 1981). En regressionsanalys gjordes för att se om det gick att hitta något samband mellan maskin-marktyp-spårdjup. Ett varianstest på "Sävarförsöket" genomfördes där de olika kombinationerna jämfördes för att upptäcka eventuell signifikans mellan dem.

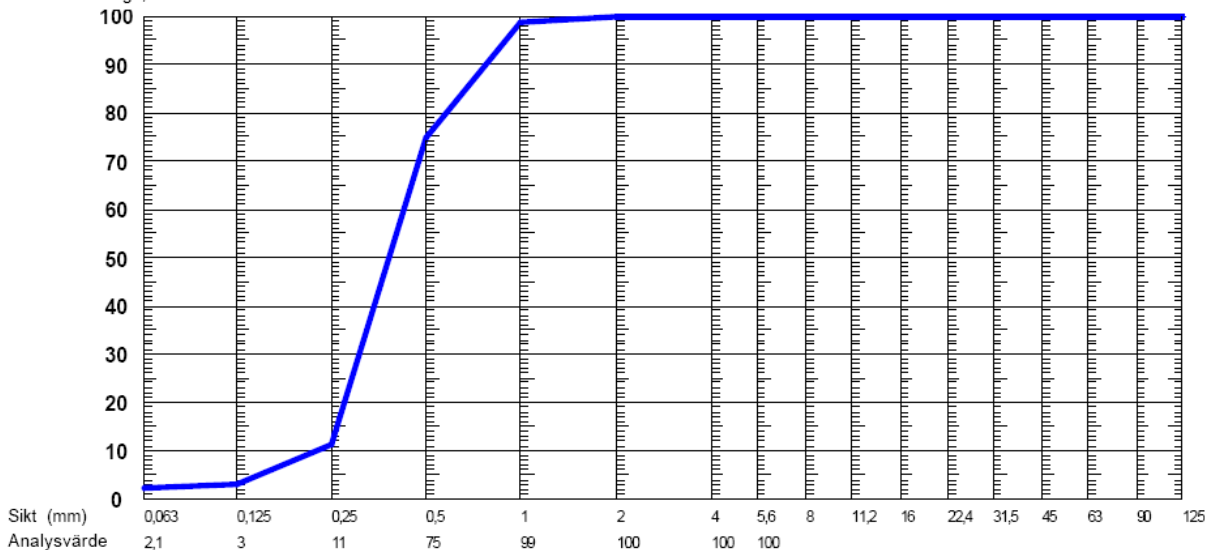
För att få reda på vilken bärighet olika marktyper har, användes konpenetrometermätningarna från den orörda marken och dessutom gjordes stödmätningar på olika marktyper för att säkra resultaten. De översta 10 cm användes för att bestämma marktyp.

2.2 Fältförsöket i Sävar

Försöket gjordes i samarbete med Olofsfors AB. En Valmet 890.3-skotare kördes med och utan band (EcoTrac-band från Olofsfors) på två olika marktyper, en fast och relativt torr sedimentmark innehållande mellansand med fuktkvoten 7% (se figur 1, siktanalys), med ett tunt humustäcke (6 cm) och en blötare torvmark med en högre fuktkvot (22,4%) och ett tjockare humustäcke (25 cm) med mellansand därunder. Ett fuktkvotsprov gjordes genom att ett jordprov från trakten vägdes före och efter torkning, skillnaden representerar då vatteninnehållet (Jansson 1998).

KORNSTORLEKSFÖRDELNING - SS-EN 933-1

Passerad mängd, vikt-%

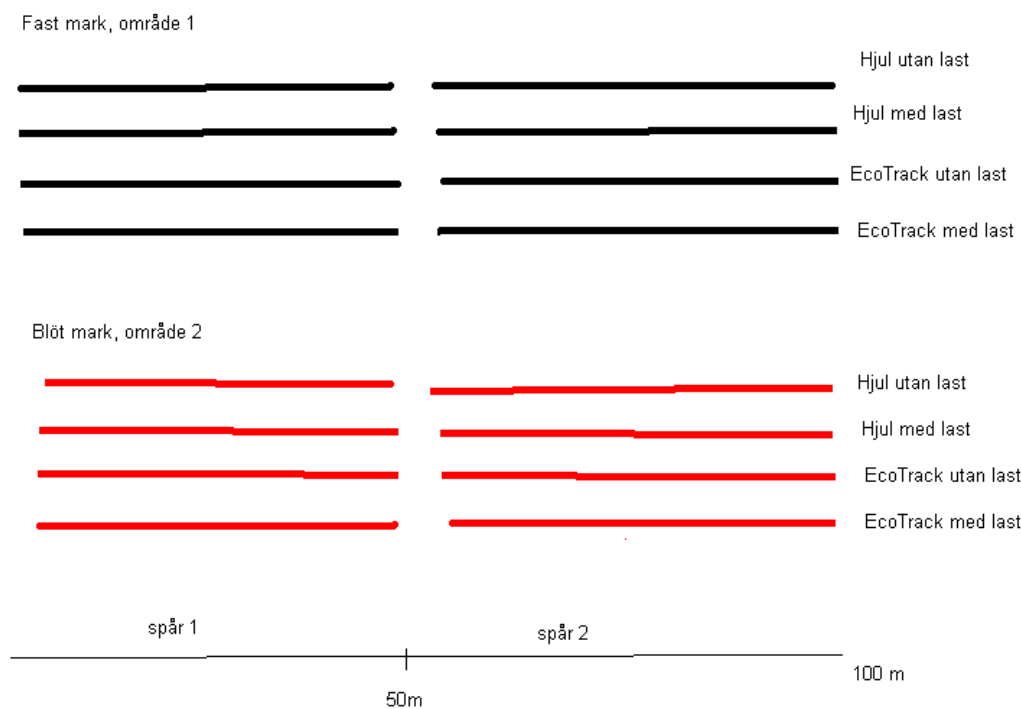


Figur 1. Siktanalys på jordprov från sedimentmarken i Sävarforsöket, utförd av Svevia.

Figure 1. Analysis of the sand in the Sävarstudie, carried out by Svevia .

Studien delades upp i fyra olika behandlingskombinationer, där maskinen kördes med: **1.** Bara hjulen, utan last. **2.** Bara hjulen, med last. **3.** EcoTrac-band, utan last. **4.** EcoTrac-band med last. På respektive markområde gjorde alla varianterna 1-4 i två upprepningar, kallade spår 1 och spår 2. Varje spår var 50 m långt (Se figur 2). Spårdjupet mättes på fyra punkter i varje spår, med 10 m mellanrum. Kompaktionen mättes med Eijkelkamps konpenetrometer, 10 st mätplatser i varje upprepning, fem i spåret och fem utanför spåret (kontrolltytor). På varje mätpunkt gjordes tre nedstick som bildade ett medelvärde.

Skotarens tjänstevikt uppskattades av entreprenören då fordonsvågarna inte fungerade som de skulle, markkontaktytorna mättes genom att färg sprayades mot bandet och hjulen. Den mark som var opåverkad av färg är anläggningsytan mot marken. Marktrycket och axellasten beräknades med hjälp av marktrycksmodeller (Malmberg 1981). Lastvikten mättes med de inbyggda bankvågarna på maskinen och lasten utgjordes av 15 ton talltimmer.



Figur 2. Fältförsöket i Sävar med två upprepningar.
Figure 2. The field study in Sävar with two repetitions.

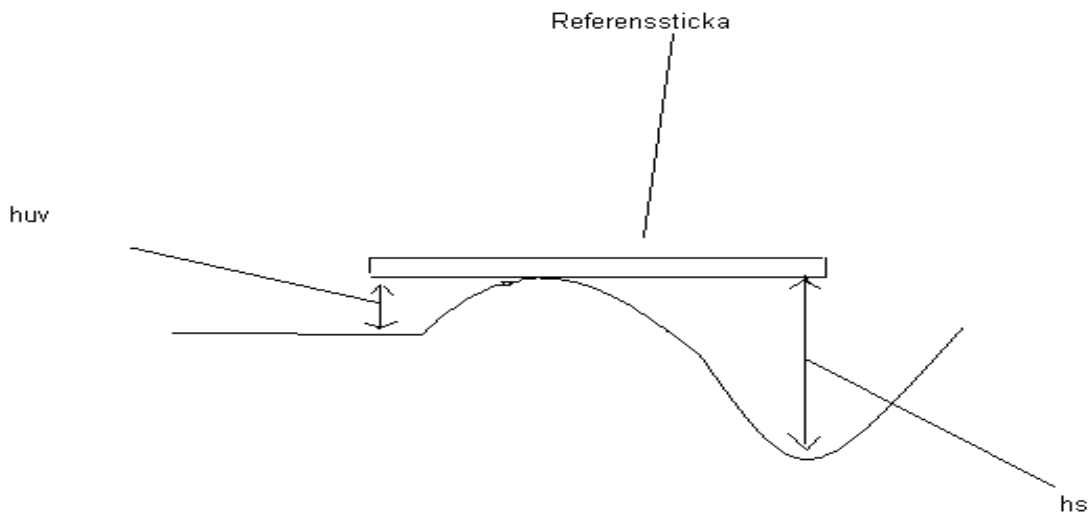
2.3 Fältinventeringar Södermanland

Vid fältinventeringen på Sörmlands distrikt (Juni 2009) inventerades fem olika trakter som avverkats under hösten 2008 i Mellanskogs regi (tre slutavverkningar och två gallringar) där omfattande körskador fanns. På trakterna mättes spårdjupet på 10 slumpvis utvalda punkter och kompakteringen mättes i hjulspåret på 5 slumpvis utvalda mätpunkter, med nio nedstick i varje som bildar medelvärde. Konmotståndet mättes i den orörda jorden för att få en uppgift om vilken marktyp det handlar om.

De berörda entreprenörerna intervjuades gällande vilken maskin och hjulutrustning som använts på respektive trakt. Utifrån detta beräknades marktrycket enligt RTG-formeln.

2.4 Genomgång formler, mätmetoder och mätinstrument

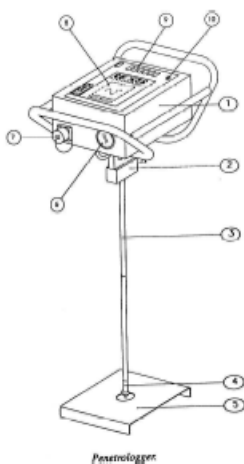
Spårdjupet (h_s) mättes genom att en sticka placerades parallellt över hjulspåret och avståndet mellan markytan och botten på hjulspåret mäts med en tumstock. Avdrag för eventuell uppvällning (dvs. jord som tryckts upp på sidan av hjulspåret) gjordes enligt Figur 3.



Figur 3. Spårdjupsmätning, metod. Spårdjupet= $hs-huv$.
Figure 3. Ruth depth measurement. Ruth depth= $hs-huv$.

2.4.1 Konpenetrometern

För att mäta kompakteringen av marken i hjulspåren användes en konpenetrometer av märket Eijkelkamp. En konpenetrometer har många användningsområden, främst i civila sammanhang för mätning av markens bärighet vid t.ex. nybyggnationer och anläggandet av sportfält, men konpenetrometer används även av den amerikanska armén för att bedöma bärigheten i terräng (Karafiath & Nowatzki 1978). En konpenetrometer består enkelt beskrivet av en dataenhet ansluten till en stång med en kona i änden (enligt figur 4). I denna studie användes WES-standardkona med en diameter på 20,8 mm, basarean 3,2 cm² och 30 graders vinkel. Vid mätningen placerades ett referensplan i marknivå, därefter pressades stången med konan med jämn hastighet ner i jorden genom ett hål i referensplanet, varefter motståndet mättes och automatiskt lagrades i dataenheten. Djupet mättes under penetrationen med ultraljud med referensplanet som utgångspunkt. Mätningar kan göras ner till ett djup av 80 cm. Jorden i skogsmarken varierar mycket i sin struktur, textur och organiska innehåll. Detta påverkar motståndet i jorden, varför det är viktigt att göra flera nedstick på varje mätpunkt, för att sedan använda ett medelvärde av nedsticken (Anon. 2000). I denna studie användes tre nedstick på varje mätpunkt i Sävarförsöket och nio nedstick per mätpunkt vid Sörmlandsinventeringen.



Figur 4. Konpenetrometer.
Figure 4. Cone penetrometer.

Fysiken bakom mätningarna med konpenetrometern beskrivs utförligt i *Agricultural Soil mechanics*, (Koolen & Kuipers 1983) och bygger på teorin om hur konan pressar undan jorden när den penetreras genom jorden. Konan påverkar jorden annorlunda beroende på om marken är hård eller mjuk. Man talar om hur stor influenszonen är och hur den ser ut i sin utbredning. Är jorden hård kommer den mängd jord som pressas undan att tryckas upp som uppvällning där penetrationen startade. Vid mjukare jord kommer en kanal att bildas där konan rör sig.

Konindex i den orörda markens översta 10 cm har mätts med konpenetrometer vid fältförsöket i Sävar och vid inventeringen i Sörmland. En ytterligare mätning genomfördes för att få fler observationer och kunna bilda goda medelvärden på sambandet konindex-marktyp. Resultatet är tre jordtyps-klasser som redovisas i tabell 2 där det också finns beskrivet hur en vanlig jordsond kan användas av planerare för att få en uppfattning om vilken mark det handlar om.

2.4.2 Marktrycksformler

Uträkning av maskinens marktryck är central i arbetet med att ta fram en modell för maskinval. Det är främst maskinens marktryck som avgör dess framkomlighet och graden av skador den orsakar vid avverkning. Under försöket i Sävar kördes maskinen med såväl bara hjulen som med band. Vid ett visst marktryck är nedsjunkningen i underlaget för stor och maskinen kör fast, marktrycket är därför en helt avgörande parameter för att kunna avgöra vilken maskin som skall användas vid avverkningen (Malmberg 1981). Formlerna som används vid beräkning av marktryck kommer från boken *Terrängmaskinen Del 2*, som är skriven av C-E Malmberg (1981).

Axellasten är den last som belastar varje axel. I detta arbete kommer axellasten på den tyngst belastade axeln att användas som marktrycksvärde då det är denna del av maskinen som orsakar körskadorna som mäts. För att förenkla, kan vi grovt säga att en olastad skotare har viktfordelningen 60% fram och 40% bak. I fallet då skotaren har fullt lass antas viktfordelningen här vara den omvända, dvs. 60% bak och 40% fram (Wästerlund 2009 pers. medd.).

För att kunna mäta marktrycket behövs information om maskinens anläggningsyta, vilken varierar vid olika hjulutrustning och olika markförhållanden. Enheten som används för anläggningsytan är m^2 . För marktrycket används enheten kN/m^2 ($1 kN/m^2 = 1 kPa$). Om maskinen körs med **band** blir dess anläggningsyta mot **bärig mark** lika med avståndet mellan hjulens kontaktpunkter (L) och bandets bredd (B) (Malmberg 1981).

$$\text{Anläggningsytan} = B \times L$$

För att räkna ut den största axellasten måste först maskinens totala marktryck räknas ut, detta görs genom att dividera fordonets tyngd med den totala anläggningsytan, dvs. anläggningsytan för alla banden på maskinen.

$$\text{Totalt marktryck} = \text{Fordonstyngden} / (\text{Antal band} \times B \times L)$$

För att sedan få fram axellasten multipliceras det totala marktrycket med 0,6 (60% av vikten ligger på bakaxeln vid full last).

Om maskinen istället körs med *hjul* på *obärlig* mark gäller följande (Malmberg 1981):
Anläggningsytan = Hjulets bredd x hjulets radie

Bakaxeln har i regel fyra hjul, den totala anläggningsytan blir då fyra x anläggningsytan per hjul. För att sedan få fram den tyngsta axellasten multipliceras det totala marktrycket med 0,6 (60% av vikten ligger på bakaxeln vid full last).

Några exempel på axellast/marktryck hos två olika skotare:

John Deere 1710 D

Utan last, med band på bärlig mark (Viktfördelning 60% fram, 40% bak):

$$0,75 \times 1,64 \times 2 = 2,46 \text{ m}^2 \text{ (Anläggningsyta fram)}$$

$$0,60 \times 21,5 \times 9,82 = 126,7 \text{ kN (Fordonstyngd fram)}$$

$$126,7 / 2,46 = 51,5 \text{ kPa (Axellast fram)}$$

$$0,75 \times 1,64 \times 2 = 2,46 \text{ m}^2 \text{ (Anläggningsyta bak)}$$

$$0,40 \times 21,5 \times 9,82 = 84,4 \text{ kN (Fordonstyngd bak)}$$

$$84,4 / 2,46 = 34,3 \text{ kPa (Axellast bak)}$$

Valmet 890.3

Med last, med band på bärlig mark (Viktfördelning 40% fram och 60% bak)

$$0,70 \times 1,582 \times 2 = 2,21 \text{ m}^2 \text{ (Anläggningsyta fram)}$$

$$0,40 \times 37 \times 9,82 = 145 \text{ kN (Fordonstyngd fram)}$$

$$145 / 2,21 = 65,7 \text{ kPa (Axellast fram)}$$

$$0,70 \times 1,582 \times 2 = 2,21 \text{ m}^2 \text{ (Anläggningsyta bak)}$$

$$0,60 \times 37 \times 9,82 = 218 \text{ kN (Fordonstyngd bak)}$$

$$218 / 2,21 = 98,6 \text{ kPa (Axellast bak)}$$

2.5 Övriga data till studien

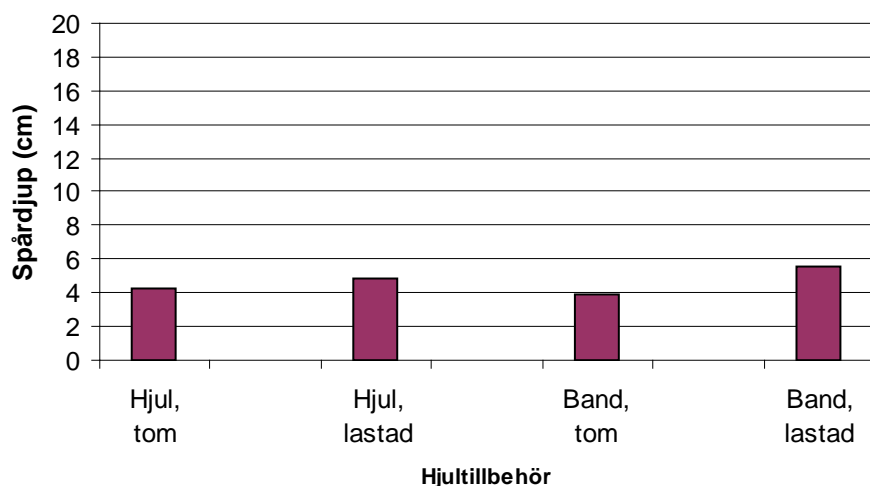
Övriga data som använts i arbetet är från två olika studier. Den ena var den nya studien som gjordes i Bräcke i Jämtland där en skotare körts med band, fullastad med Grot över en torvmark och spårdjup och jordpackning mätts upp med konpenetrometer (Bjarnert, 2010 manus).

Den andra studien är genomförd 2000 i samarbete mellan SLU och Olofsfors där en påhängsvagn (Bullmarksvagnen) kördes efter en Valmet 830 varefter konindex och spårdjup mättes upp (Bygden & Wästerlund 2007).

3. Resultat

3.1 Resultat fältförsöket i Sävar

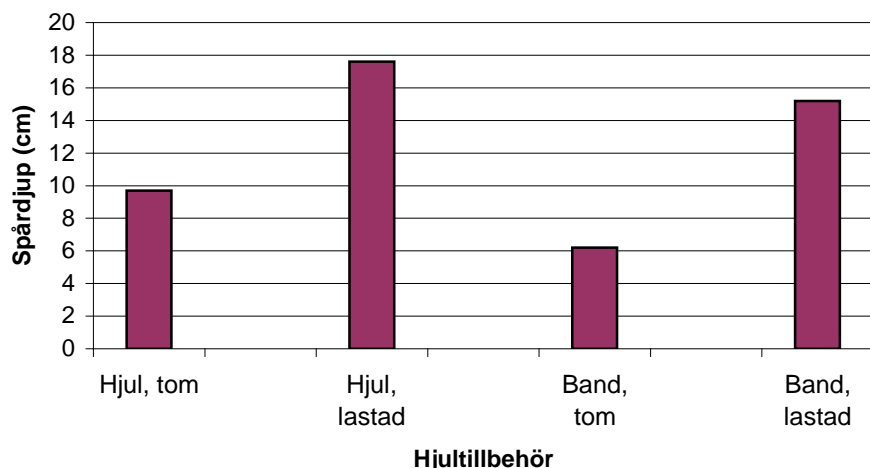
Spårdjupsvärdena på respektive område är ett medelvärde av spår 1 och 2 (upprepning 1 och 2). På område 1 låg spårdjupet mellan 3,9 – 5,6 cm. d.v.s. relativt grunda körspår blev resultatet, oavsett hjultillbehör eller last.



Figur 5. Spårdjup efter körning med skotare, område 1 (Hård mark).

Figure 5. Ruth depth after forwarding, area 1 (Hard ground).

På område 1 gav lastad maskin större spårdjup än tom maskin. Störst spårdjup på område 1 gav lastad maskin med band på vilket förväntas något eftersom att körning med bara hjulen med last ger det största marktrycket och därför borde ge det största spårdjupet.



Figur 6. Spårdjup efter körning med skotare, område 2 (mjuk mark).

Figure 6. Ruth depth after forwarding, area 2 (soft ground).

Inom område 2 blev resultatet spår djup som varierade mellan 6,2-17,6 cm. Det är uppenbart att när skotaren är lastad ökar spår djupet kraftigt. När inga band användes och skotaren kördes med last blev spåren djupast (under försöket körde maskinen dessutom fast och fick lastas av för att komma loss).

Tre s.k. variansanalyser gjordes för att undersöka om det fanns något statistiskt samband mellan spår djupet och de olika alternativen **H/B** = hjul/band, **O/L**= olastad/lastad, **Mark1/Mark2** = Område1 /område 2.

Tabell 1. Variansanalys på Sävarförsöket
Table 1. Analysis of variance for the field study in Sävar

Parameter	P-värde, Analys 1 (område 1)	P-värde, Analys 2 (område 2)	P-värde, Analys 3 (område 1 &2)
H/B	0,578	0,022	0,005
O/L	0,190	-	0,001
H/B x O/L	0,260	0,467	-
Mark	-	-	0,005
H/B x Mark	-	-	0,004
O/L x Mark	-	-	0,002

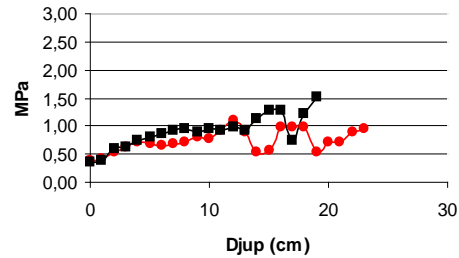
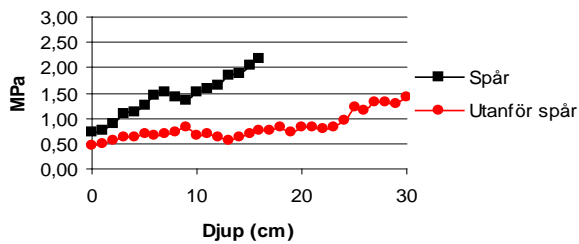
Fet stil = P-värde <= 0,05 dvs. signifikans.

I den första analysen undersöktes om det fanns samband mellan spår djupet, Hjul/Band (H/B) och Olastad/Lastad (O/L) inom område 1. Analysen visade att det inte gick att hitta något signifikant inom området. För att det ska kunna konstateras signifikans måste P-värdet vara under 0,05.

Följande varianstest gällde eventuellt samband mellan spår djup, Hjul/Band och Olastad/Lastad inom område 2. Analysen visade att det finns en signifikans mellan spår djupet och Hjul/Band. Dvs. det som ger signifikant skillnad i minskat spår djup på område 2 är om man använder band.

Det sista varianstestet (Analys 3) avsåg att undersöka samband mellan spår djupet och parametrarna: H/B, O/L, Mark. Nu gäller analysen alltså både område 1 och 2. Det fanns signifikans mellan spår djupet och Hjul/Band, Olastad/Lastad, Område 1/Område 2 (Mark 1 och 2) och mellan Hjul/Band * Mark och slutligen mellan Olastad/Lastad * Mark. Detta betyder att användandet av band ger en signifikant minskning av spår djupet, körning utan last innebär också ett samband med minskat spår djup. Det finns även signifikans som visar att användandet av hjul och körning med last ger olika stor ökning av spår djupet på område 1 och 2.

Vad gäller jordpackningen kan man se att de uppmätta konvärdena konstant ligger högre i spåren än utanför på både område 1 och 2, vilket tyder på att kompaktering av jorden åstadkommit där maskinen har körts. Jordpackningen är större där inte band har använts på maskinen och större på den fuktigare torvmarken (område 2) än på sandmarken (Område 1).

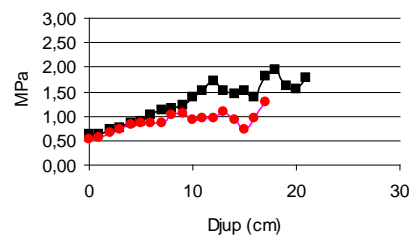
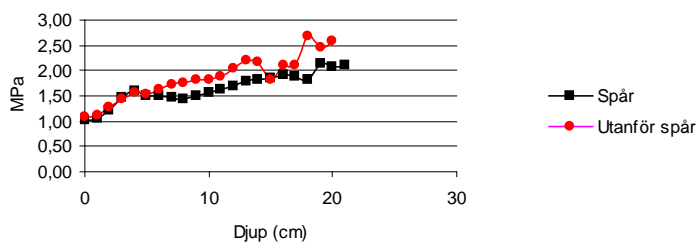


T.v. Figur 7a. Tillpackning lastad skotare med bara hjulen, område 2 (Torvmark).
Figure 7a. Soil compaction, loaded forwarder, only wheels, area 2 (soft ground).

T.h. Figur 7b. Tillpackning, lastad skotare med band, område 2 (Torvmark).
Figure 7b. Soil compaction, loaded forwarder with tracks, area 2 (soft ground).

I figurerna 8 a och b visas konmotståndet i område 1. Tillpackning uppstod efter körning med band, men är inte lika stor som på område 2. Detta kan bero på att marken har högre konindex från början och därför inte kan packas samman lika mycket som en lösare jord proportionellt sett (Wågberg 2002).

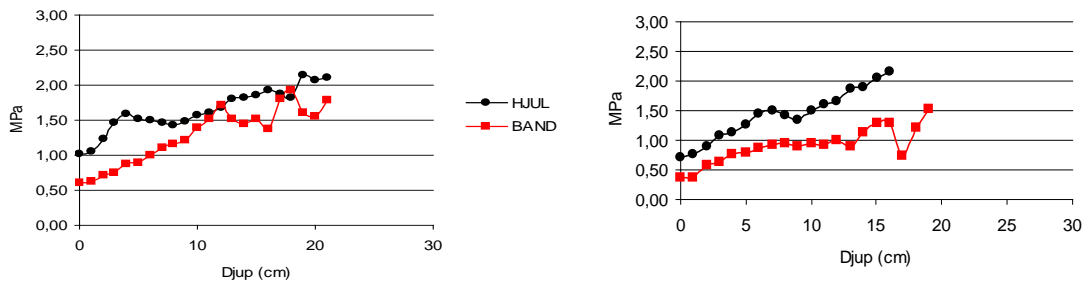
I figur 8 a, visande situationen efter att maskinen körts med bara hjulen syns knappast någon tillpackning alls. Tvärt om verkar jorden luckrats upp, vilket är en känd effekt (Jansson & Johansson 1998).



T.v. Figur 8 a. Tillpackning, lastad skotare med bara hjulen, område 1 (sandmark).
Figure 8a. Soil compaction, loaded forwarder with only wheels, area 1 (hard ground).

T.h. Figur 8b. Tillpackning, lastad skotare med band, område 1 (sandmark).
Figure 8b. Soil compaction, loaded forwarder with tracks, area 1 (hard ground).

I figurerna 9 a och b visas att det fanns skillnad i tillpackning vid körning med hjul och med band. Vid körning med bara hjulen blev det på båda områdena en större tillpackning, och liksom tidigare påpekat så ger valet hjul/band större utslag på det mindre bäriga område 2 än på område 1.



T.v. Figur 9a. Jämförelse hjul och band, lastad skotare område 1 (sandmark).

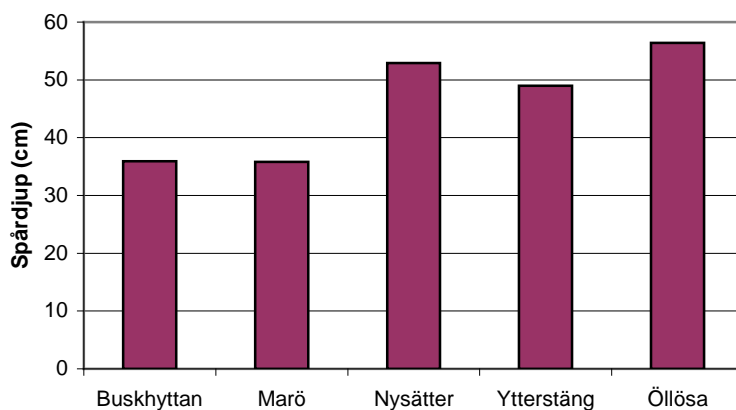
Figure 9a. Comparison between using wheels and tracks, loaded forwarder, area 1 (hard ground).

T.h. Figur 9b. Jämförelse hjul och band, lastad skotare område 2 (torvmark).

Figure 9b. Comparison between wheels and tracks, loaded forwarder area 2 (Soft ground).

3.2 Resultat fältinventeringen i Södermanland

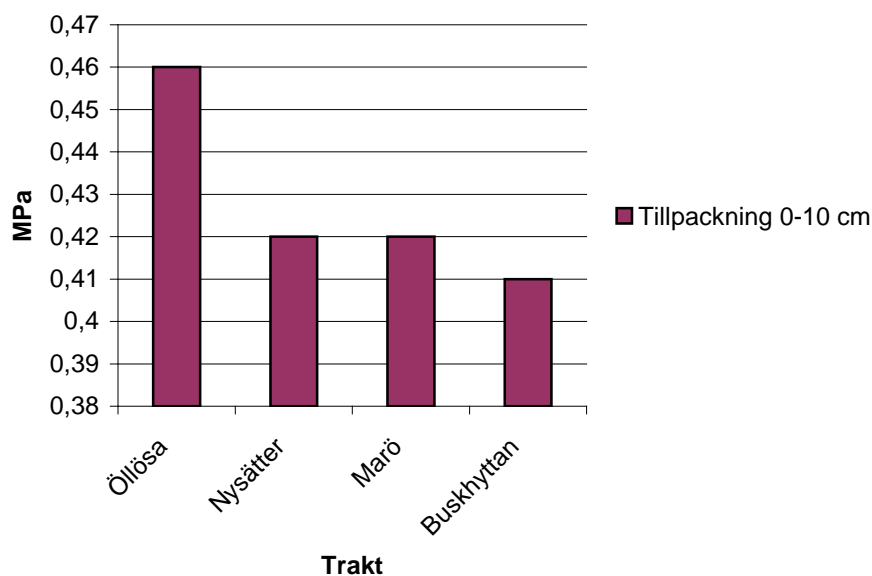
Spårdjupsinventeringarna i Södermanland visade på mycket stora spårdjup, från 35,8 till 56,4 cm, troligtvis beroende på att regnet sänkt bärigheten avsevärt på trakterna mellan planering och avverkning.



Figur 10. Spårdjup på inventerade trakter i Sörmland.

Figure 10. Ruth depth on studied sites in Sörmland.

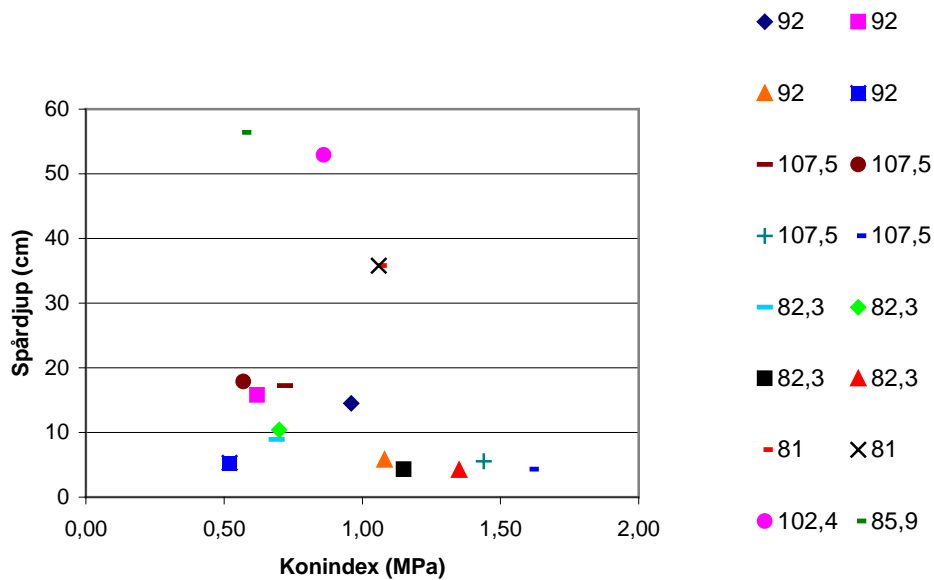
I figur 11 redovisas jordpackningen i markens översta 10 cm på de olika trakterna. Jordpackningen här är alltså skillnaden mellan konmotstånd i orörd mark och dito i körspåren. Observera att olika maskiner har använts på trakterna, värdena på tillpackning visar dock att en betydande tillpackning uppstått på de undersökta trakterna.



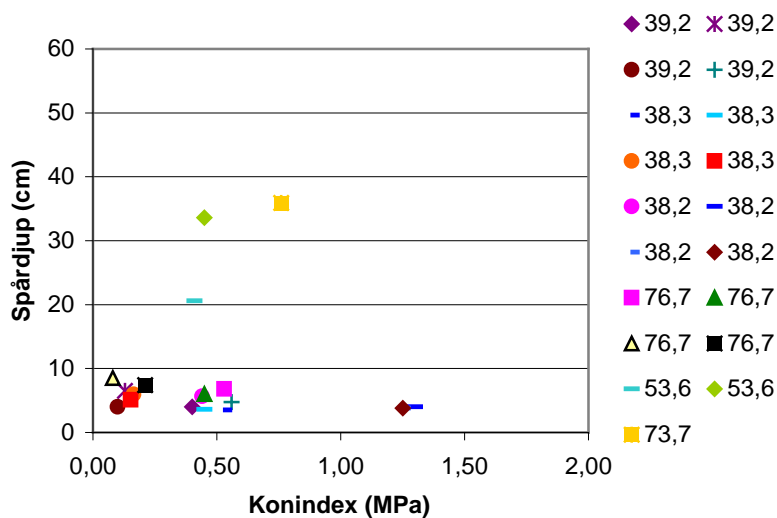
Figur 11. Jordpackning i körspår, differens mellan orörd mark och i körspår.
Figure 11. Soil compaction in rut, as difference in cone resistance between untouched and in the wheel rut.

3.3 Samband mellan marktryck, spårdjup och konindex

För att få ett nyckeltal för maskinval vid avverkning har marktrycket räknats ut för alla i studien ingående maskiner. Dessa har plottats in i ett diagram med trakternas konindex på X-axeln och spårdjup på Y-axeln. Diagrammet visar alltså vilket marktryck som åstadkommit spårdjupet på de olika trakternas konindex. Avsikten var att undersöka om det med regressionsanalys gick att hitta en kurva som förutspår körskadorna vid olika maskinval, åtminstone grovt. Maskinerna har delats in i två olika klasser för enkelhets skull; maskiner med *lågt marktryck*, marktryck < 80 kPa, och maskiner med *högt marktryck*, marktryck >80kPa. Först redovisas i figur 12 och 13 de två marktrycksklasserna, med alla maskiner plottade, i höger kant på figurena redovisas vilket marktryck (i kPa) de olika punkterna symboliserar. Anledningen till att spårdjupet används för att uttrycka körskadorna är att de mätningarna är mer tillförlitliga än värdena för tillpackning som ofta blir mer ”spretiga” d.v.s. får en högre standardavvikelse. Därefter har en regressionsanalys gjorts, och slutligen har trendlinjer lagts in



Figur 12. Uppmätt spårdjup för olika maskinalternativ med högt marktryck (>80 kPa).
Figure 12. Caused rut depth for different machine-alternativ with high ground-pressure (above 80 kPa).



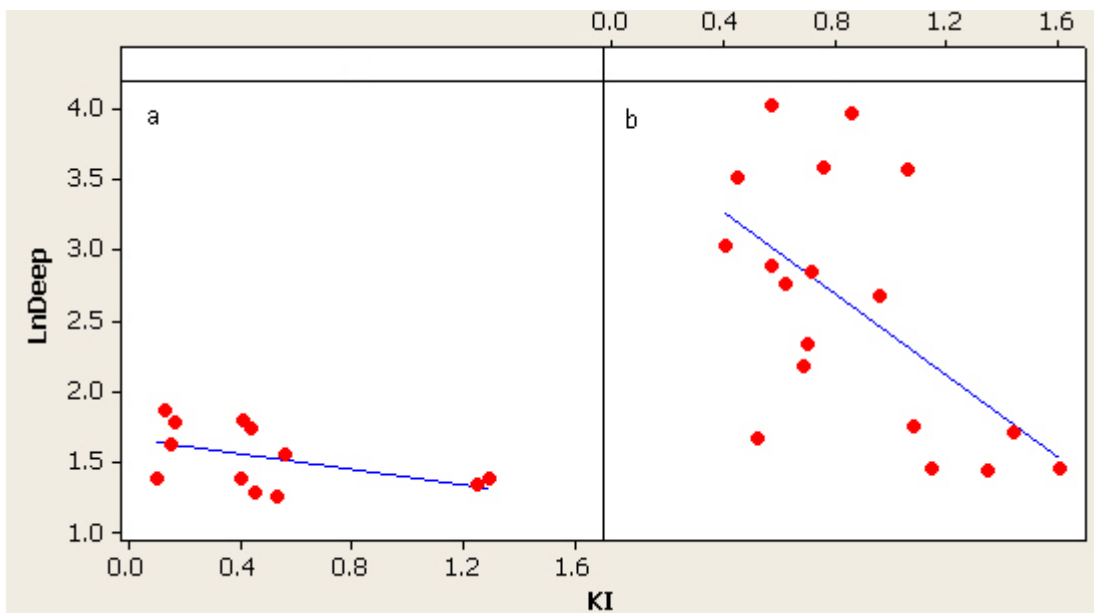
Figur 13. Uppmätt spårdjup för olika maskinalternativ med lågt marktryck (<80 kPa).
Figure 13. Caused rut depth for different machine-alternativ with low ground- pressure (below 80 kPa).

För att undersöka sambandet mellan marktryck (mtkl), konindex (KI) och spårdjup (LnDeep) gjordes ett antal regressionsanalyser. Dessa visade att det fanns ett signifikant samband mellan marktryck, marktyp (konindex) och spårdjup. I figur 14a visas sambandet för skotarna med lågt marktryck, och i figur 14b de med högt marktryck. Som tidigare så är det också här tydligt att ökningen av spårdjupet är mest dramatisk när de tunga maskinerna används på för låg bärighet. Y-axeln representerar spårdjupet (med logaritmerade värden) och X-axeln är konindex, alltså marktyp/bärighet.

Regressionsanalysen gav modellen

$$\text{LnDeep} = 1.66 + 2.19 \text{ mtkl} - 1.18 \text{ KI} \times \text{ mtkl} - 0.264 \text{ KI} \text{ (för högt marktryck, dvs. ruta b)}$$

$$\text{LnDeep} = 3.79 - 2.13 \text{ mtkl} + 0.354 \text{ mtkl} - 1.23 \text{ KI} + 0.968 \text{ KI} \times \text{ mtkl} - 0.848 \text{ KI} \times \text{ mtkl} \text{ (för lågt marktryck, dvs. ruta a)}$$

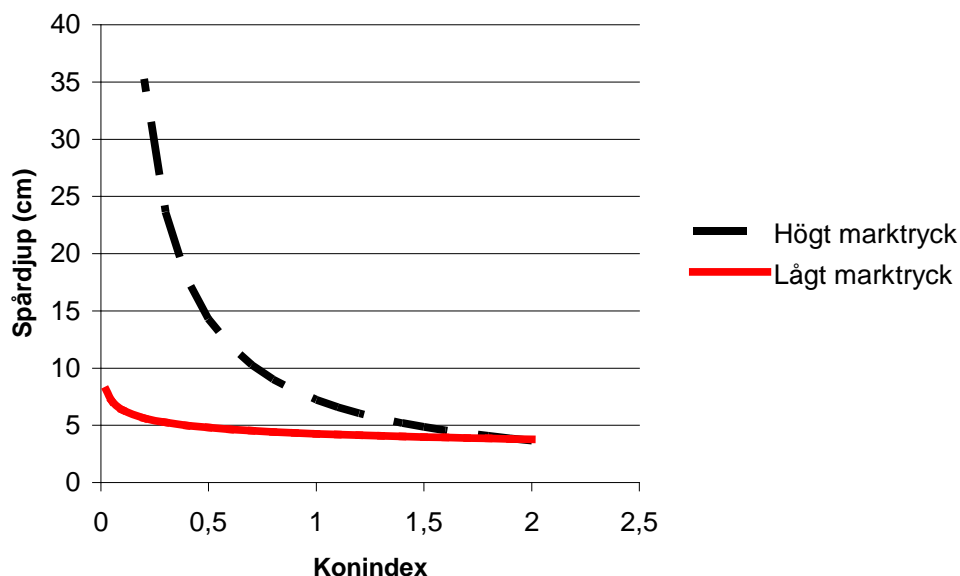


Figur 14. Regressionsanalys över sambandet mellan spårdjup, maskiners marktryck och marktyp (KI); a = lågt marktryck (<80kPa), b= högt marktryck (>80kPa).

Figure 14. Regressionanalysis of the correlation between rut depth, ground-pressure and ground-type (KI); a= low ground pressure (below 80kPa), b= high ground pressure (above 80kPa).

För att visualisera ett ev. samband mellan körskador, marktryck och marktyp lades två sannolika tolkningar i form av kurvor som följer medelvärden in i figurerna 12 och 13, med punktvärdena. Resultatet syns i figur 15, och ger intressanta resultat att använda i schemat för maskinval.

För att skapa trendlinjerna för högt och lågt marktryck har ingående värden använts (se figur 12-14) och formeln har använts för att illustrera det förväntade spårdjupet på olika konindex.



Figur 15. Förhållande spårdjup – marktryck och konindex.

Figure 15. Relationship between rut depth – ground pressure, and cone index.

När konindex blir lägre, dvs. marken blir mjukare och mindre bärig ökar spårdjupet exponentiellt för maskinerna med högt marktryck (vid 0,7 MPa), medan maskinerna med lägre marktryck inte står för samma dramatiska ökning, den största ökningen ses vid 0,3 MPa, alltså en tydlig skillnad mellan dessa två linjer/klasser.

För att underlätta läsningen av figurerna och förståelsen av vad de olika värdena på konindex betyder användes mätningarna med konpenetrometern i den orörda marken på trakterna i Sörmland, vid fältförsöket i Sävar och från de övriga två studierna, tillsammans med en okulär bedömning av jordarten och marktypen för att göra en klassning av vad olika skogsmark har för konindex. Dessutom gjordes extra mätningar av konindex på tre olika platser där jordarten var känd för att bekräfta de tidigare observationerna.

Nästa steg var att använda en vanlig jordsond på samma marker för att få en grov uppfattning om hur en jordsond kunde pressas ner i marken vid känt konmotstånd (Tabell 2). Den modell som användes som förebild var Agers klassning av snöns hårdhet i terrängtypsschemat (Berg 1982).

Tabell 2. Försök till klassificering av marktyper utifrån konindex, med hjälp av en jordsonden

Table 2 . Proposed classification of soil bearing capacity on the basis of coneindex when using a soil probe

Konindex	Marktyp	Jordsonden
>0,9 MPa	Sand/grus morän, ex. tallhed.	Sonden går ner max 10-15 cm vid fullt tryck
0,5-0,9	Mo-mjåla, ex. granmark/åkermark.	Sonden går ner 30-40 cm vid fullt tryck
0-0,5 MPa	Torvmark.	Sonden går ner hela vägen med ett lätt tryck.

3.4 Maskinval

För att välja rätt maskin för avverkning på den aktuella bärigheten redovisas en typ av modell i tabell 3. Utifrån kraven på största acceptabla spårdjup efter drivning kan maskin, last och bandalternativ fyllas i modellen med hjälp av spårdjupskurvorna i figur 15 och marktrycksvärdena i tabell 4 och 5.

I exemplet nedan, tabell 3, har 10 cm spårdjup satts som gräns. I den lägsta bärighetsklassen, torvmark, gick det i studien inte att hitta något maskinalternativ som hade tillräckligt lågt marktryck för att orsaka spårdjup under 10 cm.

Tabell 3. Modell för val av skotarstorlek utifrån bärighet
Table 3. Model for choice of forwarder depending on bearing capacity

Marktyp	Rek. Marktryck	Ex. maskin	Hjulustrustning	Last
Sand/grus morän	80 - 100kPa	JD1710	Ecotrac-band	Full last (18,5 ton)
Sand/grus morän	80 - 100kPa	Valmet 890.3	Ecotrac-band	Full last (15,5 ton)
Sand/grus morän	80 - 100kPa	Ponsse Buffalo	Clark-band	Full last (17 ton)
Mo-mjälamark	40-80 kPa	JD 1110	Ecotrac-band	Full last (15 ton)
Mo-mjälamark	40-80 kPa	JD 1710	Ecotrac-band	Halvt lass (9 ton)
Torvmark	<40 kPa	(Bullmarksvagnen)	Band från Olofsfors.	Tom

I tabell 4 och 5 redovisas exempel på maskiner och deras marktryck. Med marktryck menas som tidigare även här axellasten bak, då det är där trycket är störst när maskinen är fullastad med virke, och körspåren uppkommer av detta. Lägg märke till att JD-maskinen 1510 E är fullastad med Grot och därför inte åstadkommer lika högt marktryck i denna jämförelse.

Tabell 4. Marktryck för skotare med band, lastad
Table 4. Ground-pressure for forwarders with tracks, loaded

Maskin	Band	Marktryck (kPa)
Påhängsvagn, Bullmark	Ecotrac	39,2
JD 1510 E (Grot-lastad 9 ton)	Eco-OF	53,6
JD1110 D	EcoMagnum	73,7
Ecolog 574 B	Ecotrac	81,0
Ponsse Buffalo	Clark	85,9
Timberjack 1710 D	Ecotrac	89,8
Valmet 890.3 (15,5 tons last)	Ecotrac	92,0
Ponsse Elephant	Ecotrac	102,4

Tabell 5. Marktryck för skotare bara hjul, lastad*Table 5. Ground-pressure for forwarders, only wheels, loaded*

Maskin	Däck	Marktryck (kPa)
JD 1510 E (<i>Grot-lastad</i>)	750/55-26,5	75,4
Påhängsvagn, Bullmark	700/40-22,5	76,7
JD 1110 D	750/55-26,5	79,6
Rottne Solid F9-6	600/50-22,5	87
Ecolog 574 B	650/65-26,5	99,7
Ponsse Buffalo	650/65-26,5	105,8
Timberjack 1710 D	750/55-26,5	111
Valmet 890.3	700/65-26,5	107,5
Ponsse Elephant	750/55-26,5	124,7

I tabell 6 redovisas skotarna indelade i storleksklasser utifrån maskinvikt. Detta för att få en grov uppfattning om dess storlek.

Tabell 6. Studerade maskiner indelade i maskinvikts-klasser*Table 6. Studied machines in weight-classes*

Liten <=15 ton	Mellan 15-20 ton	Stor >20 ton
JD 1110D (15 ton)	Ponsse Buffalo (18 ton)	Valmet 890.3 (21,5 ton)
Rottne Solid F9-6 (12 ton)	JD 1510e (18,4 ton)	Ponsse Elephant (25,5 ton)
	Ecolog 574 B (17 ton)	JD 1710D (21,5 ton)

4. Diskussion

Examensarbetets material är uppdelat i fyra delar: Fältstudien i Sävar, inventeringen i Södermanland och analys av data från Bräcke och Olofsforsstudien. Det är av vikt att antalet observationer är relativt stort för att säga något generellt i frågan om marktryckets påverkan på spårdjupet. Under de omständigheterna som funnits gällande tid och resurser för studien har ett tillfredsställande antal värden samlats in för att genomföra en variansanalys och en regressionsanalys som gett resultat.

Vad gäller inventeringsmetoderna i Sörmland och dess utformning fanns vissa brister. Spårdjupsmätningarna gjordes inte korrekt objektivt med ett förutbestämt förband för mätpunkterna. Spårdjupsmätningarna gjordes även utanför själva trakten på flera av trakterna. Spårdjupsvärdena från Sörmland ska betraktas i ljuset av detta. Vid försöket i Sävarheden, Bräcke och i Olofsforsstudien har inventeringsmetoderna dock varit välplanerade och gett tillförlitliga resultat.

Valet av de statistiska analysmetoderna variansanalys och regressionsanalys har gjorts efter rådgörande med statistisk expertis på SLU. Anledningen till att spårdjup användes för att uttrycka körskador i modellen var att det bedöms vara den viktigaste praktiskt enkla mätvariabeln att beakta.

Körning på Sävarheden med bara hjulen gjorde som väntat i regel större spårdjup än körning med band, förutom på område 1 där lastad skotare med band gav större spårdjup än dito med hjul. Skillnaden var dock liten och kan förklaras med att marken var fast och spåren blev små över lag. Eftersom mätningen gjordes ner till djupaste punkt, kan bandribbor eller dobbar ge ett något större djup än medeldjupet på spåret. Variansanalysen visade bl.a. att det inte gick att säga med statistisk säkerhet om spåren skiljde sig åt på område 1, dvs. på sandmarken. På område 2, med sämre bärighet visar analysen på signifikant minskning i spårdjupet när band används på maskinen. Detta visar hur viktigt det är att använda band på mindre bäriga marker för att sprida ut marktrycket och minimera skadorna på avverkningstrakten.

Körning nr 3 med varianstestet visade att det fanns signifikans mellan flera variabler och spårdjupet. Det fanns t.ex. ett samband mellan marktyp (konindex) och förekomsten av körspår samt marktryck och spårdjup.

De viktigaste parametrarna för att få bättre åtkomst genom minskade körskador är enligt variansanalysen:

1. Anpassad lastvikt
2. Användande av band på svag mark
3. Markförstärkning

Mätningar av konmotståndet på Sävarheden i körspåren och utanför visade att det uppstått jordpackning i hjulspåren under samtliga försöksled på båda områdena med störst skada när maskinen kördes utan band. På område 2 med sämst bärighet blev kompakteringen störst.

Inventeringen av de fem trakterna i Södermanland visade på mycket djupa körspår, upp till 56cm. En trolig orsak till att de blev större än man kunnat vänta sig på de marktyperna kan förutom bristfällig planering av inventeringen vara att kraftiga nederbördsmängder gjorde att

marken fick en helt annan bärighet vid avverkningen än vid planeringen. Det indikerar att aktuell bärighet måste kunna mätas på ett enkelt sätt.

Mätningarna som gjordes i Bräcke utfördes efter en JD 1510 som skotade Grot och vikten på ekipaget var lägre än vid skotning av virke, 9 ton istället för 15 ton (Bjarnert 2010). Grundvattnet stiger efter avverkning (Haglund 2009), vilket kan leda till problem vid skotning. Därför är det intressant att notera att GROT-skotning innebär ett lägre marktryck och därför ändå kan utföras en tid efter avverkningen.

Olofsforsstudien är intressant att beakta då en ovanlig maskinsammansättning användes, både för produktivitet och för minimering av markskador kan ”påhängsvagnar” som används tillsammans med en vanlig skotare vara intressanta, då det blir tal om färre överfarter om man kan lasta mer.

Figureerna 12 och 13 gjordes som ett steg i att försöka göra en modell för maskinval baserat på marktryck och konindex. Här valdes att använda spårdjup för att uttrycka markskador. De skapade trendlinjerna visade på samband mellan marktryck, konindex och spårdjup. Samband som användes för att sätta ihop modellen för val av maskinstorlek/marktryck efter bärighet vid praktiskt hantering. I och med att studien till största delen baseras på data från Sävarförsöket och Olofsforsförsöket där endast en överfart gjordes, fungerar modellen troligen bäst för situationer där en överfart görs. Detta kan vara en svaghet i modellen då det ofta görs fler överfarter i samma spår vid praktisk avverkning.

Skogsmarken är ojämn i sin struktur, med varierande markfuktighet, partikelstorlek, förekomst av stenar och rötter. Därför är det svårt att göra enhetliga och generella regler för vilken hållfasthet och motstånd en jord har. Klassningen av marktyperna efter konindex ger dock en uppfattning om inom vilka intervall t.ex. en torvmark ligger.

Marktrycksberäkningarna är gjorda enligt RTG-formeln (Malmberg 1981). Det blir en något grov, men enhetlig metod att använda för att jämföra maskinernas marktryck, och framförallt i praktiken den enda metoden som fanns att gå efter.

Anledningen till att det finns så få studier i ämnet är troligtvis för att det finns så många variabler att hänsyn till (Wågberg 2002). Variabler som har påverkan på förekomsten av körskador kan vara extrem väderlek med mycket nederbörd, planering av körstråk, antal överfarter, risning av körstråk, maskinförarens misstag, stora variationer inom trakten osv. Vid planeringen av trakten finns inte information om väderleken vid avverkningen och tiden innan, vilket gör att markfuktighetens variation och dess påverkan på bärigheten inte går att förutse långt i förväg. En av de största påverkbara faktorerna för att få bättre åtkomst till det rotstående lagret är dock anpassning av avverkningsmaskinernas totalvikter och marktryck.

I denna studie har mätningarna gjorts efter olika och oftast ett fåtal överfarter. Vid Sävarförsöket var det en överfart. På basvägarna har det troligtvis varit fråga om flera överfarter. Basvägen till trakten avgör ofta vilken maskin som kan användas. Dock har inte betydelsen av antalet överfarter studerats i detta examensarbete.

5. Slutsatser

- Studien visar att konindex 0,70 MPa (motsvarar mjälamarker, se tabell 2) utgör ett gränsvärde för användande av de allra största maskinerna med högst marktryck.
- Modellen för val av maskinstorlek syftar till att inte använda maskiner med marktryck som överskrider skogsmarkens aktuella bärförmåga. I studien orsakade maskiner med högt marktryck (>80kPa) dramatiska ökning av spårdjupet vid körning på mjälamarker eller svagare.
- Såväl jordpackning som körspår minskar vid användning av band på skotarna, särskilt på skogsmark med sämre bärighet. Det bör vara intressant med markförstärkning vid 0,70 MPa och svagare.
- Det kan behövas någon typ av bärighetsmätning vid avverkningsplaneringen i framtiden. Generellt ger dagens planering för dålig information om markförhållanden och aktuell bärighet för att hålla körskadorna på en låg nivå.

Referenser

- Andersson & Westlund (2008). Vägstandardens inverkan på skogsnäringens transportarbete. Arbetsrapport nr 663, Skogforsk, Uppsala. [online]
<http://www.skogforsk.se/upload/53434/Arbetsrapport663.pdf> [2009-06-02]
- Anon. 2000. *Operating instructions for the Eijkelkamp penetrometer*.
- Berg, S. 1982. *Terrängtypsschema för skogsarbete*. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten.
- Bergh J et. al. (2000). Fakta skog. Framtida klimatförändringar – tänkbara effekter på den svenska skogen. [online] Tillgänglig: <http://www2.slu.se/forskning/fakta/faktaskog/pdf00/S00-13.pdf> [2009-06-02]
- Bjarnert, J. (2010). Reducering av markskador vid GROT-skotning. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå, institutionen för skoglig resurshushållning. (Arbetsrapport nr. X, under färdigställande)
- Bygdén & Wästerlund. (2007). *Rutting and soil disturbance minimized by planning and using bogie tracks*. Forestry studies 46: 5-12.
- Eliasson & Wästerlund.(2007). *Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine grain soil*. Forest ecology and management 252 : 118-123.
- Eliasson, L. (2005). *Effects of Forwarder Tyre pressure on Rut Formation and Soil Compaction*. Silva Fennica 39 (4): 549-557.
- Fransila, J. et al. (2005). *Klimatförändringar och deras inverkan på skogsbruket*. Skogsstyrelsen, Solna.
- Froster, A. (2008) Varmare klimat ger fler körskador. SkogsEko nr.4 (2008): 8-11.
- Granolund, P. (2006) Fem miljoner kilometer med CTI. Resultat nr. 10, Skogforsk.
- Haglund, C. (2009). Skogsavverkningens påverkan på vattnets strömmningsvägar i jorden. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. (Serie: UPTEC W 1401-5765;09033).
- Horn, R. et al. (2004). *Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties*. Soil & Tillage Research 79: 207-219.
- Jansson, K-J. (1998) *Effects of Machinery Traffic in Forestry on soil Properties and Tree Growth*. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, Silvestria 66. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Jansson, K-J. & Johansson, J. (1998). *Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine*. Forestry 71 (1): 57-66.
- Jansson, H. (2002). Avverkningar under tjällossningsperioden –är de på en uthållig nivå. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå, institutionen för skoglig resurshushållning. (studentuppsatser nr. 54).

Karafiath & Nowatzki (1978). *Soil mechanics for off-road vehicle engineering*. New York: Trans tech publications

Koolen & Kuipers (1983). *Agricultural Soil Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin.

Malmberg C-E (1981). *Terrängmaskinen Del 2*. Oskarshamn: Primo

Wågberg, C. (2001). *Miljöeffekter och omfattning av spårbildning vid slutavverkning*. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå, institutionen för skoglig resurshushållning. (Studentuppsatser nr.48).

Wästerlund (2009), institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, Umeå. Personligt meddelande.