



Konindexbaserad prognostisering av spårdjup på sedimentmarker för Komatsus skotare

*Cone index based prognostication of rut depth for Komatsu
forwarders on sediment soils*

Jonas Eriksson

Arbetsrapport 16 2015
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet

Handledare:
Tomas Nordfjell

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi
S-901 83 UMEÅ

www.slu.se/sbt

Tfn: 090-786 81 00

Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Konindexbaserad prognostisering av spårdjup på sedimentmarker för Komatsus skotare

*Cone index based prognostication of rut depth for Komatsu
forwarders on sediment soils*

Jonas Eriksson

Nyckelord: *Simulering, skotning, överfarter, utrustningsalternativ*

Arbetsrapport 16 2015

Examensarbete i skogshushållning vid Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, 30 hp
EX0772, A2E

Jägmästarprogrammet

Handledare: Tomas Nordfjell, SLU, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Examinator: Urban Bergsten, SLU, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2015

Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Förord

Denna studie är ett examensarbete på 30hp som ingår i jägmästarprogrammet. Arbetet har skrivits inom skogshushållning med inriktning på skogsteknologi. Studien är utförd vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi på Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå.

Uppdragsgivare var Komatsu Forest AB, hos vilka data har inhämtats och bearbetats.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Tomas Nordfjell, institutionen för skogens biomaterial och teknologi, för mycket kreativ handledning. Jag vill även rikta ett stort tack till Kjell Rönnholm på Komatsu Forest AB för givande och inspirerande diskussioner.

Sammanfattning

I Sverige sker idag avverkning och terrängtransport av virke till största del mekaniserat. Vid terrängtransport av virke med en skotare skapas ofta en spårbildning i marken. Spårbildningen kan leda till körskador. Körskador är en fråga som många intressenter vill undvika, bl. a. maskintillverkare som till exempel Komatsu Forest AB. Målet med examensarbetet var att ta fram ett Excelbaserat redskap för spårdjupsprognostisering avsett för Komatsu Forests olika skotarmodeller med olika däckstorlekar, ringtryck och axelbelastningar, med eller utan boggiband vid upprepade överfarter på sedimentmarker med olika bärighet. Delsyften var därför att sammanställa befintliga matematiska modeller/metoder för spårdjupsberäkning och analysera/välja mest lämpliga för skogsterräng och skotare samt genomföra analyser med valda metoder där olika parametrar varierades. Som grund för bärighetsklassificering användes konindex (markens penetrationsmotstånd).

Prognostisering av spårdjup gjordes för samtliga Komatsu Forests skotarmodeller av årsmodell 2015 utifrån tekniska specifikationer. Redskapet och prognoserna visade att användande av band på skotare kan minska spårbildningen med mer än 60 % och att störst minskning var på marker med låg bärighet. En minskning av ringtrycket i däcken från 600 kPa till 450 kPa kan bidra till att minska spårbildningen med 30 %. Resultaten från prognoserna överensstämmer bra med tidigare utförda studier och det framtagna redskapet bör därför kunna användas som avsett. Validering mot fältstudier är dock angelägen liksom att utveckla redskapet, exv. till att även inkludera moränmarker och band av olika typ.

Nyckelord: *Simulering, skotning, överfarter, utrustningsalternativ*

Abstract

Harvesting and forwarding of timber is today mainly mechanized in Sweden. Extraction of timber with forwarders often creates rutting. Rutting can lead to ground damages and it is something that all stakeholders want to avoid including forest machine manufacturers like Komatsu Forest. The aim of the thesis was to develop a prognosis model for rut depths on sediment soils for Komatsu Forest's different forwarder models.

Materials and methods was to compile existing mathematical models / methods for rut depth calculations and analyze / select the most suitable method for forest terrain and forwarders as well as to conduct analyses with the selected methods in which various parameters were varied. Cone index was used as a basis for ground bearing classification (soil penetration resistance). Forecasts of rut depth were made for all Komatsu Forest's forwarder models of model year 2015 with technical specifications as a basis.

The presented model include different tire sizes, tire pressures and axle loads, with or without bogie tracks on repeated crossings of sediment soils with different bearing capacities. The model was also used in an Excel based tool that was developed parallel as the work was done.

The tool and the forecasts indicate that use of bogie tracks on forwarders could reduce rut depth up to 60 % and the largest reduction was on soils with low bearing capacity. A reduction of the inflation pressure in the tires from 600 kPa to 450 kPa could reduce rutting by up to 30 %. The results of the forecasts correspond well with previous studies and the developed tool should therefore be able to be used as intended. However it is keen to conduct validations against field studies, as well to further develop the tool, for example to include moraine soils and different types of bogie tracks.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Körskador	6
1.2.1	Spårbildning	7
1.2.2	Markkompaktering	7
1.3	Effekter och definiering av körskador	7
1.4	Mätning av markens bärighet	9
1.5	Metoder att förebygga eller minska körskador	9
1.5.1	Tekniska förändringar på skogsmaskinen	9
1.5.2	Förändringar av arbetsmetod, eller användning av hjälpmedel	10
1.6	Metoder för att beräkna spårdjup.....	12
1.6.1	Metoder för att beräkna spårdjup med bandutrustade skotare	13
1.7	Syfte.....	14
2	Material och metod.....	15
2.1	Val av modeller och metoder för spårdjupsprognostisering.....	15
2.1.1	Prognostisering av spårdjup med hjul	15
2.1.2	Prognostisering av spårdjup med bandutrustade skotare	15
2.1.3	Skapande av prognostiseringsverktyg för spårdjupsutveckling	16
2.2	Indata till prognostiseringen	17
3	Resultat.....	19
3.1	Beräkningsmodeller för att prognostisera spårdjupsutveckling	19
3.1.1	Spårdjup efter hjul.....	19
3.1.2	Spårdjup efter band	20
3.2	Prognostiserad spårdjupsutveckling	21
3.3	Känslighetsanalyser	23
4	Diskussion	27
4.1	Resultat	27
4.2	Antaganden i detta arbete	28
4.3	Fortsatta studier	31
4.4	Slutsatser.....	31
	Litteraturförteckning	32

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I Sverige är skogsnäringen omfattande och utgör en av landets basindustrier. Skogsnäringens totala produktionsvärde uppgick till 216 miljarder kronor under år 2011. Exportintäkterna som den genererar har en betydande grund i Sveriges ekonomi och samma år var exportvärdet för skogsindustriprodukter 127 miljarder kronor (National Research Agenda, 2012; Christiansen, et al. 2014). Industrier i form av sågverk, massabruk och värmeverk förbrukar råvara från skogen bestående av timmer, massaved och biobränsle. För att industrierna skall förses med råvara behöver skog avverkas och transporteras till industrin.

I Sverige tog mekaniseringen fart under 1960 och -70 talen och nu är både avverkning och terrängtransport av virke helt mekaniserat inom storskogsbruket. Den tekniska utvecklingen har utmynnat i dagens maskintyper. Idag nyttjas främst sortimentsmetoden och tvåmaskinskonceptet vid avverkning och gallring i svensk skog. Det innebär att en skördare och en skotare arbetar tillsammans med att avverka och transportera virke. Skördaren fäller, kvistar och kapar träden i skogen. Sedan transporterar en skotare virket från skogen till avlägg vid bilväg för vidare transport med lastbil (Kellogg & Bettinger, 1994).

Typisk skogsmark i Sverige utgörs av jordarten morän (Eriksson, et al. 2005). Det är en mark som utgörs av osorterade partikelstorlekar. Partiklarna ligger i storleksintervallet från små lerpartiklar till stenar och block. Sammansättningen av dessa är avgörande för markens egenskaper, bland annat bärighet. En större andel finkorniga partiklar ökar markens förmåga att hålla vatten. Högre markfuktighet leder generellt till lägre bärighet. Marker bestående av främst grova partiklar som sand och grus har en lägre förmåga att hålla vatten i jorden. Förekomst av block och stenar har en armerande effekt i marken. En annan jordart som förekommer i Sverige är sedimentmark. Det utgörs av sorterade partikelstorlekar. Även här är storleken på partiklarna avgörande för markens egenskaper och därigenom bärighet. Finkorniga sedimentmarker har generellt en högre markfuktighet än grovkorniga sedimentmarker på grund av deras förmåga att hålla vatten. Dessa ligger även ofta placerade i lägre terrängpartier (Eriksson, et al. 2005).

Det översta lagret i en typisk skogsmark består av humus. Det utgörs av dött organiskt material t.ex. nedfallna barr, grenar och löv (Eriksson, et al. 2005). Utöver det döda organiska materialet finns en mängd levande material som exempelvis rötter i olika grovlek. Dessa rötter tillsammans med det övriga organiska materialet bildar en matta ovanpå den underliggande mineraljorden. Mattan i sig innebär en dämpning och fördelar skogsmaskinernas belastning på en större yta. Förekomsten av rötter bidrar med en bärande förmåga som förstärker markens bärighet.

1.2 Körskador

Körskador vid avverkning uppkommer främst till följd av skotarens överfarter, då den fullastad är betydligt tyngre än en skördare. Dessutom kör en skotare längre sträckor på en avverkningstrakt än vad en skördare gör. Fullastad väger de vanligaste skotarna i Sverige mellan 20 och 40 ton beroende på modell och storlek, och flertalet väger mellan 30 och 40 ton

(Bygdén, et al. 2003; Öhman, 2013). På basvägar där stor mängd virke transporteras ett flertal gånger och skotaren passerar upprepade tillfällen skapas den kraftigaste markpåverkan.

1.2.1 Spårbildning

Spårbildning är ett tecken på att belastningen som skotaren medför är större än markens bärighet i det översta jordlagret. En del av den energi som maskinen producerar går alltså åt till att deformera jorden (Yong, et al. 1984; Muro, 1982). Det finns ett tydligt samband mellan markens fuktighet och spårbildning. En högre markfuktighet innebär lägre bärighet och leder till kraftigare spårbildning (Rajaram & Erbach, 1999). Fordonets massa har även en tydlig inverkan på spårbildningen. Ett tyngre fordon skapar ofta en kraftigare spårbildning (Liu, et al. 2010). Vid kurvtagning med en skotare sker en skjuvning av jorden. Det innebär att fordonet kan skjuva jorden i och ut ur körspåret. Skjuvning är något som är oundvikligt, speciellt för ett fordon utrustat med boggi. När ett fordon svänger i terrängen kan även viktfordelningen förändras i sidled på fordonet. Detta tillsammans med skjuvningen påverkar spårbildningen signifikant. Hur skarp sväng fordonet tar (svängradiens storlek) har även en stark inverkan på hur djupa spåren blir. En mindre svängradie leder till kraftigare spårbildning (Liu, 2009). Såväl spår djup, spårbredd och höjden på spårkanten där jord föses upp ökar vid mindre svängradie (Ayers, 1994).

1.2.2 Markkompaktering

Markkompaktering innebär att porerna i jorden pressas samman. Dessa porer kan vara fyllda med luft eller vatten. Markkompaktering har olika karaktär beroende på vilken jordart som utgör underlaget. En studie gjord av Ampoorter et al. (2007) påvisade att sandiga marker visar en omfattande kompaktering redan efter en överfart av en skotare. De visade även att effekten är mest påtaglig i de översta 20 centimetrarna av marken. Mer grovkorniga jordarter beter sig annorlunda då de utsätts för maskinöverfarter. Kompakteringen på grova jordarter sker mer gradvis och 50 % av kompakteringen uppstår efter 3 överfarter (Brais & Camire, 1998). Finkorniga marker som utsätts för belastning av skogsmaskiner visar på en omfattande kompaktering redan efter första överfarten för att sedan endast kompakteras marginellt under de efterföljande överfarterna (Ampoorter, et al. 2007; Brais & Camire, 1998). Är porerna fyllda med luft kan marken kompakteras till en högre grad än om porerna är fyllda med vatten. Finkorniga jordar och lerjordar som kompakterats behöver inte nödvändigtvis få en högre bärighet. Det beror på att partiklarna glider mot varandra och däck/band kan sjunka kraftigt trots en hög markkompaktering (Raper, 2005).

1.3 Effekter och definiering av körskador

När marken kompakterats till följd av virkestransporter medför det ett högre motstånd för trädens rötter att penetrera. Fältförsök har påvisat att rotlängden hos granplantor (*Picea abies*) var 50 % kortare i körspår gentemot orörd jord (Wästerlund, et al. 1990). Däremot visade det sig att rötterna var tjockare i den kompakterade jorden och jämfört med den orörda jorden uppgick den förlorade rotbiomassan till 30-40 %. Trädens rötter och framför allt granens växer ytligt och horisontellt. Det innebär att de lätt utsätts för skador vid gallring när tunga maskiner kör på dem (Wästerlund, 1983). Skadade rötter innebär en ökad risk för att träden skall angripas av röta (Roll-Hansen & Roll-Hansen, 1981). Rötterna har en viss dragstyrka

och den enskilda rotens styrka tillsammans med antalet rötter förstärker marken. Den förstärkande effekten av rötter försvinner när de slits av till följd av för hög belastning.

Erosion innebär en omlokalisering av mindre partiklar till följd av en ökad flödes hastighet på markvattnet. Markkompaktering i körspår samt hjulspåren i sig leder till en ökad risk för erosion. Körspår bidrar till en ökad ytavrinning och kan skapa fåror som styr vattnets väg nerför sluttningar. Erosionsrisken är störst i brantare sluttningar där marken innehåller en stor andel finkorniga partiklar (Larsson & Gretener, 1982).

En del körskador berör fornminnen och kulturminnen. Körskador som påverkar fornminnen och kulturminnen regleras delvis genom kulturmiljölagen, där den som skadar fornminnen på grund av oaktsamhet kan dömas till fängelse i högst 6 månader (Kulturmiljölagen, 1988). Fornminnen och kulturminnen berörs även i skogsvårdslagen, bl.a. i 30 §. Där ingår förordningar, föreskrifter och allmänna råd om hur fornminnen skall undvika att skadas (Skogsvårdslagstiftningen, 2014). Skador på fornminnen uppkommer främst vid markberedning och inte i lika stor utsträckning vid slutavverkning eller gallring.

Förutom de rent biologiska eller kulturella skadorna som kan uppstå upplevs körskador negativt ur ett etiskt och estetiskt perspektiv. Djupa spår efter maskinerna samt sönderkörd terräng är något som många har en negativ uppfattning om (Wågberg, 2001). Körskador i terräng kan definieras utifrån vilka följder skadorna orsakar (Tabell 1).

Tabell 1. Definiering av körskador utifrån vad i terrängen som skadats samt vilka påföljande effekter körskadorna kan leda till (Efter Berg, 2011)

Table 1. Definition of ground damages from the aspect of what in the terrain has been damaged and what the consequences of the damages will be

Typ av skada	Primära effekter	Sekundära effekter
Körspår nära sjöar och vattendrag.	Ökad erosion och omrörning. Ändrade flödesvägar för vatten.	Risk för ökad utlakning av kvicksilver och fosfor. Igenslamning av vattendrag förstör vattenorganismernas livsmiljö.
Körskador på mark utan anslutning till vatten.	Mekaniska skador på rötter, rothalsar och träd. Markkompaktering.	Risk för röta och tillväxtförluster.
Körskador som påverkar naturhänsyn och rekreativsvärdet.	Körskador som minskar naturvärdet hos lämnad hänsyn. Förstörda stigar och leder.	Försämrar framkomlighet, rekreativsvärde och kvalitet på naturhänsyn.
Körskador som förstör fornlämningar, fornminnesområden och övriga kulturhistoriska lämningar.	Regleras enligt Kulturmiljölagen och Skogsvårdslagen.	

1.4 Mätning av markens bärighet

En ofta återkommande metod för att mäta markens bärighet och som flitigt redovisas i rapporter är att mäta markens penetrationsmotstånd med en konpenetrometer. En konpenetrometer utgörs av en stav med en konformad spets kopplat till ett mätinstrument. Genom att pressa staven ner i marken samtidigt som mätinstrumentet mäter kraften som krävs för att staven skall penetrera marken erhålls ett konindex. Konindex är ett värde på markens penetrationsmotstånd med enheten kPa. Ett högre motstånd i marken ger ett högre konindex och innebär en högre bärighet.

Olika marktyper har olika bärighet beroende på vilken jordart de utgörs av. I ett arbete av Andersson (2010) återfinns en klassificering av vanliga marktyper med riktlinjer för vilket konindex de olika marktyperna förväntas ha (Tabell 2). Denna klassificering syftar till att ge enkla värden på konindex för ett antal vanliga skogsmarkstyper i Sverige.

Tabell 2. Klassificering av konindex för olika marktyper (Efter Andersson, 2010)

Table 2. Cone index classification for different ground types (After Andersson, 2010)

Konindex	Jordart
>900 kPa	Sandig/grusig morän
500-900 kPa	Mo/mjåla sediment
0-500 kPa	Torvmark

Markfuktigheten har en kraftig inverkan på markens bärighet och därigenom även konindex. En hög markfuktighet innebär en lägre bärighet jämfört med samma mark med låg markfuktighet (Wästerlund & Andersson, 2011). I Wästerlund & Andersson (2011) anges även en del gränsvärden för konindex vid olika markfuktighet för en typisk skogsmark bestående av sandig moig moränmark (Tabell 3).

Tabell 3. Exempel på konindex vid olika markfuktighetsförhållanden (Efter Wästerlund & Andersson, 2011)

Table 3. Example of cone index values at different ground moisture levels (After Wästerlund & Andersson, 2011)

Markförhållanden	Konindex, kPa
Torr mark	>1100
Fuktig mark	800-1000
Blöt mark	400-700

1.5 Metoder att förebygga eller minska körskador

1.5.1 Tekniska förändringar på skogsmaskinen

Den tekniska utvecklingen på skotaren har lett fram till dagens skotarmodeller. Dessa har en högre produktivitet och bättre ergonomi jämfört med äldre modeller (Öhman, 2013). Den ökande problematiken kring körskador har lett till att en mängd tekniska lösningar och förändringar som minskar markpåverkan tagits fram. Nedan beskrivs några av dessa.

1.5.1.1 Bredare och större hjul

Skotare kan utrustas med hjul med större diameter och bredd samt med fler hjul för att få en större kontaktyta mot marken. I genomsnitt är skotare utrustade med betydligt bredare däck än för 20 år sedan (Öhman, 2013).

1.5.1.2 Viktsfördelning

Om en lastad skotare är så utformad att viktsfördelningen mellan fram och bakvagn är så lika som möjligt så minskar det spårbildningen i jämförelse med en ojämn viktsfördelning. I nuläget är skotare utformade så att med last vilar en större massa på bakvagnen än på framvagnen. Ett möjligt sätt att kompensera för ojämn viktsfördelning är att utrusta skotaren med större och bredare däck samt band på bakvagnen.

1.5.1.3 Minska ringtrycket vid körning utan band

En relativt enkel lösning för att minska spårbildningen vid skotning är att minska ringtrycket i skotarens däck vid körning utan band. Tidigare utförda studier visar att det är möjligt att minska spårdjupen signifikant genom att köra med lägre ringtryck (Löfgren, 1991). Denna studie genomfördes med en skotare av modell Kockum 83-85 på en åkermark där resultaten tydligt pekar på ett samband mellan lägre ringtryck och mindre djupa hjulspår. En annan studie visar också på liknande resultat (Sakai, et al. 2008). I denna studie jämfördes spårdjup och markkompaktering för en skotare (Rottne rapid) med lågt ringtryck, högt ringtryck samt med band. Där visades att den kraftigaste spårbildningen uppstod vid körning med högt ringtryck. Lägst spårbildning uppkom vid körning med band och lågt ringtryck utan band hamnade däremellan.

1.5.1.4 Urusta skotaren med band

Genom att utrusta skotaren med band skapas en större kontaktyta. Banden i sig tillför vikt till maskinen och totalvikten på skotaren kan öka med 10-12 % (Bygdén, et al. 2003). Trots detta kan band bidra till att minska spårdjup med upp till 40 % (Bygdén, et al. 2003). Markkompaktering kan även reduceras genom att förse skotaren med band (Sakai, et al. 2008).

1.5.1.5 Individuellt styrbara axlar

Ytterligare ett exempel på en teknisk lösning som kan minska körskador tack vare att markskjuvningen minskar är använda ett styrningssystem som medför att axlarna och hjulen på skotaren kan styras individuellt. Vid en jämförelse mellan en traditionell skotare (Valmet 860) och en skotare med individuellt styrbara axlar (El-forest F15) fanns observationer som understödjer att denna teknik bidrar till mindre spårbildning. Det visade sig fördelaktigt vid både körning rakt fram såväl som vid körning på en slingrig bana (Edlund, et al. 2012). Den främsta fördelen med denna teknik var att skjuvningen vid kurvtagning minskade signifikant och därmed även spårbildningen.

1.5.2 Förändringar av arbetsmetod, eller användning av hjälpmedel

Ett antal vedertagna metoder för att förebygga körskador är att planera samt arbeta på ett sätt som förebygger att tunga skogsmaskiner framförs på marker med för låg bärighet. Ett antal av dessa redovisas nedan.

1.5.2.1 Förstärka basvägar med grot

Vid avverkning av rundvirke blir grenar och toppar (GROT) ett bisortiment som kan tillvaratas i form av biobränsle för eldning i värmeverk. Grot kan också användas för att förstärka basvägarna. Genom att utföra det förstärker man bärigheten på marken. Maskinens vikt fördelas över en större yta tack vare grotens armerande effekt. Det utförs främst för att minska spårbildning och maskinernas påverkan på marken. Genom att risa basvägar kan även markkompakteringen minska. Det är under fuktiga markförhållanden risning av basvägar har högst effekt och minskar spårdjup i störst grad (Han, et al. 2006). Ett exempel på detta är Stora Enso:s rätt metod, där grotuttag och basvägar planeras efter markens bärighet. Det har visats minska körskador (Segerstedt, 2013). Ytterligare en studie redovisade att grot kan förstärka marken och bidra till minskade körskador samt spårdjup vid gallring (Sirén et al. 2013).

1.5.2.2 Användning av stockbroar/marsskonare vid överfarter av mjukare partier

Ytterligare en lösning för att minska spårbildningen vid skotning är att lägga ut stockbroar, även kallat marsskonare vid mjukare partier. En marsskonare består av sammansatta blocksågade stockar. Skotaren bär med sig stockbroarna ut till trakten och placerar de längs basvägar över mjukare partier. Det har visats ge en betydande minskning av spårbildningen jämfört med att köra utan stockbroar (Sundbaum, 2013).

1.5.2.3 Planering och dragning av basvägar

Genom bättre planering av avverkningen och dragningen av basvägarna kan körskador minskas (Sonesson, et al. 2012). Om basvägar placeras på höjder och höjdkurvor med hög bärighet minskar körskadorna gentemot om basvägar dras på lägre liggande mark med högre markfuktighet och lägre bärighet. Detsamma gäller om en basväg dras runt en myr eller annat blött parti istället för rakt över den. Med hjälp av olika beslutsstöd grundade på laserscanning av terrängen samt markfuktighetskartor kan planeringen underlättas samt ge tydligare direktiv till maskinlagen (Sonesson, et al. 2012). Ett annat exempel på hur planering kan bidra till en minskning av körskador är att fördela terrängtransporten av virke på flera basvägar istället för en. På så sätt kan man undvika flaskhalsar samt att skotaren passerar mjukare partier vid fler tillfällen än vad marken klarar av.

1.5.2.4 Avverka trakter med dålig bärighet under perioder med tjäle eller torka

Mjuka fuktiga marker med låg bärighet avverkas traditionellt under vintern då marken är frusen och bärigheten är högre. Det medför att marker med dålig bärighet kan avverkas med tunga maskiner. Problemet med detta är att dessa trakter främst utgörs av granskog och industrin efterfrågar rundvirke från såväl gran som från tall året runt och i ett jämnt flöde (Jansson, 2002). Om främst grantrakter avverkas under vintern skapas ett ojämnt flöde med en ojämn fördelning mellan gran och tallvirke. Denna ojämnhet kan justeras med hjälp av lager i olika form samt terminaler. Något som däremot är kostsamt då det binder kapital och kan leda till sämre virkeskvalitet (Brunberg, 1999).

1.5.2.5 Reducerad laststorlek

Ytterligare en metod för att undvika körskador och djupa körspår är att minska storleken på lassen. Det minskar vikten på den bakre boggin och viktfordelningen förflyttas.

Tyngdpunkten skjuts framåt och viktfordelningen närmar sig 50/50 mellan den främre och den bakre boggin. Men, samtidigt innebär det oftast att fler överfarer måste ske.

1.6 Metoder för att beräkna spårdjup

År 1960 initierade den amerikanska arméns forskningsgrupp ett forskningsprojekt som syftade att utreda förhållanden mellan hjul och mark. Detta projekt benämndes Waterways Experiment Station (WES) och bedrevs under en lång tid (Turnage, 1972). Ett stort antal fordonstester genomfördes i såväl fält som i laboratorium. Resultatet av forskningen som genomfördes här är en mängd modeller som bland annat kan beskriva nedsjunkning och nödvändig dragkraft för att ett visst fordon skall ta sig fram. En stor del av de modeller och ekvationer som finns idag för att beräkna framkomlighet, nedsjunkning, spårdjup och samspel mellan fordon och mark är baserade på detta forskningsprojekt (Wijekoon, 2012).

Det har tagits fram en mängd matematiska modeller baserade på WES-metoden. Dessa grundar sig på principen om ett hjuls framkomlighetsfaktor. Det innebär att fordonsp parametrarna definieras som dimensionslösa parametrar (Pirnazarov, 2014). Framkomlighetsfaktorn beräknas genom däckets dimensioner, däckets vertikala belastning och markens bärighet (Pirnazarov, 2014). Den första modellen (Formel 1) togs fram av Freitag (1965) se (Rula & Nutall, 1971). Den är utformad på följande sätt:

$$(1) \quad N_F = \frac{CI \times b \times d}{W} \times \sqrt{\frac{\delta}{h}}$$

Där N_F är framkomlighetsfaktor, CI är konindex, b är däckbredd, d är däckdiameter, W är vertikal belastning per däck, δ är däckdeflektion och h är däcksektionens höjd (jfr Figur 1).

Deflektionen är beroende av ringtryck, däckmaterialets styvhet samt vertikal belastning. Ett däcks deflektion blir större med högre belastning och lägre ringtryck. En ökad deflektion leder till en ökad kontaktyta mellan däckets och marken.

Turnage (1972) vidareutvecklade modellen för enskilda däckers framkomlighetsfaktor. Den är framtagen under förhållanden med sandig/finkornig jord. Det finns ytterligare WES-baserade modeller framtagna av Wismer & Luth (1973), Brixius (1987), Maclaurin (1990), Hegazy & Sandu (2013) med flera. Dessa är utformade på liknande sätt som Freitag (1965) men är framtagna under olika förhållanden. Exempelvis är ett förhållande i Wismer & Luths (1973) modell att samtliga däck antas ha 20 % deflektion.

De framkomlighetsfaktorer som erhålls från ovan nämnda modeller används sedan i modeller för att beräkna nedsjunkning och spårbildning. Det finns ett flertal modeller som syftar att beräkna detta. Gee-Clough (1980) skapade en modell som beräknar spårdjupet utifrån däckets rullmotstånd. En modell skapad av Maclaurin (1990) beräknar spårdjup efter första hjulpassagen.

Vid en jämförelse mellan ett flertal modeller för spårdjupsberäkning och uppmätta spårdjup i fält gav Maclaurin (1990) de spårdjupsvärden med bäst överensstämmelse och låg nära

uppmätta spårdjup i fältförsök (Wijekoon, 2012). Indatat till denna modell var den framkomlighetsfaktor som erhöles genom Turnages (1972) modell.

För att prognostisera spårdjupsutveckling vid stigande antal överfarter skapade Abebe, et al. (1989) en modell. Antalet överfarter i denna ekvation syftar till antalet hjulpassager. Fyra hjulöverfarter motsvarar en maskinöverfart med en åttahjulig skotare. Denna har även verifierats mot fältdata och påvisats ge väl överensstämmande värden. Indatat till denna modell är spårdjup efter första hjulpassagen från exempelvis Maclauren (1990).

I Finland genomfördes en studie för att undersöka hur väl matematiska modeller grundade på WES-principen kunde användas till att beräkna spårdjup. Denna studie genomfördes på moränmark och slutsatsen var att modeller går att använda för att förutse samt undvika allt för riskabla avverkningar (Saarilahti & Anttila, 1999).

En omfattande modell framtagen av Saarilahti (2002) syftar till att beskriva interaktionen mellan maskin och mark. Denna modell utgörs av ett flertal delmodeller. Ingångsvärdena till delmodellerna är justerbara för att kunna se hur samspelet mellan maskin och mark varierar. Delmodellerna utgörs bland annat av en maskinmodell där variablerna är motorstyrka, hjul och markkontaktmodell samt en förarmodell. Ytterligare en delmodell är mark och terrängmodellen där topografiska variabler tas in. En annan delmodell är ”trafficability of soil” där markparametrar och maskinens vikt ska påvisa bärigheten i marken. Den fjärde delmodellen skall beskriva rörligheten där dragkraft, rullmotstånd och så vidare är variabler. Den femte delmodellen är miljömässig rörlighet där spårdjup och nedsjunkning beskrivs. Den sjätte delmodellen beskriver körhastigheten som påverkas av bland annat motorstyrka och vibrationer (Saarilahti, 2002).

Ytterligare en studie som genomförts undersökte hur användbara modeller som prognostiserar spårdjup vid stigande antal överfarter under nordiska förhållanden. Modellerna var baserade på WES-metoden. Fälttester genomfördes för att jämföra modellerna mot faktiska spårdjup. Där fann de att en del modeller gav acceptabla resultat. Olikheter mellan modellerna och faktiska spårdjup uppstod bland annat där grova rötter och stenar armerade jorden (Saarilahti, et al. 2003).

1.6.1 Metoder för att beräkna spårdjup med bandutrustade skotare

Det finns en del metoder till att beräkna spårdjup med bandgående fordon. En ekvation framtagen av Willoughby & Turnage (1988) se Pirnazarov (2014) syftar till att kunna prognostisera nedsjunkning av såväl bandgående fordon som hjulburna fordon. Vid jämförelse mellan ekvationer och fältdata visade sig ekvationen för bandgående fordon ge värden på nedsjunkning som följer fältdata vid stigande antal överfarter. Däremot följde ekvationen för hjulburna fordon inte kurvan för spårdjupsutveckling i fält (Pirnazarov, 2014).

Den markparameter som används i denna modell är RCI (rating cone index). För att erhålla RCI skall konindex uppmätt med konpenetrometer sänkas med 25 %. Övriga parametrar i modellen är bandbredd, bandets kontaktlängd mätt på en hård, slät yta, antalet överfarter samt vertikal belastning per bandsektion.

För majoriteten av de modeller som redovisats ovan och syftar till att prognostisera spårdjup var en beräkningsförutsättning att skotaren körde upprepade gånger på samma basväg. Ofta var också en förutsättning att maskinens vikt var konstant och utgjordes av samma massa vid varje överfart. Således möjliggjorde de inte prognoser av att en skotare kör ut på basvägen utan lass och återvänder med lass eller att laststorleken varierar mellan vändorna.

1.7 Syfte

Syftet var att prognostisera spårdjupsutveckling för Komatsu Forests olika skotarmodeller med olika däckstorlekar, ringtryck och axelbelastningar, med eller utan boggiband vid upprepade överfarter på sedimentmarker med olika bärighet.

Målsättningen var att presentera prognoser för spårdjupsutveckling vid stigande antal överfarter i ett Excelbaserat redskap där olika parametrar kan varieras.

Arbetet begränsades till att prognostisera spårdjup. Övriga faktorer, som t.ex. markkomprimering, ingår endast i kunskapssammanställningen. På grund av de matematiska ekvationernas utformningar prognostiserades enbart upprepade överfarter av lastade eller olastade skotare. Således gjordes inga prognostiseringar där varannan överfart var olastad och varannan lastad. Ytterligare avgränsningar i arbetet var att det begränsades till skotarmodeller med 8 lika stora hjul samt att prognoserna begränsas till körning rakt fram utan kurvtagning.

2 Material och metod

2.1 Val av modeller och metoder för spårdjupsprognostisering

Under de litteraturstudier som gjordes identifierades ett antal metoder och modeller som tidigare använts vid beräkning av spårdjup. Bland de modeller som identifierats gjordes en utsällning för att finna det mest lämpade räknesättet till att prognosticera spårdjup och spårdjupsutveckling. Tillvägagångssätten såg något olika ut för prognostisering med enbart hjul eller med band. Urvalet av räknesätt till detta arbete genomfördes genom att väga samman litteratur som utvärderat räknesätt samt jämfört dessa med fältdata. En mängd WES baserade räknesätt diskuteras och jämförs i Wijekoon (2012), Pirnazarov (2014) och Saarihahti, et al. (2003). Där framhävs en del av de räknesätt som använts i detta arbete. De matematiska modeller som använts i arbetet redovisas matematiskt i resultatkapitlet.

2.1.1 Prognostisering av spårdjup med hjul

Den metod som använts i detta arbete för att prognostisera spårdjupsutveckling vid körning med enbart hjul var ett WES baserat räknesätt. Efter noggranna litteraturstudier rörande prognostisering samt jämförelser i ovan nämnda arbeten genomfördes prognostiseringarna enligt den metodik som redovisas nedan.

Vid framtagandet av prognoserna för enbart hjul användes räknesätt enligt Turnage (1972) för att erhålla framkomlighetsfaktorn.

Nästa steg utgjordes av att använda den framkomlighetsfaktor som uträknats för respektive skotarmodell i tidigare steg som indata till den modell som skapats av Maclauren (1990). När det genomförts erhöles en prognostisering av spårdjup efter första hjulspassagen.

Därefter användes spårdjupsvärdet från Maclauren (1990) som indata i den modell som Abebe, et al. (1989) tagit fram. Denna modell utgjorde det slutgiltiga steget vid prognostisering av spårdjupsutveckling för skotare med enbart hjul.

I detta arbete användes ett standardvärde för konindex på 1000 kPa vid prognostisering av spårdjup vid körning utan band. Detta valdes ur det avseende att det motsvarar en bärlighet för typisk skogsmark (Andersson, 2010, Saarihahti, et al. 2003).

2.1.2 Prognostisering av spårdjup med bandutrustade skotare

Vid prognostisering av spårdjup med bandutrustade skotare användes modell enligt Willoughby & Turnage (1988). De presenterar räknesätt för såväl bandutrustade fordon för såväl fordon utan band. Räknesättet för bandutrustade fordon har i Pirnazarov (2014) påvisats skapa prognoser för skotare som nära liknar spårdjupsutveckling uppmätt i fältförsök.

Arbetsmetodikerna i detta skeende var liknande det vid prognostisering med enbart hjul. Vid prognostisering av spårdjup med band användes endast bandmodellen Olofsfors EVO.

Under arbetets gång har det genomgående arbetats i programmet Microsoft Excel. De matematiska formlerna matades in manuellt i programmet. För en inledande nivåläggning av modellerna användes uppmätta spårdjup från en äldre skotare, Valmet 860.3, från en tidigare studie (Pirnazarov, 2014). När dessa genomförts och modellerna nivålagts påbörjades arbete

med att prognostisera spårdjupsutvecklingen med Komatsu Forests aktuella skotarmodeller. Visualiseringar av prognoserna skapades löpande under arbetets gång, för såväl bandgående som hjulburna skotaralternativ. Vid prognostiseringarna av spårdjupsutveckling vid stigande antal överfarter har ett medelvärde på konindex nyttjats.

Utöver de prognostiseringar som genomförts ovan genomfördes ett antal känslighetsanalyser. Känslighetsanalyserna utfördes bland annat genom att prognostisera jämförande spårdjupsutveckling för samtliga av Komatsu Forests skotarmodeller vid gemensam mängd skotat virke. Det genomfördes även jämförelser på hur en ändrad viktfordelning mellan fram och bakaxel skulle påverka spårdjupsutvecklingen. Viktfördelningen mellan fram och bakaxel skiljer sig endast marginellt mellan olika skotarmodeller. Vid fullt lass ligger den kring 65 % vikt på bakaxeln och 35 % vikt på framaxel. Olastad ligger viktfordelningen omvänt med den största andelen av maskinens vikt fördelad på framaxeln. Det beror på att de allra flesta skotare har motorn monterad över framaxeln. I känslighetsanalyserna har även viktfordelningen ändrats för att jämföra hur detta skulle kunna påverka spårdjupsutvecklingen.

Vid prognostisering av spårdjup med band användes ett standardvärde för konindex på 670 kPa. Detta värde valdes ur den synpunkten att det motsvarar en bärighet där band kan komma att vara nödvändiga för att undvika allvarliga körskador (Andersson, 2010, Saarilahti, et al. 2003). Det motsvarar ett RCI på 500 kPa.

2.1.3 Skapande av prognostiseringsverktyg för spårdjupsutveckling

Prognostiseringsverktyget baserades på de räknesätt som redovisats ovan. Redskapet utformades för att möjliggöra jämförelser mellan olika skotarmodeller samt olika utrustningsalternativ och dess inverkan på spårbildningen. Det ställdes upp i radsystem i Microsoft Excel där möjligheter finns att jämföra till exempel olika däckalternativ för en och samma skotare eller olika skotarmodellers spårdjupsutveckling vid en viss given traktstorlek. Traktstorleken angavs i hur stor mängd (ton) virke som skall skotas.

2.2 Indata till prognostiseringen

De maskindata som använts i studien var befintliga maskinspecifikationer på skotare från Komatsu Forest (tabell 4). Valet av maskinspecifikationer gjordes utifrån vilket indata som krävdes för de matematiska modellerna. Vissa data har räknats om till de enheter som krävs av modellerna. Maskinvikt, bandvikt och lastvikt har räknats om från kg till kN med gravitationskonstanten $9,82 \text{ m/s}^2$.

Tabell 4. Maskinspecifikationer för Komatsu Forests skotarmodeller av årsmodell 2015

Table 4. Machine specifications of Komatsu Forests 2015 forwarder models

Parameter	Skotarmodell									
	835		845		855.1		865		895	
Antal däck (st)	8		8		8		8		8	
Maskinvikt (kg)	15800		16600		17900		19100		23700	
Totalvikt lastad (kg)	26800		28600		31900		34100		43700	
Totalvikt (last & band) (kg)	29800		31960		35260		37460		48100	
Lastkapacitet (kg)	11000		12000		14000		15000		20000	
Fordonsdel	Fram	Bak	Fram	Bak	Fram	Bak	Fram	Bak	Fram	Bak
Bandvikt (kg/par)	1500	1500	1680	1680	1680	1680	1680	1680	2200	2200
Vikt olastad (kg)	9100	6700	9500	7100	10630	7270	11220	7880	13500	10200
Totalvikt lastad (kg)	9100	17700	9500	19100	10630	21270	11220	22880	13500	30200
Totalvikt (last & band) (kg)	10600	19200	11180	20780	12310	22950	12900	24560	15700	32400
Lastfördelning, olastad utan band (%)	58	42	57	43	59	41	59	41	57	43
Lastfördelning, totalvikt utan band (%)	34	66	33	67	33	67	33	67	31	69
Lastfördelning, totalvikt med band (%)	36	64	35	65	35	65	34	66	33	67
Axelavstånd boggi (cm)	143	143	152	152	152	152	152	152	172	172
Hjulradie, olastad (cm)	61,5	61,5	61,5	61,5	67	67	67	67	76,3	76,3
Bandbredd EVO (cm)	85	85	86	86	86	86	86	86	93	93

För varje analyserad skotarmodell finns ett antal däckalternativ (tabell 5) som innebär olika dimensioner på däcken (tabell 6).

Tabell 5. Befintliga däckalternativ till Komatsu Forests skotarmodeller. De fetmarkerade är de vanligaste däckalternativen

Table 5. Existing tire alternatives for Komatsu Forest forwarder models. Marked with fat text are the most commonly used alternatives

Skotarmodell	Däckalternativ 1	Däckalternativ 2	Däckalternativ 3
835	600/55x24,5	650/45x24,5	710/45x24,5
845	600/55x26,5	710/45x26,5	
855.1	600/55x26,5	710/45x26,5	800/40x26,5
865	600/55x26,5	710/45x26,5	800/40x26,5
895	780/50x28,5		

Tabell 6. Dimensioner för Komatsu Forests olika däckalternativ (Jfr. Figur 1)

Table 6. The dimensions of the different tire alternatives (compare Figure 1)

Däck	Däckbredd (m)	Däckdiameter (m)	Däcksektionens höjd (m)
600/55x24,5	0,60	1,28	0,33
650/45x24,5	0,65	1,21	0,29
710/45x24,5	0,71	1,26	0,32
600/55x26,5	0,60	1,33	0,33
710/45x26,5	0,71	1,31	0,32
800/40x26,5	0,80	1,31	0,32
780/50x28,5	0,78	1,50	0,39

För varje analyserad skotarmodell valdes ett gemensamt bandalternativ med olika dimensioner för olika skotarmodeller (tabell 7).

Tabell 7. Bandbredd samt kontaktlängd för Olofsfors EVO. Fram och bak avser fram och bakvagn

Table 7. Track width and contact length for Olofsfors EVO

Skotarmodell	Bandbredd (m)		Kontaktlängd (m)	
	Fram	Bak	Fram	Bak
835	0,85	0,85	1,43	1,43
845	0,86	0,86	1,52	1,52
855.1	0,86	0,86	1,52	1,52
865	0,86	0,86	1,52	1,52
895	0,93	0,93	1,72	1,72

3 Resultat

3.1 Beräkningsmodeller för att prognostisera spårdjupsutveckling

3.1.1 Spårdjup efter hjul

Det första steget (Formel 2) utgörs av att från Turnage (1972) beräkna framkomlighetsfaktorn (N_T) utifrån däckdimensioner och däckbelastningar. Parametrarna i formeln utgörs främst av dimensioner och belastningar för respektive däck (Jfr. Figur 1).

$$(2) \quad N_T = \frac{CI \times b \times d}{W} \times \sqrt{\frac{\delta}{h}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{b}{2} \times d\right)}$$

Där de ingående parametrarna och deras sorter är:

N_T = Framkomlighetsfaktor (sortlös)

CI = Konindex, markens penetrationsmotstånd mätt med en konpenetrometer (kPa)

b = Däckbredd (m)

d = Däckdiameter (m)

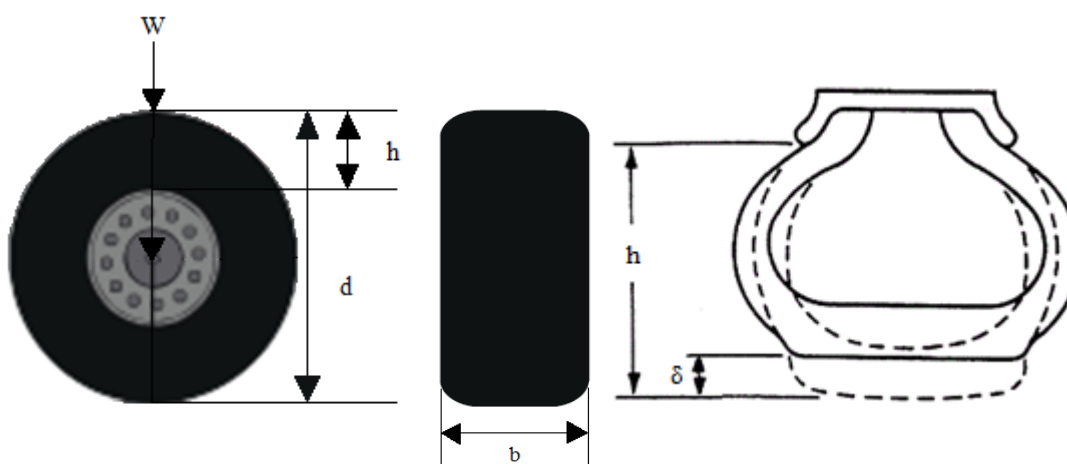
W = Hjulbelastning (kN)

δ = Däckets deflektion mot en fast yta, erhålls från formel (3) (m)

h = Höjd av däcksektionen (m)

$$(3) \quad \delta = 0,008 + 0,001 \left(0,365 + \frac{170}{P_i}\right) W$$

Där P_i = Ringtryck (kPa)



Figur 1. Däckdimensioner som ingår i de matematiska modellerna.

Figure 1. Tyre dimensions used in the mathematical models.

Nästa steg utgörs av att använda framkomlighetsfaktorn (N_T), som beräknats för respektive skotarmodell i tidigare steg, som indata till den modell som skapats av Maclaren (1990)

(Formel 4). När det genomförts erhålls en prognostisering av spårdjup efter första hjulspassagen.

$$(4) \quad z_{rut} = d \left(\frac{0,224}{N_T^{1,25}} \right)$$

Där z_{rut} = Spårdjup (m)

N_T = Framkomlighetsfaktor erhållen från Formel (2).

Därefter används spårdjupsvärdet från Formel 4 som indata i den modell som Abebe, et al. (1989) tagit fram (Formel 5). Denna modell utgör det slutgiltiga steget vid prognostisering av spårdjupsutveckling för skotare med hjul.

$$(5) \quad Z_n = z_1 \times n^{\frac{1}{a}}$$

Parametrarna i denna ekvation utgörs av:

Z_n = Spårdjup efter n antal överfarter (m)

z_1 = Spårdjup efter första överfarten (m)

a = Koefficient, bör ligga mellan 2-3 (Abebe, et al., 1989).

3.1.2 Spårdjup efter band

Vid prognostisering av spårdjup med bandutrustade skotare beräknas det enligt Willoughby & Turnage (1988) (Formel 6).

$$(6) \quad z = 0,00443 e^{\frac{5,88W}{(CI \times 0,75) \times b \times l}} \times N^{\frac{1}{2}}$$

Där:

z = spårdjup (m)

W = vertikal belastning per bandsektion (kN)

CI = konindex, markens penetrationsmotstånd mätt med en konpenetrometer (kPa)

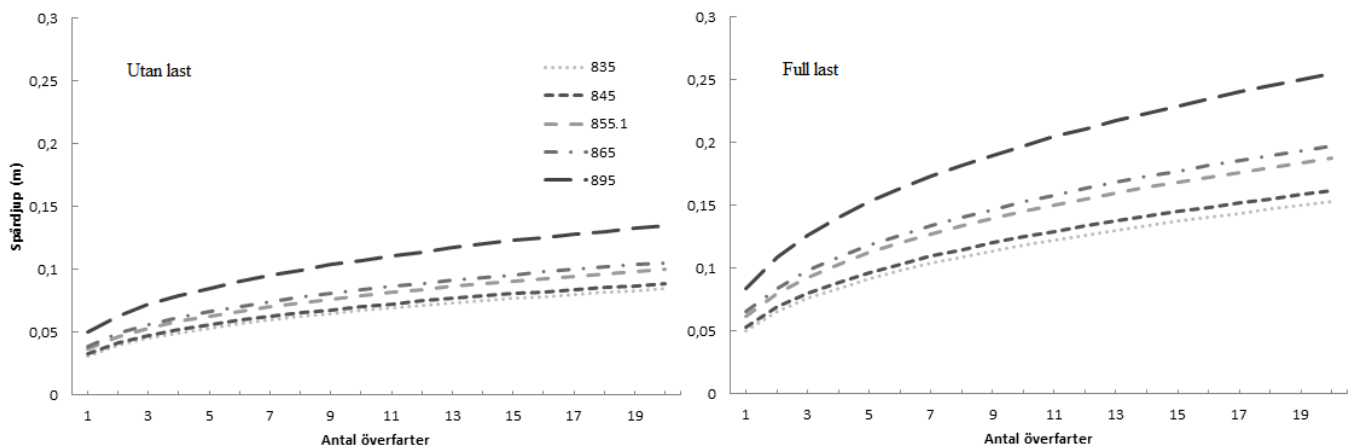
b = bandbredd (m)

l = bandets kontaktlängd mätt på en hård plan yta (m)

N = antalet överfarter

3.2 Prognostiserad spårdjupsutveckling

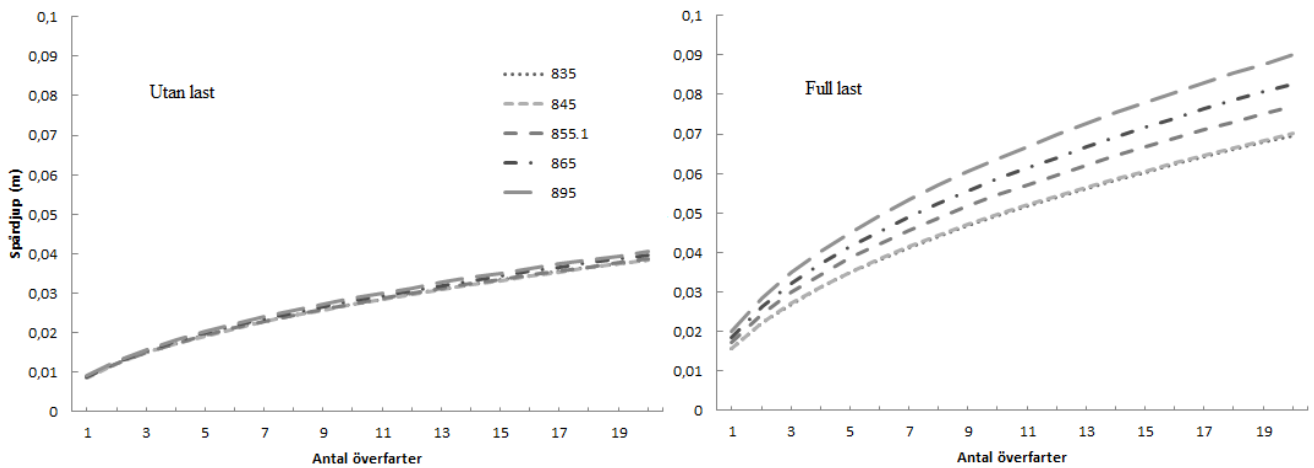
Prognostiserad spårdjupsutveckling utan last med hjul visar en relativt kraftig utveckling efter första överfarten för att sedan endast öka marginellt vid påföljande överfarter (Figur 2). Det kan utläsas att de minsta skotarmodellerna (Komatsu 835 & Komatsu 845) gav de minsta spårdjupen vid gemensamt antal olastade överfarter. Den största skotarmodellen (Komatsu 895) gav cirka 50 % djupare körspår än Komatsu 835 givet samma antal överfarter. Prognosen vid körning med fullt lass visar på att Komatsu 895 skapar den kraftigaste spårbildningen gentemot övriga skotarmodeller vid identiska markförhållanden. Förhållandet mellan maskinernas vikt är i stort sett detsamma vid olastade som lastade förhållanden. Skotarmodellerna Komatsu 835 och Komatsu 845 visar på snarlika spårdjupsutvecklingar i båda fallen. Detsamma kan utläsas för Komatsu 855.1 och Komatsu 865. I prognosen skapar Komatsu 895 en relativt kraftig spårbildning redan efter första överfarten vid körning med fullt lass. De däckalternativ som användes var de vanligast förekommande (Jfr Tabell 5).



Figur 2. Spårdjup som funktion av antalet överfarter vid körning med Komatsu Forests olika skotarmodeller utan band. Ringtryck för samtliga skotarmodeller var 600 kPa. Aktuellt konindex var 1000 kPa. Aktuella däckalternativ var 710/45x24,5 för Komatsu 835, 710/45x26,5 för Komatsu 845, Komatsu 855.1 & Komatsu 865 samt 780/50x28,5 för Komatsu 895.

Figure 2. Rut depth as a function of the number of passes at driving with Komatsu Forests different forwarder models without tracks. Tire pressure for all forwarder models were 600 kPa. Actual cone index was 1000 kPa. Actual tire options were 710/45x24.5 for Komatsu 835, 710/45x26.5 for Komatsu 845, Komatsu 855.1 & Komatsu 865 and for Komatsu 895 it was 780/50x28.5. In the left figure the forwarders were simulated to be unloaded and in the right figure they were simulated to be fully loaded.

Prognostiserade spår djup vid körning med Komatsu Forests skotarmodeller utan last med band var mycket små (Figur 3). Skillnaden mellan de olika skotarmodellers spårbildning var nästan obefintlig. Men vid prognostisering av spår djupsutvecklingen vid körning med fulla lass skapas en kraftigare spårbildning. Spår djupen skiljer sig även åt mellan samtliga skotarmodeller med undantag mellan skotamodellerna Komatsu 835 och Komatsu 845. Prognostiseringen av spår djupsutvecklingen mellan dessa skotarmoder följs åt närmast identiskt.

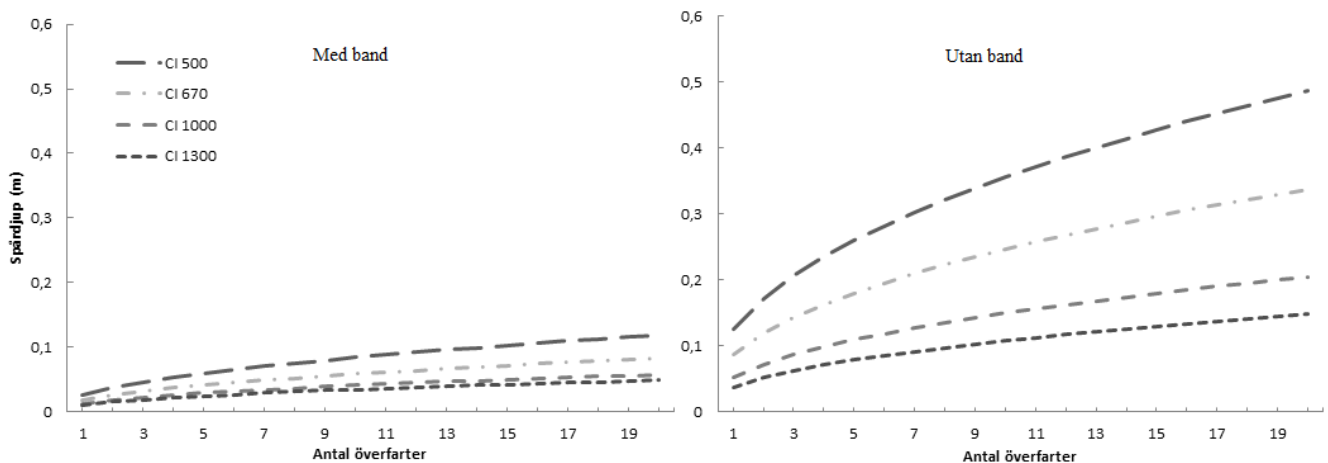


Figur 3. Spår djup som funktion av antalet överfarter vid körning med Komatsu Forests olika skotarmodeller med band. Konindex 670 kPa.

Figure 3. Rut depth as a function of the number of passes at driving with Komatsu Forests actual forwarder models with tracks. Actual cone index was 670 kPa. In the left figure the forwarders were simulated to be unloaded and in the right figure the forwarders were simulated to be fully loaded.

3.3 Känslighetsanalyser

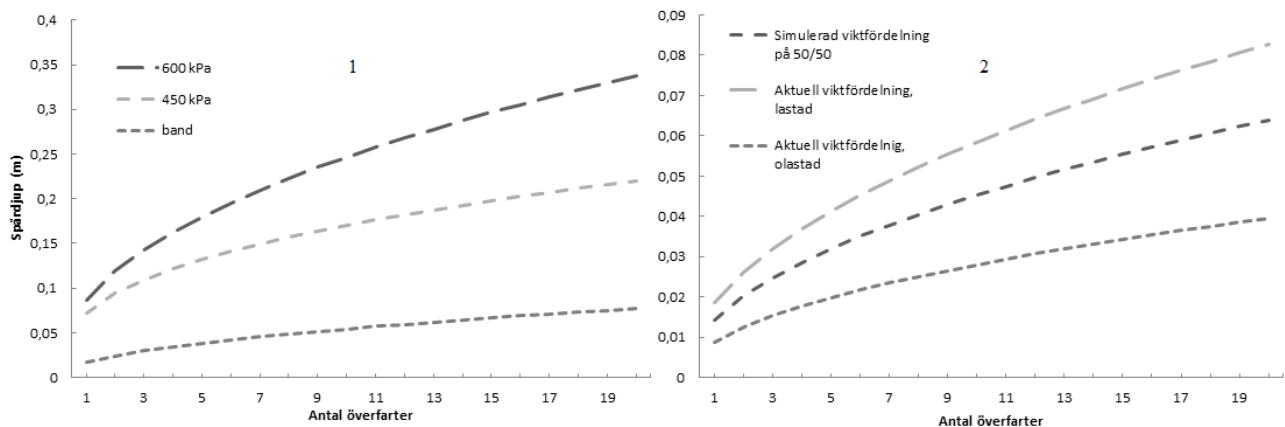
Prognostiserad spårdjupsutveckling vid körning med fullt lastad Komatsu 865 med band eller utan band vid olika bärighetsförhållanden visar på att bandutrustning minskar spårbildningen vid samtliga konindex (Figur 4). Minskningen av spårbildning med hjälp av band är störst vid låga konindex. Vid högre konindexvärden är skillnaden i spårdjup inte lika stor mellan att köra utan band eller med band. Vid konindex 670 kPa och 500 kPa skapar den första överfarten utan band en spårbildning som är lika djup som efter 20 överfarter med band.



Figur 4. Spårdjup som funktion av antalet överfarter vid olika bärighet, konindex (CI), vid körning med fullt lass med en Komatsu 865 med eller utan band.

Figure 4. Rut depth as a function of the number of passes at different ground bearing capacities, cone index (CI), at driving fully loaded with a Komatsu 865. To the left bogie tracks are simulated to be used and to the right no bogie tracks are simulated.

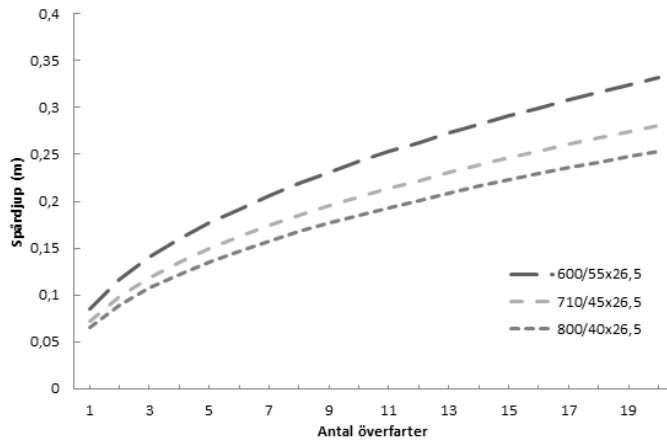
Ett ringtryck på 450 kPa kan enligt prognostisering bidra till en minskad spårbildning jämfört med ett ringtryck 600 kPa (Figur 5:1). Det kan observeras en omfattande spårbildning i prognostiseringen om skotaren (Komatsu 865) skulle köras med fulla lass och ett ringtryck på 600 kPa vid konindex 670 kPa. Att utrusta skotaren med band skulle leda till den lägsta markpåverkan och spårbildningen i detta exempel. Efter en överfart var spårdjupet vid ringtryck 450 kPa 83 % av spårdjupet vid 600 kPa. Efter 20 överfarter var samma förhållande 65 %. I prognosen bidrog band till en minskning av spårdjupet med cirka 85 % jämfört med däck och ringtryck 600 kPa. Jämförande prognostisering av spårdjupsutveckling mellan två olika viktfördelningar, aktuell samt simulerad 50/50 viktfördelning visar att en jämn viktfördelning kan vara fördelaktigt gällande spårbildning (Figur 5:2). Den simulerade viktfördelningen på 50/50 mellan fram och bakvagn gav cirka 20 % lägre spårdjup än befintlig viktfördelning. Olastad skotare gav cirka 50 % lägre spårdjup än vad lastad skotare med befintlig viktfördelning skapade i denna prognos.



Figur 5. Spårdjup som funktion av antalet överfarter vid körning med fulla lass vid varierat ringtryck respektive med band med en Komatsu 865 vid konindex 670 kPa. Aktuellt däckalternativ var 710/45x26,5 (Figur 5:1). Spårdjup som funktion av antalet överfarter vid olika viktfördelning vid fullt lass samt tomt lass vid aktuell viktfördelning med en Komatsu 865 med band vid konindex 670 kPa. 50/50 innebär en simulerad lika viktfördelning mellan fram och bakvagn (Figur 5:2).

Figure 5. To the left: Rut depth as a function of the number of passes at driving fully loaded with different tire pressures or with tracks with a Komatsu 865 at a cone index of 670 kPa. The actual tire option was 710/45x26.5). To the right: Rut depth as a function of the number of passes with different weight distribution with full load and actual weight distribution without load with a Komatsu 865 using tracks at a cone index of 670 kPa.

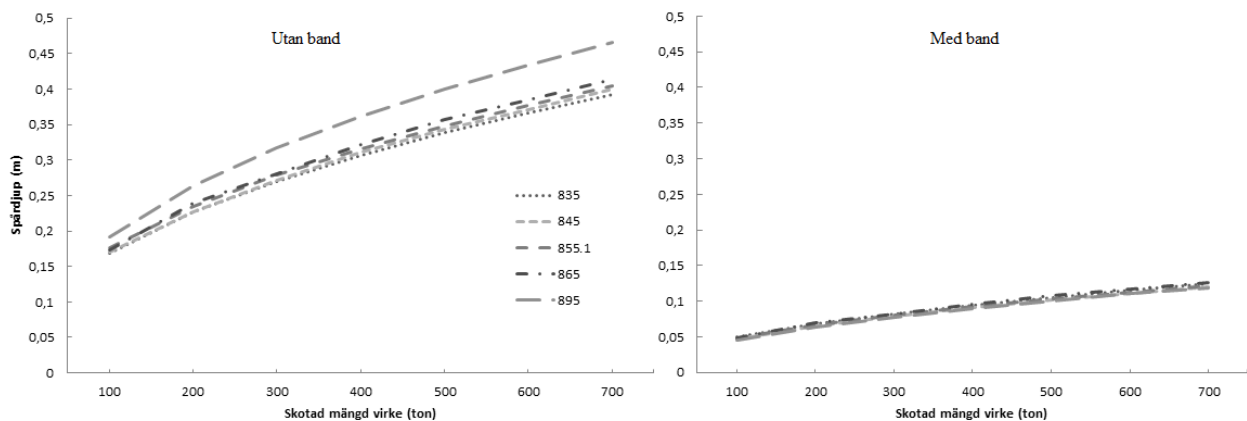
Prognostiserad spårdjupsutveckling för en fullt lastad Komatsu 865 med tre olika däckalternativ indikerar att bredare däck skapar en mindre spårbildning (Figur 6). Däckalternativet med 710 mm breda däck skapar i prognosen 15 % mindre spårdjup än däckalternativet med 600 mm breda däck. 800 mm breda däck skapar i detta exempel 24 % mindre spårdjup än 600 mm breda däck.



Figur 6. Spårdjup som funktion av antalet överfarter vid körning med fulla lass vid olika däckalternativ med en fullastad Komatsu 865 vid ett konindex på 1000 kPa och ringtryck 600 kPa.

Figure 6. Rut depth as a function of the number of passes at driving fully loaded with three different tire options with a Komatsu 865 at a cone index of 1000 kPa and tire pressure 600 kPa.

Prognostiserad jämförelse av spårdjupsutvecklingen mellan Komatsu Forests skotarmodeller vid gemensam mängd skotat virke med fulla lass utan band visar relativt små skillnader (Figur 7). Det kan dock observeras att Komatsu 895 var den skotarmodell som skapade den kraftigaste spårdjupsutvecklingen i prognosen. Övriga fyra skotarmodellers spårdjupsutveckling följs åt tämligen lika där Komatsu 865 skapar den kraftigaste spårbildningen och Komatsu 835 den minsta. En skotningsmängd på 500 ton motsvarar 25 överfarter med fullt lastad Komatsu 895 och 46 överfarter med fullt lastad Komatsu 835. En jämförelse av prognostiserad spårdjupsutveckling mellan Komatsu Forests olika skotarmodeller med band beroende av den mängd virke som skotas ut visar inte på några skillnader (Figur 7).



Figur 7. Spårdjup som funktion av skotad mängd virke vid körning med fulla lass med Komatsu Forests olika skotarmodeller med eller utan band. Ringtryck för samtliga skotarmodeller utan band var 600 kPa. Aktuellt konindex var 1000 kPa utan band och med band 670 kPa. Aktuella däckalternativ var 710/45x24,5 för Komatsu 835, 710/45x26,5 för Komatsu 845, Komatsu 855.1 & Komatsu 865 samt 780/50x28,5 för Komatsu 895.

Figure 7. Rut depth as a function of the amount of forwarded timber at driving fully loaded with Komatsu Forests actual forwarder models with or without tracks. Tire pressure for all forwarder models were 600 kPa. Actual cone index without tracks was 1000 kPa and 670 kPa with tracks. Actual tire options were 710/45x24.5 for Komatsu 835, 710/45x26.5 for Komatsu 845, Komatsu 855.1 & Komatsu 865 and for Komatsu 895 it was 780/50x28.5. To the left no bogie tracks are simulated to be used and to the right bogie tracks are simulated.

4 Diskussion

4.1 Resultat

Resultaten kan anses trovärdiga, de pekar tydligt mot att en tyngre maskin skapar kraftigare spår djup jämfört med en lättare maskin vid identiska förhållanden och antal överfarter. Undantagsvis visar resultat i figur 2 att spår djupsutvecklingen för Komatsu 835 och Komatsu 845 var i det närmaste identisk. I det exemplet simulerades skotarna köra med fullt lass samt utrustade med band. En teknisk skillnad mellan maskinmodellerna utöver storleken var att Komatsu 845 hade bredare band på bakre boggin än på den främre. Komatsu 835 hade lika breda band på såväl främre som bakre boggi. Detta kan förklara varför de två maskinerna uppvisar i det närmsta identisk spår djupsutveckling.

Prognostiserad spår djupsutveckling för fullt lastad Komatsu 895 utan band var ca 15 cm efter fem överfarter (Figur 2). Detta kan jämföras mot uppmätta spår djup i en studie av Eliasson (2005) där en lastad Timberjack 1710 med en massa på 37,8 ton skapat spår djup på 9 cm efter fem överfarter. Marken i den studien utgjordes av en sandig moig morän med ett konindex på 985 kPa. Ringtrycket på skotaren i den studien var 600 kPa. En prognostisering med Komatsu 895 givet samma massa som i Eliasson (2005) gav ett spår djup på cirka 10 cm vid ett konindex på 1000 kPa och ett ringtryck på 600 kPa. Detta ger ett intryck av att prognostiseringar av spår djup är möjliga att genomföra med relativt god precision om data för aktuell skotare samt markens konindex är känt.

Prognostisering av körning med lastade skotare utan band visade på en kraftig spårbildning redan efter första överfarten. Jämfört med fältresultat från Pirnazarov (2014) skapades inte lika kraftig spårbildning efter en överfart. Den prognostiserade spår djupsutvecklingen vid fyra överfarter eller fler visade däremot på liknande spår djupsutveckling som vid fältförsöket.

Olastad körning med band visar på en ytterst begränsad spårbildning. Detta kan ses som relativt rimliga värden då spår djupsutveckling vid olastad körning med skotare (Valmet 860.3) under fältförsök visade på en liknande utveckling (Pirnazarov, 2014). I den studien var spårbildningen ökande fram till efter ett par överfarter där den näst intill stagnerade och efter 10 överfarter hade ett prognostiserat spår djup på 5 cm skapats. Prognostiserat spår djup med Komatsu 865 redovisade ett spår djup på cirka 3 cm.

Resultatet i figur 5 visar på att bandutrustning eller ett lägre ringtryck på skotaren kan bidra till att minska spårbildningen. Detta resultat överensstämmer med en studie gjord av Sakai, et al. (2008). I den studien mättes spår djup efter överfarter av skotare och visade på ett samband där band och lägre ringtryck bidrar till en minskad spårbildning.

Resultatet i denna studie visar att det endast skiljer sig marginellt i hur djupa spår som skapas av respektive skotarmodell vid gemensam mängd skotat virke. Det finns andra aspekter att tänka på gällande val av skotare. Ekonomiskt och tidsmässigt kommer det sannolikt att bli dyrare att köra den minsta skotaren (Komatsu 835) ett större antal vändor jämfört med att köra den största skotaren (Komatsu 895) ett lägre antal vändor.

Noggrannheten på prognoserna kan inte helt fastställas innan fältförsök har utförts så prognostiseringarna kan avvika från spårdjupsutvecklingar i verkligheten. En typisk skogsmark är inte homogen som i prognostiseringarna. Det förekommer variationer i förekomst av sten och block, variationer i markfuktighet, förekomst av rötter m.m.

Det sätt som detta arbete genomförts på medförde en omfattande litteratursamling. Bland litteraturen identifierades befintliga räknesätt för spårdjup. En stor mängd av de räknesätt som identifierats grundas på WES principen. En klar majoritet av räknesätten beräknar endast spårdjup för hjulgående fordon, således påträffades endast ett fåtal räknesätt för bandutrustade fordon. Valet av räknesätt gjordes utifrån den litteratur som påträffats, det kan därför finnas ytterligare räknesätt som inte identifierats under litteratursamlingen.

Den manuella inmatningen av räknesätten i Microsoft Excel var bitvis mycket tidskrävande och inledningsvis uppstod en mängd komplikationer. Somliga grundade sig i direkta felberäkningar eller felskrivningar. Den initiala nivåläggnings av räknesätten resulterade i prognostiserade spårdjupsvärden näst intill identiska med tidigare studier, exempelvis Pirmazarov (2014).

4.2 Antaganden i detta arbete

Prognoserna har skapats med hjälp av befintliga modeller och metoder för att prognostisera spårdjupsutveckling. Vid utvecklingen har ett antal antaganden varit nödvändiga för att skapa prognoserna. Dessa antaganden skulle kunna utgöra felkällor.

Prognostiseringar syftade att genomföras för sedimentmarker. Anledningen till detta var att de utgör ett mer homogent underlag. De matematiska modellerna prognostiserar spårdjup på homogena underlag som inte varierar i bärighet. Därför antogs modellerna vara mer lämpade för sedimentmarker än moränmarker där bärigheten kan variera kraftigt vid inslag av stenar och block. Ytterligare en jordart som utgör ett relativt homogent underlag är torvmarker. Dessa marker har dock generellt en mycket låg bärighet och är problematiska ur drivningssynpunkt (Jfr tabell 2). Torvmarker utgörs främst av organiskt material där den övre delen består av levande organiskt material och de undre delarna av mer eller mindre nedbrutet organiskt material. Den övre delen som består av en rotmatta är den del som utgör bärigheten i torvmarker och bryts denna bidrar den nedre delen inte med någon betydande bärighet. Rotmattans styrka är beroende av vilka arter vegetationen utgör samt dess densitet (Ala-Illomäki, 2006). Detta samband har även påvisats i en annan studie där en ökad stående volym virke m³/ha leder till en ökad bärighet på torvmark (Uusitalo & Ala-Illomäki, 2013). För att prognostisera spårdjupsutveckling på torvmarker krävs modeller som är anpassade för torvmarker då markmekaniken skiljer sig åt från mineraljordar. De modeller som använts i detta arbete är inte anpassade för torvmark och prognoser bör därför ej utföras mot torvmarker.

En studie utförd av Zeleke, et al. (2007) syftade till att prognostisera spårdjup för skördare och skotare på torvmark. Studien visar att det även är möjligt att utföra prognoser för spårdjup på torvmarker. Skillnaden gentemot det räknesätt som använts i denna rapport är att ingen konpenetrometer använts för att mäta markens bärighet. Istället för en konpenetrometer

nyttjades en anordning med tryckplattor för att mäta nedsjunkning vid ett visst tryck. Därefter prognostiserades spårdjup för kommande överfarter av fordon. Prognoserna visar på liknande resultat som denna studie där bandutrustning eller lägre ringtryck leder till minskade spårdjup även i dessa prognoser.

Koefficienten vid prognostisering av spårdjup utan band är variabel och bör ligga inom intervallet 2 - 3. Vid jämförelse mot fälldata har ett visst värde på denna parameter visat sig ge en spårutvecklingskurva som följer spårutvecklingen uppmätt i fält. Vid egna jämförelser mot fälldata visade sig ett värde på 2,2 ge en spårutvecklingskurva väl överrensstämmande med registrerat fälldata från (Pirnazarov, 2014). Detta vid ett ringtryck på 600 kPa. Med ett ringtryck på 450 kPa gav koefficienten 2,7 den mest likvärdiga spårdjupsutvecklingen för en Valmet 860.3. Denna modell motsvarar någorlunda dagens Komatsu 865. Vilket värde koefficienten skall ha för respektive skotarmodell behöver utredas ytterligare. Den modell i Excelredskapet som passar denna skotarmodell behöver inte nödvändigtvis passa de skotarmodeller som använts i Excelredskapet. Dessa skotarmodeller skiljer sig åt vad gäller vikt, däckstorlek och bandbredd. Samtliga av dessa parametrar påverkar hur maskinen interagerar med marken och hur spårdjupen utvecklas.

Ytterligare en faktor som skulle kunna ha en inverkan på prognostiseringarnas trovärdighet är att de matematiska modeller som använts endast tar hänsyn till belastning per däck eller bandsektion. De tar inte direkt hänsyn till maskinernas helhet eller viktfördelning. Dessa parametrar ligger till grund för hur stor belastningen blir per däck eller bandsektion.

De matematiska modeller som använts i detta arbete simulerar endast körning rakt fram. Vid skotning av virke längs en basväg är knappast vägen helt rak. Basvägar dras i terräng som ofta är ojämn. Basvägarna brukar ofta slingra sig fram i terrängen, något som inte detta redskap tar hänsyn till. Vid fältförsök har det dessutom visats att slingrig körning leder till en annorlunda spårdjupsutveckling och markmekanik. Exempelvis i Wijekoon (2012) visas det att spårdjupen efter 10 överfarter med en skotare är cirka 10 % djupare jämfört med överfarter efter rak körning utan kurvtagning. Edlund et al. (2012) visade att individuellt styrbara axlar kraftigt kan minska spårbildning vid kurvtagning jämfört med en traditionell skotare utrustad med band. Anledningen till detta tros vara att rotmattan behålls intakt. Vid kurvtagning med en traditionell skotare utrustad med band sker en skjuvning som sliter av rotmattan och dess bärande förmåga försvinner. Vid körning rakt fram skapar en traditionell skotare utrustad med band mindre spårbildning och den anses väl anpassad till detta arbete. Ett problem är hur dynamiken vid kurvtagning skall inkluderas vid prognostiseringar.

I de figurer som framtagits i detta arbete visas spårdjupen efter 20 överfarter med last eller utan last. Detta blir inte helt verklighetsförankrat då varannan överfart sker med tomt lass på väg ut till trakten där lastningen sker. På grund av de matematiska modellernas uppbyggnad var det inte möjligt att simulera körning där varannan vända var lastad och varannan olastad.

Den markparameter som ingick i de matematiska modeller som nyttjas i detta arbete var konindex. Detta värde visar markens motståndskraft mot penetration och kan även vara ett mått på markens bärighet. I en orörd jord har marken ett visst konindex. Efter en maskin passerat kompakteras jorden och det medför att konindex ökar. Detta sker efter varje

maskinöverfart till dess att jorden inte kan kompakteras mer. Var denna gräns går beror av vilken jordart marken utgörs av samt hur hög fuktigheten är i jorden. Det konindex som använts i detta arbete är konstant för varje överfart. Vid prognostisering av spårdjup vid körning utan band användes ett konindex på 1000 kPa. Det representerar ett medelvärde från 10 överfarter med en Valmet 860.3 (Wijekoon, 2012). Huruvida detta värde skulle vara högre eller lägre för en annan skotarmodell kan endast antas vara någorlunda proportionellt mot skotarmodellens vikt samt marktrycket. Vid prognostisering av spårdjup vid körning med band användes ett RCI på 500 kPa. Det motsvarar ett konindex på cirka 670 kPa uppmätt med konpenetrometer. Anledningen till att dessa konindex valdes var att skotning på bäriga marker med högt konindex kan utföras utan att utrusta skotaren med band utan att skada marken. Vid skotning på mjukare marker med lägre konindex utrustas vanligen skotaren med band för att öka bärigheten och minska markpåverkan.

En oklarhet som finns i Excelredskapet är att fältdata från tidigare studier endast sträcker sig upp till 10 överfarter. Det är dock möjligt att prognostisera fler överfarter. Vad som händer efter 10 överfarter i fält är inte studerat under just de förhållanden som Wijekoon (2012) gjorde. Därav är det inte verifierat hur spårdjupsutvecklingen ser ut vid 10 eller fler överfarter och detta är en begränsning av modellen.

De marker som spårdjup prognostiserats på i detta arbete motsvarar homogena sedimentmarker. Den vanligaste jordarten i Svensk skog utgörs av heterogena moränmarker där förekomst av stenar och block fläckvis ger en armerande effekt. Det kan likaväl förekomma partier med en stor andel finkorniga partiklar som har en sämre bärighet. Denna varierande bärighet behandlas inte i detta arbete och utgör en svårighet vid prognostiseringar av spårdjup.

En nackdel i prognoserna är att den matematiska formel som använts för att prognostisera spårdjupsutveckling med band inte tagit i beräkning hur banden var utformade. Endast bandets kontaktyta utifrån bredd och kontaktlängd tas hänsyn till. Formeln tar såvida inte hänsyn till hur glest det är mellan bandplattorna eller hur breda bandplattorna är. Det finns fler bandalternativ än det band som använts i denna studie. Exempelvis Olofsfors Magnum har bredare bandplattor och bidrar till en större kontaktyta än Olofsfors EVO. Dock så är Magnumbanden bredare än EVO-banden och dess större kontaktyta skulle behandlas i viss mån. Magnumband har en tyngre massa än EVO band och tillför cirka 400-500 kg mer massa till en skotare än EVO band. I verkligheten kan antas att skillnaden i spårdjupsutveckling mellan de två bandalternativen kunde vara större än vad som skulle prognostiseras med det räknesätt som använts i denna studie.

Ytterligare en parameter som har inverkan på spårbildning är bandspänning. Ett band med högre spänning kan bidra till en minskad spårbildning (Wong, 1995). En högre spänning på banden kan även minska motståndet mot marken. Däremot kan det innebära större slitage på banden och därmed ge banden en kortare livslängd (Wong, 1995). Denna parameter behandlas inte i detta arbete.

Kontaktytan för ett band beror dels på utformningen av bandet samt markens egenskaper. Deformation av däck bidrar till en större kontaktyta. Detta behandlas av de matematiska

modellerna som använts i detta arbete. Deformation av marken bidrar även till en ökad kontaktyta för såväl däck som för band (Malmberg & Granström, 1981). Det behandlas däremot inte i de matematiska modellerna.

På skogsmarker i Sverige utgörs det översta lagret av humus. Detta består av mer eller mindre nedbrutet organiskt material. Det översta lagret i skogsmarker innehåller även en stor del av trädens och växternas rötter. Dessa rötter har en armerande inverkan på marken och bidrar till en förstärkning. Denna faktor är något som inte tagits med i Excelredskapet. Det skulle vara möjligt att höja konindex på marker som innehåller en stor mängd rötter för att få med rötternas förstärkande förmåga i prognoserna.

Det Excelbaserade redskap som tagits fram skulle i praktiken kunna användas för att få en uppfattning om hur pass väl en basväg kan användas. Framförallt svagare partier längs basvägen, där skulle detta verktyg kunna användas som ett beslutsstöd till om den aktuella dragningen av basvägen är bra eller om den behövs dras över partier med högre bärighet för aktuell skotare och skotningsmängd. Det skulle även kunna användas för att fastställa hur stor mängd virke som kan transporteras på samma basväg innan för djupa spår skapats. Vid detta beslutsfattande kan det även användas i syfte att jämföra och fastställa vilken skotarmodell med vilket utrustningsalternativ som skulle vara bäst lämpad i syfte att undvika kraftig spårbildning.

Ytterligare användningsområden skulle kunna vara att jämföra befintliga däck och band mot simulerade däck och band. Där kan man se en skillnad i hur mycket bättre eller sämre bärighet en simulerad utrustning skulle bidra med.

Då denna studie främst riktar sig mot spårdjupsutveckling så prognosticeras ingen markkompaktering eller övriga körskador. Detta har sina för och nackdelar. fördelarna är att spårdjup är lätta att få grepp om och utgör de mest synliga skadorna. Det i sin tur ger en form av redskap till att även minska andra körskador. Exempelvis erosion och utlakning till följd av att vattnet ringer längs djupa hjulspår (Jfr Tabell 1).

4.3 Fortsatta studier

För att verifiera användbarheten och noggrannheten på prognostiseringarna bör de värden som genererats jämföras mot observationer i fält. Således bör ett antal fältförsök göras med de skotarmodeller och de utrustningsalternativ som använts i detta arbete. Där bör man mäta spårdjup efter maskinernas överfarter och påvisa huruvida väl prognoserna från detta arbete stämmer överens med faktiska förhållanden.

4.4 Slutsatser

- Prognostisering av spårdjup är möjliga att göra för olika skotarmodeller med framtagna redskap om konindex för marken samt maskinspecifikationer är kända.
- För att fastställa noggrannheten på prognostiseringen av spårdjup behövs fältstudier för olika skotarmodeller för att validera/kalibrera beräkningsmodellerna.

Litteraturförteckning

- Abebe, A., Tanaka, T. & Yamazaki, M. 1989. *Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic*. Journal of terramechanics, 26(2), pp. 139-148.
- Ala-Ilomäki, J. 2006. *The effect of weather conditions on the trafficability of unfrozen peatlands*. Forestry Studies – Metsanduslikud Uurimused 45: 57–66.
- Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W. & Verheyen, K. 2007. *Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils*. Forest ecology and management, Volym 241, pp. 162-174.
- Andersson, E. 2010. *Bättre åtkomst till avverkningstrakter med anpassat marktryck från avverkningsmaskinerna*. Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, Umeå, Arbetsrapport 276.
- Ayers, P. D. 1994. *Environmental-damage from tracked vehicle operation*. Journal of terramechanics, 31(3), pp. 173-183.
- Berg, S. 2011. *Vad är en körskada?*. Skogforsk, Uppsala, Resultat Nr 3 2011.
- Brais, S. & Camire, C. 1998. *Soil Compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada)*. Canadian Journal of Soil Science, 78(1), pp. 197-206.
- Brixius, W. W. 1987. *Traction prediction equations for bias ply tires*. American society of agricultural engineering, St. Joseph.
- Brunberg, T. 1999. *Flexibel drivning*. Skogforsk, Uppsala, Arbetsrapport, nr 435.
- Bygdén, G., Eliasson, L. & Wästerlund, I. 2003. *Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks*. Journal of terramechanics, 40(3), pp. 179-190.
- Christiansen, L., Karlsson, S. & Pettersson, J. 2014. *Skogsstatistisk årsbok 2014*. Kapitel 14, Skogsstyrelsen, Jönköping.
- Edlund, J., Bergsten, U. & Löfgren, B. 2012. *Effects of two different forwarder steering and transmission drive systems on rut dimensions*. Journal of terramechanics, Volym 49, pp. 291-297.
- Eliasson, L. 2005. *Effects of Forwarder Tyre Pressure on Rut Formation and soil Compaction*. Silva Fennica, 39(4), pp. 549-557.
- Eriksson, J., Nilsson, I. & Simonsson, M. 2005. *Wiklanders Marklära*. Studentlitteratur, Lund.
- Freitag, D. R. 1965. *A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on soft soils*. U S Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Report No. 3-688.

- Gee-Clough, D. 1980. *Selection of tyre sizes for agricultural vehicles*. Journal of agricultural engineering research, 25(3), pp. 261-278.
- Han, H.-S., Page-Dumroese, D., Han, S.-K. & Tirocke, J. 2006. *Effects of Slash, Machine Passes, and Soil Moisture on Penetration Resistance in a Cut-to-length Harvesting*. International Journal of Forest Engineering, 17(2), pp. 11-24.
- Hegazy, S. & Sandu, C. 2013. *Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number*. Journal of terramechanics, 50(5-6), pp. 303-310.
- Jansson, H. 2002. *Avverkningar under tjällossningsperioden - är de på en uthållig nivå*. Institutionen för skogsteknologi, SLU, Umeå, Studentuppsatser, nr 54.
- Kellogg, L. & Bettinger, P. 1994. *Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA*. Journal of Forest Engineering, 5(2), pp. 43-54.
- Kulturmiljölag. 1988. *Svensk författningssamling 1988:950*. Stockholm: (SFS 1988:950).
- Larsson, S. & Gretener, B. 1982. *Effekten av skogsavverkning på erosionsförloppet i sedimentslutningar i övre Klarälvsdalen*. Statens Naturvårdsverk, Solna, SNV PM 1601.
- Liu, K. 2009. *Influence of Turning on Military Vehicle Induced Rut Formation*. PhD diss, University of Tennessee, Knoxville.
- Liu, K., Ayers, P., Howard, H. & Anderson, A. 2010. *Influence of soil and vehicle parameters on soil rut formation*. Journal of terramechanics, 47(3), pp. 143-150.
- Löfgren, B. 1991. *Lägre lufttryck ger mindre spårdjup*. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Kista, Resultat nr 23.
- Maclauren, E. B. 1990. *The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres*. 10th international conference of the ISVTS, Kobe.
- Malmberg, C. E., Granström, L. 1981. *Terrängmaskinen, del 2*. Forskningsstiftelsen skogsarbeten. Stockholm.
- Muro, T. 1982. *Tyres/wheels and tracks state-of-the-art report*. Journal of Terramechanics, 19(1), pp. 55-69.
- National Research Agenda. 2012. *En nationell strategisk forskningsagenda - För den skogsbaserade näringen i Sverige*. NRA Sweden, Stockholm.
- Pirnazarov, A. U. 2014. *On forestry machine and soil interaction for sustainable forestry*. Licentiate thesis in Machine Design, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Rajaram, G. & Erbach, D. C. 1999. *Effect of wetting and drying on soil physical properties*. Journal of terramechanics, 36(1), pp. 39-49.

- Raper, R. L. 2005. *Agricultural traffic impacts on soil*. Journal of terramechanics, 42(3-4), pp. 259-280.
- Roll-Hansen, F. & Roll-Hansen, H. 1981. *Root wound infection of Picea abies at three localities in southern Norway*. Reports of the Norwegian Forest Research Institute, 36(4), pp. 1-18.
- Rula, A. A. & Nutall, C. J. 1971. *An analysis of ground mobility models (ANAMOB)*. U.S. Army engineer waterways experiment station, Vicksburg.
- Saarilahti, M. 2002. *Soil Interaction model*. Project Deliverable D2 (Work package No.1), Quality of Life and Management of Living Resources contract No. QLK5-1999-00991, Helsinki.
- Saarilahti, M. & Anttila, T. 1999. *Rut depth model for timber transport on moraine soils*. University of Helsinki, Helsinki.
- Saarilahti, M., Mulari, J. & Rantala, M. 2003. *Multicycle rut depth in forwarding*. University of Helsinki, Helsinki, ECOWOOD-Project.
- Saarman, E. 1992. *Träkunskap*. Sveriges Skogsindustrieförbund, Markaryd.
- Sakai, H. Nordfjell, T. Suadicani, K. Talbot, B. & Bøllehuus, E. 2008. *Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate*. Croatian Journal of Forest Engineering, 29(1), pp. 15-27.
- Segerstedt, R. 2013. *Det lönar sig att köra i samma gamla hjulspår*. Lantbruk & Skogsland, Land, Publicerad 2013-05-27.
- Sirén, M. Ala-Ilomäki, J. Mäkinen, H. Lamminen, S. & Mikkola, T. 2013. *Harvesting damage caused by thinning of Norway spruce in unfrozen soil*. International Journal of Forest Engineering, 24(1), pp. 60-75.
- Skogsvårdslagstiftningen. 2014. *Skogsvårdslagstiftningen - gällande regler 1 September 2014*. Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Sonesson, J. Mohtashami, S. Bergkvist, I. Söderman, U. Barth, A. Jönsson, P. Mörk, A. Jonmeister, T & Thor, M. 2012. *Beslutsstöd och metod för att minimera markpåverkan vid drivning - Slutrapport från projekt ID 0910/143-10*. Skogforsk, Uppsala, Arbetsrapport nr. 772-2012.
- Sundbaum, K. 2013. *Fältförsök visar: Få skador med välrisad väg*. Tema körskador, Skogforsk, Vision 1 - 2013.
- Turnage, G. W. 1972. *Performance of soils under tire loads*. US Army Waterways Experiment Station, Vicksburg.

Uusitalo J. & Ala-Ilomäki J. 2013. *The significance of above-ground biomass, moisture content and mechanical properties of peat layer on the bearing capacity of ditched pine bogs*. Silva Fennica 47(3) article id 993. 18 p.

Wijekoon, M. 2012. *Forest Machine Tire-Soil Interaction*. Industrial Engineering and Management, Machine Design, Kungliga Tekniska Högskolan, Master of Science Thesis, Stockholm.

Willoughby WE, Turnage GW. 1988. *Review of a procedure for predicting rut depth*. Unpublished memo.

Wismer, R. D. & Luth, H. J. 1973. *Off-road traction prediction for wheeled vehicles*. Journal of terramechanics, 10(2), pp. 49-61.

Wong, J.Y. 1995. *Application of the computer simulation model NTVPM-86 to the development of a new version of the infantry fighting vehicle ASCOD*. Journal of terramechanics. 32(1), pp. 53-61.

Wågberg, C. 2001. *Miljöeffekter och omfattning av spårbildning vid slutavverkning*. Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, Umeå, Studentuppsatser nr. 48.

Wästerlund, I. 1983. *Kantträdens tillväxtförluster vid gallring p.g.a. jordpackning och rotskador i stickväg. En sammanställning och bearbetning av litteraturuppgifter*. Sveriges skogsvårdsförbunds tidskrift, Utgåva 2, pp. 97-109.

Wästerlund, I. & Andersson, E. 2011. *Increased harvesting operation using adapted ground pressure to soil conditions*. 17th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems - September 18-22, Blacksburg.

Wästerlund, I., Brandtberg, T., Eliasson, P. & Widmark, M. 1990. *Samband Marktryck, Markskador och tillväxt efter körning med tung skotare på siltig sandjord*. Institutionen för Skogsteknik, SLU, Garpenberg, Uppsatser och Resultat nr. 169.

Yong, R., Fattah, E. & Skiadas, N. 1984. *Vehicle traction mechanics*. Developments in agricultural engineering 3. Elsevier, Amsterdam.

Zelege, G. Owende, P.M.O. Kanali, C.L. & Ward, S.M. 2007. *Predicting the pressure-sinkage characteristics of two forest sites in Ireland using in situ soil mechanical properties*. Biosystems engineering 97. pp. 267-281.

Öhman, E. 2013. *Hjulskotarens tekniska utveckling*, Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, Umeå: Arbetsrapport 395.