



Effekt av Central Tire Inflation på strukturellt svaga skogsbilvägar

Effect of Central Tire Inflation on weak forest roads

Gustav Karlefors

Arbetsrapport 11 2014
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

Effekt av Central Tire Inflation på strukturellt svaga skogsbilvägar

Effect of Central Tire Inflation on weak forest roads

Gustav Karlefors

Nyckelord: Bärighet, däckstryck, grusväg, morän, ringtryck, vägbyggnad

Arbetsrapport 11 2014

Jägmästarprogrammet

EX0772, A2E, Examensarbete vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Handledare: Tomas Nordfjell, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Extern handledare: Jonas Bylund, Holmen Skog AB

Examinator: Ola Lindroos, SLU, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2014

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Förord

Denna studie har utförts som examensarbete motsvarande 30 hp i ämnet skogshushållning vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå. Holmen Skog i Örnsköldsvik har fungerat som värd företag och uppdragsgivare.

Först vill jag rikta ett stort tack till min far Torbjörn Karlefors på WSP Group för sitt stora engagemang att ordna mätutrustning som varit ovärderlig för studien samt för sina sakkunniga råd och givande diskussioner.

Jag vill även tacka:

- Professor Tomas Nordfjell (Handledare vid SLU), för sitt engagemang och goda råd under arbetets gång.
- Jonas Bylund (Kontaktperson på Holmen Skog), för sitt engagemang och förmedlandet av kontakter till sakkunniga personer på Holmen Skog.
- Kjell Johansson (Holmen Skog), för sin hjälp med praktiska detaljer kring arbetet och att hitta försöksområdet.
- Professor Sven Knutsson (LTU), för sina sakkunniga råd och givande diskussioner under arbetets upptakt.
- Petter Lindqvist på Skanska och Gunnar Zweifel på Trafikverket som lånat ut mätutrustning som varit av stor betydelse för denna studie.
- Tord Magnusson (SLU), för sitt engagemang och stöd vid siktninganalyserna.

Umeå i januari 2014

Gustav Karlefors

Sammanfattning

Nybyggnation och underhåll av skogsbilvägar medför stora kostnader för skogsbruket i Sverige. Därför är det av intresse att finna metoder för att minska dessa kostnader. Ett tillvägagångssätt kan vara att utrusta virkesfordon med Central Tire Inflation (CTI). CTI är ett system som kan sänka och höja ett fordons däckstryck under färd. Tidigare studier har konstaterat att när virkesfordon sänker däckstryck blir spårbildning mindre. Därför kan det vara möjligt att dimensionera vägar som enbart trafikeras av CTI-utrustade virkesfordon med tunnare överbyggnad. Studier som bekräftat detta har genomförts, dock inte i Sverige.

Syftet var att jämföra spårbildningen av ett fullastat virkesfordon med släp som har lågt eller högt däckstryck. Jämförelsen utfördes på skogsbilvägar med en underbyggnad av normalmorän och både vid trafikering direkt på underbyggnaden eller på ett 5 cm tjock bärlager.

En spårdjupsstudie genomfördes i oktober 2013. Ett CTI-utrustat virkesfordon trafikerade olika vägvägnitt med lågt eller högt däckstryck. Virkesfordonet var fullastat med bruttovikten 61 500 kg. Spårbildningen mättes efter var sjätte överfart tills 30 överfarter genomförts.

På ingen av försökssträckorna uppstod svår spårbildning, utan maximalt uppmätt spårdjup var 27 mm. Lågt däckstryck gav mindre spårbildning men differensen mot högt däckstryck var liten (3,4-10,5 mm). Dock var skillnaden statistiskt signifikant på två av försökssträckorna. Det innebär att på skogsbilvägar med en underbyggnad av normalmorän kan tillgänglighetsklass C uppnås utan bärlager och oavsett däckstryck. Det innebär en besparingspotential för Holmen Skog då de normalt lägger 810 ton bärlager per km på dessa vägar för att uppnå tillgänglighetsklass C.

Nyckelord: Bärighet, däckstryck, grusväg, morän, ringtryck, vägbyggnad

Summary

Construction and maintenance of forest roads is costly for the forest industry in Sweden. It is therefore of interest to investigate methods to reduce these costs. One possible method is to equip timber vehicles with Central Tire Inflation (CTI). CTI is a system that can change the tire pressure while the vehicle is driving. Previous studies have found that timber vehicles equipped with CTI and thereby operating with reduced tire pressure create less rutting than conventional vehicles. It suggests that forestry roads travelled exclusively by timber vehicles equipped with CTI can be constructed with a thinner base course without reduced accessibility. Studies have confirmed this but none of them has been conducted in Sweden.

The aim was to compare the rutting on a forest road when travelled by a fully loaded timber vehicle with trailer at high and low tire pressure. The trial was conducted on a forest road with a subgrade of normal till and sections with 5 cm thick base course. The comparison was carried out on both the subgrade and the sections with a base course.

A field study was conducted in October 2013. A timber vehicle equipped with CTI travelled different road sections with low and high tire pressure. The timber vehicle was loaded with a gross weight of 61 500 kg. Rutting was measured after every six overpasses until 30 overpasses were completed.

On none of the test sections were severe rutting created and maximum measured rut depth was 27 mm. Low tire pressure yielded less rutting but the difference to high tire pressure was small (3.4 to 10.5 mm), although significantly different on two test sections. This means that forest roads with a subgrade of normal till can achieve access class C without a base course and regardless of tire pressure. This means a great savings potential for Holmen Skog as they normally put 810 ton of base course per km to achieve access class C.

Keywords: Bearing capacity, gravel road, road construction, till, tire pressure,

Innehåll

Beteckningar	2
Benämningar	2
1. Inledning	4
1.1 Konstruktion av skogsbilvägar	5
1.2 Vattens inverkan på vägens bärighet	8
1.3 Spårbildning.....	9
1.4 Klassificering av jordarter	12
1.5 Geotekniska provtagningsmetoder	13
1.6 Sonderingsmetoder	14
1.7 Bärighet/packningskontroll.....	16
1.8 Laboratorieundersökningar.....	19
1.9 Syfte och avgränsning.....	20
2. Material och metod	21
2.1 Geotekniska undersökningar av försöksområdet	22
2.4 Geotekniska och metrologiska förutsättningar	23
2.5 Identifierade försökssträckor	26
2.6 Fältförsök med ett CTI-utrustat virkesfordon	31
3. Resultat	35
4. Diskussion.....	40
4.1 Spårbildning.....	40
4.2 Utvärdering av material och metod	41
4.3 Jämförelse med tidigare studier	43
4.4 Dimensionering av skogsbilvägar för CTI-utrustade virkesfordon.....	43
4.5 Slutsatser.....	45
Bilaga 1. Skogsstyrelsens underlag för dimensionering av överbyggnader	49
Bilaga 2. Nomogram för klassificering av mineraljordarter.	50
Bilaga 3. Dygnsvärden för väderdata (20130901-20131010)	51
Bilaga 4. Skruvprovtagning, karta och protokoll	53
Bilaga 5. Kornstorleksfördelning erhållen från torrsiktning.	56
Bilaga 6. Karta över mätpunkterna för LWD samt mätresultat.....	58
Bilaga 7. Karta över hejarsondering.....	60
Bilaga 8. Borrhållsritning hejarsondering	61
Bilaga 9. Fullständigt protokoll från spårdjupsmätningen.	62
Bilaga 10. Residual plot för spårdjup.....	63
Bilaga 11. Regressionsanalys av Spårdjup vs Bärighet; Däckstryck	64

Beteckningar

CTI:	Central Tire Inflation. System för att ändra däckstrycket under färd.
Evd:	Dynamisk deformationsmodul erhållen från provbelastning med lätt fallvikt. Uttrycks i MPa.
E_{v1}/E_{v2}:	Deformationsmoduler uppmätta vid första och andra belastningsproven vid statisk plattbelastning. Uttrycks i MPa.
FWD:	Tung fallvikt.
Hv:	Halvvarv.
LWD:	Lätt fallvikt.
M^3_{fub}:	Kubikmeter fast under bark.
n:	Stickprovstorlek.
PLT:	Statisk plattbelastning.
SD:	Standardavvikelse.
SE:	Medelfel.
Sl:	Slag.
ÅDT:	Årsdygnstrafik

Benämningar

Bärighet:	Högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer.
Deformationsmodul:	Storhet, som används för att karakterisera deformationsbarheten hos jorden.
Deflektion:	Nedsjunkning under provbelastning.
Finjord:	Jord bestående av korn mindre än 0,063 mm.
Friktionsvinkel:	Friktionen uttryckt som en vinkel $\tan \phi$, då glidning uppstår i materialet.
Körbana:	Den färdiga ytan på vägkroppen som trafiken framförs på.
Grovjord:	Jord bestående av korn större än 0,063 och mindre än 63 mm.
P-värde:	Sannolikheten att få ett stickprovsmedelvärde så extrem som den faktiskt observerade. Givet att nollhypotesen är sann.

Skjuvhållfasthet:	Ett materials förmåga att motstå skjuvkrafter.
Skärning och bank:	När en väg byggs utjämnas marken för att få en jämn terrass vilket görs genom att höjder skärs av och sänkor fylls igen vilket benämns skärning och bank.
Sättningsmodul:	Beskriver den elastiska deformationen orsakad av en påförd belastning.
Terrassytan:	Den packade och bomberade eller skevade ytan på underbyggnaden som utgör gränsen mellan överbyggnad och underbyggnad.
Tvärfall:	Körbanans lutning i profilplanet även kallad bombering.
Underbyggnad:	Det lager i väggroppen som genom fyllning bygger upp terrassytan.
Undergrund:	Den naturliga marken under underbyggnaden.
Vattenkvot:	Uttrycks i procent och anger förhållandet mellan vattnets massa (m_w) och den torra jordens massa (m_s).
Väggropp:	Underbyggnad och överbyggnad.
Vägområde:	Det område som tagits i besittning för en vägandordning. Vänd- och mötesplatser samt slänter och diken ingår i vägområdet. I skogsmark och inägomark upptas i vägområdet även mark 2 m respektive 0,5 m utanför släntfot eller släntkrön.
Årsdygnstrafik:	Mått på medeltrafikflödet per dygn för ett visst år för ett vägavsnitt. ÅDT anges med enheten fordon per dygn.
Överbyggnad:	Krossat naturmaterial eller berg ovan terrassen upp till körbanan.

1. Inledning

Nybyggnation och underhåll av skogsbilvägar medför stora kostnader för skogsbruket i Sverige. År 2002 uppgick den totala kostnaden för ny- och ombyggnation samt underhåll av skogsbilvägar till 727 miljoner kronor (Skogsstyrelsen, 2002). Därför är det av intresse att finna metoder för att minska dessa kostnader. En metod kan vara att utrusta virkesfordon med Central Tire Inflation (CTI).

CTI är ett system som medför att fordonets däckstryck kan ändras under färd. Systemet består av ett antal komponenter för att sänka och öka däckstrycket samt en kontrollenhet för att styra trycket. Ett längre tryck medför att kontaktytan mellan däck och väg ökar vilket i sin tur leder till ett lägre marktryck från fordonet. Studier har visat att kontaktytan kan ökas med 35-67 % med ett CTI-system vilket ger en procentuell sänkning av marktrycket med 26-37 %. Intervallet beror på att kontaktytan skiljer sig mellan framhjul, bakhjul och släp. Störst procentuell skillnad har påvisats på mindre däck som har en mindre kontaktyta i grunden, dvs vid högt däckstryck (Granlund, 2006).

Tidigare forskning har visat att under tjällossning på vägar med en underbyggnad med hög finjordshalt blir spårbildningen mindre när virkesfordon opererar med lågt däckstryck. Studierna har konstaterat att vid lågt däckstryck kan vägarna utsättas för fler överfarer innan virkesfordonet riskerar att köra fast. Resultaten har pekat i samma riktning oberoende av om studierna genomförts i Sverige (Granlund & Andersson, 1998; Åkerlund, 2006), Kanada (Bradley, 1996) och med eller utan överbyggnad (Bradley, 1996). På vägar med högre bärighet har liknande resultat uppvisats men då har differens blivit mindre och utgjorts av millimetrar (Johansson, 2006) jmf (Granlund, 2006). Det innebär att med lågt däckstryck kan virkestransporter utföras under en längre period under tjällossningen då lågt däckstryck ger en lägre nedbrytningstakt av vägarna (Bradley, 1996). Enligt Bradley, (1996) kan även lågt däckstryck ha en läkande effekt på vägen när virkesfordon varierar sitt spårval. Detta betyder att CTI-utrustade virkesfordon kan framföras på strukturellt svagare vägar än konventionella virkesfordon vilket skapar möjligheter för att konstruera svagare skogsbilvägar utan att minska deras tillgänglighet. Detta har bekräftats av studier utförda i USA (Grau, 1993) och Kanada (Lègère & Mercier, 2005). De har undersökt hur mycket överbyggnaden kan reduceras på vägar med en underbyggnad av silt och/eller lera och som uteslutande trafikerar av CTI-utrustade lastbilar. De studierna förslår en reducering av överbyggnaden men 28 – 37 % på de undersökta vägarna i studierna

Med en tunnare överbyggnad blir materialåtgången av bär- och förstärkningslager lägre. Det medför en stor besparingspotential vid ny- och ombyggnation av skogsbilvägar eftersom materialkostnaden utgör en stor del av den totala kostnaden. Priset för bärlager (0-35 mm) från en kommersiell täkt ligger kring 60 kr/ton (Brännlund, 2013). Det innebär en materialkostnad på ca 61 000 kr/km om bärlagret har en tjocklek på 15 cm och densitet förutsätts vara 1,7 ton/m³. Kan överbyggnaden halveras reduceras materialkostnaden med 30 500 kr och utöver detta minskar även transportkostnaden då mindre material måste transporteras.

1.1 Konstruktion av skogsbilvägar

Holmen Skog konstruerar sina skogsbilvägar utifrån Skogsstyrelsens anvisningar (Johansson, 2013). Definitionen av en skogsbilväg är enligt Skogsstyrelsen en väg med ett huvudsakligt syfte att tillgodose skogsbrukets behov genom att möjliggöra virkestransporter med lastbil (Gunnarson, et al., 2011). I Skogsstyrelsens (Gunnarson, et al., 2011) anvisningar delas skogsbilvägarna in i olika klasser utifrån dimensionerad hastighet och vägens tillgänglighet under året (tabell 1). Den dimensionerade hastigheten styrs av vägens bredd, kurvor och lutning och är indelad i fyra klasser där klass 1 har den högsta standarden. Till vägklassen kopplas även en tillgänglighetsklass (A-D) som anger när under året vägen är tillgänglig (tabell 1).

Tabell 1. Vägklasser för skogsbilvägar indelade efter tillgänglighet och dimensionerad hastighet (Svensson, et al., 2012)

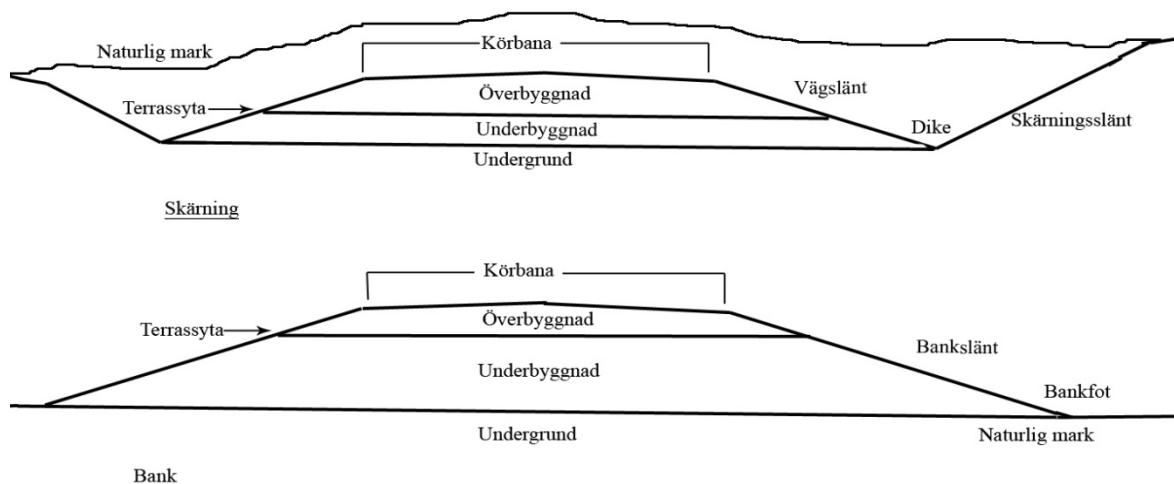
Table 1. Road classes for forest roads classified by availability and the dimensioned speed (Svensson, et al., 2012)

Tillgänglighet	Dimensionerande hastighet, (km/h)			
	60	40	30	20
Last- och personbilstrafik hela året.	1A	2A	3A	4A
Lastbilstrafik hela året utom vid svår tjällossning. Personbilstrafik hela året.	1B	2B	3B	4B
Lastbilstrafik hela året utom under tjällossnings- och ihållande regnperioder. Personbilstrafik hela året utom under tjällossningen.	1C	2C	3C	4C
Lastbilstrafik i huvudsak vintertid. Personbilstrafik även sommartid.	-	-	-	4D

Nedan följer ett kort sammandrag av Skogsstyrelsens anvisningar för projektering och byggande av skogsbilvägar klass 3 och 4 samt förklaringar till de olika åtgärderna.

Markröjning

En väg är uppbyggd av en mängd lager med olika funktioner som tillsammans utgör väggroppen (fig. 1). Under väggroppen finns undergrunden som är den avschaktade eller orörda naturliga marken. Innan material läggs på undergrunden kan en markröjning vara nödvändig om avståndet till den färdiga körbanan annars understiger 30 cm. En markröjning innebär att marktäckets som består av stubbar, humus och matjord avlägsnas från väggroppen (Gunnarsson, et al., 2011). Om undergrunden består av tjälfarligt material är det olämpligt att utföra en markröjning. Marktäckets fungerar då som ett kapillärbrytande skikt eftersom det hindrar att vatten stiger upp i under- och överbyggnad genom kapillära krafter (Gunnarsson, et al., 2011).



Figur 1. Vägområde i genomskärning vid bank och skärning.
Figur 1. Cross-section of a road area when banked and cut.

Terrassering

Vid terrassering utformas väggkroppen med dess slänter och diken. Terrassytan utgör underbyggnadens övre gräns och byggs upp av det material som finns på platsen (Svensson, et al., 2012). Materialet som används till underbyggnaden bör sorteras så att det bästa materialet kan placeras närmast ytan (Svensson, et al., 2012; Gunnarsson, et al., 2011). Bärigheten på terrassytan påverkas främst av fuktförhållandena i underbyggnaden och den jordart den är uppbyggd av (Gunnarsson, et al., 2011). Ju mer finjord och ju högre vattenkvot desto svagare blir terrassytan. Underbyggnaden bör var minst 50 cm tjock och de översta 20 cm ska inte innehålla block med en diameter större än 20 cm (Svensson, et al., 2012). Innan en överbyggnad läggs på terrassytan justeras den till önskat tvärfall vilket normalt är 5 grader och därefter packas den (Gunnarsson, et al., 2011). Dock bör underbyggnaden lämnas orörd över en period och helst över vintern så att den får sätta sig och därefter kan justering och packning utföras (Svensson, et al., 2012).

Överbyggnad

Överbyggnadens konstruktion är avgörande för den bärighet som eftersträvas på skogsbilvägen eftersom den ska fördela de krafter som uppstår vid trafikbelastning. Är överbyggnaden för svagt konstruerad finns det risk för att skador och deformationer uppstår i väggkroppen (Granhage, 2009). Skogsstyrelsens utformning av överbyggnader bestäms av vägens tillgänglighetsklass, jordart i underbyggnad/undergrund samt fuktighetsförhållande (bilaga 1). Holmen Skog region Ö-vik har utformat en alternativ dimensioneringstabell men som bygger på Skogsstyrelsens anvisningar. Där har packat mått på överbyggnaden konverterats till antal ton per km (tabell 2).

Tabell 2. Holmen Skogs rekommenderade överbyggnadstjocklek för olika undergrunder och bärighetsklasser. Tjockleken avser packat mått i cm (Kristofferson, 2013)

Table 2. Holmen Skog basis for pavement design for different subgrades and bearing classes. The thickness refers to packed material in cm (Kristofferson, 2013)

Undergrund	Bärighetsklass			
	A	B	C	D
	Överbyggbyggnad (ton/km, samt tjocklek i cm på bär- och förstärkningslager med en kornstorleksspridning angiven i mm)			
Grus Sandigt grus Grusig morän	1220 15 (0-40)	820 10 (0-40)	820 10 (0-40)	410 5 (0-40)
Grusig sand Sand	1630 20 (0-40) alt 15 (0-80) + 5(0-30)	1220 15 (0-40) alt 10 (0-80) + (0-30)	820 10 (0-40)	410 5 (0-40)
Sandig och normal morän	2450 25 (0-80) + 5 (0-30)	1630 20 (0-40) alt 15 (0-80) + 5(0-30)	820 10 (0-40)	410 5 (0-40)
Övriga finjordsrika jordarter	3260 35 (0-80) + (0-30)	2450 25 (0-80) + 5 (0-30)	1630 20 (0-40) alt 15 (0-80) + 5(0-30)	410 5 (0-40)

Det finns olika typer av överbyggnader men alla byggs upp av ett eller flera lager av krossat eller sorterat stenmaterial och naturgrus (Gunnarson, et al., 2011). Alla lager i överbyggnaden samt underbyggnaden kräver någon form av packning. Avsikten med packningen är att öka densiteten i materialet vilket därmed ger en högre bärighet. Kan densiteten ökas med 1 % stiger hållfastheten och bärigheten med 15 %. Packningen försvårar även vattendnedträngning i vägkroppen vilket har en positiv effekt på bärigheten (Jonsson, et al., 1991). En vattenansamling i överbyggnaden medför en försämrad bärighet och därför är det dessutom viktigt att vattengenomsläppligheten ökar nedåt i vägkroppen (Granhage, 2009). Högst belastning uppstår på de översta lagren i vägkroppen och därmed ställs det störst krav på materialet i dessa lager. De vanligaste överbyggnadskonstruktionerna i skogsbilvägar består enbart av bärlager och/eller slitlager. Det finns emellertid flera alternativa överbyggnadskonstruktioner och nedan följer en kort beskrivning av de lager som kan förekomma på skogsbilvägar och när de bedöms vara lämpliga (Gunnarson, et al., 2011).

Materialavskiljande lager används för att förhindra att egenskaperna av det påförda lagret försämras av det underliggande lagret (Gunnarson, et al., 2011). Om underbyggnaden/undergrunden består av material med en hög finjordshalt finns det risk för att det grövre materialet i överbyggnaden pressas ner i det underliggande lagret. Det kan leda till en lägre bärighet i överbyggnaden eftersom den späds ut med finare material vilket i sin tur kan ge upphov till deformationer (Jonsson, et al., 1991).

Vid höga krav på bärighet kan ett förstärkningslager användas för att öka tjockleken på överbyggnaden. Förstärkningslagret läggs direkt på terrassen eller eventuellt ovanpå ett materialavskiljande lager. Belastningen på förstärkningslagret är inte lika högt som på

ovanpåliggande lager eftersom trafikbelastningen sprids på en större yta med ökat djup i vägkroppen. Det innebär att förstärkningslagret inte behöver hålla samma standard som lager högre upp i vägkroppen (Granhage, 2009). Emellertid ska förstärkningslagret tillhöra tjälfarlighetsgrupp 1 men bör inte bestå av sand eller innehålla stenar som är större än halva förstärkningslagrets tjocklek (Gunnarson, et al., 2011). Bärigheten ökar i takt med en ökad tjocklek på förstärkningslagret eller om materialet är krossat. Optimal bärighet uppnås då båda dessa förutsättningar är uppfyllda. Om förstärkningslagret består av stora fraktioner kan det behöva tätas för att eliminera risken att bärlagret tränger ner i förstärkningslagret (Svensson, et al., 2012).

Bärlagret läggs på förstärkningslagret eller direkt på terrassytan i de fall ett förstärkningslager inte används. Bärlager består av krossat eller sorterat stenmaterial och ska ha en tillräckligt hög kvalitet för att säkerställa att det inte krossas eller vittrar av trafiken. Normalt har bärlagret en kornstorleksfördelning på 0-50 mm eller 0-35 mm (Gunnarson, et al., 2011). Det vill säga att bärlagret har sorterats så att det innehåller alla kornstorlekar mellan 0 och 35 mm. Bärlagret har samma syfte som förstärkningslagret, det vill säga att uppta och fördela trycket av trafikbelastningen på en större yta. Det bör dock framhållas att bärlagret är det viktigaste lagret i överbyggnaden med avseende på vägens bärighet eftersom det ska uppta och fördela den största belastningen (Granhage, 2009; Svensson, et al., 2012).

Ovanpå bärlagret kan ett grusslitlager påföras. Syftet med grusslitlagret är att skapa en jämn och tät yta som skyddar den underliggande vägkroppen från vatteninträngning (Svensson, et al., 2012; Granhage, 2009). Grusslitlagret bör bestå av krossgrus eller välgraderat naturgrus med en kornstorleksfördelning på 0-20 mm (Gunnarsson, et al., 2011).

Dränering

Vatten har en starkt bärighetsnedsättande effekt på vägar. En vägkropp kan skyddas från vatten genom avvattning och dränering. Med avvattning menas uppsamling och avledning av dagvatten. Detta sker genom att vatten leds till vägens diken via körbanans tvärfall. Dränering innebär att vatten avlägsnas från vägkroppen genom diken och ledningar. För att avvattningen ska fungera effektivt krävs det att vägen har ett tillfredställande tvärfall och att dikena är dimensionerade för de förekommande flödena (Granhage, 2009). En lyckad dränering åstadkoms genom att dimensionera lutningen i väg och bakslänter så att jord och sten inte rasar ner i diket. Slänterna får dock inte bli för flacka vilket ökar risken för självbreddning vilket innebär att dikena pressas ihop och att avvattningen försämras (Svensson, et al., 2012). Det krävs även att vägen underhålls för att undvika att vallar bildas vilket gör att vattnet rinner in i vägkroppen istället för att rinna av den (Jonsson, et al., 1991).

1.2 Vattens inverkan på vägens bärighet

En väg består av jord som i sin tur består av korn, vatten och gas. Kornen är jordens lastbärande skelett och består vanligtvis av mineralpartiklar men kan även utgöras av organiskt material. I hålrummen i kornskelettet finns antingen vatten, gas eller kombination av dessa. Vattnet förekommer som fritt och bundet och det fria vattnet utgörs av grundvatten vilket kan strömma fritt genom jorden. Det bundna vattnet förekommer dels som kemiskt bundet till en partikel och dels som kapillärt bundet mellan korn och i porvinklarna (Sällfors, 2009). Jorden hålls samman av de bindningskrafter som verkar mellan kornen men typen av bindningskraft skiljer sig åt beroende på kornstorlek. I grovkorniga jordar utgörs den av friktionen mellan kornen och i finkorniga jordar består den av molekylära attraktioner mellan

kornen. I blandkorniga jordar återfinns en kombination av ovannämnda bindningskrafter (Lindskog et al., 1988). När vattenmängden ökar i en jord ökar vattentrycket i jordens porer vilket leder till ett ökat porvattentryck. Det medför att effektivspänningen minskar vilket är den del av totalspänningen som bärs upp av kornskelettet (Sällfors, 2009). Det leder i sin tur till att skjuvhållfastheten i jorden minskar (Berglund, 2009).

Effektivspänningen är differensen mellan totalspänningen och porvattentrycket och beräknas med följande formel (Sällfors, 2009):

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u$$

där

σ'_0 = Effektivspänningen

σ_0 = Totalspänningen

u = Porvattentrycket

När en väg utsätts för en trafikbelastning pressas vattnet som finns mellan kornen ut i porerna och blir de då fyllda sker en dramatisk stegring av portrycket (Löfroth, 1995). Portrycket kommer då att verka i motsatt riktning mot den kraft som håller samman kornen vilket innebär att den minskar. Det leder till att jordens hållfasthet reduceras och därmed även dess förmåga att motstå deformationer (Dawson & Kolisoja 2006). Känsligheten för vatten skiljer sig dock mellan olika jordar. Grovkorniga jordar har större porer vilket innebär att de dräneras snabbare vilket gör dem mindre känsliga för nederbörd. Finkorniga jordar har en hög vattenhållande förmåga och de kan dessutom suga upp vatten genom kapillära krafter från grundvattnet. Det medför att de är särskilt känsliga för nederbörd och töperioder efter säsongsbunden tjäle (Lindskog et al., 1988).

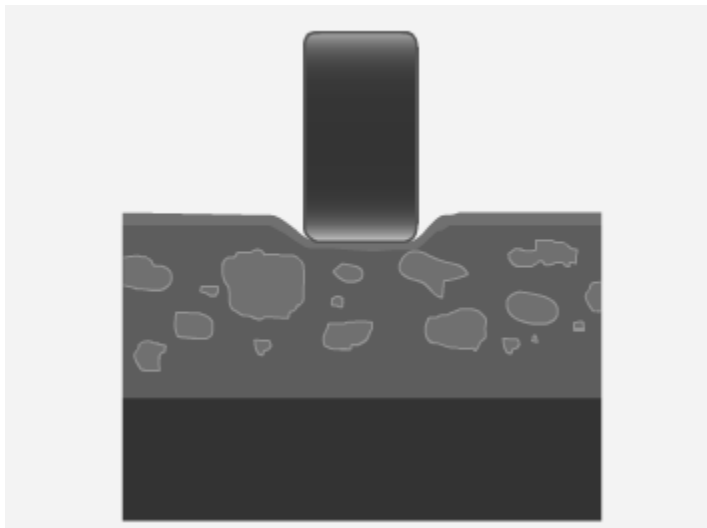
1.3 Spårbildning

Förenklat kan det sägas att ju bredare spåren är, desto djupare i väggroppen finns orsaken till spårbildningen (Svensson, et al., 2012). Spårbildning är inte önskvärt på körbanan då det leder till att vatten rinner in i väggroppen istället för att rinna av den. Det leder till mer vatten i överbyggnaden vilket gör den svagare och därmed mindre motståndskraftig (Dawson & Kolisoja 2006).

När ett material utsätts för en tyngd uppstår en spänning som är lika med tyngden delat med kontaktytan. Om materialet då får en formförändring har en deformation skett. En deformation definieras som förhållandet mellan formförändring och materialets ursprungliga form (Roadex, 2013). Återgår materialet till sin ursprungliga form efter att spänningen avlägsnas är deformationen elastisk och kvarstår deformationen är den plastisk. Deformationerna kan uppträda tillsammans eller var för sig och behöver inte vara linjära och de kan dessutom vara tidsbundna eller momentana (Sällfors, 2009). Material som utsätts för en plastisk deformation genomgår först en elastisk deformation vilket innebär att det delvis återfår sin ursprungliga form efter att spänningen avlägsnas. I vägmateriel kan en viss ackumulering av plastisk deformation uppstå vid trafikbelastningen vilket leder till spårbildning. Vid trafikering på lågtrafikerade vägar sker alltid en viss elastisk deformation och en mycket liten plastisk deformation. Deformationen stabiliseras dock på en låg nivå efter att materialet succesivt packas (Roadex, 2013).

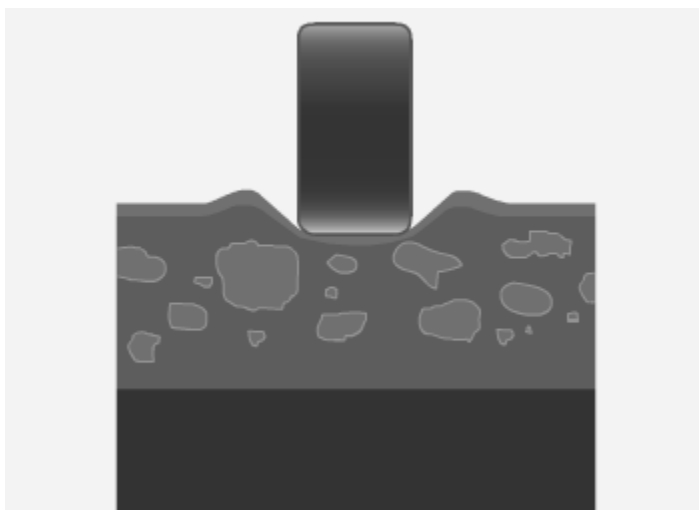
Generellt kan spårbildning härledas till fyra olika orsaker vilka benämns typ 0,1,2,3 av Dawson och Kolisoja (2006).

Typ 0 uppstår till följd av det översta lagret i vägkroppen inte har packats tillräckligt innan vägen trafikeras (fig. 2). Det innebär att när vägen trafikeras packas det översta lagret ytterligare och därmed sker en spårbildning. Viss spårbildning av denna typ är inte negativ utan ökar endast vägens bärighet eftersom packningen gör materialet styvare och därmed sprider det lasten bättre. Det gör att trycket på underbyggnad och undergrund minskar. Tillstånd 0 kan även uppstå på grund av tjällyftning vilket luckrar upp vägen och därmed reduceras vägens densitet. Det innebär att vägen återigen kan packas vilket leder till typ 0 spårbildning (Dawson & Kolisoja, 2006).



Figur 2. Spårbildning av typ 0. Roadex ©.
Figure 2. Type 0 rutting. Roadex ©.

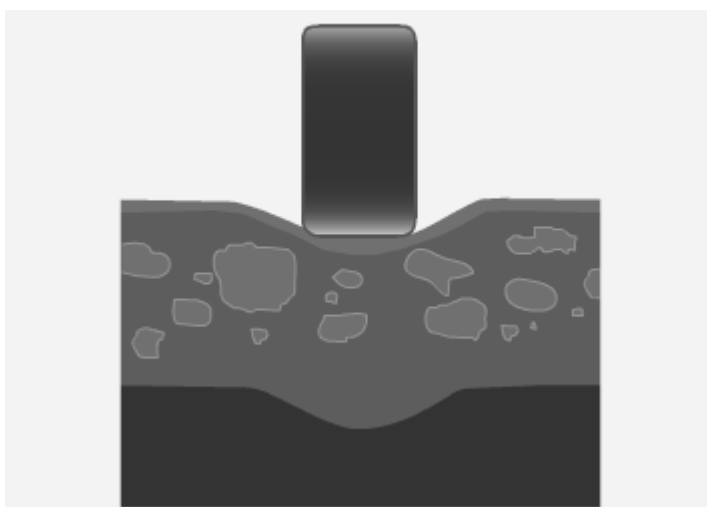
Typ 1 uppstår på grund av att den övre delen av överbyggnaden har för låg skjuvhållfasthet vilket leder till skjuvning (valkbildning) i direkt anslutning till hjulens insida och utsida (fig. 3). Den låga skjuvhållfastheten kan oftast kopplas till en överbyggnad av dålig kvalitet eller att den tappat sin bärförmåga på grund av vattenmättnad. Detta sker huvudsakligen under våren då materialet töar vilket leder till att vatten frigörs i överbyggnaden. Det är sannolikt att bärförmågan är tillfredsställande under resterande del av året då materialet har dränerats och packats. Risken för att tillstånd 1 ska uppstå kan minskas genom packning, bättre dränering, stabilisering med hjälp geosyntetiska material av vägkroppen eller genom att sänka däckstrycket (Dawson & Kolisoja, 2006).



Figur 3. Spårbildning av typ 1. Roadex ©.

Figure 3. Type 1 rutting. Roadex ©.

Typ 2 inträffar när underbyggnaden fallerar på grund av för låg bärighet vilket gör att materialet i underbyggnaden pressas utåt och uppåt i vägens sidor och mitt (fig. 4). Det leder till spårbildning i underbyggnaden. Överbyggnaden deformeras då som helhet vilket innebär att spårbildning sker i överbyggnaden utan att den förtunnas. Den låga bärigheten orsakas av ett vattenöverskott i undergrunden som följd av tjällossning. För att undvika detta måste trafikbelastningen spridas bättre vilket kan uppnås med en tjockare överbyggnad. Typ 2 spårbildning kan inte undvikas med sänkt däckstryck eftersom det är axellasten som är avgörande för belastningen på materialet vid det djupet (Dawson & Kolisoja, 2006).



Figur 4. Spårbildning av typ 2. Roadex ©.

Figure 4. Type 2 rutting. Roadex ©.

Typ 3 spårbildning liknar typ 0 men orsakas inte av kompaktering utan av vittring och nötning av beläggning eller slitlager. Denna spårbildning är väldigt ovanlig på lågtrafikerade vägar och därmed även på skogsbilvägar (Dawson & Kolisoja, 2006).

1.4 Klassificering av jordarter

Jord indelas i mineraljord och organisk jord. Mineraljord klassificeras efter kornstorlek och kornstorleksfördelning (Karlsson & Hansbo, 1992). Det finns olika system vilket innebär att fraktionsindelningen och benämningar på kornstorlekarna kan skilja sig mellan olika system (tabell 3). I skogsbruket används en modifierad version av Atterbergs skala och i geotekniska sammanhang används den nya internationella standarden SS-EN ISO 14688-1 (IEG, 2010; Lidberg, 2009). Dessa system skiljer sig åt genom att det som benämns mjäla och mo i Atterbergs skala benämns som silt och finsand i ISO 14688-1. Systemen har också skilda gränsvärden för grus och sten. I SS-EN ISO 14688-1 är 63 mm gränsvärdet mellan sten- och grusfraktionerna medan i Atterbergs skala är gränsen satt vid 20 mm. Dessa system skiljer sig även åt genom att de övre gränsvärdena för fraktionerna är flyttade från det numeriska värdet 6 till 6,3 i SS-EN ISO 14688-1 (tabell 3). Fortsättningsvis används benämningar enligt SS-EN ISO 14688-1.

Tabell 3. Fraktionsindelning enligt Atterbergs skala och SS-EN ISO 14688-1 (Karlsson & Hansbo, 1992; IEG, 2010)

Table 3. Fraction division according to the Atterberg scale and SS-EN ISO 14688-1 (Karlsson & Hansbo, 1992; IEG, 2010)

Kornstorlek (mm)	Atterbergs skala med modifierade beteckningar	Kornstorlek (mm)	SS-EN ISO 14688-1
> 2000		> 2000	Stora block
600-2000	Block	630-2000	Block
200-600		200-630	
60-200	Sten	63-200	Sten
20-60		20-63	Grovgrus
6-20	Grovgrus	6,3-20	Grus Mellangrus
2-6	Fingrus	2-6,3	Fingrus
0,6-2	Grovsand	0,63-2	Grovsand
0,2-0,6	Mellansand	0,2-0,63	Sand Mellansand
0,06-0,2	Grovmo	0,063-0,2	Finsand
0,02-0,06	Finmo	0,02-0,063	Grovsilt
0,006-0,02 µm	Grovmjäla	0,0063-0,020	Silt Mellansilt
0,002-0,006	Finmjäla	0,002-0,0063	Finsilt
0,0006-0,002	Lera	0,00063-0,002	Lera
< 0,0006		< 0,00063	

1.5 Geotekniska provtagningsmetoder

För att undersöka jorden under markytan krävs provtagning av någon form och provernas storlek är beroende av vilken analys som ska göra på jorden (tabell 4).

Provtagning kan indelas i tre kategorier (SGF, 1996):

- *Ostörda jordprover:* Jorden har kvar sina mekaniska egenskaper och jordlagerföljden är intakt.
- *Störda jordprover:* Jordens mekaniska egenskaper har förändrats men jordlagerföljden är intakt.
- *Omrörda jordprover:* Jordens mekaniska egenskaper har förändrats och jordlagerföljden är omrörd.

Tabell 4. Erforderlig provstorlek (g) för laboratorieanalys (SGF, 1996)

Table 4. The required sample size (g) for laboratory analysis (SGF, 1996)

Laboratorieundersökning	Jordart			
	Lera	Silt	Sand	Grus/morän
Vattenkvot	10-30	10-30	100-200	>500
Densitet	20	20	50	50
Konflytgräns	100	100		
Siktning	200-500	200-500	200-500	500-1500

Skruvprovtagning

Skruvprovtagning är en störd provtagning och utförs med en geoteknisk borrhandsvagn som genom tryck och rotation borrar ned en skruvprovtagare i jorden (fig. 5). Allteftersom skruvprovtagaren borrar ned i marken förlängs den med borrhåll och när önskat djup nåtts dras den upp varvid jord fastnar på dess flänsar och följer med upp till ytan. Det är viktigt att rotationshastigheten på skruvprovtagaren är i takt med neddrivningen för att jordprovet inte ska korskontamineras. Överstiger rotationen neddrivningen kommer jord transporteras upp längs flänsarna och därmed blandas jordprovet (SGF, 1996).

Jorden som fastnat på flänsarna preliminärbestäms i fält och sparas sedan i lufttäta påsar för noggrannare bestämning. Lagerföljder noteras även och olika lager sparas i separata påsar. Det finns flera fördelar med skruvprovtagning: den skadar inte markytan, är snabb och ger en bra överblick av jordlagren. Nackdelen är att den fungerar sämre vid provtagning i sandigt och grusigt material då detta lätt lossnar då skruvprovtagaren dras upp. Även provtagning i jordar med mycket block och sten medför vissa svårigheter (SGF, 1996).



Figur 5. Skruvprovtagare monterad på geoteknisk borrhandsvagn. Foto: Gustav Karlefors.

Figure 5. Auger sampler mounted on tracked geotechnical drilling vehicle. Photo: Gustav Karlefors

Provgropsgrävning

Provgropsgrävning innebär att gropar grävs, vanligtvis med maskin men kan även utföras med handkraft. Gropens storlek och djup styrs av maskintyp och grundvattenytan men ska ha en tillräcklig storlek för att det ska vara lätt att ta prover. Metoden används när man vill studera jorden i större skala och framförallt i stenig och blockig jord där andra provtagningsmetoder är svåra att genomföra. Fördelen med metoden är att stora prover kan tas samt att representativa prover kan väljas (SGF, 1996). De nackdelar som föreligger med metoden är att markytan är svår att återställa på provtagningsplatsen och den är relativt långsam (SGF, 2013).

1.6 Sonderingsmetoder

CPT (Cone Penetration Test)

CPT utförs med en geoteknisk borrhandsvagn och innebär att en cylinderformad sond med en konformad spets drivs ned i jorden med konstant hastighet. Under nedrivningen mäts motståndet mot sondspetsen (spetsstrycket), mantelfriktionen och porvattentrycket. Detta ger en bild av lagerföljder, relativ fasthet samt hur egenskaperna i jorden varierar med djupet. Användningsområdet för CPT är lösa till fasta jordar med kornstorlekar upp till grus. I grövre jordar blir motståndet för stort vilket kräver slag eller rotation för att driva ner sonden. Inom sitt användningsområde är CPT-sondering överlägsen andra sonderingsmetoder med avseende på detaljbestämning av jordlagerföljder (Larsson, 2007).

Utifrån sonderingsresultat kan sättningensmodulen beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$E = q_T^{0,93}$$

där

E = Sättningsmodul

q_T = Spetsstrycket i MPa

Friktionsvinkel beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$\phi' = 29 + 2,8q_c^{0,45}$$

där

ϕ' = Friktionsvinkeln

q_c = Spetsstrycket i MPa

Viktsondering

Viktsondering kan utföras både manuellt eller med maskin. Metoden innebär att ett borrstål med en skruvformad spets drivs ned i jorden genom belastning och vridning. Belastning ökas till dess att sondspetsen börjar sjunka ned genom jorden. Maximal belastning är 1 kN och sjunker inte spetsen vid den belastningen roteras den. Under sondering registreras nedsjunkningshastighet, belastning och antalet halvvarv spetsen roteras per 0,2 m nedsjunkning. Lösa till medelfasta jordar med liten förekomst av block och sten är det huvudsakliga användningsområdet för viktsondering. Metoden används för att bestämma jordlagerföljder samt deras relativa fasthet (SGF, 1996).

Utifrån sonderingsresultat kan sättningsmodulen beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$E = 0,5hv_{20}^{1,07}$$

där

E = Sättningsmodul

hv_{20} = Antal halvvarv per 20 cm nedträngning

Friktionsvinkel beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$\phi' = 29 + hv_{20}^{0,53}$$

där

ϕ = Friktionsvinkeln

Hejarsondering

Hejarsondering utförs med en geoteknisk borrbandvagn som utrustats med en frifallshejare som slår ned ett borrstål med en konad cylindrisk sondspets i jorden. Slagenergin överförs från hejaren till borrstålet via en slagdyna med mellanlägg. Under sonderingen registreras antalet slag för varje 0,2 m nedsjunkning. Metoden används för att bestämma jordlagerföljder samt deras relativa fasthet (SGF, 1996). Hejarsondering är lämplig att använda i steniga jordar såsom moräner där andra sonderingsmetoder såsom CPT-sondering och viktsondering inte fungerar (SGF, 1996).

Utifrån sonderingsresultat kan sättningssmodulen beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$E = 2,8Hfa_{(netto)}^{0,91}$$

där

E = Sättningssmodul

$Hfa_{(netto)}$ = Antal slag per 20 cm nedträngning reducerat med mantelfriktionen mot sondstängan

Friktionsvinkel beräknas med formeln (Trafikverket, 2011b):

$$\phi' = 29 + 2,3Hfa_{(netto)}^{0,46}$$

där

ϕ = Friktionsvinkeln

Utvärdering av sonderingsresultat

För att bestämma jordlagrens mäktighet, utsträckning samt relativa fasthet kan ovannämnda sonderingsmetoder användas. Utifrån sonderingsresultatet kan sedan sättningssmodul och friktionsvinkel beräknas. För utvärdering av fasthet kan TK Geo 11 karakteristiska värden användas (tabell 5).

Tabell 5. Karakteristiska värden på friktionsvinkel och sättningssmodul

Table 5. Characteristic values of the angle of friction and settling module

Lagringstäthet	Cpt sondering (MPa)	Hejarsondering (SI/0,2 m)	Viktsondering (Hv/0,2 m)	Friktions- vinkel (°)	Sättningss- modul (MPa)
Mycket lös	0-2,5	0-4	0-10	29-33	0-10
Lös	2,5-5	4-8	10-25	33-35	10-19
Medelfast	5-10	8-12	25-45	35-36	19-27
Fast	10-20	12-25	45-80	36-39	27-52
Mycket fast	>20	>25		>39	>52

1.7 Bärighet/packningskontroll

Trafikverket definierar bärighet som ”Högsta last, enstaka eller ackumulerad, som kan accepteras med hänsyn till uppkomst av sprickor eller deformationer” (Trafikverket 2011, sid 8). Vid nybyggnation och upprustning av vägar med en ÅDT > 2000 har trafikverket krav på bärighets och packningskontroll vilket utförs med statisk plattbelastning. I det dokumentet används deformationsmodulen E_{v2} vilken erhålls från statisk plattbelastning som ett indirekt mått på konstruktionens bärighet. De bärighetskrav som trafikverket ställer på de obundna lagren i dessa vägar är att terrassen ska uppvisa $E_{v2} > 15-32$ MPa och det översta obunda lagret ska ha $E_{v2} > 125$ MPa (Trafikverket, 2011).

Fallviktsmätning (FWD)

Fallviktsmätning är en metod för att undersöka den dynamiska styvheten i en vägkonstruktion. Mätningen utförs med en fallvikt som släpps på en belastningsplatta med diametern 300 mm vilken via ett fjädersystem överför kraften till vägkonstruktionen (fig. 6). Belastningen som överförs på körbanan är 50 kN vilket motsvarar överfarten av ett lastbilshjul. Deflektionen i körbanan som orsakats av kraftpulsens mäts i centrum och vid ett antal punkter på olika avstånd från centrum. Deflektionen i de olika punkterna från belastningsplattan används för att beräkna styvheten i väggroppens olika lager. Storleken på centrumdeflektionen påverkas av alla lager i vägkonstruktionen medan deflektionen i de yttersta punkterna reagerar på egenskaperna i underbyggnad och undergrund (Trafikverket, 2012). Resultatet från provbelastningen är olika styvhetsmoduler (E-modul) i vägkonstruktionens lager (Trafikverket, 2012b).



Figur 6. Fallviktsapparat. Foto: Håkan Carlsson, VTI.

Figure 6. Falling weight deflectometer. Photo: Håkan Carlsson, VTI.

Statisk plattbelastning (PLT)

Statisk plattbelastning används för att bestämma styvheten och packningskvaliten i en jord. Mätningen utförs med en hydraulisk press som belastar jorden med en platta som har en diameter på 300 mm (fig. 7). Jorden belastas under två omgångar och mellan omgångar avlastas jorden. De sättningar som uppstår till följd av belastningarna registreras och används för att beräkna deformationsmodulen som benämns E_v . Metoden kräver förutom en hydraulisk press även ett mothåll som väger 4,5 ton mer än den tänkta maximala belastningen. Lämpliga mothåll kan vara en vält eller en hjullastare (Vägverket, 1993). Deformationsmodulen bestäms för båda belastningsomgångarna och benämns E_{v1} och E_{v2} . Kvoten mellan E_{v1} respektive E_{v2} används för att bedöma packningskvaliten och E_{v2} användas som ett indirekt mått på bärighet enligt TRVKB 10.



Figur 7. Statisk plattbelastning. Foto: Håkan Arvidsson, VTI.

Figure 7. Static plate load tester. Photo: Håkan Arvidsson, VTI.

Lätt fallvikt (LWD)

Den lätta fallvikten är en snabb mätmetod som ger ett värde på den dynamiska deformationsmodulen (E_{vd}). Grovkorniga eller blandkorniga jordar med en kornstorlek på upp till 63 mm är bäst lämpade för LWD. Metoden är därmed passande att användas på obundet bär- och förstärkningslager. Mätningen utförs manuellt genom att en fallvikt släpps (10 kg) från en höjd (700 mm) på ett fjädersystem som överför kraften på en belastningsplatta med diametern 300 mm som står i kontakt med jorden (fig. 8). Sättningen registreras i en dosa som är kopplad till belastningsplattan och utifrån sättningsamplituden beräknas automatisk E_{vd} -värdet (Anon, 94). Begränsningar med LWD är att den har en begränsad djupverkan, ca 1,5 gånger plattdiametern dvs 0,45 m vid en plattdiameter på 30 cm. Mätnoggrannheten minskar även vid höga bärighetsvärden på grund att LWD då åstadkommer mindre sättningar. I det fallet är det bättre att använda en FWD eller PLT (SGF, 2004). Metoden har även en begränsning vid mätning i sluttningar. Om sluttningen är för brant kan kraften från fallvikten ge belastningsplattan en sidoförskjutning vilket leder till osäkra i mätresultat (Anon, 94).

Metoden kan användas som alternativ eller komplement till PLT vid bärighetsmätningar. För detta krävs dock att korrelationsvärden måste bestämmas mellan E_{vd} och E_{v2} eller att befintliga samband används. När inga specifika korrelationsvärden är bestämda kan tillgängliga värden användas (Anon, 1994)(Tabell 6). Dock är förklaringsgraden relativt låg när E_{vd} omvandlas till E_{v2} (Tompai, 2007).

Tabell 6. Korrelationsvärden mellan den statiska (E_{v2}) och dynamiska deformationsmodulen (E_{vd})
Table 6. Correlation values between the deformation modulus (E_{v2}) and the dynamic deformation modulus (E_{vd})

E_{v2} (MPa)	E_{vd} (MPa)
120	60
100	50
80	40
45	25

LWD har gentemot PLT följande fördelar:

- Den kräver inget mothåll
- Mätningarna kan utföras på väldigt kort tid (några minuter)
- Metoden är ekonomiskt fördelaktig



Figur 8. Lätt fallvikt. Foto: Gustav Karlefors.

Figure 8. The lightweight drop-weight tester. Photo: Gustav Karlefors.

1.8 Laboratorieundersökningar

Vattenkvot

Vattenkvoten uttrycks i procent och anger förhållandet mellan vattnets massa och den torra jordens massa. Vattenkvoten bestäms genom att jordprovet vägs i rått tillstånd och sedan torkas i 105 °C i 24h och därefter vägds det igen. Skillnaden i vikt före och efter torkning motsvarar vattnets massa i det råa jordprovet (Larsson, 2008).

Vattenkvoten beräknas med formeln:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$

där

w = vattenkvot i procent

m_w = vattnets massa

m_s = torra jordens massa

Siktanalys

För att bestämma kornstorleksfördelningen i ett jordprov kan siktning användas. Metoden utförs med en siktningsapparat vilken består av ett antal siktar och en skakapparat. Jordprovet placeras i den översta sikten och genom vibrationer passerar det genom de olika siktarna. Siktarna har en minskande maskvidd nedåt i apparaten vilket gör att provet delas upp i olika fraktionsstorlekar när de passerar genom siktarna. Fraktionerna vägs och deras viktprocent av hela provets massa beräknas. Vid låg finjordshalt räcker det med torrsiktning men vid högre halter krävs att siktningen utförs under vattenspolning (våtsiktning) för att minska risken att finjordsandelen underskattas (Larsson, 2008).

1.9 Syfte och avgränsning

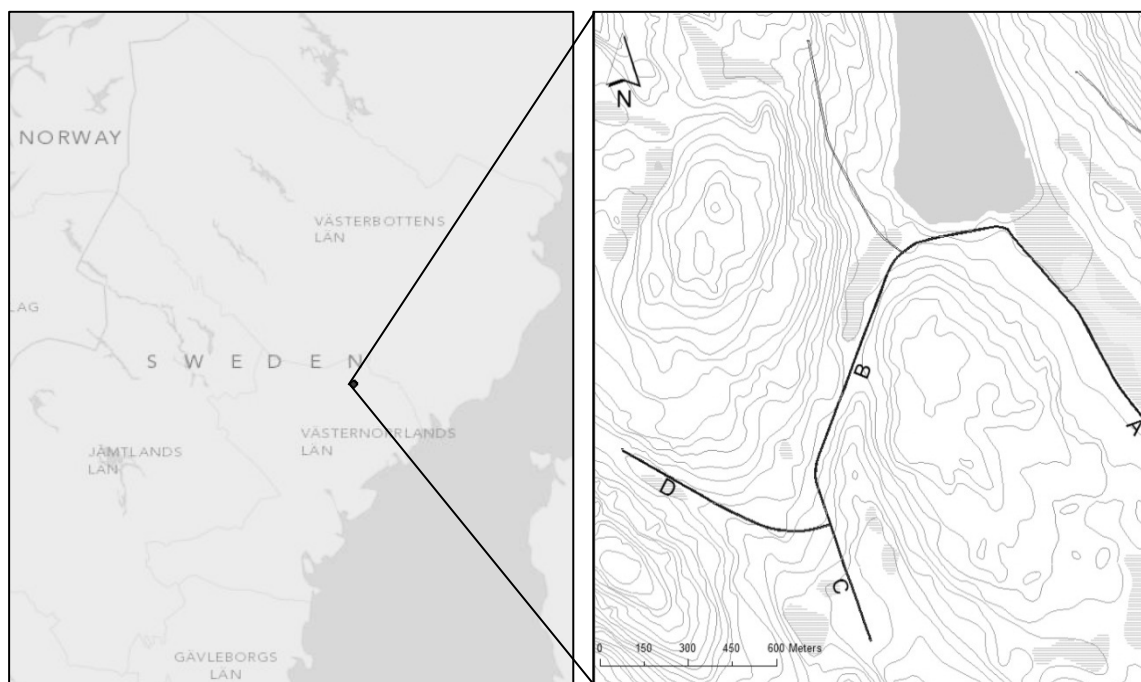
Syftet med studien var att jämföra spårbildningen efter trafikering av ett fullastat virkesfordon med släp som har lågt eller högt däckstryck. Jämförelsen utfördes på skogsbilvägar med en underbyggnad av normalmorän och både vid trafikering direkt på underbyggnaden eller på ett 5 cm tjock bärlager (0-35 mm). Målsättningen var att utifrån resultaten finna en alternativ dimensionering av överbyggnaden på skogsbilvägar av klass 3C med en underbyggnad av normalmorän och som uteslutande trafikeras av CTI-utrustade virkesfordon.

2. Material och metod

Studien utfördes i två delar. Den första delen bestod av geotekniska undersökningar av försöksområdet och laboratorieanalyser för att kunna beskriva vägarnas egenskaper. Detta användes för att identifiera jämförbara vägvägar på skilda vägar. Vägvägar med liknande egenskaper parades ihop till försökssträckor och därigenom bestod varje försökssträcka av två jämförbara vägvägar på skilda vägar. På försökssträckornas vägvägar genomfördes sedan ytterligare geotekniska mätningar för att kunna beskriva deras bärighet och fasthet.

Den andra delen bestod av en fullskalig spårjupsstudie. Studien utfördes i oktober 2013 med ett fullastat virkesfordon med släp utrustat med CTI som trafikerade de olika försökssträckorna. På försökssträckorna trafikerades det ena vägvägarvägarna med lågt däckstryck och det andra med högt däckstryck. Det möjliggjorde jämförelser av spårbildning mellan högt och lågt däckstryck på försökssträckorna. Spårbildningen mättes genom att före trafikeringen mätta körbanans profil på försökssträckorna vilken användes som referens för hur försökssträckorna såg ut innan trafikeringen. Därefter gjordes en identisk mätning av profilen efter trafikeringen av virkesfordonet. Skillnaden mellan de uppmätta värdena utgjorde därmed den spårbildning som uppstått till följd av trafikbelastningen.

Försöksområdet som användes i studien är beläget 37 km nordväst om Björna (fig. 9). Det omfattade 3,6 km väg och delades in i fyra separata vägstreck A, B, C och D.



Figur 9. Karta över försöksområdets samt dess geografiska läge. Lantmäteriet ©

Figure 9. Map of the test area and its geographical location. Lantmäteriet ©

2.1 Geotekniska undersökningar av försöksområdet

Provtagning och preliminärbestämning av jordlagerföljderna i vägkonstruktionen

För bestämning av jordart, jordlagerföljd samt vattenkvot i undergrund/underbyggnad inhämtades jordprover. Provtagningen skedde under 9-11 september 2013. Punkterna lades ut systematiskt med 100 m mellanrum längs med de fyra vägsträckorna och omfattade totalt 35 punkter. Provtagningen skedde ned till 2 m djup eller grundare när block eller hårt packad morän omöjliggjorde djupare provtagning. För bestämning av vattenkvoten i närmare anslutning till spårdjupsstudien genomfördes ytterligare en provtagning den 15 oktober.

Proverna togs genom skruvprovtagning med en geoteknisk borrhandsvagn av typen Geotech 604. Skruvprovtagaren hade längden 1 m och diametern 82 mm och för att nå ner till 2 m djup förlängdes den med ett borrhåll. Provtagningspunkternas positioner bestämdes med en handburen GPS av typen Garmin Montana 650.

Vattenkvot

Vattenkvoten i vägarna bestämdes vid två tillfällen, den 9-11 september och 15 oktober. Vid den först mätningen (9-11 sept) bestämdes vattenkvoten i 35 punkter och i skiktet 0-1 m under körbanan. Den andra mätningen utfördes efter spårdjupsstudien och då mättes vattenkvoten i åtta punkter. Vikten på proverna varierande mellan 1,5-2 kg. Materialet i varje prov blandades noggrant och därefter togs ett sampel på ca 700 g, vilket användes för att bestämma vattenkvoten.

Bestämning av kornstorleksfördelningen och jordart genom siktanalys

Kornstorleksfördelning bestämdes genom torr- och våtsiktning. Siktarna som användes hade maskvidder på: 0,063, 0,2, 0,63, 2,0, 6,3 och 20 mm vilket är i enlighet med SS-EN ISO 14688-1 (Larsson, 2008). För att få en uppfattning om variationen i sand- och grusfraktionen torrsiktades samtliga 35 prover tagna i skiktet 0-1 m under körbanan. Med utgångspunkt i resultatet från torrsiktningen valdes ett representativt prov ut från varje väg. De fyra proverna våtsiktades för att få en noggrannare bestämning av finjordhalten och för att klassificera jordarten i vägarnas underbyggnad/undergrund. Resultatet från våtsiktningen användes med ett nomogram från Byggeforskningsrådet (1992) för att bestämma jordarten (Bilaga 2). Vikten på jordproverna som torr- och våtsiktades varierade mellan 1,5–2 kg och från den mängden togs ett sampel ut på ca 600 g.

Dynamisk deformationsmodul (E_{vd})

Den dynamiska deformationsmodulen mättes på försökssträckorna med en LWD av typen HMP LFG-SD. Mätningen skedde i hjulspåren och provpunkter lades ut objektivt på försökssträckorna och totalt mättes bärigheten i 30 punkter. Mätningen skedde under 2-3 oktober sju dagar innan spårdjupsstudien. Mätvärdena sammaställdes och ett medelvärde samt standardavvikelse för varje vägavsnitt beräknades. För att omvandla E_{vd} till E_{v2} användes befintliga korrelationsvärden (tabell 6).

Friktionsvinkel och sättningsmodul

Materialet i väggroppen utgjordes av en morän innehållande sten och block. Därför var hejarsondering den enda lämpliga metoden för att bestämma friktionsvinkel och sättningsmodul. Hejarsonderingspunkterna lades ut objektivt med tre punkter på väg A och B samt 2 punkter på väg C och D. Det resulterade i totalt 11 sonderingar. Sondering utfördes med en geoteknisk borrhandsvagn av typen GM 75 GTS och sonderingen skedde ned till 1,6 m

djup under körbanan. Utifrån sonderingsresultatet beräknades friktionsvinkel och sättningsmodul enligt TK geo 11 figur 5.2-8 och 5.2-9. De beräknade värdena användes för att utvärdera vägarnas relativa fasthet på olika djup under körbanan.

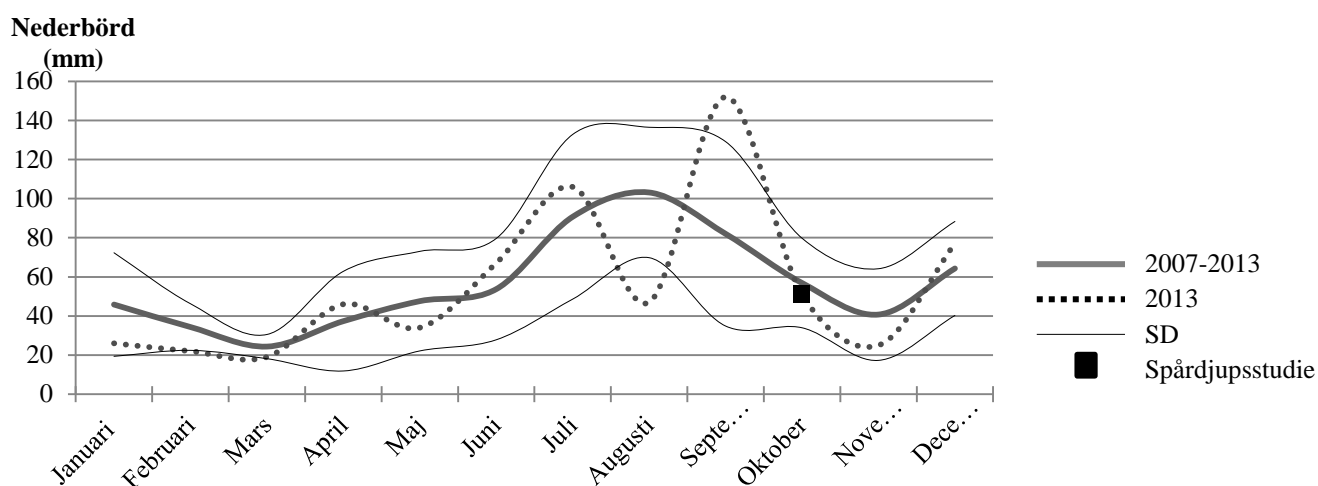
2.4 Geotekniska och metrologiska förutsättningar

Allmänt

Försöksområdet delades in i 4 vägar A, B, C och D och vägarna var av klass 3 (fig. 9). Väg A och B bedömdes ha högre standard än väg C och D då de senare var stickvägar och kraftigt igenvuxna. Det tydde på att de trafikerats mindre och därför gjordes bedömningen att materialet i dessa vägar var mindre packat vilket innebär en lägre bärighet (Jonsson, et al., 1991). Uppgifter om när vägarna byggdes saknas men enligt Johansson (2013) är de sannolikt byggda i början på sjuttioalet. Avvattning och dränering bedömdes vara tillfredställande då det var lite eller inget vatten på körbanan och lite vatten i diken. Vägarna inom försöksområdet var i huvudsak byggda både i skärning och på bank med undantag för väg C som var byggd enbart på bank. Vidare var vägarna konstruerade med dike på ena sidan av vägen och med slänt på den andra sidan. Försöksområdet hyvlades i början av september 2013 då det förekom spårbildning på vissa vägavsnitt inom försöksområdet och som tidigare nämnts hade väg C och D kraftig vegetation på körbanan som behövde avlägsnas.

Nederbörd

Nederbörden i försöksområdet har i medel varit som störst i augusti månad under de senaste sju åren (fig. 9). År 2013 avvek dock från detta mönster, nederbörden var låg i augusti och mycket hög i september (152 mm). Under båda dessa månader avvek de från medelvärdet med mer än en standardavvikelse. Nederbörden i september 2013 var koncentrerad till perioden mellan 17:e och den 23:e då nederbörden sammanlagt uppgick till 116 mm. Efterföljande period fram till spårdjupsstudien den 10 oktober var nederbördsfattig med endast 4 dagar med nederbörd som totalt uppgick till 21,3 mm (bilaga 3). I oktober 2013 var nederbörd lik medelvärdet för perioden 2007-2013 och låg inom en standardavvikelse från medelvärdet.



Figur 10. Nederbördsmängd vid Hemlings väderstation, medelvärdet och standardavvikelse för perioden 2007-2013 samt medelvärde för år 2013. SMHI ©

Figure 10. Amount of precipitation at Hemlings weather station, the mean and the standard deviation for the period 2007-2013 and mean value for the year 2013. SMHI ©

Jordlagerföljd

Provtagningen visade att väg B, C och D saknade överbyggnad och bestod enbart av naturligt material som tagits upp i väglinjen (bilaga 4). På väg A har det tidigare påförts bärlager i ett tunt skikt (<5 cm) dock har det tryckts ned och blandats ut med materialet i underbyggnaden. Därmed bedömdes det inte ha någon större effekt på vägkonstruktionens bärighet. I majoriteten av provtagningspunkterna bestod underbyggnad/undergrund av samma material vilken i fält preliminärt bedömdes som siltig sandig morän. De platser som avvek från detta mönster var början av väg D (D,1-D,3) där det påträffades lager av siltig morän och torv. Även punkt A,5 hade ett tunt skikt med siltig morän (bilaga 4).

Vattenkvot

Resultatet från mätningarna den 9-11 september visade på variationer längs med vägarna, värdena varierade mellan 9 - 21 % (tabell 7). Det ska dock noteras att prov C,5 som hade den lägsta vattenkvoten avser djupet 0-0,5 m under körbanan då djupare provtagning på den platsen inte var möjlig (bilaga 4). Medelvärdet för respektive väg varierade mellan 12 -15 % och medelvärdet för försöksområdet uppmättes till 14 %. Väg A hade högst vattenkvot och därefter i fallande ordning B, D och C. Standardavvikelse inom hela försöksområdet var 3 procentenheter och inom vägarna varierade den mellan 2 - 3 procentenheter.

Tabell 7. Vattenkvot i vägen från körbanan till 1 meters djup uppmätt den 9-11 september
Table 7. The water content in the road from the road surface to a depth of 1 meter measured 9-11 september

Väg A		Väg B		Väg C		Väg D	
Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)
A.1	10	B.1	17	C.1	14	D.1	18
A.2	13	B.2	11	C.2	12	D.2	15
A.3	12	B.3	15	C.3	12	D.3	18
A.4	14	B.4	11	C.4*	11	D.4	13
A.5	18	B.5	12	C.5*	9	D.5	13
A.6	11	B.6	16			D.6	11
A.7	16	B.7	12			D.7	11
A.8	18	B.8	15				
A.9	18	B.9	14				
A.10	12						
A.11	21						
A.12	15						
A.13	18						
A.14	15						
Medel	15		14		12		14
SD	3		2		2		3
Medel samtliga vägar:							14
SD:							3

* Vattenkvoten baserad på ett prov som tagits grundare än 0-1m.

Mätningen av vattenkvoten den 15 oktober visade att medelvärdet för skiktet 0-1 m under körbanan var 16 % vilket innebär en ökning med 2 procentenheter från mätningarna i september (tabell 7 och 8). Inom försöksområdet varierade vattenkvoten mellan 21 – 13 % och standardavvikelsen var 3 procentenheter.

Tabell 8 Vattenkvoten i vägen från körbanan till 1 meters djup uppmätt den 15 oktober
Table 8. The water content in the road from the road surface to a depth of 1 meter measured 15th of oktober

Väg A		Väg B		Väg C		Väg D	
Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)	Provnr	Vattenkvot (%)
A,3	21	B,2	15	C,2	13	D,5	14
A,6	20	B,7	18	C,4	14	D,7	15
Medel:	21	Medel:	17	Medel:	14	Medel:	14
Medel samtliga vägar:						16	
SD:						3	

Kornstorleksfördelning

Torrsiktningen visade att kornstorleksfördelningen var likartad i samtliga vägar med i genomsnitt 11 % finjord, 60 % sand och 29 % grus i skiktet 0-1 m under körbanan. Dock kan det konstateras att väg B hade något lägre finjordshalt och något högre grushalt än de övriga tre vägarna. I väg B uppmättes kornstorleksfördelningen till 9 % finjord, 60 % sand och 31 % grus (tabell 9). Standardavvikelsen inom försöksområdet är lägst i finjordsfraktionen och störst i grusfraktionen. Fullständig kornstorleksfördelning från samtliga 35 provtagningspunkter visas i bilaga 5.

Tabell 9. Resultat från torrsiktning, kornstorlekens viktprocent av jordprovets bruttovikt (material < 63 mm). Medelvärde per väg och försöksområdet samt standardavvikelse av samtliga prov.
Table 9. Results from dry sieving, the grain size weight percent of the soil sample mass (material <63 mm). Mean value per road and test area and standard deviation of all samples.

Väg	Kornstorlek		
	<0,063 (mm) Finjord	0,063 – 2 (mm) Sand	2 - 63 (mm) Grus
A	11	61	28
B	9	60	31
C	10	60	29
D	12	58	29
Medel:	11	60	29
SD:	2	4	5

Torrsiktning underskattar finjordsandelen och därför genomfördes en våtsiktning för att bestämma jordarten. Resultatet från våtsiktningen visade att det i genomsnitt var 25 % finjord, 46 % sand och 29 % grus i vägarna (tabell 10). Genom detta bestämdes jordarten i underbyggnad/undergrund till grusig, sandig, siltig morän det vill säga normalmorän. Eftersom provtagningen skedde genom skruvprovtagning var det ej möjligt att fastställa blockhalten.

Tabell 10. Resultat från våtsiktning, kornstorlekens viktprocent av jordprovets bruttovikt (material < 63 mm)

Table 10. Results from wet sieving, the grain size weight percent of the soil sample mass (material < 63 mm)

Väg	Kornstorlek		
	<0,063 (mm) Finjord	0,063 – 2 (mm) Sand	2 - 63 (mm) Grus
A	26	44	30
B	21	48	31
C	29	44	27
D	24	48	28
Medel:	25	46	29
SD:	3	2	2

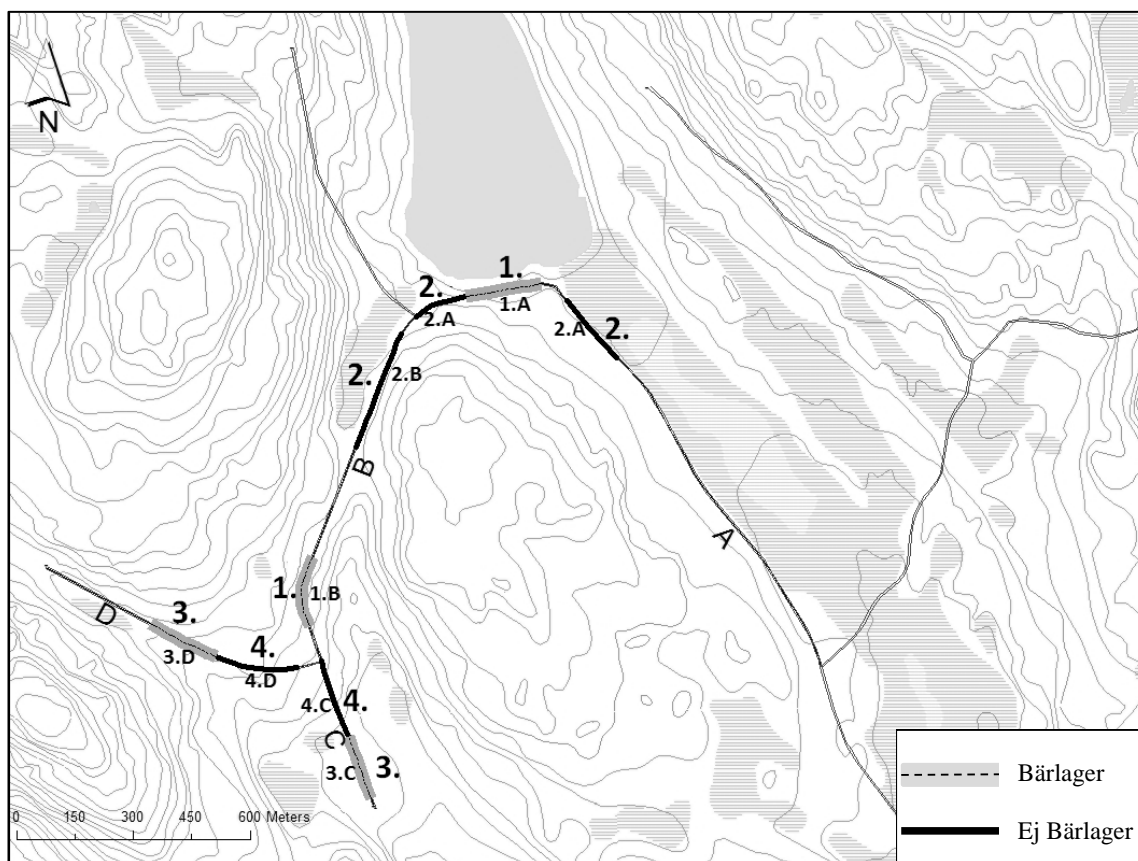
2.5 Identifierade försökssträckor

Fyra försökssträckor identifierades och benämndes 1-4 (fig. 11). Deras ingående vägavsnitt betecknades med försökssträckans nummer och på vilken väg den var placerad (A-D). Det vill säga vägavsnitt 1. A ingår i försökssträcka 1 och är placerad på väg A. Två vägavsnitt på väg A identifierades som jämförbara med två avsnitt på väg B vilket resulterade i försökssträcka 1 och 2. På samma sätt identifierades två vägavsnitt på väg C som var jämförbara med två vägavsnitt på väg D vilket blev försökssträcka 3 och 4. Vägavsnitten i försökssträckorna var ca 200 m långa förutom i försökssträcka 2 där vägavsnitten var 400 meter långa (tabell 11).

Tabell 11. Vägavsnitten som ingick i försökssträckorna

Table 11. The road sections that were included in the test sections

Försökssträcka	Vägavsnitt	Längd (m)	Bärlager (cm)
1	1.A	200	5
	1.B	200	
2	2.A	400	-
	2.B	400	
3	3.C	180	5
	3.D	200	
4	4.C	200	-
	4.D	200	



Figur 11. Placeringen av försökssträckorna 1,2, 3 och 4 på respektive väg samt deras vägvägningsavsnitt. Lantmäteriet ©.

Figure 11. The placement of test section 1,2,3 and 4 on each road and their road sections. Lantmäteriet ©.

På försökssträckorna 1 och 3 lades bärlager (0-35 mm) ut på en sträcka om 200 m (fig. 11). Bärlagret som användes hämtades från en kommersiell täkt (Gidmarks grusförädling). Mängden bärlager som lades ut motsvarade 410 ton/km, vilket i teorin innebär en tjocklek av 5 cm packat bärlager. Detta är hälften av vad Holmen Skog region Ö-vik normalt lägger på en skogsbilväg av klass 3C givet att undergrunden består av normalmorän (tabell 3). Bärlagret packades genom grusbilens överfarter vilket är standard för Holmen Skog i region Ö-vik varför denna metod ansåg passa studiens syfte bäst (Kristofferson, 2013). För att få likartad packningsgrad fick grusbilen direktiv om att packa bärlagret på samtliga vägvägningsavsnitt med lika många överfarter.

Dynamisk deformationsmodul (E_{vd})

Den dynamiska deformationsmodulen varierade mellan 21,23 MPa och 37,55 MPa inom försöksområdet (tabell 12). Det förekom även skillnader mellan vägvägningsavsnitten inom försökssträckorna men främst på försökssträcka 1 och 3 där bärlager lagts ut. Störst skillnad uppträdde på **försökssträcka 1** där vägvägningsavsnitt 1.A hade ett E_{vd} -värde på 37,55 MPa och 1.B ett värde på 23,48 MPa. På **försökssträcka 3** var differensen mindre, där uppmättes E_{vd} -värdet till 21,23 MPa på vägvägningsavsnitt 3.C och till 27,16 MPa på vägvägningsavsnitt 3.D. På försökssträckorna 2 och 4 hade inget bärlager lagts ut, där bestod vägvägningsavsnittet enbart av underbyggnaden.

Försökssträcka 2 uppvisade högst genomsnittlig E_{vd} -värde och differensen mellan vägvägningsavsnitten var liten. Här mättes E_{vd} -värdet till 34,08 MPa på vägvägningsavsnitt 2.A och till 34,48 MPa på 2.B vilket ger ett medelvärde på 34,28 MPa. **Försökssträcka 4** uppvisade också liten

spridning mellan vägvansnitten, dock hade vägvansnitt 4.C en relativt hög standardavvikelse (7,99). Här uppmättes E_{vd} -värdet till 22.21 MPa på 4.C och till 22.41 MPa på 4.D.

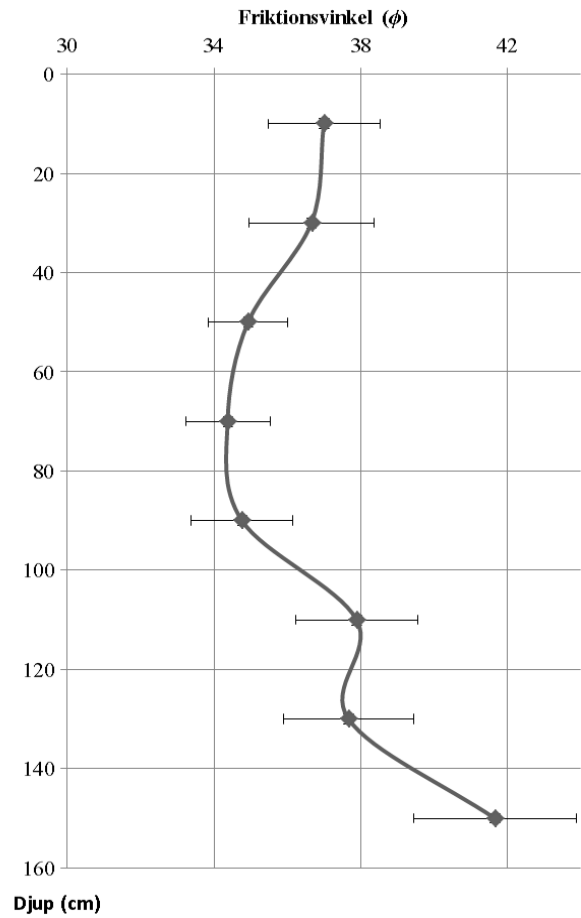
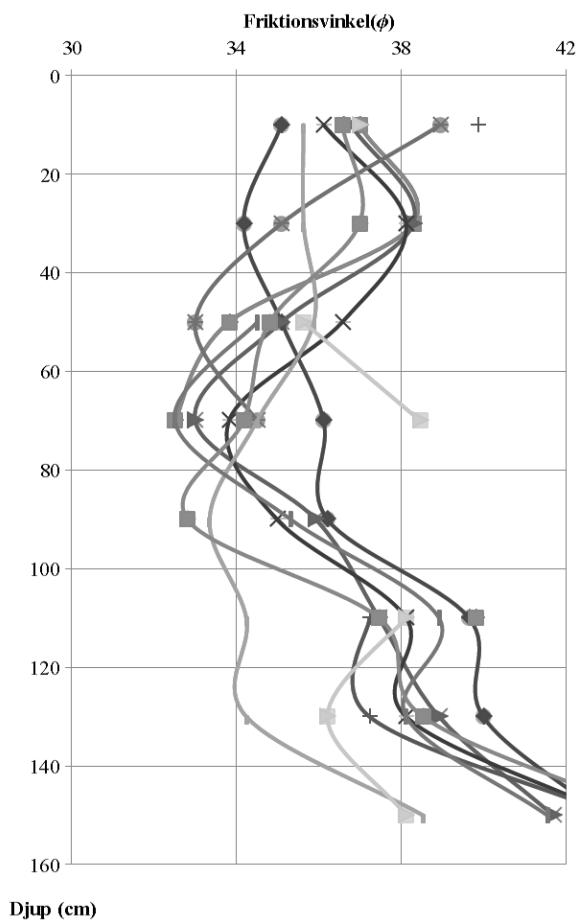
Tabell 12. Resultat från bärighetsmätningar med LWD på försökssträcka 1-4

Table 12. Results from bearing capacity measurements on test section 1-4 performed with a LWD

Försökssträcka	Vägvansnitt	E_{v2} (MPa)	E_{vd} (MPa)	SD	n	Bärlager (cm)
1	1.A	75	37,55	2,91	3	5
	1.B	45	23,48	2,73	3	
2	2.A	70	34,08	5,43	6	-
	2.B	70	34,48	4,69	6	
3	3.C	40	21,23	1,06	3	5
	3.D	50	27,16	3,85	3	
4	4.C	40	22,21	7,99	3	-
	4.D	40	22,41	4,25	3	

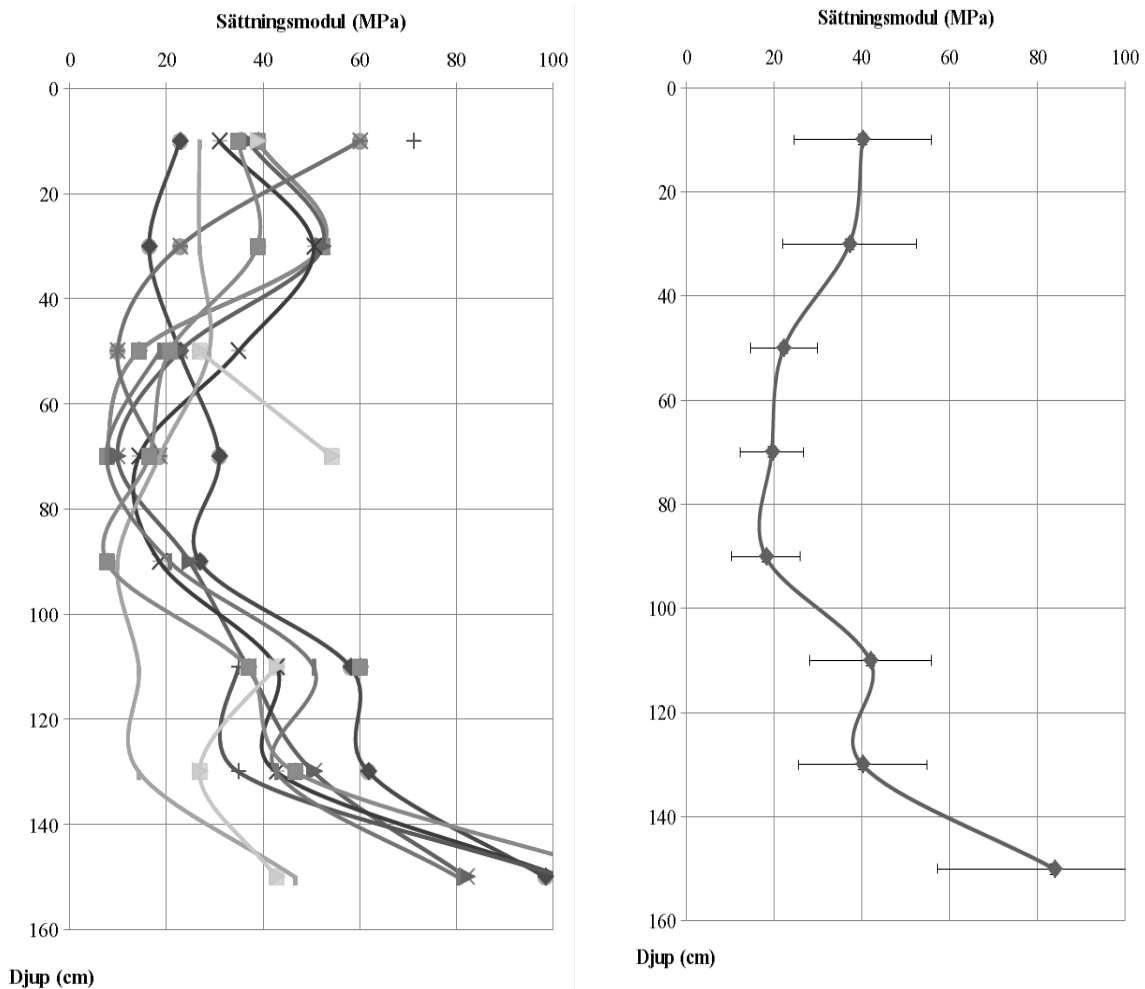
Friktionsvinkel och sättningsmodul

Borrhålsritning och karta över borrhålens placering visas i bilaga 7 och 8. Härlett värde för friktionsvinkel var $\phi = 37^\circ$ i skiktet 0-40 cm, $\phi = 35^\circ$ i skiktet 40-100 cm, $\phi = 38^\circ$ i skiktet 100-140 cm, $\phi = 42^\circ$ i skiktet 140-160 cm (fig. 12). Härlett värde för sättningsmodulen var 39 MPa i skiktet 0-40 cm, 20 MPa i skiktet 40-100 cm, 41 MPa i skiktet 100-140 cm och 82 MPa i skiktet 140-160 cm (fig. 13) Detta innebär att vägkroppen hade en fast lagringstäthet ned till 40 cm djup under körbanan och därefter lös till medelfast ned till 100 cm djup. Under den nivån ökade lagringstätheten till fast ned till 140 cm djup och sedan ökade den gradvis till att bli mycket fast under den nivån. Detta tyder på att de översta av 40 cm av vägkroppen har packats av trafikbelastningen. Den undre delen av underbyggnaden har påverkats mindre av trafikbelastningen då den uppvisar samma lagringstäthet som undergrunden. På större djup där lagringstätheten ökade är det sannolikt att det rör sig om bottenmorän vilken är väldigt hårt packad till följd av inlandsisens tyngd (Karlsson & Hansbo, 1992).



Figur 12. Friktionsvinkel (ϕ) härledd från hejarsondering. Till vänster friktionsvinkel i samtliga provtagningspunkter, extremvärden exkluderade. Till höger medelvärdet av friktionsvinkel samt standardavvikelse.

Figure 12. The angel of friction (ϕ) derived from ram drilling. On the left, the angel of friction (ϕ) in all sampling points, outliers excluded. To the right the mean value of the angle of friction and standard deviation.



Figur 13. Sättningsmodul härledd från hejarsonering. Till vänster sättningsmodul i samtliga provtagningspunkter, extremvärden exkluderade. Till höger medelvärde sättningsmodulen samt standardavvikelse.

Figure 13. The settling module derived from ram drilling. On the left, the settling module in all sampling points, outliers excluded. To the right the mean value of the settling module and standard deviation.

Sammanfattning

Försökssträckorna var uppbyggda av grusig, sandig, siltig, morän (normalmorän) med 25 % finjord, 49 % sand och 29 % grus. Två av försökssträckorna hade en överbyggnad bestående av 5 cm bärlager (0-35 mm), övriga sträckor saknade bärlager. Där bestod väggroppen endast av en underbyggnad. Vattenkvoten i försökssträckorn var i genomsnitt 16 % i skiktet 0-1 m under körbanan. Kennedy (2007) har konstaterat att den typ av morän som försökssträckorna bestod av har bra egenskaper för vägbyggnad. I en sådan morän vid en vattenkvot på 12 - 14 % och efter packning kan E_{v2} uppgå till ca 120 MPa vilket möter Trafikverkets bärighetskrav enligt TRVKB 10 (Kennedy, 2007). På vägvägnings i denna studie uppmättes E_{v2} till 40 - 75 MPa vilket är 38 - 67 % lägre än vad som kan åstadkommas med denna typ av material. Men detta bör dock ställas i relation till trafikmängd. Vägar med detta bärighetskrav har en ÅDT < 2000 och i relation till det har försökssträckorna en hög bärighet. Friktionsvinkel beräknades till 37 grader i den övre delen av väggroppen. Enligt TK geo 11 kan en normalmorän uppnå en friktionsvinkel på 42 grader om den packats enligt AMA 10. Det innebär att försöksområdet hade en relativt hög bärighet och fasthet men att med erforderlig packning kan högre bärighetsvärden uppnås.

2.6. Fältförsök med ett CTI-utrustat virkesfordon

Virkesfordonet

Vid fältförsöket användes en Volvo FH16 750 samt en timmersläpvagn tillverkad av Björnavagnar (fig. 14) som var utrustat med ett CTI-system från Tireboss. Virkesbilen hade 3 axlar och timmervagnen 4 axlar. Däcksuppsättningen bestod av 22,5 tums däck med dubbelmontage på bakhjul och släp (tabell 13).



Figur 14. Virkesfordonet som användes i studien.

Figure 14. The timber vehicle that was used in the study.

Tabell 13. Däckdimensioner på virkesfordonet

Table 13. Tire dimensions on the timber truck

Placering	Däckdimensioner		
	Beteckning	Bredd (mm)	Diameter (mm)
Framhjul (enkelhjul)	385/65R22,5	385	822
Bakhjul (dubbelmontage)	295/80R22,5	295	807,5
Släp (dubbelmontage)	275/70R22,5	275	764

Enligt ägaren av virkesfordonet hade bilen (inklusive kran) och släpvagnen en taravikt på 16 100 kg respektive 6 300 kg. Vid försöket var fordonskombinationen fullastad och lasten bestod av massaved destinerad till Husum, bruttovikten var 61 500 kg vid invägning vid industrin vilket ger en lastvikt på 39 100 kg (tabell 14). Enligt en rapport från SDC har barmassaved som leveraras till Husum i oktober månad en genomsnittlig densitet på 1,14 m³fub/ton (Johansson & Björklund, 2011). Det ger virkesfordonet en lastvolym på 44,6 m³fub. Vid beräkningar av axeltryck antogs lastvikten vara jämnt fördelad på tre travar vilket ger virkesbilen och släpvagn bruttovikten 29 133 kg respektive 32 367 kg (tabell 14).

Tabell 14. Taravikt, lastvikt och bruttovikt på virkesbilen och timmersläpvagnen**Table 14.** Tare weight, cargo weight and gross weight of the timber truck and timber trailer

	Taravikt (kg)	Lastvikt (kg)	Bruttovikt (kg)
Virkesbil	16100	13033	29133
Timmervagn	6300	26067	32367
Totalt:	22400	39100	61500

Virkesfordonets kontrollenhet för CTI-systemet var inställd för sommartransport och hade 6 tillgängliga tryck. Vid spårdjupsstudien användes endast två trycksättningar: lågt däckstryck och högt däckstryck. För lågt däckstryck användes inställningen **Dålig grusväg lastad** och för högt däckstryck användes inställningen **Landsväg lastad** (tabell 15).

Tabell 15. Trycksinställningar som användes vid spårdjupsstudien**Table 15.** The pressure settings that were used in the rut depth study

Trycksättning	Inställning	Framhjul (kPa)	Bakhjul (kPa)	Släp (kPa)
Lågt däckstryck	Dålig grusväg lastad	503	350	483
Högt däckstryck	Landsväg lastad	820	650	750

Kontaktytan på virkesfordonets däcksuppsättning vid högt och lågt tryck mättes för att möjliggöra beräkningar av marktrycket vid respektive däckstryck (tabell 16). Mätningen utfördes med sprayfärg och en tumstock vilka användes för att markera kontaktytan och mäta dess area.

Tabell 16. Kontaktytan per axel vid högt och lågt däckstryck**Table 16.** Contact surface per axel at high and low tire pressure

	Däck	Högt tryck		Lågt tryck	
		(kPa)	(m ²)	(kPa)	(m ²)
Framhjul	385/65R22,5	821	0,14	503	0,19
Bakhjul	295/80R22,5	650	0,22	352	0,28
Släp	275/70R22,5	752	0,17	483	0,23

Utifrån virkesbilen och timmersläpvagnens bruttovikt samt kontaktyta beräknades marktrycket vid högt och lågt däckstryck. På släpet antogs taravikten och lastvikten vara jämt fördelad över dess fyra axlar. Med hjälp av enkla beräkningar antogs axellasten på virkesfordonets framaxel vara 8 500 kg och på bakaxeln 10 300 kg. Det ger fordonskombinationen ett marktryck på 455- 600 kPa vid högt däckstryck och 345-450 kPa vid lågt däckstryck. Det innebär en procentuell reduktion av marktrycket med 20-25 % när fordonskombination sänker däckstrycket (tabell 17).

Tabell 17. Kontaktyta och marktryck per axel vid högt och lågt tryck*Table 17.* Contact surface and ground pressure per axle at high and low tire pressure.

Placering	Däck	Axellast (kg)	Kontaktyta		Marktryck		Förändring %
			(m ²)		(kPa)		
			Högt tryck	Lågt tryck	Högt tryck	Lågt tryck	
Framhjul	385/65R22,5	8500	0,14	0,19	600	450	25
Bakhjul	295/80R22,5	10316	0,22	0,28	459	367	20
Släp	275/70R22,5	8092	0,17	0,23	455	345	24

Spårdjupsstudie med virkesfordon

Den 10 oktober utfördes spårdjupsstudien på försöksområdet. På varje försökssträcka trafikerades de ingående vägavsnitten med endast en typ av däckstryck, lågt eller högt (tabell 18). Totalt trafikerades varje försökssträcka med 30 överfarter under fyra timmar. Föraren i virkesfordonet var instruerad att köra i samma spår vid alla överfarter. Detta gjordes för att säkerställa att spårbildning uppstod där referensmätningen skett för att därigenom kunna koppla spårdjupet till antalet överfarter och inte virkesfordonets spårval. Vidare gavs den instruktionen för att utsätta vägen för maximal belastning.

Tabell 18. Däckstryck som användes på vägavsnitten i försökssträcka 1-4*Table 18.* Tire pressures used on each road section in the test section 1-4

Försökssträcka	Vägavsnitt	Däckstryck	Längd (m) (m)	Bärlager (cm)
1	1.A	Lågt	200	5
	1.B	Högt	200	
2	2.A	Lågt	400	-
	2.B	Högt	400	
3	3.C	Högt	180	5
	3.D	Lågt	200	
4	4.C	Högt	200	-
	4.D	Lågt	200	

Vid spårdjupsmätningen användes en Topcon RL-H3C rotationslaser och en Topcon LS-70B lasermottagare som var monterad på en elektronisk avvägningstång av märket Z-FIX (fig. 14). Enligt instruktionsboken har rotationslasern en mätnoggrannhet på $\pm 3,6$ mm/50 m och lasermottagaren tillsammans med avvägningstången har en noggrannhet på ± 1 mm (Anon, 2012). Då avståndet mellan laser och mottagare aldrig var större än ca 5 m är det sannolikt att mätnoggrannheten var bättre än $\pm 3,6$ mm vid mätningarna.

Spårbildningen fastställdes genom att mäta körbanans profil innan (referens) och efter trafikerings av virkesfordonet. Mätplatserna var placerade med 50 m avstånd och vid de punkter där LWD mätningarna utförts. Detta möjliggjorde analyser av spårdjupet med hänsyn till uppmätt bärlighet. På varje vägavsnitt fanns det 3 mätpunkter förutom på vägavsnitten tillhörande försökssträcka 2 som hade 6 mätpunkter. Spårdjupet efter 30 överfarter mättes vid samtliga mätpunkter och på en av mätpunkterna i varje vägavsnitt mättes dessutom spårdjupet efter 6,12, 18, 24 och 30 överfarter vilket användes för att få en bild av vägens successiva nedbrytning.

Vid mätningarna användes en stakkäpp som fixhöjd och i förhållande till den mättes körbanans höjd på ett avstånd av 30, 60, 90, 150, 210, 240 och 270 cm från ytterkanten på det ena befintliga hjulspåret. Det mätvärde med störst differens i förhållande till referensmätning i respektive hjulspåret fastställdes som den uppkomna spårbildningen i det hjulspåret. Mätpunktens spårbildning bestämdes genom att ta medelvärdet för spårbildning av höger och vänster hjulspår.



Figur 15. Mätning av körbanans profil med rotationslaser och Z-fix. Foto: Gustav Karlefors
Figure 15. Measurement of road surface profile with a rotating laser and Z-fix. Foto: Gustav Karlefors

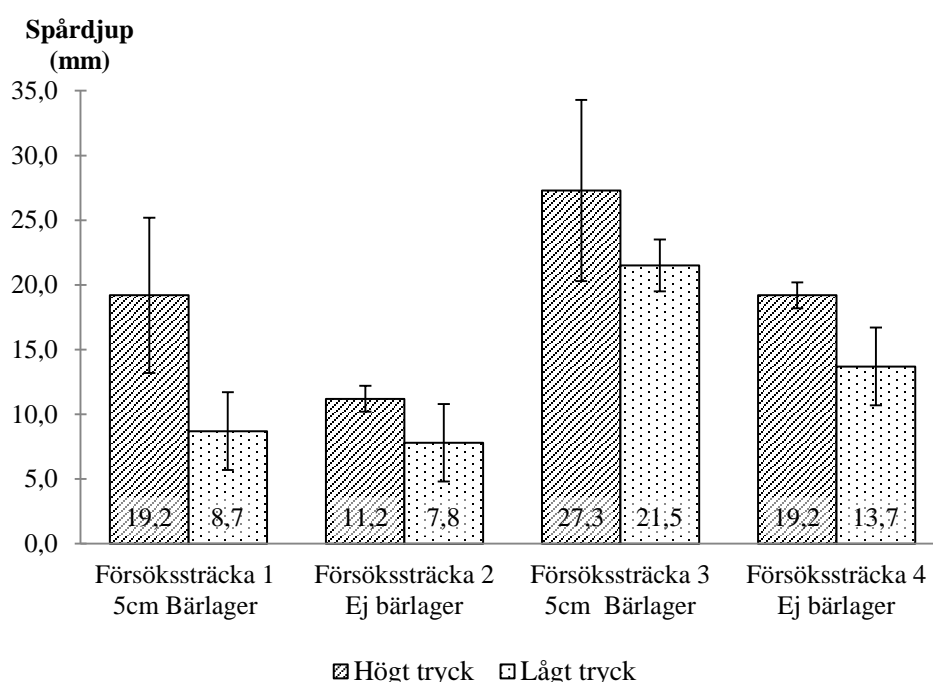
För att fastställa om spårbildningen inom försökssträckorna var signifikant mindre på vägvsnitten som trafikerades med lågt däckstryck användes ett ensidigt T-test. För att avgöra om spårbildningen skiljde sig mellan vägvsnitten med och utan bärlager placerade på samma väg och som trafikerades med samma däckstryck användes ett tvåsidigt T-test. Ett tvåsidigt T-test användes också för att undersöka om E_{vd} -värdena var skilda mellan vägvsnitten i försökssträckorna. Signifikansnivån sattes till 95 % och vägvsnittens varians antogs vara likvärdig.

En regressionsanalys genomfördes för att undersöka om spårbildningen var beroende av däckstryck och/eller bärighet. Däckstrycket användes som en kategorisk variabel med kategorierna högt eller lågt däckstryck. Variabeln bärighet var kontinuerlig och utgjordes av mätresultatet från LWD. Fler förklarande variabler var inte möjligt att använda då det i regressionsanalys krävs att de förklarande variablerna är oberoende av varandra (Chatterjee, & Hadi, 2006). Därför kunde inte vattenkvot och kornstorlek användas eftersom de inte är oberoende av varandra och är korrelerade till bärighet.

För att undersöka huruvida spårbildning och E_{vd} -värdena var skilda inom försöksområdet genomfördes en varians analys (ANOVA) och för att identifiera vilka medelvärden som skiljde sig åt användes ett Tukey test.

3. Resultat

Utvecklingen av spårbildning efter trafikering av ett virkesfordon med lågt eller högt däckstryck mättes på fyra försökssträckor på en skogsbilväg med en underbyggnad av normalmorän. Varje försökssträcka bestod av två separata vägvagnsnitt med liknande egenskaper där den ena trafikerades med lågt däckstryck och den andra med högt däckstryck. På två av försökssträckorna (försökssträcka 1 och 3) var det utlagt 5 cm bärlager (0-35 mm) och på övriga sträckor saknade vägen bärlager. Totalt trafikerades varje försökssträcka med 30 överfarer av ett fullastat virkesfordon med lastvikten 39 100 kg och bruttovikten 61 500 kg. De 30 överfarer motsvarade en transporterad vikt och volym på 1173 ton och 1337 m³fub.



Figur 16. Spårdjup på försökssträckorna efter 30 överfarer.

Figure 16. Rutting on the test sections after 30 overpasses.

På **försökssträcka 1** hade 5 cm bärlager lagts ut på underbyggnaden och där gav lågt däckstryck 10,5 mm mindre spårbildning än högt däckstryck. Det var den största uppmätta differensen i försöksområdet (fig. 16). Vägvagnsnittet som trafikerades med lågt däckstryck hade 8,7 mm spårdjup efter 30 överfarer medan på avsnittet där högt däckstryck användes var spårdjupet 19,2 mm. Här återfanns även störst skillnad i E_{vd} -värde mellan de två ingående vägvagnsnitten. E_{vd} -värdet på vägvagnsnitt 1.A var 14,1 MPa högre än vägvagnsnitt 2.B (tabell 19).

På **försökssträcka 2** var inget bärlager påfört utan här skedde trafikeringen direkt på underbyggnaden. På försökssträckan påvisade LWD-mätningen små skillnader i bärighet mellan de två ingående vägvagnsnitten (tabell 19). Vägvagnsnittet som trafikerades med lågt däckstryck hade 7,8 mm spårdjup efter 30 överfarer medan på vägvagnsnittet där högt däckstryck användes var spårdjupet 11,2 mm (fig. 16). Lågt tryck gav således 3,4 mm mindre spårdjup än högt tryck på denna försökssträcka.

På **försökssträcka 3** hade 5 cm bärlager lagts ut underbyggnaden. På den försökssträckan var den uppmätta bärigheten högre på vägavsnittet som trafikerades med lågt däckstryck (tabell 19). På det vägavsnittet var spårdjupet 21,5 mm efter 30 överfarer medan på vägavsnittet där högt däckstryck användes var spårdjupet 27,3 mm (fig. 16). På denna försökssträcka gav lågt däckstryck följaktligen 5,8 mm mindre spårdjup än högt däckstryck.

På **försökssträcka 4** var inget bärlager påfört utan här skedde trafikeringen direkt på underbyggnaden. På försökssträckan påvisade LWD-mätningen små skillnader i bärighet mellan de två ingående vägavsnitten (tabell 19). Vägavsnittet som trafikerades med lågt däckstryck hade 13,7 mm spårdjup efter 30 överfarer medan avsnittet där högt däckstryck användes var spårdjupet 19,2 mm (fig. 16). Lågt däckstryck gav därmed 5,5 mm mindre spårdjup än högt tryck på denna försökssträcka.

Spårbildningen var liten på samtliga försökssträckor vid både lågt och högt däckstryck och på samtliga försökssträckor blev spårbildningen mindre med lågt däckstryck (fig. 16). På två av försökssträckorna (1 och 4) var differensen statistiskt signifikant med ett konfidensintervall på 95 %. På försökssträcka 1 var även den uppmätta bärigheten signifikant skild mellan de ingående vägavsnitten. På de övriga försökssträckorna (2 och 3) var inte spårbildning statistiskt signifikant skild mellan lågt och högt däckstryck. Försökssträcka 2 hade ett p-värde = 0,119 och försökssträcka 3 hade ett p-värde = 0,125 (tabell 19).

Försöksområdet bestod av fyra vägar (A-D). På varje väg fanns två typer av vägavsnitt, ett med 5 cm bärlager och ett utan bärlager och varje väg trafikerades bara med en typ av däckstryck, högt eller lågt. Inom vägarna blev spårbildning större på vägavsnitten med bärlager och differensen varierade mellan 1,1 - 8 mm (fig. 16). Spårdjupet var dock inte statistiskt signifikant skild mellan vägavsnitten på samma väg (tabell 19).

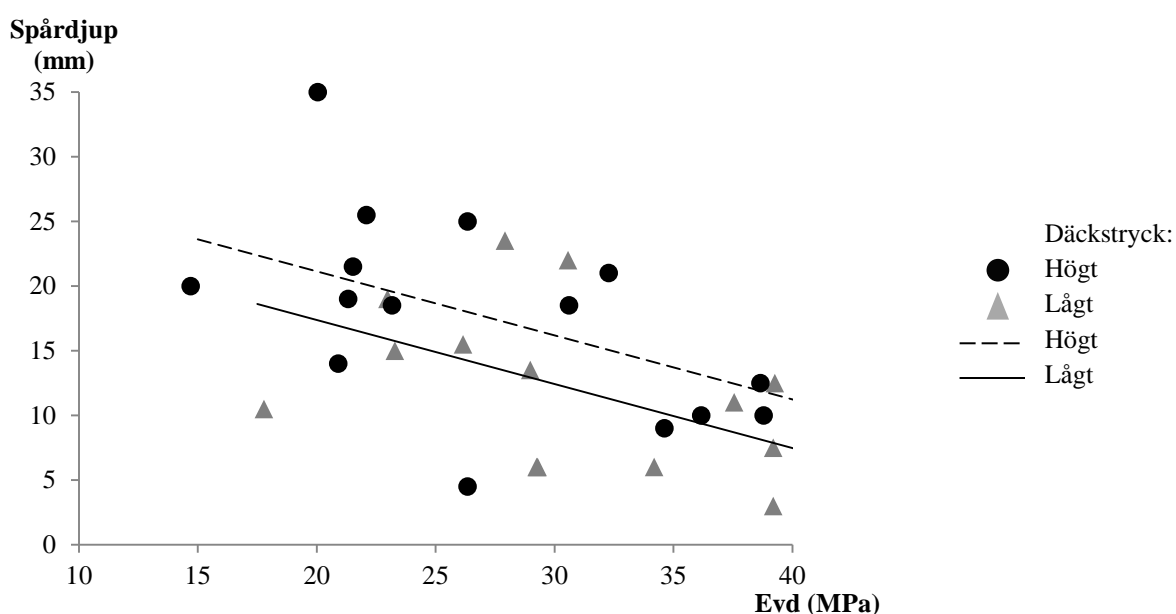
Tabell 19. Spårbildning efter 30 överfarer samt försökssträckornas uppmätta bärighet (E_{vd})
Table 19. Rutting after 30 overpasses and the measured bearing capacity (E_{vd}) on the test sections

Försöks- sträcka	Väg- avsnitt	Däcks tryck	Bärlager- tjocklek (cm)	Spårdjup			E_{vd}		
				(mm)			(Mpa)		
				Medel ¹⁾²⁾	n	SD	Medel ¹⁾²⁾	n	SD
1	1.A	Lågt	5	8,7 ^{a,C,D}	3	3,4	37,55 ^{a,A}	3	2,91
	1.B	Högt	5	19,2 ^{b,A,B,C}	3	5,5	23,48 ^{b,B,C}	3	2,73
2	2.A	Lågt	-	7,8 ^{a,D}	6	3,8	34,08 ^{a,A,B}	6	5,43
	2.B	Högt	-	11,2 ^{a,B,C,D}	6	5,5	34,48 ^{a,A,B}	6	4,69
3	3.C	Högt	5	27,3 ^{a,A}	3	6,9	21,23 ^{a,C}	3	1,06
	3.D	Lågt	5	21,5 ^{a,A,B}	3	2,3	27,16 ^{a,A,B,C}	3	3,85
4	4.C	Högt	-	19,2 ^{a,A,B,C}	3	0,8	22,21 ^{a,C}	3	7,99
	4.D	Lågt	-	13,7 ^{b,B,C,D}	3	2,8	22,41 ^{a,C}	3	4,25

¹⁾ Inom en försökssträcka (1-4), värden som inte har samma upphöjda **små** bokstäver är signifikant skilda på 5 % nivå.

²⁾ Inom försöksområdet, värden som inte har samma upphöjda **stor** bokstav är signifikant skilda på 5 % nivå.

T-testerna och ANOVA analysen av E_{vd} -värdena visade att det fanns signifikanta skillnader inom försökssträckorna och mellan vägvagnsnitten inom hela försöksområdet (tabell 19). Därför användes regressionsanalys för att undersöka om däckstryck och/eller bärighet (E_{vd}) påverkade spårbildningen. Analysen av datasetet med spårbildning, bärighet och däckstryck uppfyllde villkoren för multipel linjärregression (Bilaga 10). Residualerna var normalfördelade, hade konstant varians och de var oberoende av varandra (bilaga 10). Via regressionsanalysen erhöles ekvationer för spår djup med avseende på bärighet och däckstryck (tabell 20). Ekvationerna visade att vid samma bärighet ger lågt däckstryck 4 mm mindre spårbildning än högt däckstryck (fig. 17). Dock var variabeln däckstryck inte signifikant i ekvationen då den hade ett p-värde = 0,12. Variabeln bärighet hade däremot ett p-värde = 0,005 och var således signifikant i ekvationen. Ekvationerna hade en förklaringsgrad på 32% vilket innebär att fler förklarande variabler krävs för förklara variationen i spårbildningen (bilaga 11).



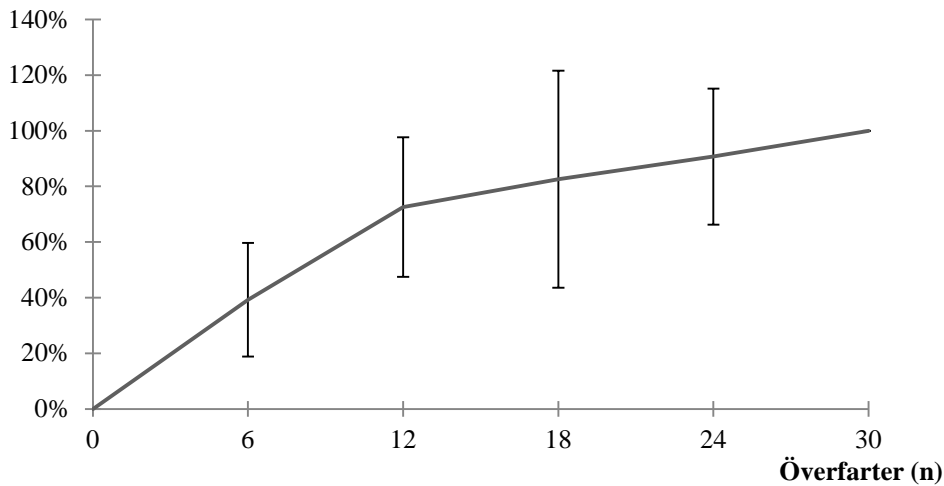
Figur 17. Spridningsdiagram med regressionslinje. Spårdjup vs Evd grupperat efter däckstryck.
Figure 17. Scatterplot with regression. Rut depth vs Evd grouped by tire pressure.

Tabell 20. Ekvationer för spårdjup i mm som en funktion av bärighet (E_{vd}) och däckstryck.
Table 20. Equations for the rut depth in mm as a function of the load-bearing capacity (E_{vd}) and tire pressure

Däckstryck	Ekvation
Högt	$\text{Spårdjup} = 31,051 - 0,494982 \times E_{vd}$
Lågt	$\text{Spårdjup} = 27,2728 - 0,494982 \times E_{vd}$

Vid en plats per vägvagnsnitt mättes spårdjupet efter 6,12,18,24, och 30 överfarter. För varje hjulspår på varje vägvagnsnitt beräknades spårdjupet efter var 6:e överfart i procent av spårdjupet efter 30 överfarter. Spårbildningen från vägvagnsnitten sammaställdes till ett diagram och visade hur spårdjupet utvecklas över tiden (fig. 18). Tillväxten av spårdjupet är som störst under de 12 första överfarterna som står för 73 % av spårbildningen. Det motsvarar en

tillväxttakt av 6 procentenheter per överfart. Efter 12 överfarter avtar tillväxttakten och stabiliseras kring ett värde på 1,5 procentenheter per överfart. Standardavvikelsen är relativt stor och är som störst vid 18 överfarter.



Figur 18. Spårdjup efter var 6:e överfarter. Uttryckt i procent av spårdjupet efter 30 överfarter. Vertikala linjer visar SD vid var sjätte överfart.

Figure 18. Rut depth after every six overpasses expressed in percent of rut depth after 30 overpasses. Vertical lines show the SD for every six overpass.

Typen av spårbildningen som uppstod på försökssträckorna skiljde sig inte åt beroende på däckstryck. Det var av huvudsak typ 0, det vill säga att det översta lagret i väggroppen kompakterades i hjulspåren (fig. 19). Mer sällsynt och uteslutande på vägvägningsnitt med lägre bärighetsvärden uppstod en kombination av typ 0 och 1 spårbildning. Det översta lagret kompakterades och material skjuvades mot vägens sidor och mitt (fig. 20).



Figur 19. Typ 0 spårbildning.

Figure 19. Type 0 rutting.



Figur 20. Kombination av typ 0 och 1 spårbildning.
Figure 20. Combination of type 0 and 1 rutting.

4. Diskussion

4.1 Spårbildning

Studien genomfördes under hösten och avslutades med en spårdjupsstudie med ett CTI-utrustat virkesfordon den 10 okt. Resultatet från studien visade att på samtliga försökssträckor genererade lågt däckstryck mindre spårbildning än högt däckstryck. Differensen var dock liten (den varierade mellan 3,4 - 10,5 mm) men signifikant på två av fyra försökssträckor. Skälet till att endast två försökssträckor hade en signifikant skillnad beror troligtvis på att differensen var liten och att stickproven hade få observationer (mätpunkter per vägavsnitt). Ju mindre stickprov desto större differens krävs för att stickprovsmedelvärdena ska vara statistiskt signifikant skilda. På försökssträcka 1 var spårbildningen signifikant skild mellan lågt och högt däckstryck, och även bärigheten (E_{vd}) var signifikant skild mellan vägavsnitten. Vidare förekom det även signifikanta skillnader i bärighet mellan vägavsnitten inom försöksområdet (tabell 19). Därför utfördes en regressionsanalys för att undersöka om bärighet och/eller däckstrycket påverkade spårbildningen. Ekvationerna för spårdjup vid högt och lågt däckstryck som erhöles från den analysen visade att vid samma bärighet ger lågt däckstryck mindre spårdjup (fig.17). I ekvationen hade variabeln däckstryck ett p-värde = 0,12 vilket innebär att med 88 % sannolikhet ger lågt däckstryck mindre spårbildning än högt däckstryck vid samma bärighet. Sannolikheten är dock för liten för att detta med säkerhet ska kunna fastställas då det i statistiska sammanhang krävs en sannolikhet på 95 % för att en variabel ska vara signifikant. Variabeln däckstryck var dock inte helt osignifikant och datasetet som användes i regressionen var relativt litet. Med ett litet stickprov får varje observation en stor effekt på ekvationen och variabelernas signifikans (Chatterjee, & Hadi, 2006). Det kan nämnas att genom att ta bort en ovanlig observation i regressionsanalys spårdjup vs Däckstryck och Bärighet blev variabeln Däckstryck signifikant på 5 % nivån. Det indikerar att däckstryck har en inverkan på spårdjupet men att fler observationer krävs för att det ska bli statistiskt säkerställt.

På ingen av försökssträckorna blev spårdjupet tillräckligt stort för att hindra virkesfordonets framfart. Spårdjupet varierade mellan 7,8 – 27,3 mm och utgjordes i de flesta fall av typ 0 spårbildning. Det vill säga att materialet i vägens hjulspår har packats vilket gett upphov till spårbildning. Spårbildningen blev större på vägavsnitten med bärlager men differensen var inte statistiskt signifikant. Detta var inte väntat då det antogs att spårbildningen skulle bli mindre på försökssträckorna med bärlager. På sträckorna med bärlager var huvudsakligen spårbildning av typ 0 och mer sällsynt en kombination av typ 0 och typ 1. Eftersom bärlagret bestod av krossat material av god kvalitet orsakades spårbildningen sannolikt av otillräcklig packning (Dawson & Kolisoja, 2006). Troligtvis skulle spårbildningen blivit mindre om vägavsnitten med bärlager packats mer innan spårdjupsstudien. Även på försökssträckorna utan bärlager skulle bättre packning resultera i mindre spårbildning. Tidigare forskning visar tydligt att med erforderlig packning under rätt förutsättningar kan en betydligt högre fasthet och bärighet uppnås (Kennedy, 2007; Trafikverket, 2011b). Det är dock tänkbart att även en justering av diken, slänter och tvärfall är nödvändigt för att uppnå högsta möjliga bärighet, eftersom det innebär en bättre avvattning och dränering vilket därmed ger en längre vattenkvot i vägen (Granhage, 2009). Virkesfordonets spårval har också med stor sannolikhet påverkat spårbildningen. Om virkesfordonet hade tillåtits att variera sitt spårval skulle packning ha skett av hela körbanan och inte bara i hjulspåren. Det innebär att körbanan som helhet hade kompakteras och därmed hade det inte uppstått en nivåskillnad mellan hjulspår

och övriga delar av körbanan. Det i sin tur hade lett till mindre spår- och valkbildning på vägarna.

4.2 Utvärdering av material och metod

Skruvprovtagning användes för att bestämma kornstorleksfördelning, vattenkvot och jordlagerföljd i väggroppen. Det är en snabb metod och medför liten påverkan på körbanan. Dock blir provstorleken för liten för att kunna bestämma jordens blockhalt, vilket hade varit av intresse för denna studie då det påverkar jordens egenskaper. För att bestämma blockhalten hade det krävts att provgropsmetoden använts. Den metoden är långsammare än skruvprovtagning och att bestämma blockhalten är tidskrävande då stora volymer av jorden måste siktas och vägas. Därför användes skruvprovtagning istället eftersom det inte ansågs möjligt att bestämma blockhalten med hänsyn till tillgängliga resurser och därför att skruvprovtagning möjliggjorde fler provtagningspunkter. Det var ett stort område som skulle kartläggas med avseende på vattenkvot och jordart och därför valdes den snabbaste metoden, dvs. skruvprovtagning.

Kornstorleksfördelningen i vägens underbyggnad/undergrund bestämdes genom torr- och våtsiktning. Siktningen utfördes enbart på materialet i skiktet 0-1 m under körbanan. Vid den i fält preliminära bedömningen av jordlagerföljden konstaterades att materialet i skiktet 0-1 m var likvärdig med materialet på större djup (Bilaga 4). Därför ansågs det inte nödvändigt att bestämma kornstorleksfördelningen även på nivån 1-2 m under körbanan. För bestämning av jordarten i underbyggnaden användes våtsiktning som utfördes på ett jordprov per väg. Det hade dock varit lämpligt att genomföra fler våtsiktningar för att få en säkrare klassificering av jordarten i underbyggnad/undergrund. Det hade dessutom möjliggjort jämförelser av finjordshalten mellan vägavsnitten. Resultatet från torrsiktningen visade dock små variationer i kornstorleksfördelning mellan vägarna och via resultatet från våtsiktningen klassificerades jorden i vägarna till samma jordart. Därför våtsiktades inte fler prover eftersom det inte bedömdes sannolikt att jordarten skulle bestämmas annorlunda om fler prover våtsiktades.

Studier som berör vägars bärighet och hur väggroppen påverkas av trafikbelastningen kräver mycket tid och omfattande resurser för att samla in relevant mätdata. Därför är det svårt att inom ramarna för ett examensarbete att göra alla relevanta mätningar då det innebär tidskrävande och dyra mätningar. Försökssträckornas bärighet mättes med LWD och den har vissa begränsningar i form av djupverkan och mätnoggrannheten vid höga bärighetsvärden (SGF, 2004). Dessutom måste E_{vd} -värdet omvandlas till E_{v2} för att möjliggöra jämförelser mot annan forskning (Anon, 1994; Tompai, 2007). För noggrannare bestämning av vägnas bärighet och på djupare nivåer skulle PLT kunnat användas. PLT är en noggrannare mätmetod och E_{v2} värdet erhålls direkt från mätningen till skillnad från LWD då E_{vd} måste omvandlas till E_{v2} via korrelationssamband (Anon, 1994; Vägverket, 1993). PLT hade därmed gett en bättre jämförelse mot trafikverkets bärighetskrav och annan forskning då gränsvärden och mätresultat i vägkonstruktionens obundna lager vanligtvis specificeras i E_{v2} (Vägverket, 1993). En annan alternativ metod för bärighetsmätningar är FWD. Den utrustningen är noggrannare och har en större djupverkan än LWD, vilket skulle ge en exaktare mätning av bärigheten. Den skulle visa hela väggroppens bärighet och hur den varierar på olika djup. Dessutom skulle mätresultatet troligtvis i en regressionsanalys ha en bättre korrelation till spårbildningen då provbelastningen med FWD motsvarar överfarten av en lastbil (Trafikverket, 2012). Dock har LWD många fördelar gentemot PLT och FWD. LWD kräver

inget mothåll, mätningen är snabb, ekonomiskt fördelaktig och kräver ingen särskild utbildning och därför valdes den metoden för mätning av deformationsmodulen.

LWD kräver en jämn och plan yta vilket medförde vissa svårigheter vid mätningarna. På vissa platser var körbanan ojämn vilket ledde till att belastningsplattan inte hade fullständig kontakt med körbanan, vilket kan ge något osäkra mätvärden. Ett annat problem var mätningar i backar vars lutning ledde till att belastningsplattan rörde sig i sidled vid belastning vilket ger ogiltiga mätvärden (Anon, 1994). Detta problem uppstod på försökssträcka 4 som utgjordes av vägavsnitt 4.C och 4.D. När ovanstående problem uppkom genomfördes upprepade mätningar till dess att ett tillförlitligt värde kunde fastställas. Av den anledningen bedömdes redovisade mätvärden ha en betryggande tillförlitlighet.

Spårdjupsstudien genomfördes under en dag och där varje försökssträcka trafikerades under fyra timmar. Det är ovanligt att allt virke från en trakt transporteras ut under en halv dag, ofta är ledtiden från trakt till industri betydligt längre (Auselius, 2013). Därför hade det varit av intresse att undersöka spårbildningen vid trafikering under en längre tidsperiod. På så vis hade resultatet varit mer representativt för hur skogsbilvägar normalt trafikeras. Dock medför det stora kostnader att undanta ett virkesfordon från praktisk drift i flera dagar och därför var det inte möjligt inom ramarna för denna studie. Ett alternativ hade kunnat vara att använda ett vägområde som trafikerades i samband med virkestransporter i Holmen Skogs dagliga verksamhet. Nackdelen med den metoden är att försöket blir svårare att kontrollera och fler påverkande faktorer kommer variera under försöket. Det skulle även bli svårt att genomföra studien så att de undersökta vägavsnitten endast trafikerades med en typ av däckstryck. Med fler påverkande faktorer blir det svårare att dra slutsatser kring orsaken till spårbildningen och därför användes inte denna metod.

Virkesfordonet som användes i studien hade en däcksuppsättning bestående av 22,5 tums däck med dubbelmontage på bakhjul och släp. Andra typer av däcksuppsättningar ger ett annat marktryck. Dessutom skiljer sig den procentuella reduktionen av marktrycket mellan olika däcksuppsättningar (Granlund, 2006). Det är därför sannolikt att en annan typ av däcksuppsättning skulle ge ett annat resultat i spårdjupsstudien. Då Holmen Skogs entreprenörer använder olika typer av däcksuppsättning hade det varit relevant att genomföra spårdjupsstudien med olika typer av däcksuppsättningar. Det innebär dock stora kostnader samt en omfattande arbetsinsats och därför rymdes det inte inom ramarna för detta examensarbete.

På endast två av fyra försökssträckor var differensen i spårbildning mellan olika däckstryck statistiskt signifikant. Det beror sannolikt på att differensen var liten och att stickproven var små. Spårbildningen på vägavsnitten hade inte gått att påverka men däremot kunde fler mätningar per vägavsnitt utföras. Orsaken till att inte fler mätpunkter användes var dels att differensen i spårdjup förväntades bli större mellan lågt och högt däckstryck och dels fanns en tidsbegränsning. Körbanans profil mättes innan (referens) och efter trafikeringen av virkesfordonet och spårbildningen definierades i denna studie som differensen mellan de två mätningar. Referensmätningen utfördes dagen innan spårdjupsstudien för att säkerställa att försöksområdet inte trafikerades av några okända fordon vilka kunde påverka mätresultatet. Det innebar att det fanns relativt lite tid till att sätta upp mätpunkter samt att göra referensmätningen och av den anledningen begränsades antalet mätpunkter till 30 st.

4.3 Jämförelse med tidigare studier

Denna studie har visat att spårbildningen blir mindre när virkesfordon har lågt däckstryck, vilket även påvisats av andra studier (Bradley, 1996; Lègère & Mercier, 2005; Johansson, 2006; Granlund & Andersson, 1998; Grau, 1993; Åkerlund, 2006). Tidigare studier har dock uppvisat större och mer signifikanta skillnader i spårbildning mellan högt och lågt däckstryck än vad som framkommit i denna studie. Här bestod differensen av millimetrar och den var statistiskt signifikant på endast två av fyra försökssträckor. I de tidigare studierna har det rört sig om decimetrar och centimetrar. De skilda resultaten kan förklaras två faktorer. I de tidigare studierna har försöksvägarna bestått av ett betydligt sämre vägbyggnadsmaterial i undergrund/underbyggnad vilken haft en hög finjordsandel (Bradley, 1996; Lègère & Mercier, 2005; Johansson, 2006; Granlund & Andersson, 1998; Grau, 1993; Åkerlund, 2006). Dessutom har ett flertal av studierna genomförts under tjällossningen då vägkroppen har en betydligt högre vattenkvot (Johansson, 2006; Lègère & Mercier, 2005; Granlund & Andersson, 1998; Åkerlund, 2006). Det innebär att försöksvägarna haft en kraftigt reducerad bärighet vilket föranlett att högt däckstryck orsakat djupare spårbildning än i denna studie. Det betyder att det funnits en större potential att få stor differens i spårbildning mellan olika däckstryck då differensen inte kan bli större än det maximala spårdjupet. Det vill säga, ger högt däckstryck liten spårbildning blir differensen mot lågt däckstryck liten även om lågt däckstryck inte skapar spårbildning överhuvudtaget. Detta resonemang styrks av Vägverkets studie som genomfördes under våren 2005. Den studien visade att lågt däckstryck gav mindre spårbildning men att differensen var mest framträdande på strukturellt svaga vägar. På vägar med bättre bärighet uppträdde en mindre differens vilken utgjordes av millimetrar (Johansson, 2006). Detta tyder på att CTI har störst positiv effekt på vägar med hög finjordsandel i underbyggnad/ undergrund och/eller under tjällossning.

4.4 Dimensionering av skogsbilvägar för CTI-utrustade virkesfordon.

Nederbördsmängden innan spårdjupsstudien den 10 oktober 2013 låg inom en standardavvikelse från medelvärdet under perioden 2007-2013 (fig. 10). September 2013 avvek dock från detta mönster med en nederbörd på 152 mm och som därmed avvek med mer än en standardavvikelse från medelvärdet 2007-2013. Majoriteten av nederbörden var dock koncentrerad till perioden 17-23 september (bilaga 3). Före och efter den nederbördsperioden mättes vattenkvoten i vägarna, den 9-11 september och 15 oktober. Vattenkvoten i vägarna påverkades dock relativt lite av den kraftiga nederbörden och steg från 14 till 16 %. Vattenkvoten i försökssträckorna kan därför betraktas som normal eftersom den inte påverkades avsevärt av den kraftiga nederbördsperioden i september och då nederbörden i oktober var likvärdig med föregående år. Vidare kan det konstateras att vägar uppbyggda av normalmorän kräver stora mängder nederbörd för att vattenkvoten ska höjas till en sådan nivå att det medför en kraftig reduktion av vägens bärighet.

Spårdjupsstudien föregicks av en nederbördsfattig period (bilaga 3). Efter nederbördsperioden i september förekom det endast 4 dagar med nederbörd och som totalt uppgick till 21,5 mm. Det kan därför fastställas att försöksområdet inte utsatts för en ihållande regnperiod i anslutning till spårdjupsstudien. Det innebär att det inte går att dra slutsatser huruvida lågt däckstryck kan ge vägarna B-tillgänglighet. Däremot kan det konstateras att försökssträckorna uppnår C-tillgänglighet. Med utgångspunkt i lastvolymen på virkesfordonet i studien (44,6 m³fub) och Holmens Skogs medelvolym per trakt (945 m³fub) krävs det ca 21 transporter för

leverera virke från trakt till industri. Det innebär att i genomsnitt trafikeras Holmen Skogs vägar med 42 överfarter varav hälften är olastade. Detta är under förutsättning att genomfartsvägar och större vägar exkluderas. I denna studie trafikeras försökssträckorna med 30 fullastade överfarter under fyra timmar. Det betyder att försökssträckorna har utsatts för färre överfarter men att fler överfarter har varit fullastade än på genomsnittsvägen. Dessutom har trafikering skett under betydligt kortare tid än vad som är normalt. Därför dras slutsatsen att trafikbelastningen på försökssträckorna har varit minst lika stor som på Holmen Skogs genomsnittsväg. På ingen av vägavsnitten blev spårbildning tillräckligt omfattande för att hindra virkesfordonets framfart. Det betyder att varken en överbyggnad med 5 cm bärlager eller lågt däckstryck krävs för att försökssträckorna ska uppnå C-tillgänglighet. Följaktligen kan det inte rekommenderas en alternativ överbyggnad för vägar bestående av normalmorän och som enbart trafikeras av virkesfordon utrustade med CTI.

Resultatet innebär likväl en besparingspotential för Holmen Skog då det visar att överbyggnadens tjocklek kan reduceras till noll utan att svår spårbildning uppstår, detta oavsett däckstryck. Materialet i försökssträckornas underbyggnad/undergrund faller under kategorin sandig- och normalmorän i Holmen Skogs dimensioneringstabell för överbyggnader (tabell 3). För att uppnå C tillgänglighet på vägar med den typen av jordart i underbyggnad/undergrund läggs det normalt ut 820 ton bärlager per km (tabell 3). Att avstå från ett sådant bärlager innebär en besparing på 49 000 kr/km i enbart materialkostnader, givet priset på bärlager från en kommersiell täkt. Utöver detta erhålls även en besparing i form av transportkostnader för bärlagret. Det är dock tänkbart att ett tunt slitlager kan vara nödvändigt på dessa vägar för att skapa en jämnare körbana och skydda vägkroppen mot vatten. Vidare kan ett slitlager vara nödvändigt för att öka friktionen mellan däck och körbana vilken minskar risken för att fastkörning på grund av för dåligt grepp på körbanan.

Det bör framhållas att vägarna i försöksområdet byggdes på 70-talet vilket innebär att materialet i vägkroppen under lång tid har packats av trafikbelastningar och sättningar. Därför är det sannolikt att dessa vägar uppvisar en högre bärighet än en nybruten väg. Det gör att resultaten från denna studie ska användas med en viss försiktighet innan de appliceras på nybrutna vägar. Det krävs vidare forskning för att bestämma om även nybrutna vägar uppvisar samma bärighetsegenskaper. Den friktionsvinkel, sättningsmodul och E_{vd} -värde som uppmättes i denna studie kan då användas som erfarenhetstal. Visar en nybruten väg konstruerad av normalmorän liknande eller högre värden bör den kunna trafikeras av virkesfordon utan att svår spårbildning uppstår. Men det bör även undersökas hur spårbildningen utvecklas under en längre period på denna typ av väg och hur däcksuppsättningen påverkar spårbildningen.

Resultatet från den kontinuerliga spårdjupsmätningen visade spårbildningstakten minskade med fler överfarter. Därför bedöms det sannolikt att spårbildningen kommer stabiliseras på en låg nivå även med fler överfarter. Detta tillsammans med det faktum att ingen försökssträcka uppvisade svår spårbildning leder till slutsatsen att försökssträckorna troligtvis har en högre tillgänglighetsklass än C. Det innebär en än större besparingspotential för Holmen Skog. För att bekräfta detta samt huruvida det skiljer sig åt beroende på däckstryck krävs mer forskning vilken bör utföras under tjällossning och kraftiga regnperioder. Differensen i spårbildning mellan däckstrycken skulle troligtvis bli större vid den typen av förhållande. Vägarna skulle ha en högre vattenkvot vilket ger en lägre bärighet och därmed skulle trafikbelastning ge en större spårbildning. En sådan studie skulle i och med det ge ett bra underlag för dimensionering av skogsbilvägar som ska trafikeras av CTI utrustade virkesfordon under perioder med nedsatt bärighet.

4.5 Slutsatser

- På samtliga försökssträckor blev spårbildningen mindre med lågt däckstryck. På två av fyra försökssträckor var denna differens statistiskt signifikant.
- Äldre skogsbilvägar konstruerade av grusig, sandig, siltig morän (normalmorän) behövde inget bärlager för att uppnå tillgänglighetsklass C. Detta gäller även för vägar som trafikeras med konventionella virkesfordon. Vidare forskning krävs för att fastställa om detta även gäller för nybrutna vägar av denna typ.
- Utifrån resultatet från denna studie går det inte att rekommendera en alternativ dimensionering av skogsbilvägar med en underbyggnad av normalmorän och som enbart trafikeras av CTI-utrustade virkesfordon.

Källor:

- Anon. INSTRUCTION MANUAL ROTATING LASER RL-H3C. Topcon corporation.
- Anon. (94). *ZTVE-StB 94. Supplementary technical terms and conditions of contract and guidelines for earthworks in road construction.*
- Anon. (2011). *AMA Anläggning 10. Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten.* Svensk Byggtjänst.
- Anon. (2012). *Z-FIX avvägningstång. Instruktionsbok.* Nivator Instrument.
- Berglund, A. (2009). *Tjäle - en litteraturstudie med särskilt fokus på tjällossning.* Luleå Tekniska Universitet: Institutionen för Samhällsbyggnad, Avdelningen för Geoteknologi.
- Bradley, A. (1996). *Trial of a central tire inflation system on thawing forest roads.* Forest engineering research institute of Canada. (Technical Report No. TR116).
- Chatterjee, S. & Hadi, A. (2006). *Regression analysis by example.* 4:e uppl. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Dawson, A. & Kolisoja, P. (2006). *Managing rutting i low volume roads.* (Roadex III).
- Granhage, L. (2009). *Kompendium i vägbyggnad.* Chalmers tekniska högskola: Göteborg.
- Granlund, P. & Andersson, G. (1998). *CTI på virkesfordon ger bättre framkomlighet och större dragkraft.* Uppsala: Skogforsk. (Resultat, Nr 2).
- Granlund, P. (2006). *CTI på virkesfordon.* Uppsala: Skogforsk. (Redogörelse, Nr 3).
- Grau, R. W. (1993). *Effects of variable tire pressure on road surfacing's.* US Army Corps of Engineers for the US Department of Agriculture Forest Service Technology and Development Center.
- Gunnarson, S. Hallgren, P. & Christofferson, P. (2011). *Anvisningar för projektering och byggande av skogsbilvägar klass 3 och 4.* Skogsstyrelsen.
- IEG. (2010). *SS-EN/ISO 14688-1. Geoteknisk undersökning och provning Identifiering och klassificering av jord.* Stockholm: Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik. (Rapport 12:2010).
- Johansson, J. & Björklund, L. (2011). *Stickprovstravars vikt och volym. En studie av 5:2 – mätning.* Massaved 2004 – 2006. SDC.
- Johansson, S. (2006). *Fältförsök med CTI under 2004 och 2005.* Roadscanners Sweden AB.
- Jonsson, T. Larsson, M. Löfroth, C. & Filipsson, S.(red.) (1991). *Skogsbilvägar service, underhåll upprustning.* Oskarshamn: Forskningsstiftelsen Skogsarbeten 1991.

Karlsson, R. & Hansbo, S. (1992). *Jordarternas indelning och benämning*. Stockholm: Bygghörsningsrådet. (Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2).

Kennedy, H. (2007). *Mixed grain Till in pavement structures – A field and laboratory studie*. Göteborg: Chalmers tekniska universitet.

Larsson, R. (2007). CPT-sondering, utrustning – utförande – utvärdering, En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Linköping: Statens Geotekniska Institut. (Information 15).

Larsson, R. (2008). *Jords Egenskaper*. Linköping: Statens Geotekniska Institut. (Information 1).

Légère, G. & Mercier, S. (2005). *Reducing Aggregate Thickness on Forest Roads Designed for Log Trucks Equipped with Tire Pressure-Control Systems*. Quebec: Forest Engineering Research Institute of Canada (FERIC).

Lidberg, L. (2009). *Texturbestämning genom fält-, pipett- och hydrometermetoder*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö. (Examensarbeten, Nr 20).

Lindskog, G. Rengmark, F. Flodin, N. Brink, R. (1988). *Geoteknik*. Arlöv: Esselte Studium AB (Fjärde upplagan).

Löfroth, C. (1995). *Balsjövvägen – provväg med stenrik överbyggnad*. Uppsala: Skogforsk. (Redogörelse, nr 8).

Roadex. (2013). *Vad är permanent deformation och varför vi inte tycker om den*. [Online] Tillgänglig: <http://www.roadex.org/index.php/e-learning/permanent-swe> [2013-12-13].

Skogsstyrelsen. (2002). *Ekonomi*. [Online] Tillgänglig: <http://www.skogsstyrelsen.se/Myndigheten/Statistik/Amnesomraden/Ekonomi/Ekonomi/> [2013-08-12].

Smith, D. (1993). *Effects of variable tire pressure on road surfacings - volume II: analysis of test results*. US Army Corps of Engineers for the US Department of Agriculture Forest Service Technology and Development Center.

Svensson, G., Ljungberg, B., Filipsson, S., Kjellberg, K., Forsberg, D., Westman, S., Brandelius, S., Ahlenius, S., Jansson, O., Ivarsson, S. & Johansson, A. (2012). *Vägar*. [Online] Tillgänglig: www.skogforsk.se/sv/KunskapDirekt/m/Vagar/ [2013-08-12].

Svenska Geotekniska Föreningen, (SGF). (1996). *Geoteknisk fälthandbok allmänna råd och metodbeskrivningar*. Lindköping: Svenska Geotekniska Föreningen.

Svenska Geotekniska Föreningen, (SGF). (2004). *Packning och packningskontroll av blandkorniga och finkorniga jord*. Lindköping: Svenska Geotekniska Förening.

Svenska Geotekniska Föreningen, (SGF). (2013). *Fälthandbok Undersökning av förorenade områden, Remissversion mars 2013*. Göteborg: Svenska Geotekniska Föreningen. (SGF Rapport 2:2013).

Sällfors, G. (2009). *Geoteknik, Jordmateriallära, Jordmekanik*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (4:e upplagan).

Trafikverket. (2011). *TRVKB 10 Obundna lager*. Borlänge: Trafikverket. (TDOK 2011:265).

Trafikverket. (2011b). *TK Geo 11 Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner*. (2011:047).

Trafikverket. (2012). *TRVMB 112- Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*. Borlänge: Trafikverket. (TRV 2012:050).

Trafikverket. (2012b). *TRVMB 114 -Bearbetning av deflektionsmätdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat*. Borlänge: Trafikverket. (TRV 2012:051).

Vägverket. (1993). *VVMB 606 - Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*. (Metodbeskrivning 606:1993).

Vägverket. (2005). *ATB VÄG. Kapitel A gemensamma förutsättningar*. (VV Publ 2005:112).

Tompson, Z. (2007). *Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values*. Periodica Polytechnica.

Åkerlund, M. (2006). *Utvärdering av CTI på virkesfordon*. Umeå: Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsskötsel. (Studentuppsatser, nr 87).

Personlig kommunikation

Anders Brännlund, Vägmästare Holmen Skog. Mailväxling 2013-07-10.

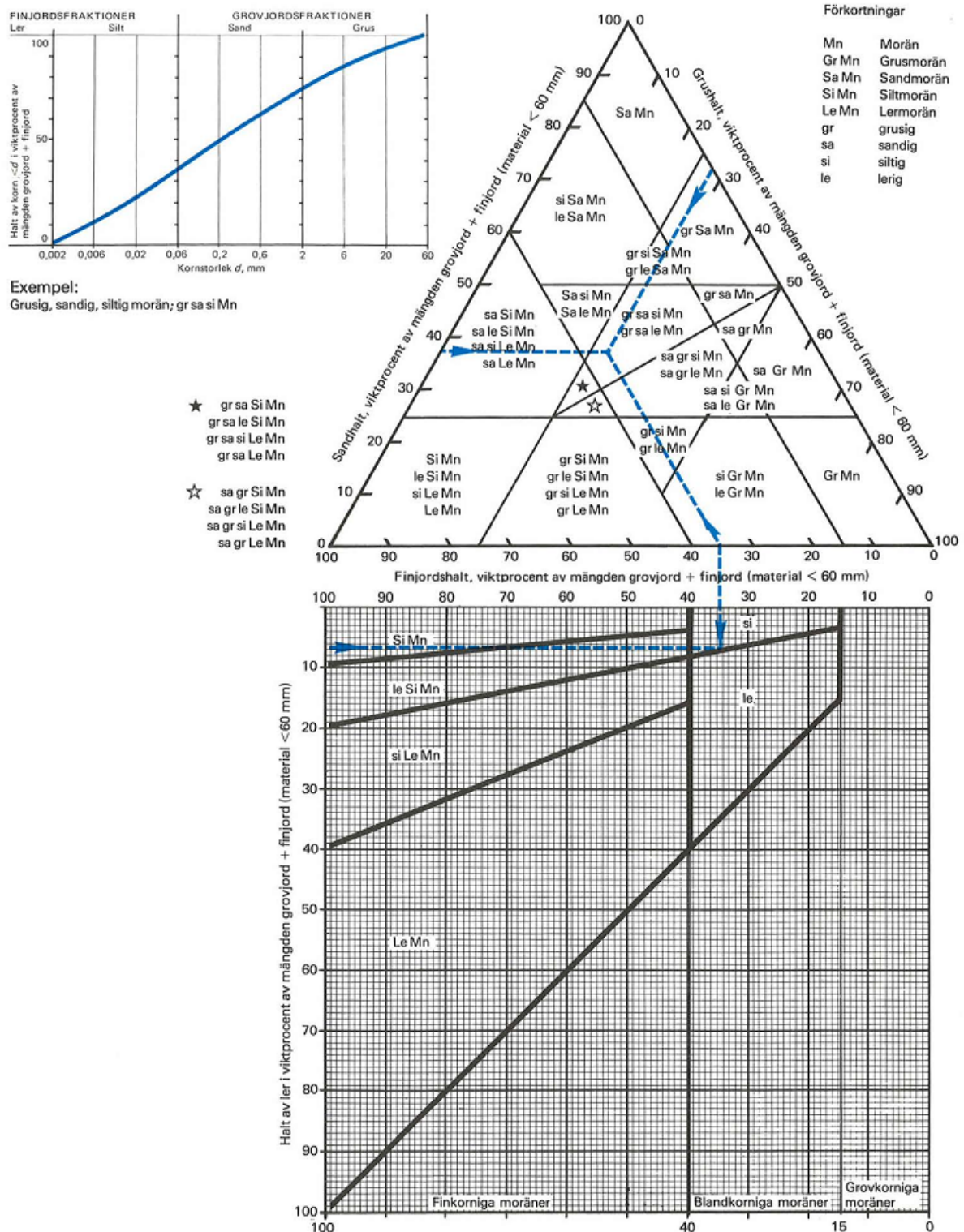
Jonas Auselius, Verksamhetsutvecklare logistik Holmen Skog. Mailväxling 2013-10-22

Kjell Johansson, Produktionsledare Skötsel Holmen Skog. Personliga samtal 2013

Bilaga 1. Skogsstyrelsens underlag för dimensionering av överbyggnader (Gunnarson, et al., 2011).

			Total överbyggnadstjocklek (cm) för tillgänglighetsklass A–D							
			A		B		C		D	
Material i underbyggnad eller undergrund	Förkortn. enl. Sv. Geotekn. Föreningen	Tjälfarlighetsgrupp	Skärning	Bank	Skärning	Bank	Skärning	Bank		
Skravel										
Grus		Gr								
Sandigt grus	s	Gr	I		15		5,7 eller 10		0	
Grusig morän	gr	Mn								
Sandig morän	s	Mn								
Grusig sand	gs	S								
Sand		S	I		20		15		10	
Grovmo		M s								
Grusig morän	gr	Mn								
Sandig morän	s	Mn	II		30	20	20	15	15	5
Normal morän		Mn								
Sandig moig morän	sm	Mn								
Lerig morän	l	Mn	II		40	30	30	20	20	15
Moränlera		Mnl								
Moig morän	m	Mn								
Mjälilig morän	mj	Mn								
Finmo			III		60		50		40	30
Mjåla		Mr								
Grovlera (lättlera)		Lj								
Grov mellanlera		Ls								
Fin mellanlera			II		40	30	30	20	30	15
Finlera (styv lera)		Lf								
Såplera										
Torv		T			60		50		40	
Gyttja		G								
Dy		Dy								

Bilaga 2. Nomogram för klassificering av mineraljordarter (Karlsson & Hansbo, 1992).

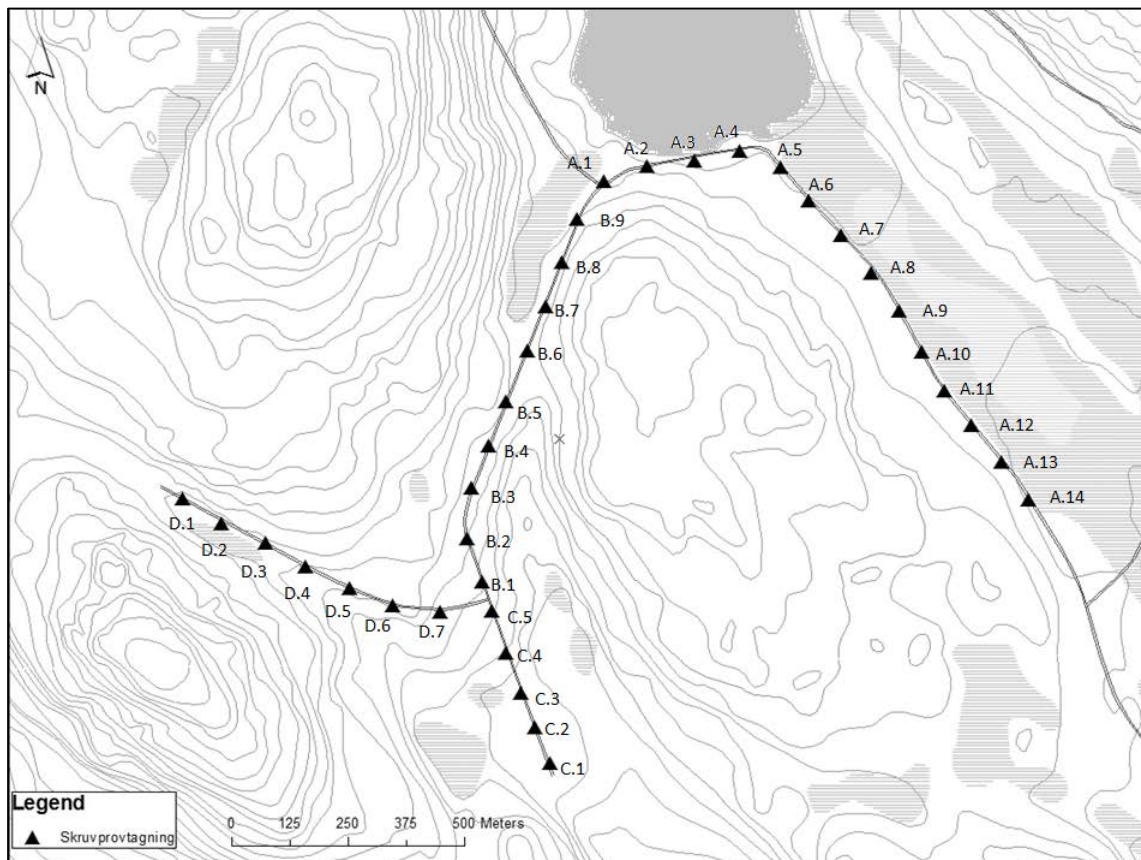


Bilaga 3. Dygnsvärden för väderdata (20130901-20131010) erhållna från SMHI:s väderstation i Hemling

Datum		Obs/ dygn	Temperatur °C			Rel.Fukt %			Nederbörd mm		Vind m/s, °	
Datum	Dagnr		1.5m	Min	Max	1.5m	Min	Max	2.0m	Tot.	2-10m	Riktn
20130901	244	24	11.1	6.9	14.0	94.4	90.0	99.0	17.6	383.1	2.3	23
20130902	245	24	10.9	7.2	16.4	85.9	60.0	97.0	0.0	383.1	1.5	40
20130903	246	24	12.1	6.4	17.5	80.3	58.0	98.0	0.0	383.1	2.0	134
20130904	247	24	11.2	4.7	18.6	75.5	49.0	99.0	0.1	383.3	1.4	206
20130905	248	24	13.1	4.0	20.3	84.8	62.0	99.0	0.0	383.3	2.5	274
20130906	249	23	14.5	7.4	19.6	82.3	59.0	98.0	0.0	383.3	3.2	266
20130907	250	23	14.6	6.5	22.6	82.0	54.0	101.0	0.0	383.3	1.5	236
20130908	251	24	14.0	6.4	22.8	85.7	57.0	101.0	0.0	383.3	1.4	349
20130909	252	24	13.1	7.9	19.9	86.6	63.0	98.0	0.0	383.3	1.6	358
20130910	253	24	12.1	5.7	16.0	94.8	89.0	97.0	0.2	383.4	1.7	318
20130911	254	24	12.2	4.6	16.8	88.7	67.0	98.0	0.0	383.4	1.7	236
20130912	255	24	10.4	1.6	18.8	80.8	48.0	99.0	0.0	383.4	1.5	228
20130913	256	24	12.8	7.0	18.0	86.6	65.0	98.0	0.0	383.4	2.5	271
20130914	257	24	12.6	6.0	18.7	87.5	67.0	98.0	0.0	383.4	2.7	280
20130915	258	24	12.7	9.9	15.5	86.0	70.0	97.0	0.1	383.6	4.2	291
20130916	259	24	12.1	10.2	13.4	84.9	66.0	97.0	5.4	388.9	4.9	324
20130917	260	24	12.0	10.1	13.4	94.6	91.0	97.0	15.1	404.1	4.2	332
20130918	261	24	11.9	10.7	12.6	93.9	88.0	97.0	25.6	429.6	4.1	343
20130919	262	24	12.9	12.2	13.5	96.4	95.0	97.0	21.0	450.6	3.7	341
20130920	263	24	12.2	10.4	14.0	97.5	96.0	99.0	39.4	490.0	2.0	316
20130921	264	24	8.9	4.3	14.3	87.1	58.0	100.0	0.0	490.0	1.5	156

Datum		Obs/	Temperatur °C			Rel.Fukt %			Nederbörd mm		Vind m/s, °	
Datum	Dagnr	dygn	1.5m	Min	Max	1.5m	Min	Max	2.0m	Tot.	2-10m	Riktn
20130922	265	24	7.7	3.7	11.5	77.0	59.0	96.0	0.1	490.1	3.3	144
20130923	266	24	6.0	3.3	8.4	86.7	72.0	97.0	14.6	504.7	4.1	98
20130924	267	24	3.5	0.4	7.7	80.4	56.0	93.0	0.0	504.7	4.3	85
20130925	268	24	2.4	-0.4	7.2	77.5	52.0	92.0	0.2	504.9	3.5	88
20130926	269	24	2.3	-2.0	4.6	83.6	69.0	97.0	2.5	507.4	4.3	108
20130927	270	24	5.1	3.3	6.0	92.2	89.0	95.0	9.8	517.2	4.3	89
20130928	271	24	5.8	0.7	9.0	89.5	73.0	97.0	0.1	517.2	2.4	81
20130929	272	24	4.2	-0.5	8.1	91.5	77.0	99.0	0.2	517.5	0.9	35
20130930	273	24	4.2	2.3	7.3	87.4	68.0	97.0	0.0	517.5	0.8	16
20131001	274	24	5.3	2.7	9.5	87.1	70.0	98.0	0.0	517.5	1.7	260
20131002	275	24	5.2	-0.8	13.8	86.0	56.0	99.0	0.0	517.5	1.2	200
20131003	276	24	3.4	-3.0	13.6	88.0	61.0	99.0	0.0	517.5	1.4	260
20131004	277	24	3.4	-4.2	9.8	81.7	62.0	100.0	0.0	517.5	3.2	252
20131005	278	24	7.8	5.0	10.2	83.3	70.0	96.0	2.2	519.7	3.4	244
20131006	279	24	6.6	3.2	9.9	86.0	72.0	93.0	0.0	519.7	2.8	219
20131007	280	24	8.0	2.1	13.9	86.7	68.0	98.0	0.0	519.7	1.9	196
20131008	281	24	6.4	1.3	10.0	97.3	95.0	99.0	0.3	520.0	0.8	72
20131009	282	24	8.1	4.6	10.9	92.5	83.0	98.0	6.8	526.8	2.2	196
20131010	283	24	4.1	0.2	8.5	77.9	56.0	93.0	0.0	526.8	2.6	130

Bilaga 4. Skruvprovtagning, karta och protokoll. Lantmäteriet ©.



Punktnummer	Djup under körbana (cm)	Preliminär benämning	Anmärkning
A,1	0-100	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
	100-170	sandig siltig morän	stop vid 170cm
A,2	0-100	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
	100-140	sandig siltig morän	stop vid 140cm
A,3	0-100	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
	100-160	sandig siltig morän	terrass 70 cm
A,4	0-100	sandig siltig morän	stop vid 170cm
	100-170	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
A,5	0-50	sandig siltig morän	stop vid 170cm
	50-100	siltig morän	bärlager < 5cm
	100-200	sandig siltig morän	
A,6	0-100	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
	100-190	sandig siltig morän	
A,7	0-100	sandig siltig morän	bärlager < 5cm
	100-200	sandig siltig morän	blött prov
A,8	0-100	sandig siltig morän	
	100-200	sandig siltig morän	

Punktnummer	Djup under körbana (cm)	Preliminär benämning	Anmärkning
A,9	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	bärlager < 5cm blött prov bärlager < 5cm
A,10	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	terrass 60 cm bärlager < 5cm
A,11	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	terrass 60 cm
A,12	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	bärlager < 5cm blött prov
A,13	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	bärlager < 5cm blött prov
A,14	0-100 100-170	sandig siltig morän sandig siltig morän	bärlager < 5cm blött prov
B,1	0-100 100-	sandig siltig morän	stop vid 100cm
B,2	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	
B,3	0-100 100-120	sandig siltig morän sandig siltig morän	terrass 60 cm stop vid 120cm
B,4	0-100 100-	sandig siltig morän	stop vid 100cm
B,5	0-100 100-120	sandig siltig morän sandig siltig morän	stop vid 120cm
B,6	0-100 100-170	sandig siltig morän sandig siltig morän	stop vid 170cm
B,7	0-100 100-200	sandig siltig morän sandig siltig morän	
B,8	0-100 100-160	sandig siltig morän sandig siltig morän	terrass 60 cm
B,9	0-100 100-150	sandig siltig morän sandig siltig morän	stop vid 150 cm
C,1	0-100 100-140	sandig siltig morän sandig siltig morän	stop vid 140cm
C,2	0-100 100-170	sandig siltig morän sandig siltig morän	Terrass 50 cm
C,3	0-100 100-170	sandig siltig morän sandig siltig morän	
C,4	0-70 70-	sandig siltig morän	Stop vid 70 cm
C,5	0-50 50-	sandig siltig morän	Stop vid 50cm

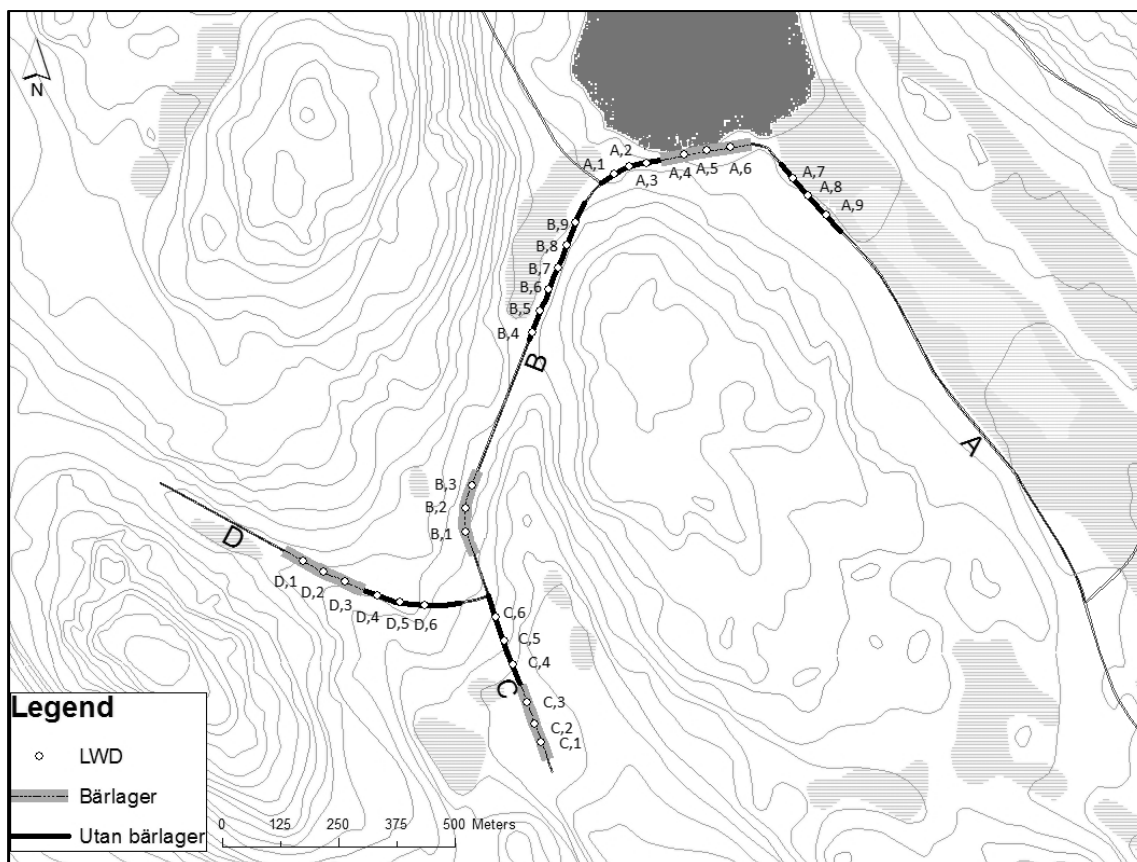
Punktnummer	Djup under körbana (cm)	Preliminär benämning	Anmärkning
D,1	0-60	sandig siltig morän	terrass 60 cm
	60-140	siltig morän	stop vid 140
D,2	0-110	sandig siltig morän	terrass 40 cm
	110-140	Torv	
	140-200	sandig siltig morän	
D,3	0-100	sandig siltig morän	
	100-200	Torv	
D,4	0-100	sandig siltig morän	
	100-160	sandig siltig morän	stop vid 170
D,5	0-100	sandig siltig morän	
	100-140	sandig siltig morän	stop vid 140
D,6	0-100	sandig siltig morän	
	100-		Stop vid 100
D,7	0-100	sandig siltig morän	
	100-		Stop vid 100 cm

Bilaga 5. Kornstorleksfördelning erhållen från torrsiktning.

Väg	Provpunkt	Kornstorlek									
		<0,063 (mm)	0,063 - 0,2 (mm)	0,2 - 0,63 (mm)	0,63 - 2 (mm)	2 - 6,3 (mm)	6,3 - 20 (mm)	20 - 63 (mm)	<0,06 (mm)	0,06 - 2(mm)	2 - 60 (mm)
		Finjord	Finsand (mm)	Mellansand	Grovsand	Fingrus	Mellangrus	Grovgrus	Finjord	Sand	Grus
A	A,1	10%	18%	22%	16%	12%	9%	13%	10%	56%	35%
A	A,2	12%	17%	22%	16%	13%	7%	13%	12%	55%	33%
A	A,3	13%	20%	24%	18%	16%	8%	0%	13%	62%	25%
A	A,4	12%	20%	21%	17%	11%	7%	12%	12%	58%	30%
A	A,5	13%	24%	22%	17%	12%	8%	5%	13%	63%	25%
A	A,5 (2)	14%	20%	21%	19%	15%	6%	5%	14%	61%	25%
A	A,6	8%	22%	24%	20%	14%	9%	3%	8%	66%	26%
A	A,7	12%	24%	22%	17%	14%	7%	5%	12%	63%	25%
A	A,8	13%	23%	21%	19%	15%	9%	0%	13%	63%	24%
A	A,9	12%	25%	22%	18%	15%	9%	0%	12%	64%	24%
A	A,10	9%	22%	23%	20%	15%	6%	4%	9%	65%	25%
A	A,11	11%	24%	22%	19%	13%	6%	5%	11%	64%	25%
A	A,11(2)	8%	17%	20%	16%	16%	10%	13%	8%	53%	39%
A	A,12	12%	22%	20%	18%	14%	9%	5%	12%	60%	28%
A	A,13	11%	20%	22%	20%	14%	9%	5%	11%	62%	27%
A	A,14	14%	22%	21%	18%	14%	9%	1%	14%	61%	25%
	Medel:	11%	21%	22%	18%	14%	8%	6%	11%	61%	28%
B	B,1	6%	18%	23%	17%	15%	12%	8%	6%	58%	35%
B	B,2	7%	20%	20%	15%	13%	10%	15%	7%	54%	39%
B	B,3	13%	26%	22%	17%	13%	6%	3%	13%	65%	22%
B	B,4	8%	15%	19%	14%	11%	12%	21%	8%	48%	44%
B	B,5	8%	20%	27%	16%	14%	10%	5%	8%	63%	29%
B	B,6	9%	19%	28%	18%	15%	9%	2%	9%	66%	26%
B	B,7	10%	20%	24%	15%	13%	8%	9%	10%	59%	30%
B	B,8	11%	18%	27%	17%	13%	8%	5%	11%	63%	26%
B	B,9	10%	22%	23%	17%	12%	10%	6%	10%	62%	28%
	Medel:	9%	20%	24%	16%	13%	9%	8%	9%	60%	31%

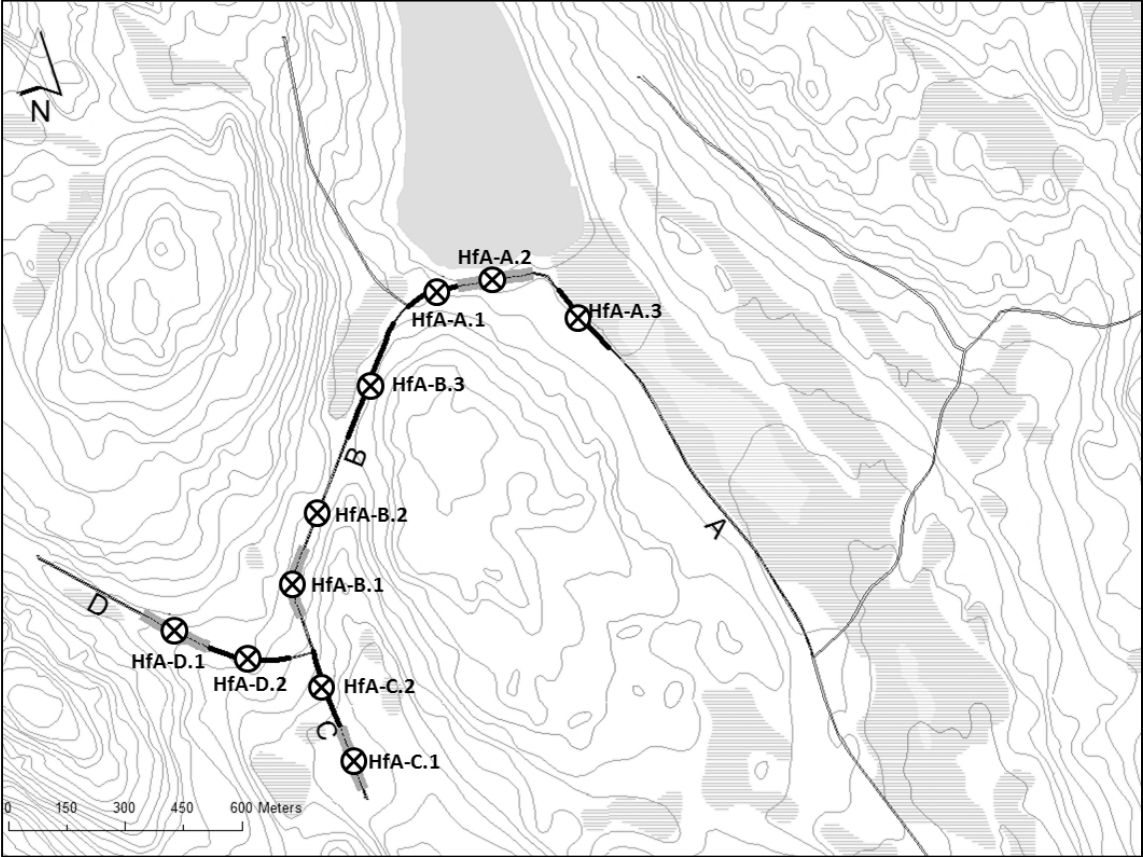
Väg		Provpunkt		Kornstorlek								
				<0,06 (mm)	0,06 - 0,2 (mm)	0,2 - 0,6 (mm)	0,6 - 2 (mm)	2 - 6 (mm)	6 - 20 (mm)	20 - 60 (mm)	<0,06 (mm)	0,06 - 2(mm)
		Finjord	Finsand (mm)	Mellansand	Grovsand	Fingrus	Mellangrus	Grovgrus	Finjord	Sand	Grus	
C	C,1	11%	24%	24%	15%	12%	9%	6%	11%	62%	27%	
C	C,2	14%	17%	23%	15%	12%	6%	12%	14%	56%	30%	
C	C,3	13%	22%	23%	15%	13%	10%	4%	13%	60%	27%	
C	C,4	10%	19%	22%	18%	18%	10%	3%	10%	59%	31%	
C	C,5	10%	22%	23%	14%	12%	13%	6%	10%	60%	31%	
	Medel:	12%	21%	23%	16%	13%	10%	6%	12%	59%	29%	
D	D,1 (1)	16%	23%	22%	16%	13%	7%	3%	16%	61%	23%	
D	D,1 (2)	16%	19%	22%	17%	13%	7%	6%	16%	58%	26%	
D	D,2	10%	24%	24%	15%	14%	9%	5%	10%	63%	27%	
D	D,3	15%	18%	19%	15%	12%	7%	13%	15%	53%	32%	
D	D,4	10%	22%	23%	16%	13%	10%	6%	10%	61%	29%	
D	D,5	11%	20%	21%	14%	11%	7%	16%	11%	54%	34%	
D	D,6	11%	21%	23%	13%	13%	10%	10%	11%	57%	32%	
D	D,7	11%	19%	21%	18%	15%	11%	4%	11%	58%	31%	
	Medel:	12%	21%	22%	15%	13%	9%	8%	12%	58%	29%	

Bilaga 6. Karta över mätpunkterna för LWD samt mätresultat. Lantmäteriet ©.

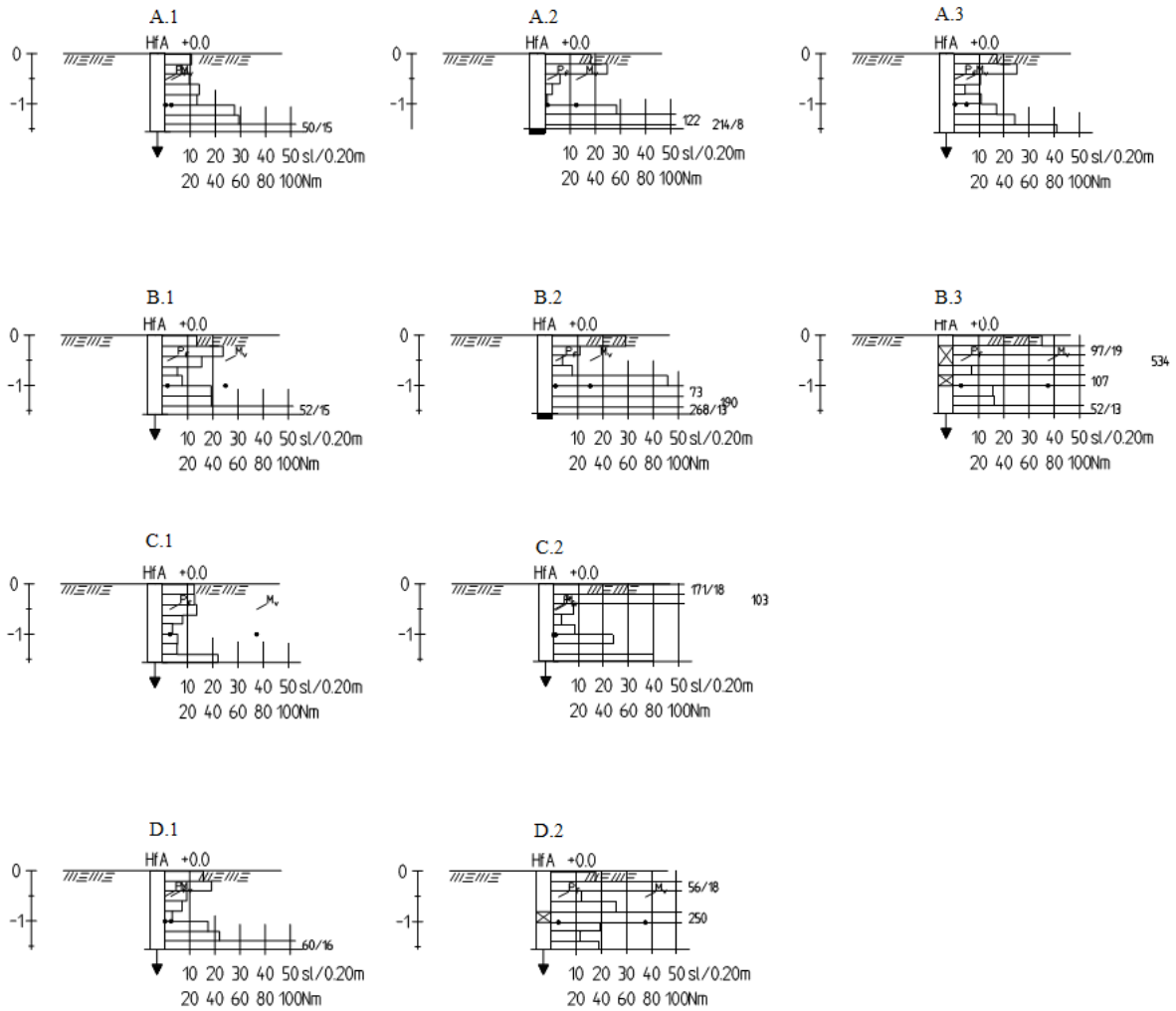


Försökssträcka	Vägavsnitt	Punkt	Sättning (mm)	Evd (MPa)
1	1.A	A.4	0,573	39,27
		A.5	0,574	39,20
		A.6	0,658	34,19
		Medel:	0,602	37,55
		SD	0,049	2,91
1	1.B	B.1	1,076	20,91
		B.2	0,854	26,35
		B.3	0,970	23,17
		Medel:	0,967	23,48
		SD	0,111	2,73
2	2.A	A.1	0,776	28,99
		A.2	0,769	29,26
		A.3	0,599	37,56
		A.7	0,547	39,20
		A.8	0,560	40,18
		A.9	0,768	29,30
		Medel:	0,670	34,08
	SD	0,112	5,43	
2	2.B	B.4	0,854	26,35
		B.5	0,697	32,28
		B.6	0,582	38,66
		B.7	0,581	38,79
		B.8	0,650	34,62
		B.9	0,622	36,17
		Medel:	0,66	34,48
	SD	0,10	4,69	
3	3.C	C.1	1,122	20,05
		C.2	1,045	21,53
		C.3	1,018	22,10
		Medel:	1,062	21,23
		SD	0,054	1,06
3	3.D	D.1	0,736	30,57
		D.2	0,806	27,92
		D.3	0,979	22,98
		Medel:	0,840	27,16
		SD	0,125	3,85
4	4.C	C.4	1,553	14,70
		C.5	1,070	21,33
		C.6	0,735	30,61
		Medel:	1,119	22,21
		SD	0,411	7,99
4	4.D	D.4	1,265	17,79
		D.5	0,966	23,29
		D.6	0,86	26,16
		Medel:	1,030	22,41
		SD	0,210	4,25

Bilaga 7. Karta över hejarsondering. Lantmäteriet ©.



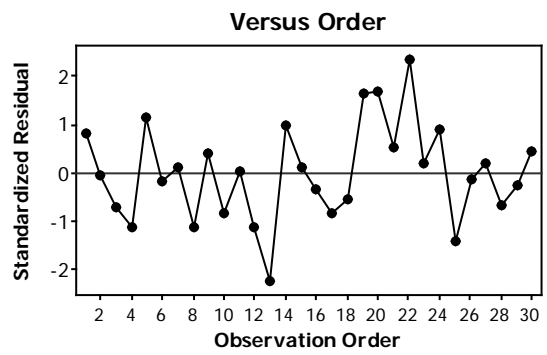
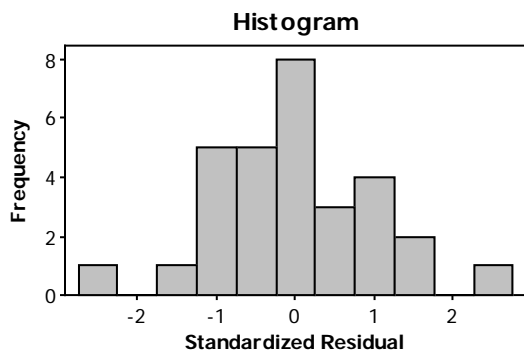
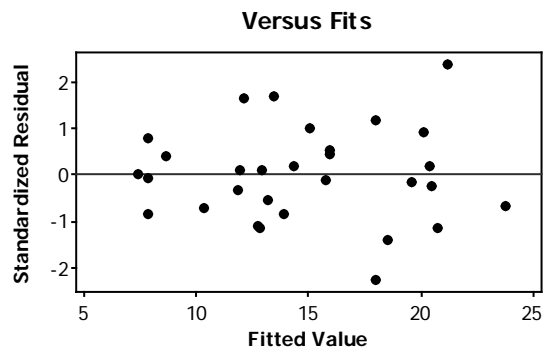
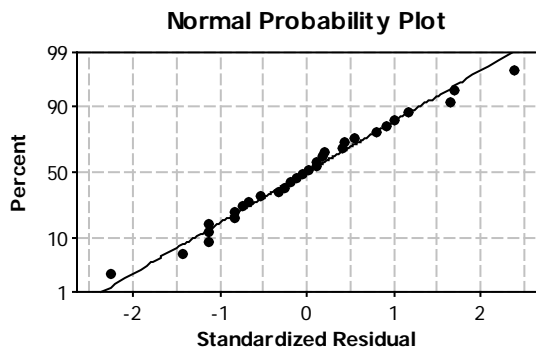
Bilaga 8. Borrhållsritning hejarsondering



Bilaga 9. Fullständigt protokoll från spårdjupsmätningen.

Försökssträcka	Vägavsnitt	Provtagningspunkt	Avstånd från ytterkant hjulspår (cm)						
			30	60	90	150	210	240	270
			Differens i förhållande till referensmätning (mm)						
1	1.A	A,4	0,003	0	-0,012	0,023	-0,001	-0,006	-0,013
		A,5	0,001	-0,003	0	0,01	-0,006	-0,012	-0,007
		A,6	0	0	-0,005	0,003	0,04	-0,001	-0,007
1	1.B	B,1	-0,005	-0,011	0,009	0,003	-0,015	-0,017	0,008
		B,2	-0,007	-0,018	-0,013	0,002	0,003	-0,018	-0,032
		B,3	-0,022	-0,015	-0,006	0,011	-0,015	-0,015	0,032
2	2.A	A,1	-0,009	-0,013	-0,006	0,003	0,003	-0,009	-0,014
		A,2	0,004	0	0,008	0,001	0,006	0	-0,016
		A,3	-0,007	-0,008	-0,01	-0,011	-0,011	-0,012	-0,015
		A,4	0	-0,002	0,004	0,004	-0,002	-0,004	-0,004
		A,5	-0,007	-0,006	-0,001	-0,007	-0,007	-0,008	-0,01
		A,6	-0,002	-0,001	-0,006	-0,003	-0,001	-0,006	-0,003
2	2.B	B,4	0,002	0,001	0,004	0,007	0,009	-0,009	-0,008
		B,5	0,009	-0,004	-0,018	0,002	0	-0,021	-0,024
		B,6	-0,015	-0,009	0,004	0,004	-0,005	-0,01	-0,002
		B,7	0	0,006	-0,007	0	0,004	-0,013	-0,005
		B,8	-0,009	-0,006	-0,004	-0,003	-0,009	-0,001	-0,009
		B,9	-0,013	-0,015	0,004	0,001	-0,005	-0,002	-0,004
3	3.C	C,1	-0,028	-0,042	0,063	0,003	-0,028	-0,027	0,02
		C,2	-0,021	-0,014	0,005	0,003	-0,019	-0,022	0,036
		C,3	-0,020	-0,025	0,002	-0,004	-0,026	-0,026	-0,007
3	3.D	D,1	-0,004	-0,018	-0,01	0	-0,008	-0,026	-0,021
		D,2	-0,001	-0,011	-0,023	-0,006	-0,001	-0,017	-0,024
		D,3	-0,007	-0,017	-0,013	0,007	-0,012	-0,015	-0,021
4	4.C	C,4	-0,016	0,00	0	-0,006	-0,016	-0,009	-0,024
		C,5	-0,016	-0,02	0,001	0	-0,017	-0,018	0,022
		C,6	-0,019	-0,009	0	0,003	-0,018	-0,008	0,001
4	4.D	D,4	0,005	-0,011	0,005	0,001	-0,002	-0,01	0,005
		D,5	0,006	0,005	-0,014	-0,003	-0,001	-0,01	-0,016
		D,6	-0,002	-0,011	-0,012	-0,002	-0,005	-0,014	-0,019

Bilaga 10. Residual plot för spårdjup.



Bilaga 11. Regressionsanalys av Spårdjup vs Bärighet; Däckstryck

Regression Equation

Däckstryck

Högt Spårdjup = 31,051 - 0,494982 Bärighet

Lågt Spårdjup = 27,2728 - 0,494982 Bärighet

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	29,1619	4,81650	6,05459	0,000
Bärighet	-0,4950	0,16082	-3,07788	0,005
Däckstryck				
Högt	1,8891	1,17098	1,61325	0,118

Summary of Model

S = 6,18154 R-Sq = 36,99% R-Sq(adj) = 32,32%
PRESS = 1249,86 R-Sq(pred) = 23,67%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	2	605,67	605,67	302,833	7,92519	0,001959
Bärighet	1	506,22	361,99	361,991	9,47336	0,004743
Däckstryck	1	99,45	99,45	99,448	2,60257	0,118319
Error	27	1031,71	1031,71	38,211		
Lack-of-Fit	25	811,46	811,46	32,458	0,29474	0,950299
Pure Error	2	220,25	220,25	110,125		
Total	29	1637,37				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Spårdjup	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
13	4,5	18,0082	1,60157	-13,5082	-2,26250	R
22	35,0	21,1266	1,96475	13,8734	2,36708	R

R denotes an observation with a large standardized residual.