

Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



# Skogsavverkning och markskador

**Tomas Nordfjell**

**Sveriges lantbruksuniversitet**

**Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, Umeå**



**Publikation inom EU Erasmus+ projektet Net4Forest, 2020**

<https://www.slu.se/en/departments/forest-biomaterials-technology/research/ongoing-projects/net4forest/>



The following disclaimer shall be added to the inner pages of the publications and studies written by external independent bodies with support from the European Commission:

<b>BG</b>	Подкрепата на Европейската комисия за изготвянето на настоящата публикация не представлява одобрение на съдържанието, което отразява гледните точки само на авторите и не може да се търси отговорност от Комисията за всяка употреба, която може да бъде използвана за информацията, съдържаща се в нея.
<b>CS</b>	Podpora Evropské komise při tvorbě této publikace nepředstavuje souhlas s obsahem, který odráží pouze názory autorů, a Komise nemůže být zodpovědná za jakékoliv využití informací obsažených v této publikaci.
<b>DA</b>	Europa-Kommissionens støtte til produktionen af denne publikation udgør ikke en godkendelse af indholdet, som kun afspejler forfatterens egne synspunkter, og Kommissionen kan ikke holdes ansvarlig for den brug, der måtte blive gjort af de deri indeholdte oplysninger.
<b>DE</b>	Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, welcher nur die Ansichten der Verfasser wiedergibt, und die Kommission kann nicht für eine etwaige Verwendung der darin enthaltenen Informationen haftbar gemacht werden.
<b>EL</b>	Η υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στην παραγωγή της παρούσας έκδοσης δεν συνιστά αποδοχή του περιεχομένου, το οποίο αντικατοπτρίζει αποκλειστικά τις απόψεις των συντακτών, και η Επιτροπή δεν μπορεί να αναλάβει την ευθύνη για οποιαδήποτε χρήση των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτήν.
<b>EN</b>	The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.
<b>ES</b>	El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.
<b>ET</b>	Euroopa Komisjoni toetus käesoleva väljaande koostamisele ei tähenda väljaandes esitatud sisu kinnitamist. Väljaandes esitatud sisu peegeldab vaid autorite seisukohti. Euroopa Komisjon ei vastuta selles sisalduva teabe kasutamise eest.
<b>FI</b>	Euroopan komission tuki tämän julkaisun tuottamiseen ei tarkoita sitä, että sisältö, joka kuvastaa pelkästään tekijöiden näkemyksiä, saa kannatusta, eikä komissiota voida saattaa vastuuseen niiden sisältämien tietojen mahdollisesta käytöstä.
<b>FR</b>	Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu, qui reflète uniquement le point de vue des auteurs, et la Commission ne peut pas être tenue responsable de toute utilisation qui pourrait être faite des informations qu'elle contient.
<b>GA</b>	Ní hionann tacaíocht an Choimisiúin Eorpaigh do tháirgeadh an fhoilseacháin seo agus formhuiniú ar ábhair an fhoilseacháin, lena léirítear tuairimí na n-údar amháin, agus ní féidir freagracht a chur ar an gCoimisiún as aon úsáid a d'fhéadfaí a bhaint as an bhfaisnéis atá ann.
<b>HR</b>	Potpora Europske komisije proizvodnji ove publikacije ne predstavlja potporu sadržaju koji odražava samo stavove autora i Komisija ne može biti odgovorna za uporabu sadržanih informacija.

<b>HU</b>	Az Európai Bizottság támogatása ezen kiadvány elkészítéséhez nem jelenti a tartalom jóváhagyását, amely kizárólag a szerzők álláspontját tükrözi, valamint a Bizottság nem tehető felelőssé ezen információk bármilyen felhasználásáért.
<b>IT</b>	Il sostegno della Commissione europea alla produzione di questa pubblicazione non costituisce un'approvazione del contenuto, che riflette esclusivamente il punto di vista degli autori, e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni ivi contenute.
<b>LT</b>	Europos Komisijos parama šio leidinio rengimui nereiškia pritarimo jo turiniui, kuriame pateikiama autorių nuomonė, todėl Europos Komisija negali būti laikoma atsakinga už informaciją panaudotą šiame leidinyje.
<b>LV</b>	Eiropas Komisijas atbalsts šīs publikācijas sagatavošanai nav uzskatāms par satura apstiprinājumu, kas atspoguļo tikai autoru viedokļus, un Komisija nevar būt atbildīga par tajā ietvertās informācijas jebkādu izmantošanu.
<b>MT</b>	L-apoġġ tal-Kummissjoni Ewropea għall-produzzjoni ta' din il-pubblikazzjoni ma jikkostitwixxi approvazzjoni tal-kontenut, li jirrifletti biss il-fehmiet tal-awturi, u l-Kummissjoni ma tistax tinżamm responsabbli għal kwalunkwe użu li jista' jsir mill-informazzjoni li tinsab fiha.
<b>NL</b>	De steun van de Europese Commissie voor de productie van deze publicatie houdt geen goedkeuring van de inhoud in. De inhoud geeft de standpunten van de auteurs weer en de Commissie kan niet aansprakelijk worden gesteld voor het gebruik dat eventueel wordt gemaakt van de daarin opgenomen informatie.
<b>PL</b>	Wsparcie Komisji Europejskiej dla produkcji tej publikacji nie stanowi poparcia dla treści, które odzwierciedlają jedynie poglądy autorów, a Komisja nie może zostać pociągnięta do odpowiedzialności za jakiegokolwiek wykorzystanie informacji w niej zawartych.
<b>PT</b>	O apoio da Comissão Europeia à produção desta publicação não constitui um aval do seu conteúdo, que reflete unicamente o ponto de vista dos autores, e a Comissão não pode ser considerada responsável por eventuais utilizações que possam ser feitas com as informações nela contidas.
<b>RO</b>	Sprrijinul acordat de Comisia Europeană pentru elaborarea acestei publicații nu constituie o aprobare a conținutului, care reflectă doar opiniile autorilor, iar Comisia nu poate fi trasă la răspundere pentru orice utilizare a informațiilor conținute în aceasta.
<b>SK</b>	Podpora Európskej komisie na výrobu tejto publikácie nepredstavuje súhlas s obsahom, ktorý odráža len názory autorov, a Komisia nemôže byť zodpovedná za prípadné použitie informácií, ktoré sú v nej obsiahnuté.
<b>SL</b>	Podpora Evropske komisije za pripravo te publikacije ne pomeni potrditve vsebine, ki izraža le mnenja avtorjev, in Komisija ne more biti odgovorna za kakršno koli uporabo informacij, ki jih vsebuje.
<b>SV</b>	Europeiska Kommissionens stöd åt framställningen av detta dokument utgör inte ett godkännande av dess innehåll, vilket endast återspeglar upphovsmännens åsikter, och Kommissionen kan inte hållas ansvarigt för någon användning av informationen i det.

## Huvudbudskap

Forskning har visat att kombinationen av jordart och markfuktighet är starkt avgörande för om man får stora markskador eller ej vid skogsavverkning. Grovkorniga jordarter har bra bärighet även vid hög markfuktighet men för finkorniga jordarter försämras bärigheten kraftigt vid ökad markfukt. Vid drivningsplanering är det viktigt att bestämma jordart för att veta hur hög markfuktighet som kan tillåtas vid drivningstillfället. För steniga marker har det visat sig att en kombination av blockkvot och maximalt stickdjup med jordsond ger en god skattning av markens aktuella bärighet. En praktiskt tillämpbar klassificering av skogsmarks bärighet utifrån enkelt mätbara variabler presenteras.

## 1. Problembeskrivning

All form av markbaserad skogsavverkning innebär att tung transport måste genomföras på skogsmark. En vanligt förekommande avverkning på 1000 m<sup>3</sup> virke innebär att i storleksordningen 1000 ton ska transporteras till bilväg. Inom avverkningen innebär detta att alltifrån en mindre mängd på kanske 20 ton ska transporteras efter de kortaste stickvägarna till att hundratals ton ska transporteras efter längre stickvägar och basstråk. Alla dessa 1000 ton transporteras efter en basväg till avlägg vid bilväg. Den sortimentsmetod som används i stora delar av Världen innebär att det är en skotare som transporterar virket till bilväg (Figur 1). De har normalt ett lastindex på ca 0,8 vilket innebär att en skotare med 20 tons egen massa har kan transportera 16 ton vid fullt lass. Detta innebär i sin tur att om 1000 ton virke ska transporteras på en basväg så blir det en total massa på 1000 ton virke samt 1250 ton maskin vid lasskörning och 1250 ton vid tomkörning tillbaka till trakten. Om skotaren är försedd med boggiband runt om minskar spårdjupen på mjuka marker, men dess totalvikt ökar med ca 4 ton. I exemplet ovan innebär det att ytterligare 500 ton då transporteras på basvägen i form av band vid skotningsarbetet. Även en skördare med en massa på 20-30 ton körs efter alla vilket ytterligare ökar belastningen på marken. Den passerar vanligen bara en gång efter flertalet stickvägar, men i flera gånger efter basväg till avlägg och servicedepå. Sammantaget innebär alla dessa transporter att vid en avverkning på 1000 m<sup>3</sup> så transporteras totalt drygt 4000 ton på basvägen och kanske upp till 1000 – 1500 ton på basstråk.



*Figur 1. En fullastad skotare på väg mot avlägget. Totalvikt ca 40 ton (20 ton maskin, 16 ton last och 4 ton boggiband). Foto: Tomas Nordfjell.*

Skogsmarken utsätts för vertikal och horisontell belastning samt skjuvbelastning när man kör med tunga skogsmaskiner. När belastningen överskrider markens hållfasthet så börjar den att deformeras och jordpartiklar flyttas både vertikalt och horisontellt. Normalt innebär markdeformation vid avverkning både kompaktering och spårbildning. Spårets botten kompakteras och förflyttning av jordpartiklar orsakar vallar vid sidan av spåret (cf. Uusitalo 2019).

Både spårbildning och kompaktering är negativt för skogens framtida tillväxt. Kompaktering innebär att markens porositet minskas. Det innebär att markens porvolym minskas samt att också förbindelsen mellan kvarvarande porer försämras. Det är främst de större porerna som påverkas. Gasutbyte och vattentransport i marken försämras när mängd av, och förbindelse mellan, stora markporer minskas. Att markens infiltrations- och vattenledningsförmåga minskas kan medföra ökad försumpning av plana marker och i övrigt längre perioder med blöta marker. Försämrade genomluftning ger marken högre bulkdensitet och sämre gasutbyte, vilket har en negativ påverkan på rottillväxt och aktivitet hos mikroorganismer. Marken blir mer kompakt och penetrationsmotståndet för rötters tillväxt blir högre. Spårbildning ger fördjupningar i marken som ofta blir vattenfyllda och som kan förhindra rottillväxt och aerob mikroorganismaktivitet. Spårbildning kan även orsaka erosion i kuperad terräng vid kraftiga regnskuror (cf. Uusitalo et al. 2019).

Kompakterad skogsmark återhämtar sig, men beroende på omständigheter så kan det ta allt ifrån ett fåtal år till många decennier. Finkorniga jordarter har lättare att återhämta sig efter cykler av genomfuktning och torkning än andra marker, men det kan ändå ta flera decennier. Bördiga marker har lättare att återhämta sig än andra marker tack vare högre biologisk aktivitet och här spelar jordlevande maskar en stor roll. Desto högre belastning som marken utsatts för desto längre tid behövs för marken att återhämta sig. Desto djupare ner i marken som den blivit kompakterad desto längre tid tar återhämtningen. Om marken är kompakterad djupare än 25 cm så kan den betraktas som påverkad för många decennier, eller till och med längre än så. Ofta förekommande cykler av genomfuktning och torkning liksom cykler av frysning och upptining underlättar markens återhämtning. Markens bulkdensitet verkar i många fall kunna återhämta sig snabbare än markporositeten (cf. Uusitalo et al. 2019).

Sammanfattningsvis så varar markskador efter tunga skogsfordon som är relaterade till tillväxt och skogens vitalitet i mer än 10 år. Markkompaktering som går längre ner i marken än 25 cm har negativ inverkan på trädens rotutveckling. Även vattenledningsförmågan och förmågan att absorbera vatten försämras. Vissa studier tyder till och med på att markkompaktering djupare ner än ca 25 cm kan vara bestående (cf. Uusitalo et al. 2019).

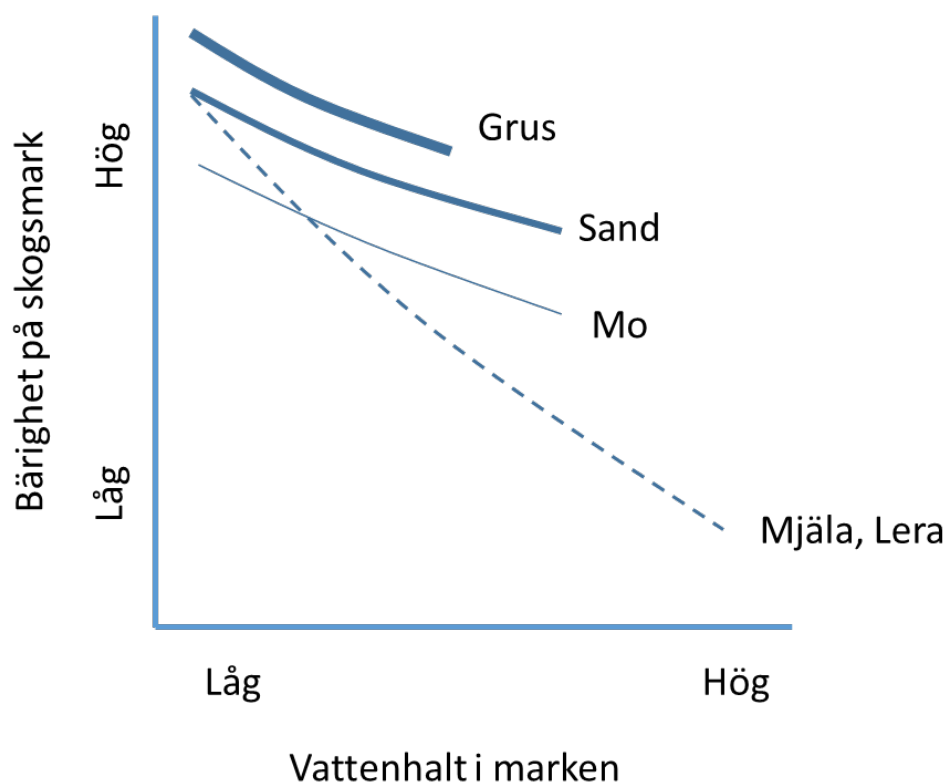
## **2. Viktiga faktorer för markens hållfasthet**

Alla skogsmarker har normalt ett armerande ytskikt av vegetation och trädrötter. För sedimentmarker och under ytskiktet så är hållfastheten helt och hållet beroende av det kraftspel som uppstår mellan jordpartiklar som i huvudsak har samma storlek. För moränmarker blir förhållandet mera komplicerat då storlek och frekvens av stenar och block har stor inverkan på markens hållfasthet. Om det finns tillräckligt många av dessa stora partiklar så bildar de hållfasta ”bryggor” mellan varandra vid belastning. Om det bara finns ett fåtal stora partiklar så kommer det allt för sällan att kunna bildas sådana bryggor. De kan då inte få något stöd av varandra. Men, det har visat sig att även steniga moränmarker kompakteras vid upprepade överfarter så att markens vattenledningsförmåga blir kraftigt reducerad (Hansson 2019).

Hållfastheten på mineraljordar är vanligtvis uttryckt som penetrationsmotstånd för en standardiserad kon som trycks med konstant hastighet ner i marken. Detta görs vanligen med ett instrument som kallas konpenetrometer. Ett mått på penetrationsmotstånd fungerar bra för att ge ett indirekt mått på markens bärighet för marker med lera, mjäla och mo, men fungerar sämre på sandmarker. Även moränmarker är

svåra att mäta med en konpenetrometer då det blir helt stopp när man stöter på en sten. Dock, om man gör många nedstick och förkastar mätvärden för de gånger en sten påträffas så kan konpenetrometern ändå användas på många moränmarker (cf. Uusitalo et al. 2019).

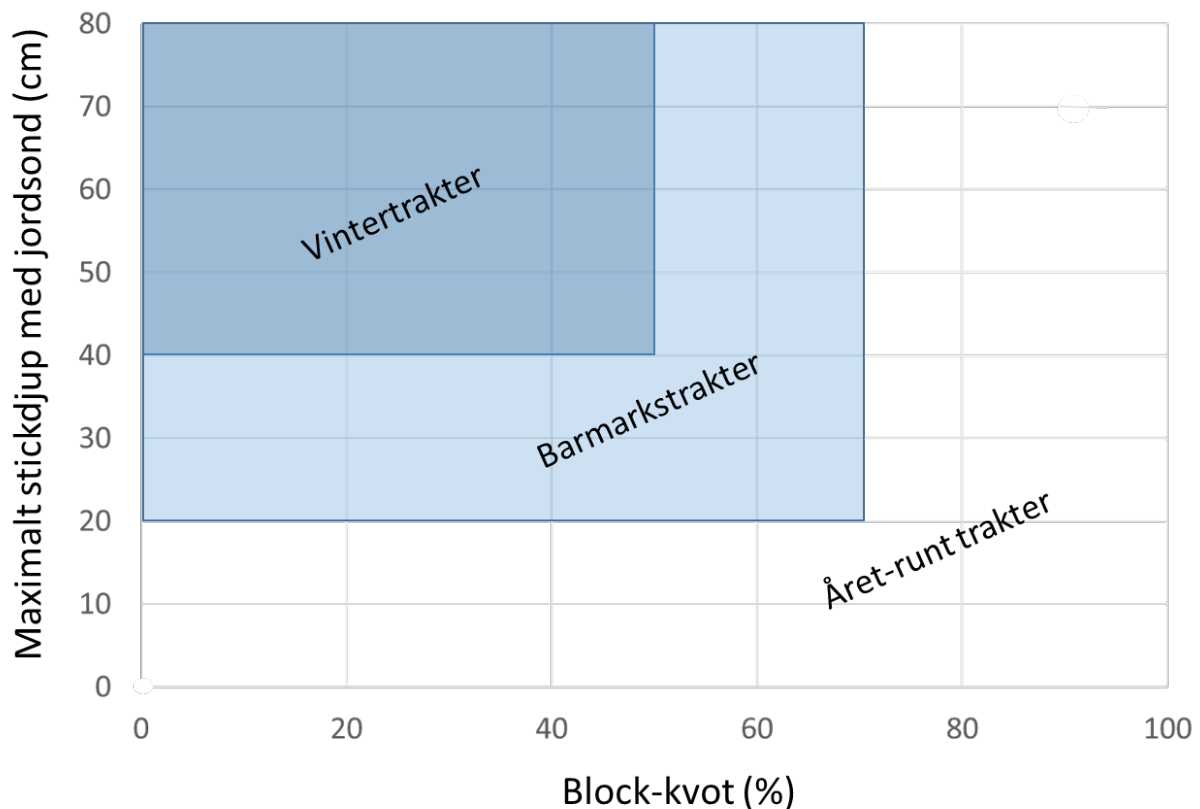
För att bedöma en skogsmarks bärighet är det mycket viktigt att ta reda på vilken jordart den har. Markens hållfasthet bestäms till stor del av jordart (partikelstorlek på mineraljorden) och vattenhalt (Figur 2). Mark med hög andel grus eller sand och/eller mycket steniga marker har bra bärighet även om vattenhalten är hög. Finkorniga marker med högre lerhalt än 10% och där andelen av övriga finpartiklar mindre än sandkorn (<0,06 mm) är högre än 30% är för sin bärighet starkt beroende av vattenhalten. Många marker har dock en lerhalt på 5-10% och en andel under 30% av övriga finpartiklar mindre än sandkorn. Dessa marker påverkas också av fukthalten, men inte alls i lika hög grad som de med högre andel lera och andra finpartiklar. Fukthalten uttrycks ofta som "Volumetric water content" (VWC) vilket är volymen av vatten dividerat med den totala volymen av ett jordprov (jord, vatten och hålrum i form av markporer). Ett VWC på ca 40% verkar vara ett ungefärligt tröskelvärde när det gäller markens bärighet. Ett högre värde än så innebär oftast dålig bärighet. Det exakta värdet är såklart beroende av jordart, maskinspecifikationer som total massa och marktryck och antal överfarer i samma hjulspår. En VWC högre än 40% är typiskt under senhöst, vinter, tidig vår och under sommar efter ihållande regnperioder. Riktigt grovkorniga marker kan normalt inte ha högre VMC än ca 40%. Sommartid tar det oftast 2-3 dagar för marken att torka under 40% VWC efter ihållande regn (cf. Uusitalo et al. 2019).



**Figur 2. Principfigur över skogsmarkens bärighet som funktion av vattenhalt och typ av sedimentjord (Efter Østby-Berntsen & Fjeld 2018)**

För en moränjord är förekomst av sten och block av stor betydelse för markens hållfasthet. Ett sätt att beskriva detta är att ange vilken blockkvot en mark har samt hur långt ner i marken som man med "normal kraft för en person på ca 80 kg" orkar trycka ner en jordsond (Fjeld et al. 2018). För att ange blockkvoten görs ett antal nedstick med en jordsond eller liknande. Man räknar hur många gånger som jordsonden fastnar på en sten ner till 20 cm djup i mineraljorden i förhållande till när den inte gör det. Förfarandet är likartat som när man bedömer blockkvoten inför markberedning med den skillnaden att

man utgår från mineraljordens övre horisont istället för från humuslagrets övre horisont (cf. Berg 1991). Om jordsonden t.ex. i 60% av fallen inom en provyta stöter på och fastnar på en sten på ett djup mindre än 20 cm så är blockkvoten 60%. Det maximala djupet som jordsonden kan tryckas ner med normal kraft avser när den inte stöter på sten. Fjeld et al. (2018) presenterade resultat från en fältstudie med många trakter där man identifierat vad som borde ha varit vintertrakter, barmarkstrakter eller åretrunt trakter baserat på andel av stick- och basvägar som hade djupare spår än 25 cm vid barmarkskörning (Figur 3). I den redovisningen framgår inte hur hög fukthalten var, men normalt kan en jordsond tryckas ner djupare desto fuktigare marken är.



**Figur 3. Klassificering av drivningstrakter baserat på block-kvot (nedtryckning av jordsond 20 cm i mineraljord) och maximalt stickdjup med jordsond när ingen sten påträffas (Efter Fjeld et al. 2018).**

Förutom fukthalt så är markens bärighet beroende av tjockleken på det organiska lagret ovan mineraljorden (föna och humus), och på andelen organiskt material inblandat i mineraljorden. Spårbildning i det ovanliggande organiska lagret har mindre skadliga effekter än vad det visuella intrycket ger sken av. Det ovanliggande organiska lagret och ren organisk mark (oftast torvmark) återhämtar sig mycket snabbare än vad kompakterad mineraljord gör (cf. Uusitalo et al. 2019).

Att använda grot från avverkning är en möjlighet som står till buds för att förbättra markens bärighet. Maskinens massa fördelas ut på en större yta om stora mängder grot används som markförstärkning. Tillgången på grot beror dels på vilken form av avverkning det handlar om, trädslag och om det sker något grot- eller brännvedstillvaratagande på trakten. Dock är rådande praxis i svenskt skogsbruk att prioritera grot som markförstärkning istället för uttag om det anses som nödvändigt.

### 3. Viktiga egenskaper på skogsmaskiner att beakta för att reducera markskador.

Den påkänning på marken som en skogsmaskin ger beror på dess massa och hur den överförs till marken. För en maskin som bär sin last, som en skotare gör, så måste man beakta att den sammanlagda massan av maskin och last som överförs till marken via markkontakt med hjul eller band. Massan av en fullastad professionell skotare i Sverige varierar mellan 22 och 44 ton utan boggiband.

Den massa som belastar ett enskilt hjul påverkar hur långt ner i marken som den komprimeras. En hög hjullast ger kompaktering längre ner i marken än en låg hjullast. Trenden har under lång tid varit att hjullasten på skotare har ökat. Den enskilda hjullasten blir lägre om en skotare har många hjul. Utvecklingen har gått från 6 till 8 hjulade skotare, vilket är en fördel. Det är en fördel om hjullasten är så jämnt fördelad som möjligt mellan maskinens alla hjul, men skotare har dock en mycket ojämn viktfordelning mellan framvagnens och bakvagnens hjul. Utan last är viktfordelningen ca 57-59% fram och 41-43% bak. Vid full last är förhållandet ca 31-34% fram och 66-69% bak. Det är endast vid en mycket liten last på 20-24% av lastkapaciteten som viktfordelningen är lika mellan hjulen (cf. Eriksson 2015). Det finns en tumregel för vilken påkänning som jordbruksmark tål utan att den komprimeras på djupet (Schønning et al. 2012). Om den tumregeln tillämpas för skogsmark så innebär det att en hjullast inte ska överstiga 3-3,5 ton. Som jämförelse och med ett antagande om en viktfordelning på 67% bak och 33% fram för fullastade skotare i Sverige så innebär det att hjullasten varierar mellan 3,7 och 7,4 ton på bakvagnen. Eftersom skogsmark har armering i form av trädrötter, humuslager och markvegetation så tål skogsmark högre hjullast än vad jordbruksmark gör. Hur stor inverkan som detta har är dock något som kräver mer forskning för att kunna besvaras.

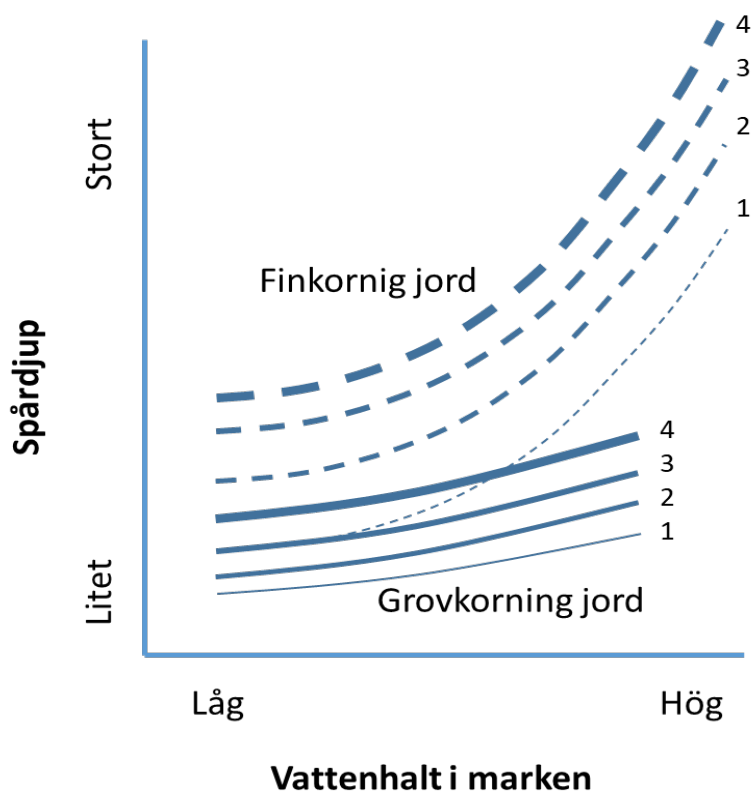
Det nominella marktrycket för en maskin är dess totala massa dividerat med kontaktytan mellan maskinens hjul och underlaget. Men, eftersom viktfordelningen nästan alltid är olika mellan fram och bakvagn så beräknas det nominella marktrycket separat för dessa fordonsdelar. Det nominella marktrycket är starkt kopplat till spårbildningen. Kontaktytans storlek beror på hjulets diameter, bredd och ringtryck, hjullastens storlek samt däckets deflektion till följd av hjullast samt av markens elasticitet. Desto större diameter och bredd ett däck har desto lägre är det nominella marktrycket. Desto lägre ringtrycket är desto lägre är det nominella marktrycket. De ringtryck som tillämpas på skogsmaskiner i dagsläget är höga, minst 400 kPa (4 bar) för att tillåta högre hastigheter, och minimera risken för klämskador på däcken. Men, för att verkligen reducera det nominella marktrycket ordentligt så måste ringtrycket sänkas till under 100 kPa (1 bar), vilket med dagens däckskonstruktion medför stora risker för skadade däck och att hastigheten dessutom måste reduceras kraftigt. Utveckling av däck som är större än idag stöter på praktiska begränsningar. En begränsning är att maskinen blir så stor att den inte kan transporteras efter allmänna bilvägar. En annan begränsning är att mycket stora däck på en skotares bakvagn reducerar lastutrymmet. Slutsatsen är att den återstående lösningen för ett reducerat marktrycket är att reducera hjullasten.

Montering av boggiband ökar kontaktytan mellan maskin och mark och reducerar marktrycket. Mätning av marktryck under band visar att deras effekt till stor del handlar om att hjulen blir bredare och till mindre del om att kontaktytan mellan boggihjulen blir längre. Det är mitt under hjulen som trycket mot marken blir störst. Detta beror på att banden inte har något stöd mellan boggihjulen (cf. Persson 2019). Man måste också vara medveten om att konventionella boggiband är tunga. Ett band väger mellan 1,0 till 1,4 ton för konventionella skotare, vilket i sig utgör ett tillskott till hjullasten på 0,5 till 0,7 ton.



#### 4. Spårdjup

Spårdjup efter överfart påverkas till stor del av samma variabler som kompaktering. En hög vattenhalt i marken ger större spårdjup än om vattenhalten är låg. En finkornig jordart ger större spårdjup än en grovkornig jordart. Spårdjupet ökar också med stigande antal överfarter (Figur 4). Förutom dessa variabler så har också markens bulkdensitet inverkan på finkorniga jordarter. En hög initial bulkdensitet ger mindre spårdjup än en mer porös mark.



**Figur 4. Principfigur över spårdjupets utveckling på skogsmark som funktion av vattenhalt och jordart och antal överfarter (markerat med 1 till 4) med en tung skogsmaskin i samma körspår. (Efter Uusitalo et al. 2018)**

Användning av boggiband reducerar spårdjupet på mjuka marker. Det är speciellt under den bakre boggin som band är betydelsefulla pga. den ojämna viktfordelningen på lastade skotare. Det finns för något skotarfabrikat även en teknisk lösning med en extra hjulaxel bakom bakre boggi, vilket medför sex hjul på bakvagnen. Extra långa boggiband kan då monteras, och anläggningsytan mot marken nästan fördubblas. Utan denna extra hjulaxel och med vanliga boggiband runt om väger denna skotare 37,7 ton vid 15 tons last. Med extra hjulaxel och med längre band på bakvagnen ökar vikten på bakvagnen med drygt 2,5 ton (cf. Gelin & Björheden 2020), men eftersom anläggningsytan mot marken ökar kraftigt så blir det beräknade medelmarktrycket ändå nästan lika lågt på bakvagnen som på framvagnen (cf. Malmberg 1981). Med en så lång anläggningsyta blir det svårt att ta en kurva utan att spårdjupen blir stora (Gelin & Björheden 2020), och den mekaniska påkänningen på konstruktionen blir också orimligt hög. Dock kan den extra hjulaxeln lyftas upp vid kurvtagning och vid körning på fast mark. Studier har visat att på mjuka marker så halverades i genomsnitt spårdjupen med den utrustningen (Gelin & Björheden 2020; Fjeld & Østerby-Berntsen 2020). Skillnaden ökade med ökad vattenhalt i marken (Fjeld & Østerby-Berntsen 2020) vilket innebär störst skillnad när grundförhållandena är riktigt dåliga.

## **5. Rekommendationer för att reducera markskador vid drivningsarbete.**

Sammantaget så kan man ge ett antal grundläggande rekommendationer för hur markskadorna ska kunna reduceras så mycket som möjligt vid drivningsarbete.

### ***Jordart och fukthalt***

Fastställ vilken jordart som det är på avverkningstrakt och basväg därifrån och om möjligt även variation i jordart inom området. I fält kan man bedöma jordart för både sediment och moränjordar via rull- och skakprov. En jordsond är ett enkelt redskap som möjliggör att snabbt få ett jordprov från den övre delen av marken. Rull- och skakprov görs normalt inför en första projektering av en skogsbilväg, men samma metod är även användbar vid en mer noggrann drivningsplanering. En utmärkt beskrivning av hur rull- och skakprov genomförs finns på [www.skogskunskap](http://www.skogskunskap) under vägar i skogen (Hallgren u.å). När man har fastställt vilken jordart det handlar om så behöver man också bedöma hur fuktig marken är. En klassificering av boreal skogsmarks bärighet för en typisk skotare är utförd med ledning av dessa två variabler (Uusitalo et al. 2019) vilket presenteras i tabell 1.

**Tabell 1. Klassificering av boreal skogsmarks bärighet för en typisk 8-hjulig skotare med 30 tons totalvikt som är försedd med boggiband på bakvagnen och två hjulkedjor på framvagnen. 1 = fast mark med god bärighet (Åretrunt trakter), 2 = medelfast mark med ganska bra bärighet, 3 = mjuk mark med dålig bärighet, 4 och 5 = mycket mjuk mark med extremt dålig bärighet (Vintertrakter). Efter Uusitalo et al. (2019)**

Jordart	Markfuktighet, volymsandel av jordprov som är vatten (%)					
	Värden inom parentes avser torvmarker					
	Mycket torr <20 (65)	Torr 25 (70)	Medel 30 (75)	Ganska våt 40 (80)	Mycket våt 45 (85)	Vatten- mättad 50 (90)
Torvmark	3	4	4	5	5	5
Finkorniga sediment med tjockt humuslager	1	2	3	4	4	4
Finkorniga sediment med tunt humuslager	1	1	1	3	4	5
Sanddominerade sediment	1	1	2	2	4	5
Morän med hög andel finkornigt material	1	1	2	3	3	4
Morän med hög andel grovkornigt material	1	1	1	1	--	--

En motsvarande klassificering har även utförts för tempererad skogsmark i Frankrike (Tabell 2). Skillnaden mellan boreal skogsmark och den mest vanliga skogsmarken i Frankrike är att den normalt saknar ett tjockt humuslager längst upp. Den har också oftast en hög andel av lera och andra finfraktioner vilket innebär att den har mycket dålig bärighet när den är våt. När marken är vattenmättad bör tunga skogsmaskiner inte användas alls och när marken är våt bör man iaktta stor försiktighet. Beroende på att markvariationen är ganska liten på tempererad skogsmark så kan man tillämpa en enklare klassificering av bärighet än den för boreal skogsmark (cf. Uusitalo et al. 2019).

**Tabell 2. Klassificering av tempererad skogsmarks bärighet för virkestransporterande maskiner generellt. 1 = Fast mark med god bärighet, 3 = Mjuk mark med dålig bärighet, 5 = Mycket mjuk mark med extremt dålig bärighet. Efter Uusitalo et al. 2019**

Jordart (ev. volymsandel av dominerande fraktion)	Markfuktighet i medeltal ner till 50 cm djup			
	Torr	Medel	Våt	Vattenmättad
Stendominerad (>50%)	1	1	1	5
Sanddominerad (>70%)	1	1	3	5
Lerdominerad	1	3	3	5
Mo och mjåla- dominerad	1	3	5	5

### **Drivningsplanering**

Planera drivningen så att de mest trafikerade vägarna (basvägar och huvudbasstråk) i möjligaste mån ligger på delar av trakten med högst bärighet, och försök i övrigt att få till så korta totala körvägar som möjligt. Vid drivningens utförande ska man tänka på att optimera samlastning av olika sortiment på så sätt att den totala körsträckan hålls så låg som möjligt. Detta är lättare sagt än gjort, men bara genom att ha den aspekten i åtanke så ökar möjligheten att reducerade markskadorna. Att optimera samlastning så att den totala körsträckan minimeras kommer ibland i konflikt med målet med så låg tidsåtgång som möjligt. Beroende på den aktuella markens bärighet så kan antingen kort total körsträcka eller låg total tidsåtgång vara det övergripande målet.

### **Utrustning och åtgärder**

Speciellt på skotarens bakvagn är det viktigt att använda boggiband om marken har begränsad bärighet. Många studier visar att spårdjupen blir mindre om band används (cf. Sakai et al. 2008).

Utnyttja möjligheten till markförstärkning av känsliga partier, eller där man kan förutse att många överfarter kommer att ske. På de flesta trakter, eller delar av trakter, är det mer angeläget att använda grot som markförstärkning att köra på än att ta tillvara som bioenergi. Men, om grot ska ha någon påtaglig effekt som markförstärkare så krävs att det är ganska stora mängder grot i körvägarna (cf. Eliasson & Wästerlund 2007).

Om det inte finns tillräckliga mängder av grot tillgängligt eller om ett terrängavsnitt har så dålig bärighet att det inte räcker med grot som markförstärkning så finns möjligheten att använda rundvirke att köra på (cf. Fogdestam & Bergkvist 2012). En bra beskrivning av hur man kan bygga tillfälliga broar över bäckar och diken eller kavelbroar över svaga markpartier och komplettera med grot finns på [www.skogskunskap](http://www.skogskunskap) under hänsyn/vatten och mark. Det normala är att använda mindre värdefulla sortimentet som material. Lövmassaved har hög oftast högre hållfasthet än barrmassaved varför det är att föredra (Figur 5). För att bygga tillfälliga broar behöver man dock ofta använda grovt sågtimmer för att finna material med tillräcklig hållfasthet. Efter avslutad avverkning kan virket tas tillvara, och beroende på hur sönderkört och nersmutsat som det blivit så kan det användas som vanligt rundvirke eller bränsleved. Men, ofta lämnas en kavelbro kvar för att den är kraftigt nersmutsad och att den kan komma att behövas av en grotskotare och/eller en markberedare i ett senare skede.



**Figur 5. En kavelbro som byggts över en smal myr av en kombination av barrmassaved och grot. Foto: Tomas Nordfjell.**

Det finns också speciellt tillverkade "markskonare" som kan läggas ut för att låta en basväg passera över ett kort avsnitt med mycket dålig bärighet (Figur 6). Markskonare kan också användas till att bygga en tillfällig överfart av diken eller en mindre bäck eller för att skydda en vägslänt. De är vanligen tillverkade av utsågade block från stockar av låg kvalitet med tjocklek och bredd på 17,5 eller 20 cm med en längd av 4,5 - 6,0 m. Vanligen är 4 eller 5 block ihopsatta med genomgående bultar till en bredd av ca 90 cm. Studier visar att spårdjupen kan reduceras till mindre än 10 cm där man annars får 40-50 cm djupa spår om markskonare används (Nordfjell & Östlund 2015). I samma studie visades också att markkompakteringen var nästan obefintlig vid användning av markskonare, men att den var påtaglig utan markskonare på en finkornig och fuktig mark. Studien utfördes där markskonare använts, men rimligtvis är resultaten lika tillämpliga för välbyggda kavelbroar av rundvirke. Markskonare kan återanvändas många gånger, men det är ytterligare något som ska transporteras mellan och inom avverkningstrakter vilket ökar den logistiska komplexiteten.



**Figur 6. Tillverkade markskonare utlagda över en kort sträcka med mycket dålig bärighet. Foto: Alexander Östlund.**

## Referenslista

- Berg, S. 1991. Terrängtypschema för skogsarbete.Handledning. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten.
- Eliasson, L. & Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management*, 252(1-3), 118-123.
- Eriksson, J. 2015. Konindexbaserad prognostisering av spår djup på sedimentmarker för Komatsus skotare. Arbetsrapport 16. Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, SLU.
- Fjeld, D., Bjerketvedt, J. & Fønhus, M. 2018. Nye muligheter for klassifisering av bæreevne. Norsk Skogbruk Mai 2018.
- Fjeld, D. & Østerby-Berntsen, Ø. 2020. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development – a Norwegian field study. *International Journal of Forest Engineering*, DOI: 10.1080/14942119.2020.1765654.
- Fogdestam, N. & Bergkvist, I. 2012. Att bygga broar – hur man gör och vad det kostar. Resultat från Skogforsk nr. 20.
- Gelin, O. & Björheden, R. 2020. Concept evaluations of three novel forwarders for gentler forest operations. *Journal of Terramechanics* 90: 49-57
- Hallgren, P. u.å. Geoteknik och hydrologi - en överkurs / Jordartsbedömning – metoder. <https://www.skogskunskap.se/vagar-i-skogen/vagbyggnadsteknik/geoteknik-och-hydrologi---en-overkurs/jordartsbedomning---metoder/>
- Hansson, L. 2019. Impacts of forestry operations on soil physical properties, water and temperature dynamics. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Faculty of Forest Sciences. Doctoral Thesis No. 2019:18.*
- Malmberg, C-E. 1981. Terrängmaskinen del 2. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Stockholm.
- Nordfjell, T. & Östlund, A. 2015. Forwarding on soft soils, comparison of rutting with and without wooden bridge sections. Formec 2015. 48th International Symposium on Forestry Mechanization: "Forest engineering : Making a positive contribution" from October 4 - 8, 2015 in Linz, Austria.
- Persson, P-E. 2019. Klassning av bärighet – optimal tillgänglighet med rätt metod. Mora in Europe AB.
- Sakai, H., Nordfjell, T., Suadicani, K., Talbot, B. & Bøllehuus, E. 2008. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croat. J. For. Eng.* 29:1, 15-27.
- Schønning, P., Lamandé, M., Keller, T., Pedersen, J. & Stettler, M. 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use and Management*, 28, 378-393.
- Uusitalo, J., Sirén, M., Ala-Ilomäki, J. & Lindeman, H. 2018. Empirical machine-dependent models to predict soil deformations. In. EFFORTE project deliverable D1.2. – Database and models for soil type specific trafficability. <https://www.luke.fi/efforte/document-library/deliverables/>
- Uusitalo, J., Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Ruch, P., Cacot, E., Martin, M., Vuillermoz, M., Keller, T., Sandin, M., Bergkvist, I., Pischedda, D., Pousse, N., Mochan, S. & Stewart, I. 2019. EFFORTE project deliverable D1.3 – Recommendations on terrain trafficability and knowledge-based preventing measures for efficient risk mitigation while planning forest operations. <https://www.luke.fi/efforte/document-library/deliverables/>
- Østby-Berntsen, Ø & Fjeld, D. 2018. Mulighetsstudie: Skånsomme lassbærere for bæresvak mark. Norskog-rapport 2018-3.

## Summary: Low Ground Impact Harvesting

Ground based forest harvesting means that heavy transportation has to be done on forest ground. The total mass of logs and machines that passes on main logging trails roads from the harvesting site to roadside is several thousand tons during an ordinary harvesting operation. When forest soil is burdened beyond its bearing capacity, it will become compacted and rutted.

The strength of the soil is largely determined by the soil type (particle size of the mineral soil) and its water content. Soils with a high proportion of gravel or sand and / or very rocky soils have good bearing capacities even at high water contents. Fine-grained soils with a high proportion of fine particles are strongly dependent on the water content for their bearing capacity. A volumetric water content (VWC) of about 40% seems to be an approximate threshold value when it comes to soil bearing capacity.

The stress that a forest machine exerts on the ground depends on the machine's mass and how it is transmitted to the ground. The mass that loads a single wheel affects the depth of the ground compaction. High wheel loads compact the ground deeper than lower wheel loads. The trend over the past many years has been that forwarders' wheel loads have increased.

Ground pressure is strongly linked to rutting. The size of the contact surface depends on the following: diameter, width and tire pressure of the wheel; the magnitude of the wheel load; the deflection of the tire caused by the wheel load; and the plasticity of the ground. The larger the diameter and width of a tire, the lower the ground pressure. The lower the tire pressure, the lower the ground pressure.

Any development of tires that are larger than today's tires would encounter practical limitations. One such limitation would be that the machine become so large that it cannot be transported on public roads. Another limitation would be that very large tires on a forwarder reduces the space available for cargo. Hence, the only remaining practical solution for reducing ground pressure is to reduce the wheel load.

The use of bogie tracks increases the contact area between the machine and the ground, thereby reducing ground pressure. Measurements of ground pressure shows that the bogie tracks' effect is more about the wheels becoming wider than about the contact surface between the bogie wheels becoming longer. Indeed, it is at the wheel's centerline that the pressure on the ground becomes greatest. This is because the tracks have no support between the bogie wheels. Rut depth is largely affected by the same variables as compaction. A high soil water content causes greater rut depth than if the water content is low. A fine-grained soil type leads to deeper ruts than a coarse-grained soil type. The rut depth also increases with increasing number of crossings.

To reduce soil damage as much as possible, the following basic recommendations should be adhered to:

- Determine the soil type of the harvesting site and main logging trails (and if possible also the variation in soil type within the area).
- Once the soil type has been determined, assess also the soil moisture content. Classifying the bearing capacity of forest soils for forwarders is done on the basis of these two variables.
- Plan the forwarding so that the most frequently used trails are located on where the bearing capacity is the highest. Beyond this factor, try to find as short total extraction distances as possible.
- Use bogie tracks, especially on the forwarder's rear bogie or if the ground has poor bearing capacity. Many studies have shown that rut depth decreases if tracks are used.
- Reinforce the ground, especially at sensitive areas or where many crossings will take place.
- If sufficient amounts of logging residues are not available or if a terrain section has very poor bearing capacity, logs (generally low-value/pulpwood logs) can also be used to drive on.
- There are also specially made "ground protectors" that can be laid out when frequently passing over shorter sections with very poor bearing capacity. Such ground protectors can also be used to build temporary crossings over ditches or very small streams.