



Skonsamt från trakt till bilväg

– en analys av potentialen hos ett digitalt planeringsverktyg i syfte att minska risken för körskador

Johan Sjöberg

Examensarbete • 30 hp

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Skogsfakulteten/Skogens biomaterial och teknologi

Jägmästarprogrammet

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2022:2

Umeå 2022



Skonsamt från trakt till bilväg – en analys av potentialen hos ett digitalt planeringsverktyg i syfte att minska risken för körskador

Johan Sjöberg

Handledare:	Ola Lindroos, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi
Bitr. handledare:	Malin Johansson, Stora Enso skog AB
Examinator:	Dag Fjeld, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi
Omfattning:	30 hp
Nivå och fördjupning:	Avancerad nivå
Kurstitel:	Masterarbete i skogsvetenskap, A2E – skogens biomaterial och teknologi
Kurskod:	EX0956
Program/utbildning:	Jägmästarprogrammet
Kursansvarig inst.:	Skogens biomaterial och teknologi
Utgivningsort:	Umeå
Utgivningsår:	2022
Omslagsbild:	Johan Sjöberg
Serietitel:	Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Delnummer i serien:	2022:2
Nyckelord:	Skotning, beslutsstöd, traktplanering, terrängtransportavstånd

Sveriges lantbruksuniversitet

Skogsfakulteten

Skogens biomaterial och teknologi

Sammanfattning

Dagens skogsbruk har höga krav på sig, både i termer av att leverera råvara på ett kostnadseffektivt sätt och i att ta hänsyn till omkringliggande miljö. Skogsbruket bedrivs i regel med stora maskiner som hanterar tunga laster med virke och detta gör att man riskerar körsador. Det finns många anledningar till att undvika körsador, både ekologiska-, ekonomiska- och sociala värden kan påverkas negativt. Det finns flera olika sätt att minska risken för körsador, varav ett är att förlägga de mest frekvent använda körstråken till mark där risken är så låg som möjligt. Dessa körstråk förväntas vara både kostnadseffektiva och samtidigt förlagda till bärig mark där risken för körsador är så låg som möjligt. Timbertrail är ett verktyg som har utvecklats i syfte att, genom användning av bakgrundsdata, optimera körstråken efter dessa krav.

Genom att jämföra förslag på körstråk från Timbertrail med körstråk från redan utförda avverkningar kunde verktygets förmåga att minska risken för körsador analyseras. Körstråken jämfördes genom GIS-analyser med markfuktighetskartor som underlag.

Resultatet visar på att Timbertrail ger förslag som sänker risken för körsador med, i genomsnitt, 4,5% och den statistiska analysen visar på en signifikant skillnad. Samtidigt visar analysen att Timbertrail förlänger körstråken med i genomsnitt 1,5%.

Analysen visar att Timbertrail som planeringsverktyg har potential att minska risken för körsador genom att förlägga körstråk till bärig mark. Innan verktyget appliceras i en operativ verksamhet behöver verktyget dock analyseras ur fler aspekter, exempelvis möjligheten att använda det i prissättningen av drivningsåtgärder.

Skotning, beslutsstöd, traktplanering, terrängtransportavstånd

Abstract

Today's forestry demands high safe and trustful supply and environmental considerations. The heavy machines used today are handling large volumes of timber and pulpwood and the risk of rutting and damages to the ground are severe. The reasons to avoid rutting are obvious; both economical- ecological and social values may be affected negatively. One way to avoid these kinds of damages is to place the most frequently used machine trails on durable ground, in fact the driest ground. The aim of those kind of frequent used machine trails is both the durable of the ground, but also to carry out the timber in a cost-efficient way, the shortest way possible. Timbertrail is a tool developed to optimize machine-trails, based on background data, in order to minimize both the risk of rutting and the operational cost.

By comparing the optimized trails from Timbertrail with trails at logging sites that already has been harvested, the utility and usefulness of the tool could be evaluated. The analyse was carried out by import the already used trails and those made by Timbertrail, into a GIS-software. The risk of rutting could be evaluated with a soil-moisture map as basis.

The results showed that Timbertrail lowers the risk of rutting by an average of 4,5%, and the differences compared to the already used trails are statistically significant. On the other hand, Timbertrail also lengthen the trails by 1,5%, in average.

This analysis shows that Timbertrail could be used with an expectation that it helps to avoid rutting, by giving suggested trails on durable ground. There is also a need of more evaluation of the tool, an interesting part to analyse would be if the tool could be used when prizing harvesting-services.

Forwarder extraction, decision support, operational planning, forwarding distance

Förord

Examensarbetet har utförts vid Institutionen för skogens biomaterial och teknologi vid Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts i samarbete med Stora Enso Skog AB som också har finansierat examensarbetet.

Ett stort tack riktas till min handledare, Ola Lindroos vid Skogens biomaterial och teknologi, som har stöttat och handlett mig med tydlighet och gett ovärderliga råd. Jag vill också tacka Malin Johansson på Stora Enso Skog AB som har försett mig med data och råd genom arbetet. Dessutom ska Erik Rönnqvist, Creative Optimization, ha ett stort tack för instruktioner kring hur den analyserade programvaran kan användas och analyseras på ett rättvist sätt.

Johan Sjöberg
Falun, 2022

Innehållsförteckning

1. Inledning	11
1.1. Bakgrund	11
1.2. Körskadorna	12
1.2.1. Påverkan på ekologi	14
1.2.2. Kväveutlakning	14
1.2.3. Sedimentation	14
1.2.4. Kviksilver	14
1.2.5. Markkompaktering och rotskador	15
1.3. Körskadornas påverkan på sociala värden	16
1.4. Körskadornas ekonomiska konsekvenser	16
1.5. Traktplanering	16
1.6. Timbertrail	17
1.7. Syfte	18
2. Material och metod	19
2.1. Data och datainsamling	19
2.1.1. Fastställande av faktiskt körda körstråk	21
2.1.2. Framtagande av körstråksförslag med hjälp av Timbertrail	24
2.2. Analyser	25
2.2.1. Viktning av markfuktighet i körstråken	26
2.2.2. Traktegenskaper	27
2.2.3. Statistisk analys	28
2.2.4. Känslighetsanalys	28
3. Resultat	29
3.1. Jämförelse av körstråksindex för Timbertrails styrda förslag och faktiskt utförda körstråk	29
3.1.1. Längd på körstråk samt längd inom kritisk markfuktighet	32
3.1.2. Traktens förutsättningar	37
3.2. Känslighetsanalys	40
4. Diskussion	41
4.1. Resultatdiskussion	41
4.1.1. Känslighetsanalys	43
4.2. Metoddiskussion	44
4.3. Framtida studier	45
4.4. Tillämpning	45
4.5. Slutsats	46
Referenser	47

Bilaga 1 52

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Skogsbruket, och speciellt drivningsarbetet, har de senaste årtiondena haft en snabb teknologisk utveckling (Thorsén & Thor 2014). Utvecklingen har gått från att arbetet var ett fysiskt tungt jobb som utfördes manuellt, till att idag i stor grad utföras av högteknologiska maskiner där flera moment sker per automatik (Klaes et al. 2016). Utvecklingen har samtidigt drivits på av utmaningen i att stora maskiner krävs för att hantera tunga träd, samtidigt som skogsmark är en känslig miljö att framföra de tunga maskinerna i (Häggström & Lindroos 2016; Hosseini et al. 2019).

Utmaningen i drivningsarbete ligger alltså i att samtidigt som det ekonomiska resultatet ska tas i beaktande måste också aspekter kopplade till kvalitet på drivningen säkerställas (Marchi et al. 2018). Båda dessa faktorer påverkas av de yttre, varierande, förhållanden som drivningen ställs inför (Eriksson & Lindroos 2014; Häggström & Lindroos 2016). Kvaliteten på den utförda avverkningen kan kopplas till flera olika utfall, där påverkan och skador på omkringliggande miljö är en viktig del. Att drivningen ska utföras på ett ekonomiskt framgångsrikt sätt och samtidigt ett, för miljön, så skonsamt sätt som möjligt är en utmaning för både maskintillverkare, markägare och avverkande aktör.

Drivningsarbete utförs oftast i arbetslag bestående av en skördare och en skotare. Produktiviteten och därmed det ekonomiska utfallet för en skördare är framförallt kopplad till medelstammens volym, medan skotarens produktivitet har ett starkt samband med terrängtransportavståndet, vilket definieras som körning mellan avlägget och traktens volymvägda medelpunkt, tom eller fullastad (Eriksson & Lindroos 2014; Proto et al. 2018). Ett kortare terrängtransportavstånd ger högre skotningsproduktivitet och därmed lägre avverkningskostnad per skotad volymenhet virke. Detta faktum gör att man lätt ställs inför en avvägning mellan att köra en så kort väg som möjligt och att välja en väg där risken för körskador är så låg som möjligt. Risken för körskador ökar med markfuktigheten, varför man bör

undvika körning i fuktiga områden (Cambi et al. 2015a). Dessutom kan risken för körskador även öka med terrängens lutning (Naghdi & Solgi 2014). Även om teknologisk utveckling samt arbetsmetoder har utvecklats för att minska risken för körskador finns fortfarande behov av utveckling inom området (Eliasson & Wästerlund 2007; Berg et al. 2010; Cambi et al. 2015a; Friberg & Bergkvist 2016).

De yttre omständigheter som drivningsarbetet ställs inför kan med klimatförändringarna förväntas kompliceras än mer och skapa en större osäkerhet kring förhållanden inför drivning (Eriksson et al. 2016; Keskitalo et al. 2016; Marchi et al. 2018). Eftersom risken för körskador är som störst på fuktig och mjuk mark kan både varmare väder och större nederbördsmängder ställa ännu större krav på skogsbruket vad gäller arbetet mot körskador. Dessutom är skogsbruket ämne för en politisk debatt där ökade krav ställs på hållbarhet i skogsbruksmetoderna med fokus på hänsyn till både natur och sociala intressen (Marchi et al. 2018). Körskador kan ha direkt påverkan på både ekonomiska, ekologiska och sociala värden i skogen och är därför ett ämne som kräver både utveckling och forskning. (Wang et al. 2015; Marchi et al. 2018; Kuglerová et al. 2021). Skogsbruket använder idag olika verktyg för att undvika körskador, både tekniska lösningar och metoder som tagits fram i syfte att minska risken.

1.2. Körskador

En fullastad skotare kan väga ca 40 ton och risken för att orsaka körskador är stor (Naghdi et al. 2009; Cambi et al. 2015b; Klaes et al. 2016). Dessutom väger virket som ska transporteras ut från avverkningstrakten till bilväg mycket och detta bidrar till att risken för körskador ökar än mer (Lindroos et al. 2017). Markens bärighet avgör hur stor risken för körskador är. Bärigheten i marken beror dels på, som nämns ovan, markfuktigheten och dels på markens sammansättning i fråga om kornstorlek och humusmaterial (Nordfjell 2020). Generellt sett så ger grövre jordarter bättre bärighet, medan finkorniga jordarter med större lerhalt ger sämre bärighet. Nordfjell (2020) beskriver i sin rapport hur bärigheten i finkorniga jordar försämras betydligt mer än i grovkorniga vid vattenmättnad efter exempelvis kraftig nederbörd. Studier visar också att graden av markkompaktering ökar med minskande kornstorlek i jorden (Labelle et al. 2022).

Hur intensivt en avgränsad markyta belastas vid avverkning är  så avgörande för risken för körskador. För att effektivisera transporten av virket ut till bilväg koncentreras körningen ofta till några få körstråk, så kallade basvägar och basstråk. Basväg benämns den del av körstråket som går mellan avlägg och traktgräns och basstråk är ett körstråk inom traktens gränser dit körningen koncentreras, figur 1

(Lindroos et al. 2014). På grund av att en större del av traktens virkesvolym koncentreras till dessa stråk ökar också risken för körskador i dessa stråk.

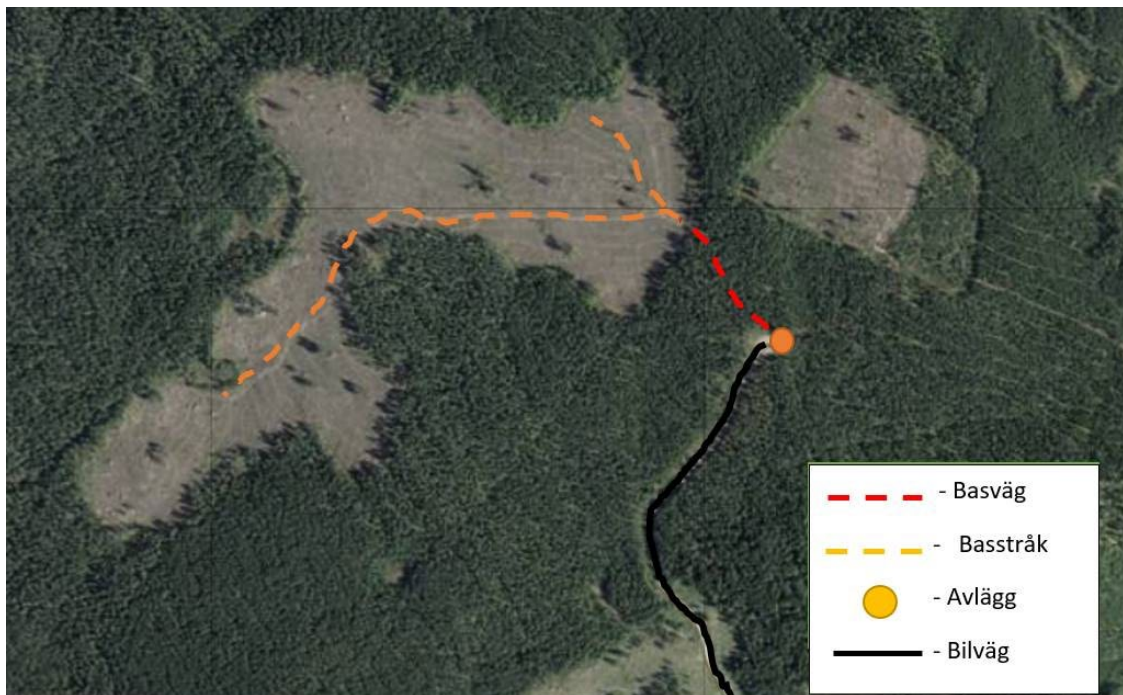


Figure 1 Illustrativ bild som visar definitionerna på basvägar och basstråk och exempel på deras respektive dragning på en avverkningstrakt.

Figure 1 Illustration that shows the definition of "basvägar" and "basstråk" and their location at the harvesting area.

Definitionen av en körskada kan skilja mellan olika aktörer. Skogforsk har i ett förslag till olika definitioner kommit fram till att körskador inte helt kan undvikas i dagens skogsbruk men att aktörer inom branschen har flera åtgärder att ta till för att motverka dem i så stor utsträckning som möjligt (Berg et al. 2010).

Hur allvarlig en körskada anses vara är starkt förknippat med dess påverkan på vattendrag och sjöar (Kuglerová et al. 2021). En körskada som påverkar närliggande vattendrag är att betrakta som en allvarlig körskada (Berg et al. 2010). Markkompaktering kan också vara ett problem, både ekologiskt men även ekonomiskt då det kan leda till sämre framtida tillväxt i beståndet (Cambi et al. 2015a).

Utöver de konsekvenser som körskador kan få för omkringliggande miljö finns fler incitament för att arbeta mot bildandet av körskador. Många skogsägare är idag certifierade enligt PEFC och/eller FSC (PEFC 2017; FSC 2020). Båda dessa certifieringsorgan kräver åtgärder som hanterar uppkomsten och rapporteringen av

körskador. Skogsägare och skogsbrukare certifierade enligt dessa standarder är därmed skyldiga att arbeta för att motverka uppkomst av körskador. Dessutom har Skogsindustrierna sedan 2013 en utarbetad policy kallad ”Branschgemensam miljöpolicy” som speciellt behandlar körskador och innehåller både definitioner av körskador samt metoder för att undvika dem (Skogsindustrierna 2013).

1.2.1. Påverkan på ekologi

Körskador, samt spårbildning överlag, riskerar att påverka omkringliggande miljö, inte minst genom att avrinningen från skogsmark till vattendragen ökar markant vid avverkning (Laudon et al. 2011). Avrinningen kan i sin tur få flera olika effekter på vattnet på både kemisk sammansättning på lång sikt och en direkt påverkan på miljön och därmed habitat för flertalet arter.

1.2.2. Kväveutlakning

Kväveutlakning är ett stort problem i Sverige, kopplat till markpåverkan och däribland skogsåtgärder av olika slag (Kronnäs et al. 2012). I och med att avrinningen och slamtransport till vattendrag riskerar att öka vid körskador så ökar också risken för kväveutlakning. Kväveutlakning bidrar till både övergödning och problem som exempelvis algbloomning och försurning riskerar att öka med ökad kvävekoncentration i sjöar, vattendrag och hav (Laudon et al. 2011; Kuglerová et al. 2021).

1.2.3. Sedimentation

Sedimentation innebär att fint, ofta organiskt, material frigörs och via ytvatten transporteras till nedströms liggande vattendrag (Cotel et al. 2020). När sediment når vattendrag och där lägger sig på botten riskerar det att ändra habitat för flera vattenlevande organismer, exempelvis fisk och musslor (Conallin 2004). Fisk som reproducerar sig i strömmande vattendrag förlorar då sina viktiga lekplatser och påverkade vattendrag kan helt tappa sin förmåga att fungera som reproduktionsplats. Sedimentation kan även bidra till så kallad ”brunifiering” som försämrar siktdjup och kan påverka livsmiljön för levande organismer (Hansson 2019).

1.2.4. Kvicksilver

Skogsmarken i Sverige är sedan länge i stor grad förorenad av bland annat kvicksilver med ursprung i industriell tillverkning, både inom Sverige samt från utländska källor, som transporterats hit luftburet (Panagos et al. 2021). Kvicksilver kan vid syrefattiga förhållanden och gynnsamma temperaturer, genom metylering, ombildas till metylkvicksilver som är den typ av kvicksilver som orsakar störst

problem. Dels binder metylkvicksilver hårt till organiskt material, vilket gör att det lätt transporteras vidare, dels är metylkvicksilver mycket giftigt för både djur och människor (Drott & Lomander 2020).

Körskador kan bidra till både ökad mängd metylkvicksilver samt spridning till omkringliggande vattendrag. Studier visar att körspår och körskador kan skapa de miljöer där metylering sker och därmed öka bildningen av metylkvicksilver (Braaten & de Wit 2016; Nasr & Arp 2018). Detta sker genom att vatten ansamlas i körspår och körskador och om marken blir nog vattenmättad bildas en syrefri miljö där metylering initieras. Vid en slutavverkning höjs dessutom grundvattennivån på grund av att träden inte längre dränerar marken och därmed ökar effekten än mer. Dessutom kan körskador bidra till att transporten av metylkvicksilver till omkringliggande miljöer, som sjöar och vattendrag, ökar. Detta sker genom att metylkvicksilver binder hårt till organiskt material och körskador frigör ofta stora mängder organiskt material (Drott & Lomander 2020). Genom en ökande avrinning, via både körskador och körspår, transporteras organiskt material med metylkvicksilver vidare till sjöar och vattendrag.

En effekt av detta är att fisk från Sveriges insjöar kan innehålla förhöjda halter kvicksilver och kan därför påverka vår hälsa vid konsumtion av vissa fiskarter, speciellt predatorer som gädda (Wu et al. 2018). Problemet med kvicksilver i sjöar och vattendrag tydliggörs genom att Björnberg et al. (2005) i sin studie visar hur koncentrationen kvicksilver i blodet hos kvinnor ökar med konsumtion av fisk från insjöar. Kvicksilver är giftigt för alla levande organismer och kan orsaka allvarliga skador på exempelvis förmågan att fortplanta sig.

1.2.5. Markkompaktering och rotskador

Körskador kan även påverka ekonomin i framtida bestånd negativt. Kompaktering av marken kan försämra framtida tillväxt negativt genom att påverka tillgången på både vatten och syre för rötterna (Eliasson & Wästerlund 2007). Jorden som påverkas av markkompakteringen blir också svårare att tränga igenom för rötterna och därmed påverkas också rotsystemets utbredning (Cambi et al. 2015a). Dessutom kan mykorrhiza påverkas negativt av markkompaktering vilket, på sikt, kan leda till försämrad tillväxt (Hansson 2019).

Skador på rötter riskerar att öka angreppen av skadegörare på kvarvarande bestånd vid gallring, exempelvis rotröta (Stenlid 2005; Wang 2012). Rotröta är ett stort problem som orsakar stora ekonomiska förluster genom kvalitetsnedsättning och tillväxtförlust hos drabbade bestånd och står för en av de största ekonomiska förlusterna i svenskt skogsbruk (Björkman & Stenlid 2013).

1.3. Körskadors påverkan på sociala värden

Körskador anses också påverka de sociala värden som skogen bidrar med, exempelvis genom att både begränsa framkomligheten i skogen samt att påverka intrycket hos allmänheten som vistas i skogen (Berg et al. 2010). Studier visar också att en stor del av den kritik som framförs mot intensivt skogsbruk grundas i användandet av maskiner som kan orsaka körskador (Jakobsson et al. 2021).

1.4. Körskadors ekonomiska konsekvenser

Bortsett från de indirekta ekonomiska kostnader som nämns ovan gällande trädens tillväxtbortfall, kan körskador också påverka drivningsekonomin mer direkt. Detta kan ske dels genom en ökad bränsleförbrukning och dels genom att körskador kan kräva återställningsarbete med hjälp av grävmaskiner (Berg et al. 2010; Brunberg 2010; Ghaffariyan et al. 2018). Skogsbruket är redan hårt ansatt av ökande kostnader som gör att nettoresultatet påverkas och att addera fler åtgärder som inte ger någon inkomst, exempelvis återställning av körskador, skulle sänka lönsamheten ännu mer.

1.5. Traktplanering

Inför en avverkning sker planering av hur drivningen ska utföras, och kvaliteten på planeringen har sedan stor betydelse för utfallet av avverkningen (Laschi et al. 2016). Planeringen syftar till att drivningen av trakten ska ske på ett sådant sätt att både hänsyn till mark och vatten säkerställs, samt att drivningen sker så arbetseffektivt som möjligt. Planeringen innefattar dels att beskriva den aktuella traktens förutsättningar i form av beståndsegenskaper, dels att genom beskrivningar och märkning i fält (oftast i form av snitslar) underlätta drivningen genom att ge förslag på lämpliga körstråk och påvisa tekniska hinder (Hänninen 2021, Laschi et al. 2016). Den praktiska planeringen inleds vanligtvis med att man med hjälp av kartor och data, insamlade genom inventering och fjärranalys, avgränsar och beskriver trakten så långt som möjligt (Lindroos et al. 2014). Därefter sker planeringen i fält där traktgränser, olika former av hänsynsytor samt skogens tillstånd fastställs och korrigeras. Här sker också en utsyning av lämpliga basvägar och basstråk att köra på. Valet av basvägar och basstråk görs utifrån traktens förutsättningar och baseras på kraven att virket ska komma fram så kostnadseffektivt som möjligt, men också på ett för marken skonsamt sätt (Laschi et al. 2016). Här har markfuktighetskartorna en viktig del i att digitalisera och underlätta fältplanerarens arbete (Friberg & Bergkvist 2016; Hoffmann et al. 2022). Markfuktighetskartor tillför viktig information som kan ligga till grund för valet av

basstråk och basväg. Med markfuktighetskartor som grund öppnas också möjligheten att bygga fullständiga beslutsstöd som tar fram förslag på lämpliga körstråk, ett verktyg som sedan länge haft en efterfrågan (Sonesson et al. 2012). Basväg och basstråk kommer härnäst gemensamt hänvisas till som körstråk.

1.6. Timbertrail

Timbertrail är ett optimeringsverktyg och beslutsstödsystem i planeringen av basvägar och basstråkutvecklat av Creative optimization. Timbertrails syfte är att minimera körskador och effektivisera drivning (Flisberg et al. 2020). Skogforsk har under flera år utvecklat ett forskningsverktyg, Bestway. Bestway utvecklades med utgångspunkt i två olika projekt på Skogforsk som hanterade dels körskador och ruttoptimering. Timbertrail har utvecklats på samma idéer som Bestway, men anpassats mer för ett kommersialiserat bruk samt integrering i andra system (Hoffman 2022).

Timbertrail tar hänsyn till både den totala körda sträckan och markförhållandena, för att skapa den bästa dragningen av basväg och basstråk ur drivningssynpunkt. Fokus ligger på att hitta en så kort körsträcka som möjligt, i kombination med att minimera risken för körskador. Timbertrail använder flera olika källor för bakgrundsdata till att optimera basväg/basstråk. För att kunna optimera utifrån risk till körskador används markfuktighetskartor. Användaren av verktyget kan i nuläget välja mellan att använda Nationella marktäckedata, NMD, eller SLU Markfuktighetskarta. I övrigt används även bakgrundsdata för lutning samt volymsfördelning av stående skog, för att optimera en så effektiv terrängtransport som möjligt. Utöver ovan nämnda data läggs den aktuella traktens förutsättningar in i modellen, i form av traktgräns, avlägg, hänsynsytor, eventuella tvingande passager osv. Data kan antingen importeras i formatet .shp, eller manuellt ritas in av användaren.

Modellen är kostnadsstyrd, vilket innebär att förslaget av basväg och basstråk tas fram genom att den bästa vägen är den som ger lägst kostnad och exempelvis fuktiga områden eller områden med kraftig lutning genererar en högre kostnad (Flisberg et al. 2020). Viktningen av de olika kostnaderna kan, i fasta intervall, ställas in av användaren efter önskemål om vilken/vilka av faktorerna förslaget ska undvika eller ignorera. Ett exempel på hur detta kan användas är om det vid avverkningstillfället är ovanligt blött i terrängen, då kan användaren välja att höja känsligheten för markfuktighet, i motsats kan användaren vid frusen mark sänka känsligheten för markfuktighet.

1.7. Syfte

Syftet med studien var att på barmark jämföra förslag på körstråk från Timbertrail med använda körstråk från avverkade trakter för att analysera nyttan med ett digitalt planeringsverktyg i syfte att minska risken för körskador. Jämförelsen innefattade både risken för körskador och längden på körstråken. Ett delmål var att ta fram ett index, körstråksindex, som fick representera risken för körskador.

2. Material och metod

Studiens arbetsgång syftade till att kunna jämföra körstråk från redan avverkade trakter med förslag på körstråk från Timbertrail. Resultatet från analysen ska sedan kunna visa om Timbertrail kan hjälpa till att minska risken för körskador genom att förlägga körstråk till mark där risken för körskador är lägre. Detta analyseras genom att samla in och fastslå körstråk från redan avverkade trakter, ta fram förslag på körstråk för samma trakter från Timbertrail och sedan analysera dessa i en GIS-analys. I GIS-analysen används data med markfuktighet för att representera risken för körskador på de avverkningstrakter som analyserades. Risken för körskador i de olika körstråken kunde sedan analyseras genom att identifiera i vilken markfuktighet körstråket dragits. Datasetet med markfuktighet återges med numeriska värden och körstråken kunde därför jämföras kvantitativt relativt varandra och testas genom statistisk analys.

2.1. Data och datainsamling

Datat över trakter och genomförd drivning tillhandahölls av Stora Enso Skog, och bestod av GPS-baserade positionsloggar. Positionsloggarna visar maskinernas körning för skotare och skördare från tidigare avverkade trakter samt data om traktens förutsättningar så som traktgräns, hänsynytor, avlägg mm. Trakterna som skulle analyseras togs fram genom slumpning för att underlaget skulle vara så representativt som möjligt. Dataunderlaget uppgick till 30st trakter avverkade under år 2021. Av dessa trakter kom 15st från gallringar och 15st från slutavverkningar (tabell 1). Trakterna hade i vissa fall drivits med basväg och i vissa fall ligger trakten vid vägkant.

De trakter som ingick i analysen kan ses i tabell 1. Trakterna är drivna av fem olika avverkningslag, med stationeringsorterna: Nås, Svartnäs, Älvdalen, Leksand, Fredriksberg och Tärnsjö.

Tabell 1 De trakter som ingick i analysen, samt deras förutsättningar. Sa = Slutavverkning och Ga = Gallring. "Fastställande av körstråk" visar vilken teknik som användes för att fastställa hur redan utfört körstråk dragits, GIS = GIS-analys, UAV = drönare, GPS = GPS-spårning. Jordart: G = grov, M = medel och F = fin.

Table 1 The harvesting areas that were included in the analysis and their conditions. Sa = Final felling and Ga = thinning. "Fastställande av körstråk" shows the method that was used to determine the trails that has been used at the harvesting, GIS = GIS-analysis, UAV = drone, GPS = GPS-tracking. Jordart: G = coarse-grained, M = middle-grained and F = fine-grained.

Drivningsåtgärd	Bestånds.nr	Areal (ha)	Basväg	Fastställande av körstråk	Höjdvariation (m)	Jordart
Slutavverkning	1	2,78	Nej	GIS	4,27	G
	2	8,96	Ja	GIS	3,89	M
	3	4,73	Ja	GIS	4,91	F
	4	1,67	Nej	GIS	7,93	M
	5	1,20	Ja	UAV	3,22	F
	6	8,54	Nej	GPS	1,93	M
	7	2,63	Ja	GIS	6,12	M
	8	4,95	Nej	GIS	3,11	M
	9	5,99	Nej	UAV	1,26	M
	10	6,54	Ja	GIS	0,78	M
	11	10,61	Ja	GPS	0,84	F
	12	4,45	Ja	UAV	4,90	M
	13	3,24	Nej	GIS	3,09	M
	14	10,18	Nej	GIS	3,10	F
	15	5,93	Nej	GIS	3,62	M
Gallring	1	14,45	Nej	UAV	4,29	M
	2	8,72	Ja	UAV	1,00	G
	3	18,74	Ja	UAV	5,55	M
	4	26,12	Nej	UAV	2,41	F
	5	18,03	Ja	GIS	2,18	M
	6	6,80	Ja	GIS	3,87	M
	7	19,52	Ja	GIS	2,00	M
	8	1,22	Nej	GIS	2,94	G
	9	13,82	Ja	UAV	3,56	M
	10	0,47	Ja	GIS	5,07	M
	11	24,40	Ja	GIS	2,91	M
	12	5,56	Nej	UAV	3,55	G
	13	14,40	Nej	UAV	2,43	M
	14	4,41	Ja	UAV	3,62	F
	15	16,40	Nej	GIS	1,74	M

Efter slumpningen gjordes ett urval där vissa trakter uteslöts. Trakterna som slumpats fram har alla avverkats under barmarksperioden år 2021.

Urvalet grundades på att trakter som bedömts lämpliga att driva under vinter kan ha drivits under förhållanden med tjäle i marken, vilket kan påverka dragningen av körstråk och därmed inte kan anses ge en rättvis analys. Dessutom användes SMHIs historiska data för att utesluta trakter som drivits under avvikande förhållanden, exempelvis torka eller kraftig nederbörd. I detta fall sattes gränsen för nederbörd till 40 mm/dygn för något av de fem senaste dygnet och gränsen för torka sattes till 14 dagar utan nederbörd baserat på SMHIs definitioner av extrem nederbörd och torrperioder (SMHI 2022). Nedan listas ett antal anledningar till att vissa trakter, eller delar av trakter, uteslöts. I de fall hela trakter uteslöts slumpades nya fram.

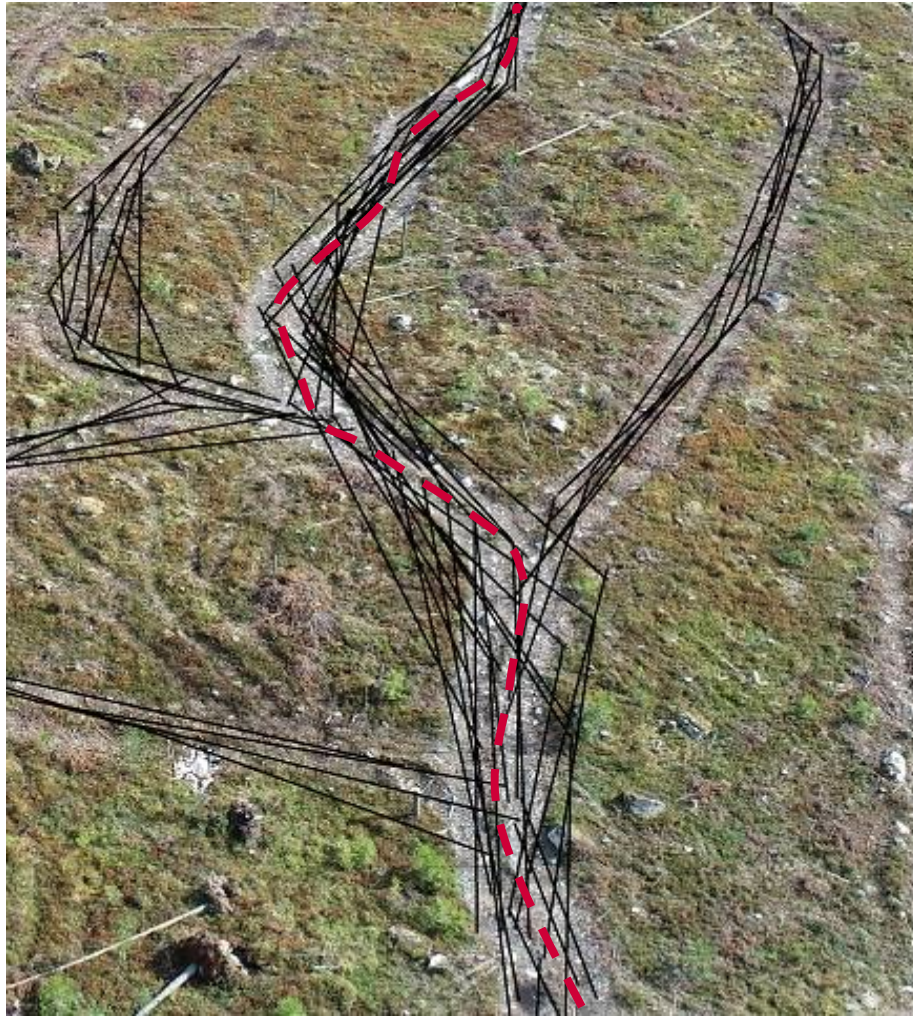
- Drivningen hade inte skett med ett tydligt basstråk. Detta var fallet på, framför allt, väldigt små trakter.
- Positionsloggarna från maskinerna var inte fullständiga. Detta kan bero på både tekniska problem, dålig uppkoppling vid trakten, samt den mänskliga faktorn då positionsloggarna kräver manuell handläggning för att registreras.
- Väldigt avvikande traktförhållanden kunde också innebära att trakten uteslöts. Som exempel kunde körstråket ha dragits med en relativt stor omväg på grund av ägarförhållanden.

2.1.1. Fastställande av faktiskt körda körstråk

Positionsloggarna utgjordes av GPS-punkter från skördaren och skotaren som hade utfört drivningen på den aktuella trakten. Positionsloggarna skapas genom att maskinernas position med jämna mellanrum registreras och mellan dessa positioner skapas linjer som återger körstråket som maskinen kört. Det faktum att positionerna inte registreras kontinuerligt utan med fasta tidsintervall påverkar hur väl linjerna sammanfaller med det faktiska körstråket som körts vid avverkningen. Faktorer som påverkar är exempelvis den hastighet som maskinen kört med, tidsintervallet mellan registreringarna samt hur mycket körstråket slingrar sig. Utöver dessa faktorer påverkas även GPS-enhetens noggrannhet av omgivande träd (Murgaš et al. 2018). Detta sammantaget gör att stråk där maskinen kört flera gånger i samma spår ändå inte alltid sammanföll med varandra i positionsloggarna (figur 2). På grund av ovanstående osäkerheter behövde körstråken fastställas innan analyserna kunde påbörjas. Detta skedde företrädesvis genom GIS-analys i programvaran QGIS version 3.16.10 med tillägget GRASS 7. Fastställandet i QGIS skedde genom följande procedur:

1. Shape-filen som innehöll linjerna från positionsloggarna konverterades från ett vektorlager till raster, sk. "Rasterisering".
2. Linjerna konverteras då till pixlar, som får ett värde utifrån hur ofta en linje (enskilt körstråk) tangerar den enskilda pixeln.
3. Genom att anpassa panoreringen till att endast visa pixlar över ett visst tröskelvärde kunde en linje tas fram där skotaren passerat flest gånger. Tröskelvärdet måste anpassas individuellt för varje trakt, eftersom det är direkt beroende av traktens storlek, utformning och virkesvolym.

Ovanstående metodik räckte i många fall för att fastställa ett körstråk som kunde användas i analysen. I de fall ovanstående metodik inte var tillräcklig utfördes även fältinventering av körstråk för att fastställa de oklarheter som fortfarande förelåg. De trakter som detta ansågs nödvändigt på besöktes och körstråken inventerades med drönare samt GPS-spårning med fältapplikation. Fältapplikationen har en tätare mottagning av GPS-signaler och därmed blev noggrannheten på ett sådant spår högre än positionsloggarna från maskinerna. Med hjälp av drönarbilder kunde framför allt otydliga kurvtagningar och positionsloggar som i hög grad avvek från varandra fastställas och det faktiskt utförda körstråket kunde konstateras (figur 2). Framförallt gallringar krävde ett fastställande i fält, detta bör kunna förklaras med att GPS-noggrannheten kan påverkas av stående träd (Murgaš et al. 2018). GPS-spårning med hjälp av fältapplikation utfördes i två fall där drönare inte kunde användas, detta på grund av att trakten låg i direkt närhet av vindkraftverk eller inom förbudszon för drönarflygning (Transportstyrelsen 2021).



Figur 2 Exempel på hur drönare användes för att fastställa vilka körstråk som hade använts, samt fastställa deras faktiska placering. De svarta heldragna strecken visar körstråken utifrån maskinernas positionsloggar och den röda streckade linjen visar det körstråk som kunde fastslås med hjälp fältbesök och drönarbilder. Foto: Johan Sjöberg.

Figure 2 Example of how the drone could be used to determine which trail that has been used. The black lines shows the positions that has been registered by the machine and the red dashed lines shows the trail that could be determined and used in the analysis. Photo: Johan Sjöberg

2.1.2. Framtagande av körstråksförslag med hjälp av Timbertrail

I den använda versionen av verktyget Timbertrail version 0.24.2 fanns flertalet inställningar som kunde varieras efter önskemål från användaren. De inställningar som användes i studien anges i Tabell 2.

Tabell 2 Timbertrail-inställningarna som användes för analysen.

Table 2 Timbertrail settings that has been used in the analysis.

Parameter	Indata/inställt värde
Wet area map	SLU
Tree volumes	From logging area
Tree volume factor	1.00
Slope sensitivity	Normal (max 30%)
Ground water sensitivity	Normal
Prefer roads within the logging area	Yes
Generate warning	Only high risk
Minimum troughput volume	Varierades efter traktens förutsättningar

Timbertrail kan basera de framtagna förslagen på olika markfuktighetskartor. I denna analys valdes SLU Markfuktighetskarta baserat på att studier visar på att den ger bäst återgivning av landskapet (Ågren & Lidberg 2020). Användaren av Timbertrail behöver importera vissa data för att programmet ska kunna ge förslag, exempelvis behöver traktgräns och avlägg placeras ut. Dessutom kan hänsynsytor, tvingande passager mm. Placeras ut av användaren. I denna analys importerades traktgränsen som en shape-fil och avlägget placerades på samma punkt eller punkter som vid avverkningen.

Två förslag togs fram genom Timbertrail, ett med fri utläggning av körstråk och ett där verktygets förslag tvingades till samma punkt där det redan utförda körstråket slutade. Någon funktion för detta finns inte i Timbertrail, men det löstes genom att skapa en fiktiv (mycket liten) trakt som endast täckte punkten dit verktyget skulle styras, vilket också utvecklarna av Timbertrail såg som en lämplig lösning (Rönnqvist 2021). På så vis kan de faktiskt körda körstråken och Timbertrails förslag jämföras rättvist genom att dragningen till samma specifika punkt jämförs. Timbertrails fria alternativ, när verktyget inte styrdes till någon särskild punkt, anpassades endast genom att den volym som man ville att körstråket skulle hantera anpassades efter traktens storlek och volymsuttag, enligt

tabell 2. Detta gjordes för att körstråket i så lång utsträckning som möjligt skulle kunna jämföras med det som använts vid den utförda avverkningen. I presentationen av resultaten lades dock mest fokus på det styrda förslaget från Timbertrail då den jämförelsen ansågs mest rättvis.

2.2. Analyser

Analyserna av de olika körstråken genomfördes i programvaran QGIS version 3.16.10, med tillägget GRASS 7. I QGIS importerades de redan körda körstråken från datainsamlingen, samt förslaget från Timbertrail och jämfördes relativt varandra (bilaga 1). Analysen sker sedan med SLU Markfuktighetskarta © SLU, där de olika körstråkens dragning inom olika markfuktighetsklasser analyserades.

Körstråket, både det faktiskt körda och förslaget från Timbertrail, förseddes i QGIS med en buffertzona för att efterlikna den faktiska bredden på ett körstråk. Detta gjordes genom att i verktyget *buffert* ge linjerna (körstråken) en buffert med "avstånd" 2 m för gallring och 2,5 m för slutavverkning. Skillnaden i buffertzons bredd motiverades av att slutavverkning kräver större maskiner och dessa bredder speglar verkligheten bra (Cambi et al. 2018). Buffertzoner fungerade sedan som egna polygoner som fick representera den yta som körstråken upptar och som utgör den yta där risken för körsador ska analyseras. Denna yta används sedan i verktyget *Zonal histogram* i QGIS där buffertzonen och markfuktighetsdata används som indata och resultatet som fås ut är de markfuktighetszoner som finns representerade i körstråket samt antalet rasterpunkter i varje markfuktighetszon. Resultatet togs fram i tabellform och kunde sedan importeras till Excel för vidare analyser.

Den markfuktighetsdata som valdes för analysen var SLU Markfuktighetskarta. SLU Markfuktighetskarta har tagits fram genom att använda en stor mängd indata och genom att träna modellen på att känna igen vilka områden som normalt håller en viss fuktighet baserat på en stor mängd fältinventeringar (Ågren & Lidberg 2020). SLU Markfuktighetskarta anses ge den bästa återgivningen av de verkliga markförhållanden relativt andra markfuktighetskartor (Ågren & Lidberg 2020). Markfuktighetskartan hade en upplösning om 2×2 m, vilket innebär att det inom varje rastercell om 2×2 m var samma markfuktighetsvärde.

2.2.1. Viktning av markfuktighet i körstråken

Inom det praktiska skogsbruket är det vanligt att olika markfuktighetsklasser används för att beskriva en trakts grundförhållande. Markfuktighetsklasser används bland annat vid riksskogstaxeringens fältinventeringar.

Risken för körskador ökar inte linjärt med markfuktigheten och för att kunna få med detta faktum i analysen behövde de olika markfuktighetsklasserna viktas relativt varandra (Bergkvist et al. 2014). Detta gjordes genom att först översätta SLU Markfuktighetskarta till riksskogstaxeringens markfuktighetsklasser enligt tabell 3, baserat på den färgkodning som markfuktighetskartan är uppbyggd med (Ågren & Lidberg 2020). Därefter gavs de olika markfuktigheterna en egen vikt, en *körskadefaktor*, utefter hur stor risken för körskador är inom de olika markfuktighetsklasser som användes i studien, baserat på Bergkvist et al. (2014).

För de olika körstråken viktades sträckan inom varje markfuktighetsklass med sin körskadefaktor (tabell 3) och summan av de sträckorna delades sedan på totalsträckan, se formel nedan. Värdet som togs fram kallades för "Körstråksindex" och fick representera risken för körskador i ett enskilt körstråk.

Formeln för viktningen:

$$KI = \frac{\sum_1^J (X_j \times Y_j)}{\sum_1^J X_j}$$

Där:

KI = Körstråksindex

X_j = Körstråkets längd (m) i fuktighetsklass j

Y_j = Viktningsfaktor för fuktighetsklass j

Viktningen skedde på de data som fåtts fram från analysen i QGIS och sammanställningen skedde i Excel.

Tabell 3 De olika markfuktighetsklasser representerades samt hur de viktades (baserat på Bergkvist et al. 2014).

Table 3 The different soil moisture-classes that was used during the analysis (based on Bergkvist et al. 2014).

Fuktighetsklass	SLU	Körskadefaktor
Markfuktighetsindex		
Blöt	91-100	3
Frisk/Fuktig-Fuktig	41-90	1,6
Frisk	11-40	1,1
Torr	0-10	1

2.2.2. Traktegenskaper

Då höjdvariation är en avgörande faktor i framtagandet av SLU Markfuktighetskarta analyserades hur höjdvariation inom en trakt påverkar Timbertrails potential att undvika körskador. Analysen genomfördes genom att först ta fram standardavvikelsen för höjd (i meter över havet) inom traktens yttergränser. Höjddatat som användes var GSD-Höjddata, grid 2+, vilket innebär att datat har en upplösning om 2x2 m där varje pixel har ett värde i form av höjd över havet (m). I verktyget *Zonal statistics* användes traktens yttergränser som zon och höjddatat som raster (indata) och då kunde standardavvikelsen tas fram. Standardavvikelsen fick således representera höjdvariationen på den aktuella trakten. För att undersöka hur detta kunde påverka Timbertrails potential att minska körskadorna gjordes en regressionsanalys med skillnaden i körstråksindex som beroende variabel och höjdvariationen som oberoende variabel.

Jordarten har också påverkan på risken för körskador (Drott och Lomander, 2020) På Stora Ensos beståndsindelning finns jordart angiven, baserat på en bedömning av traktplaneraren när traktens planerades i fält och i de fall det saknades kompletterades detta vid fältbesök. Partikelstorleken anges som finkornig, medelkornig eller grovkornig. De olika trakterna kunde således delas upp i tre olika kategorier i en boxplot där Y-axeln visade förändringen i körstråksindex och de tre kategorierna återfanns på X-axeln.

Tabell 4 De data som användes för de olika analyserna i QGIS.

Table 4 The data which was used during the analysis in Qgis.

Typ av data	Namn på data	Leverantör
Markfuktighet	SLU Markfuktighetskarta	© SLU
Höjd	GSD-Höjddata, grid 2+	© Lantmäteriet
Vägnät	GSD-Vägdata	© Lantmäteriet

2.2.3. Statistisk analys

Skillnaden i körstråksindex mellan utförda körstråk och de olika alternativen från Timbertrail testades genom statistisk analys, med hjälp av Wilcoxon signed rank-test. Metoden valdes då den lämpar sig för jämförelse av två populationers medelvärden, där observationerna är parvis kopplade till varandra och där en normalfördelning inte kan uppnås. Nollhypotesen sattes i alla olika analyser till att ingen skillnad skulle förekomma mellan Timbertrails förslag och det redan utförda körstråket, medan alternativhypotesen sattes till det motsatta. Vid den statistiska analysen användes programvaran Minitab.

De traktförutsättningar som ingick i studien angående påverkan på potentialen analyserades genom regressions-analys, samt genom boxplots. Det gjordes för att på ett visuellt sätt kunna fastställa eller avslå samband mellan, exempelvis, traktens höjdvariation och potentialen hos Timbertrail kontra körda basstråk och basvägar. Den kritiska signifikansnivån sattes till 5%.

2.2.4. Känslighetsanalys

I Timbertrail fanns möjligheten att justera känsligheten för fuktig mark. Denna inställning testades genom att 10 slumpvis utvalda trakter, 5st gallring och 5st slutavverkning, kördes med känslighet ”strong” för fuktig mark. Detta gjordes för att testa om det är praktiskt möjligt att efterlikna ett scenario där verktyget används för att ge olika förslag på körstråk baserat på rådande väderlek. Om avverkningen föregås av blött väder kan en hög känslighet användas och vid torr väderlek en låg känslighet. På så vis antas en önskad anpassning av längden på körstråket kunna tillämpas, där en kortare och därmed effektivare terrängtransport kan tillämpas när förhållandena tillåter detta.



3. Resultat

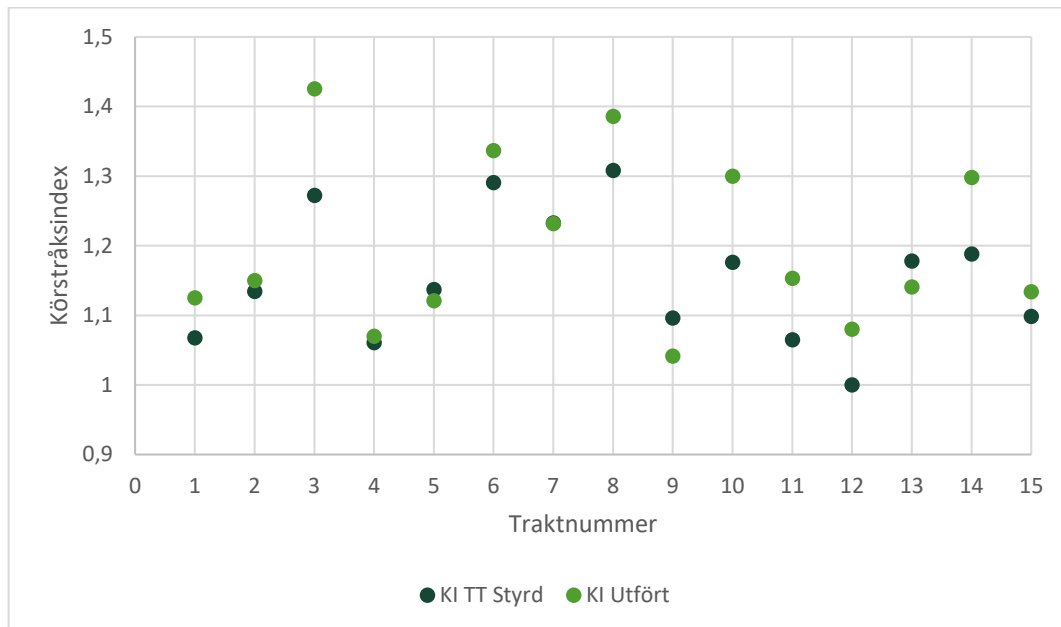
3.1. Jämförelse av körstråksindex för Timbertrails styrda förslag och faktiskt utförda körstråk

För gallring visade den statistiska analysen på en signifikant skillnad i körstråksindex mellan Timbertrails styrda förslag och de faktiskt körda ($P=0,018$). Timbertrail ger ett förslag med lägre körstråksindex på 11 av de 15 trakterna, tabell 5 och figur 4. Den största skillnaden uppnåddes i trakt nr 3, där skillnaden var -0,15 enheter. I genomsnitt så resulterade Timbertrail i ett något lägre (0,05) körstråksindex jämfört med den faktiska körningen i gallring.

Tabell 5 Resultat från jämförelse av körstråksindex för utförda körstråk och de körstråk föreslagna av Timbertrail för gallringar.

Table 5 Results from the comparison of "körstråksindex" at the already used machine-trails and those suggested by Timbertrail, thinnings.

Trakt	Körstråksindex		Skillnad
	Utfört	TT styrt	
1	1,13	1,07	-0,06
2	1,15	1,13	-0,02
3	1,43	1,27	-0,15
4	1,07	1,06	-0,01
5	1,12	1,14	0,02
6	1,34	1,29	-0,05
7	1,23	1,23	0,00
8	1,39	1,31	-0,08
9	1,04	1,10	0,05
10	1,30	1,18	-0,12
11	1,15	1,06	-0,09
12	1,08	1,00	-0,08
13	1,14	1,18	0,04
14	1,30	1,19	-0,11
15	1,13	1,10	-0,04
Medel	1,20	1,15	-0,05



Figur 3 Visualisering av skillnaden i körstråksindex (KI) för Timbertrails styrda förslag och faktiskt utförda körstrån i de 15 gallringsbestånden.

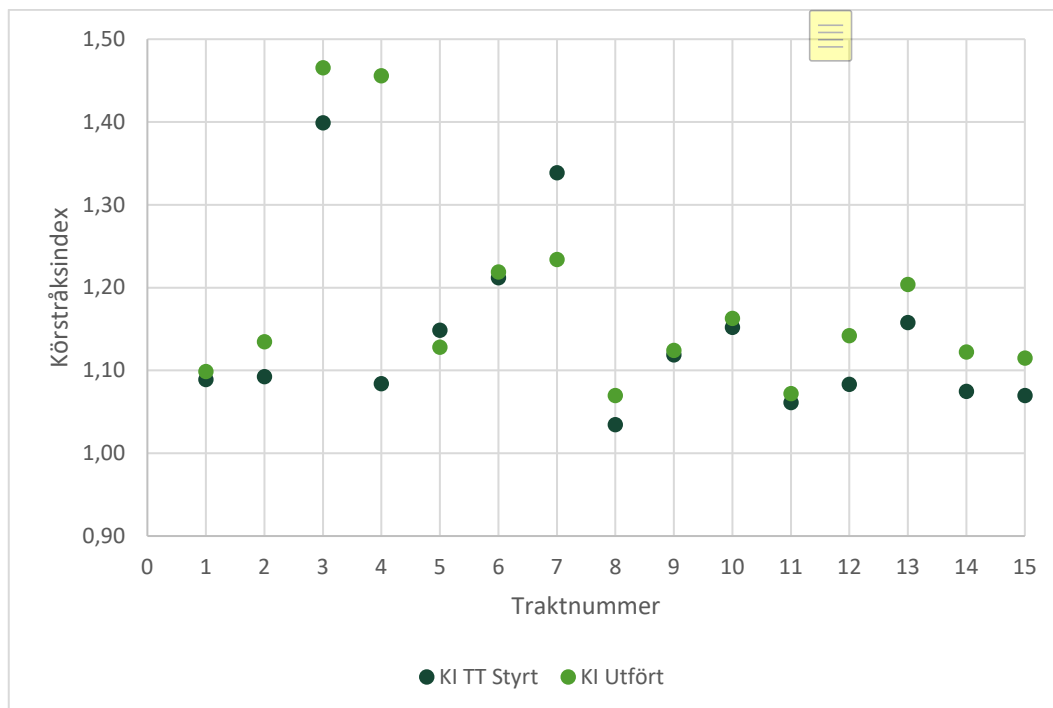
***Figure 3** Visualization of the difference in körstråksindex (KI) between those trails suggested by Timbertrail and those already used in the 15 thinning areas.*

I slutavverkning kunde också en statistisk signifikant skillnad uppnås ($P=0,035$). Här ger Timbertrails förslag ett lägre körstråksindex i 13 av de 15 trakterna, tabell 6 och figur 5. Den största skillnaden uppnåddes på trakt 4 med en minskning om 0,37 enheter. I genomsnitt var skillnaden dock lägre än för gallring (0,04 enheter).

Tabell 6 Resultat över jämförelse mellan utförda körstråk och basvägar och basstråk föreslagna av Timbertrail för slutavverkningar.

Table 6 Results from the comparison of "körstråksindex" at the already used machine-trails and those suggested by Timbertrail, final felling.

Trakt	Körstråksindex		
	Utfört	TT styrt	Skillnad
1	1,10	1,09	-0,01
2	1,13	1,09	-0,04
3	1,47	1,40	-0,07
4	1,46	1,08	-0,37
5	1,13	1,15	0,02
6	1,22	1,21	-0,01
7	1,23	1,34	0,10
8	1,07	1,03	-0,04
9	1,12	1,12	-0,01
10	1,16	1,15	-0,01
11	1,07	1,06	-0,01
12	1,14	1,08	-0,06
13	1,20	1,16	-0,05
14	1,12	1,07	-0,05
15	1,11	1,07	-0,05
Medel	1,18	1,14	-0,04



Figur 4 Visualisering av skillnaden i körstråksindex för Timbertrails styrda förslag och faktiskt utförda körstråk i de 15 slutavverkningsbestånden.

Figure 4 Visualization of the difference in körstråksindex between those trails suggested by Timbertrail and those already used in the 15 final felling areas.

3.1.1. Längd på körstråk samt längd inom kritisk markfuktighet

När längden för de olika körstråken, faktiskt utförda och Timbertrails styrda förslag, jämfördes med varandra i gallring resulterade Timbertrail i genomsnitt i körstråk som var 1% (2,9 m) längre totalt sett, men med 28% (40,5m) kortare sträcka inom markfuktighetsklass *frisk/fuktig-blöt* (Tabell 7).

Tabell 7 Tabell över längden för de utförda körstråken samt Timbertrails styrda förslag. Dessutom längd inom de markfuktighetsklasser som ansågs som kritiska ur körskadesynpunkt, Frisk/fuktig, Fuktig-blöt, här gallring.

Table 7 Table with length for the already used machine trails and those suggested by Timbertrail. also the length in the soil moisture that were considered as critical considering rutting, frisk/fuktig-blöt, thinning.

Trakt	Längd (m)			Längd inom frisk/fuktig-blöt (m)		
	Utfört	TT styrt	Skillnad	Utfört	TT Styrt	Skillnad
1	454,7	511,4	56,7	53,1	37,5	-15,6
2	417,3	410,6	-6,7	71,5	43,4	-28,1
3	443,9	478,8	34,9	272,8	152,0	-120,8
4	496,5	510,4	13,9	24,4	23,6	-0,8
5	654,5	597,4	-57,1	101,6	110,6	8,9
6	313,3	306,9	-6,4	127,2	129,5	2,3
7	585,2	579,4	-5,8	180,9	179,7	-1,1
8	454,4	475,8	21,4	259,7	201,7	-58,0
9	592,0	618,6	26,6	59,8	53,4	-6,4
10	79,5	71,4	-8,2	37,7	19,5	-18,1
11	904,0	933,2	29,3	157,9	35,6	-122,3
12	184,2	229,1	45,0	0,0	0,0	0,0
13	801,3	768,1	-33,2	107,6	159,8	52,2
14	1271,2	1222,6	-48,6	572,8	304,8	-268,0
15	574,1	555,2	-18,9	88,9	56,7	-32,2
Medel	548,4	551,3	2,9	141,1	100,5	-40,5

I tre av de 15 slutavverkningsbestånden (tabell 8), trakterna 5, 7 och 9, resulterade förslaget från Timbertrail i längre körstråkssträcka i den kritiska markfuktighetsklassen (tabell 8). I de övriga 12 bestånden gavs förslag med kortare sträcka i de kritiska markfuktighetsklasserna. I genomsnitt ökade, för slutavverkning, körstråkslängden med 2% (14,1 m) och körningen inom *frisk/fuktig-blöt* markfuktighetsklass sjönk med 38,1 m i genomsnitt, vilket innebär en sänkning med 27,5%.

Tabell 8 Tabell över längden för de utförda körstråken samt Timbertrails styrda förslag. Dessutom längd inom de markfuktighetsklasser som ansågs som kritiska ur körskadesynpunkt, fuktig-blöt, här slutavverkning.

Table 8 Table with length for the already used machine trails and those suggested by Timbertrail. also the length in the soil moisture that were considered as critical considering rutting, frisk/fuktig-blöt,, final felling.

Trakt	Längd (m)			Längd inom frisk/fuktig-blöt (m)		
	Utfört	TT styrt	Skillnad	Utfört	TT Styrt	Skillnad
1	807,2	819,5	12,2	87,3	78,3	-9,0
2	630,1	593,0	-37,07	103,1	52,0	-51,1
3	401,6	416,9	15,3	288,9	245,9	-42,9
4	400,7	414,1	13,4	176,5	36,4	-140,0
5	694,7	650,9	-43,7	55,7	71,0	15,2
6	1242,7	1130,2	-112,4	374,9	330,2	-44,8
7	261,5	214,9	-46,6	80,4	107,9	27,5
8	790,6	1193,6	402,9	53,7	39,6	-14,2
9	498,3	503,7	5,3	74,3	75,0	0,7
10	304,3	309,0	4,7	59,3	52,2	-7,1
11	1169,2	1142,2	-27	76,8	64,1	-12,7
12	914,9	825,8	-89,1	174,7	78,7	-96,0
13	410,1	428,4	18,3	111,6	83,5	-28,1
14	630,1	625,5	-4,5	93,8	38,2	-55,6
15	1767,4	1867,4	100	262,0	148,2	-113,8
Medel	728,2	742,5	14,1	138,2	100,0	-38,1

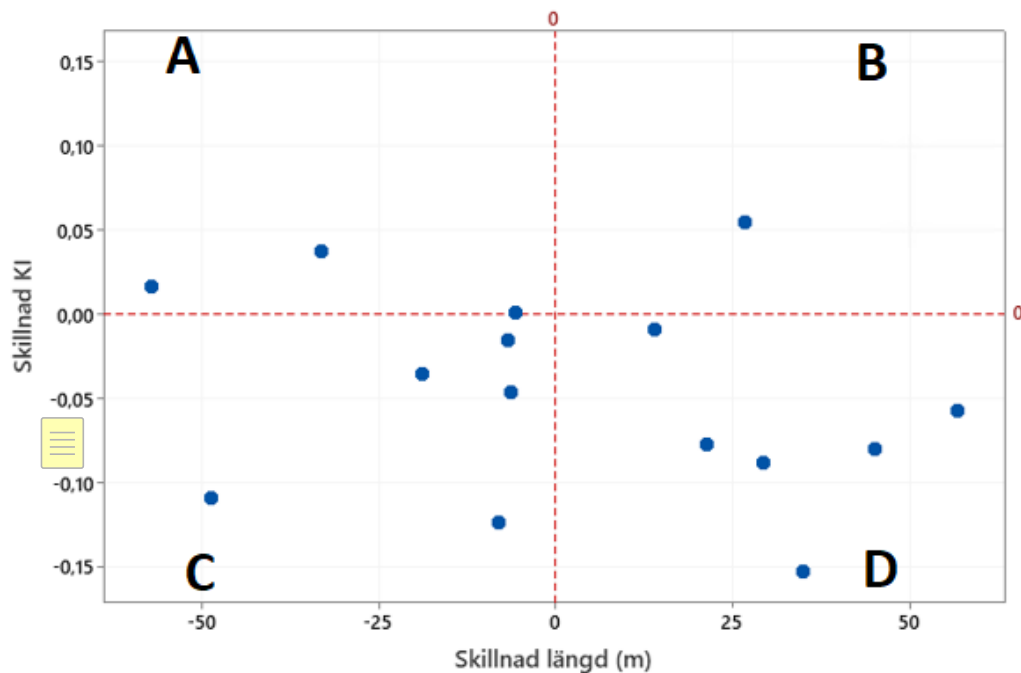
När Timbertrails fria förslag, utan någon styrning av körstråket, inkluderades i analysen gav det ett lägre körstråksindex än det styrda förslaget, som i sin tur gav ett lägre körstråksindex än det faktiskt utförda, tabell 9.

Det fanns en signifikant skillnad i körstråksindex mellan utförda körstråk och Timbertrails styrda förslag (Wilcoxon Signed rank test, $p=0,016$) samt utförda körstråk och Timbertrails fria förslag (Wilcoxon Signed rank test, $p=0,032$).

Tabell 9 Jämförelse av medelvärden för körstråksindex och längd inom kritisk markfuktighetsnivå mellan Utförda körstråk, Timbertrails styrda förslag samt Timbertrails fria förslag.

Table 9 Comparison of mean values of körstråksindex and length in the critical soil moisture between already used machine trails, the guided suggestions from Timbertrail and the free suggestions from Timbertrail.

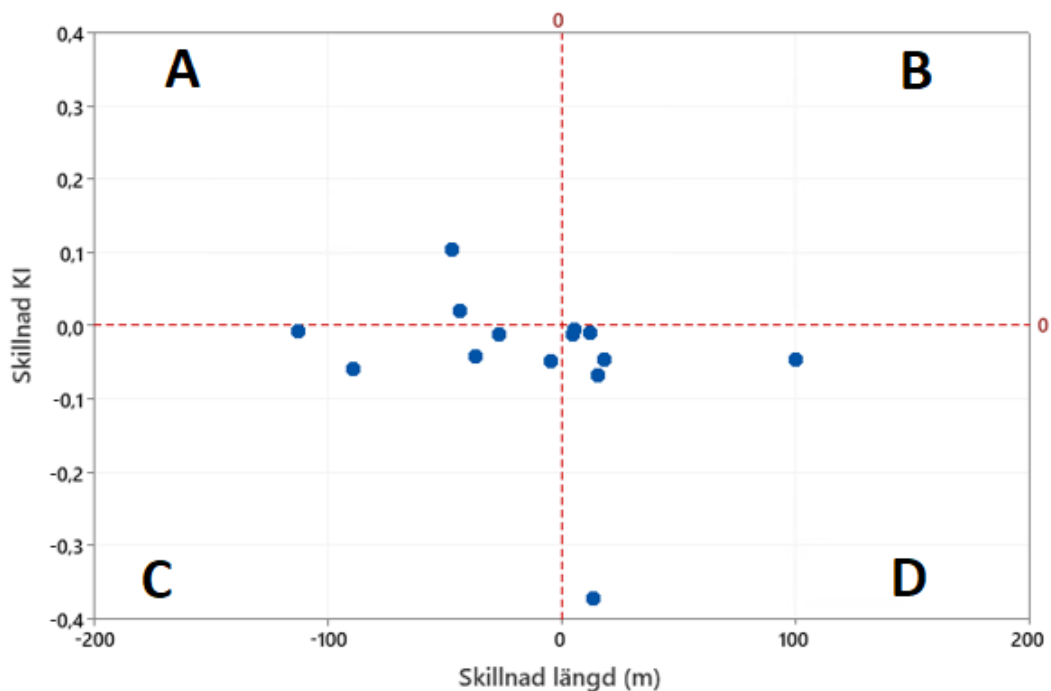
	N	Utfört körstråk	TT Styrd	TT Fri
Medelvärde	30	1,19	1,15	1,11
Körstråksindex				
Medelvärde längd inom kritisk markfuktighet (m)	30	139,5	101	88



Figur 5 Visuell jämförelse mellan faktiskt körda körstråk och Timbertrails styrda förslag för där skillnaden i både längd och körstråksindex ingår, Gallring. A = Högre risk för körsador, kortare terrängtransport. B = Högre risk för körsador, längre terrängtransport. C = Lägre risk för körsador, kortare terrängtransport. D = Lägre risk för körsador, längre terrängtransport.

Figure 5 Visual comparison between already used machine trails and those suggested by Timbertrail with the difference in both length and körstråksindex, thinning. A = Higher risk of rutting, shorter driving distance. B = Higher risk of rutting, longer driving distance. C = Lower risk of rutting, shorter driving distance. D = Lower risk of rutting, longer driving distance.

Vid en sammanvägning i en scatterplot av förändringen i längd och förändringen i körstråksindex hamnade fem trakter av gallringarna i kvadrant C, vilket innebär att de både är kortare och har ett lägre körstråksindex än de utförda körstråken (figur 5). En trakt hamnade i kvadrant B som innebär både ett högre körstråksindex samt en längre körd sträcka. Vid samma jämförelse för slutavverkning (figur 6) hamnade 4st trakter i kvadrant C. Här återfanns dock ingen trakt i kvadrant B. För både gallring och slutavverkning hamnade flest trakter i kvadrant D, som innebär ett längre körstråk, med lägre körstråksindex.

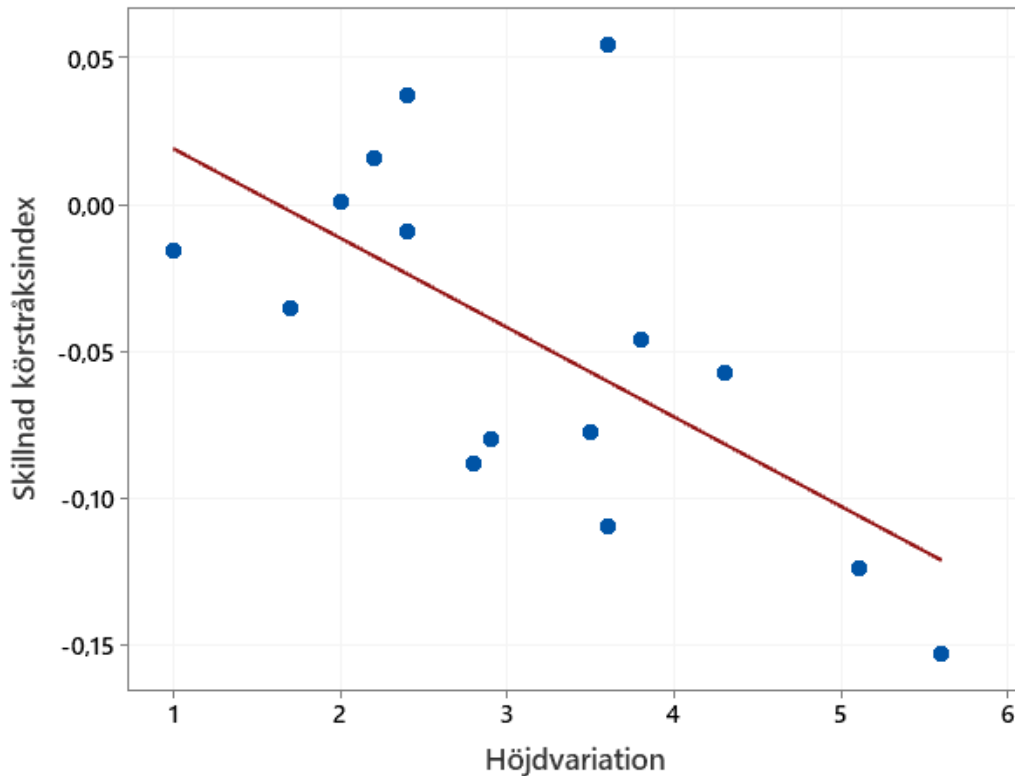


Figur 6 Visuell jämförelse mellan faktiskt körda körstråk och Timbertrails styrda förslag för där skillnaden i både längd och körstråksindex ingår, Slutavverkning. A = Högre risk för körsador, kortare terrängtransport. B = Högre risk för körsador, längre terrängtransport. C = Lägre risk för körsador, kortare terrängtransport. D = Lägre risk för körsador, längre terrängtransport.

Figure 6 Visual comparison between already used machine trails and those suggested by Timbertrail with the difference in both length and körstråksindex, final felling. A = Higher risk of rutting, shorter driving distance. B = Higher risk of rutting, longer driving distance. C = Lower risk of rutting, shorter driving distance. D = Lower risk of rutting, longer driving distance.

3.1.2. Traktens förutsättningar

Traktens höjdvariation



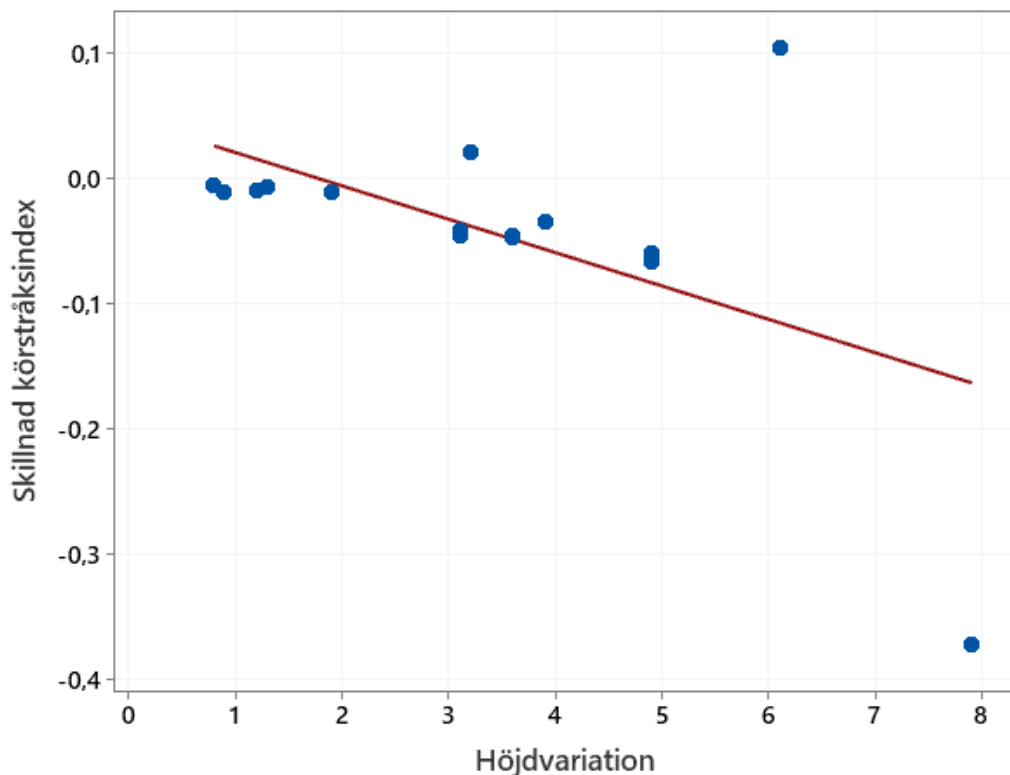
Figur 7 Regression över sambandet mellan skillnaden i körstråksindex mellan utförda körstråk och Timbertrails styrda förslag, i gallring i relation till utförda körstråk och traktens variation i höjd. Traktens höjdvariation är representerad av standardavvikelsen för traktens höjd över havet.

Figure 7 Regression that shows the connection between the difference in körstråksindex between already used machine trails and those suggested by Timbertrail in relation to the height variation in the harvesting area. The height variation is represented by the standard deviation of the height above sea level.

För gallringar visade regressionsanalysen att höjdvariationen inom trakten har en påverkan på skillnaden i körstråksindex och att sambandet är statistiskt signifikant ($p=0,010$, $R^2= 40,8\%$). Ekvationen för regressionen på gallring blev $y = 0,04969 - 0,03055x$. Minst skillnad i körstråksindex fanns för bestånd med liten höjdvariation (figur 7), Ju högre höjdvariation det var i bestånden, desto bättre

värde på körstråksindex blev det på förslagen från Timbertrail jämfört med utfört körstråk (dvs större negativ skillnad i figur 7).

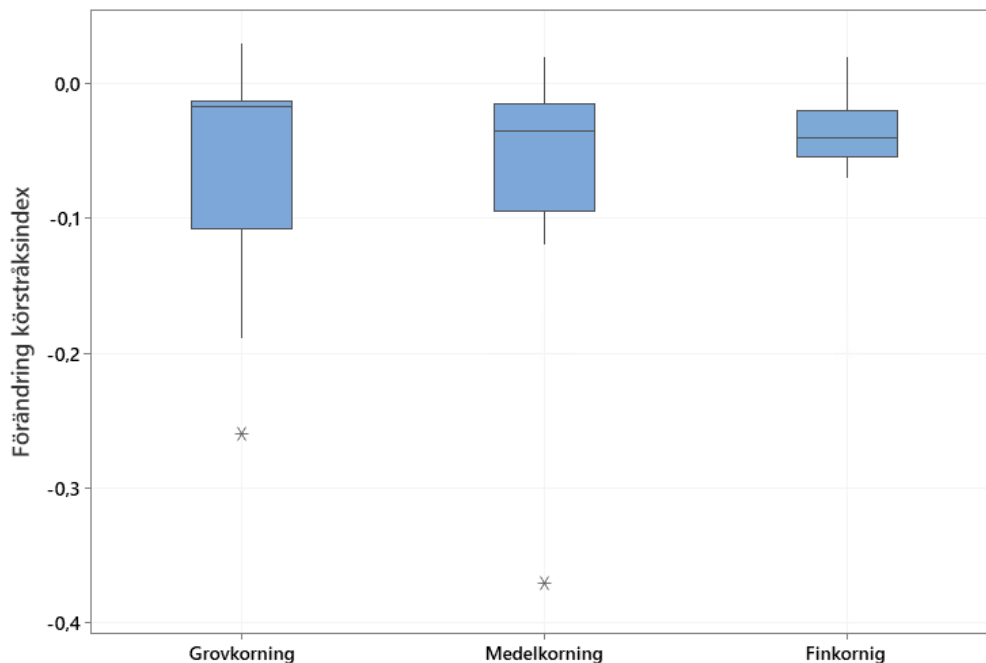
För slutavverkning (figur 8) var sambandet lägre ($p=0,039$, $R^2=28,9\%$), men också där statistiskt signifikant. Resultatet visar att 28,9% av skillnaden i körstråksindex kan förklaras av traktens höjdvariation.



Figur 8 Regression över sambandet mellan förändringen i markfuktighet, i slutavverkning i relation till utförda körstråk och traktens variation i höjd. Traktens höjdvariation är representerad av standardavvikelsen för traktens höjd över havet.

Figure 8 Regression that shows the connection between the difference in körstråksindex between already used machine trails and those suggested by Timbertrail in relation to the height variation in the harvesting area. The height variation is represented by the standard deviation of the height above sea level.

Traktens grundförhållanden



Figur 9 Boxplot som visar förändringen i körstråksindex mellan Timbertrails styrda förslag i relation till det redan utförda körstråket över de olika kornstorlekar som representerar traktens grundförhållanden, gallring samt slutavverkning. F = finkornig, G = grovkornig, M = medelkornig.

Figure 9 Boxplot that shows the change in körstråksindex between already used machine trails and those suggested by Timbertraal (guided) over the different soil grain sizes that represents the ground conditions of the harvesting area, thinning and final felling. F = fine-grained, G = coarse-grained and M = medium-grained.

I genomsnitt återfanns den största minskningen i medelvärde av körstråksindex på finkornig mark, figur 9. Den finkorniga marken visar dessutom på lägst spridning och därmed högst förutsägbarhet.

För den grovkorniga blev medelvärdet -0,02 och standardavvikelsen 0,087, för medelkorning ett medelvärde på -0,03 och standardavvikelse 0,064, för finkornig ett medelvärde på -0,04 och en standardavvikelse på 0,026.

3.2. Känslighetsanalys

Tabell 10 Körstråksindex och körlängd för de styrda körstråken vid olika inställning på Timbertrails känslighet för markfuktighet ("Normal" respektive "Strong"). Ga = gallring och Sa = slutavverkning.

Table 10 Körstråksindex and length of machine trails at different settings of soil-moisture sensitivity in Timbertrail ("Normal" or "Strong"). Ga = thinning and Sa = final felling.

Trakt	Körstråksindex			Längd (m)		
	Normal	Strong	Förändring (%)	Normal	Strong	Förändring (%)
Ga 3	1,27	1,14	-10	478,8	494,6	3
Ga 5	1,14	1,08	-5	597,4	674,2	13
Ga 8	1,31	1,05	-20	475,8	504,5	6
Ga 12	1,00	1,00	0	229,1	276,8	21
Ga 13	1,18	1,07	-9	768,1	851,3	11
Sa 1	1,09	1,03	-6	819,5	984,3	20
Sa 2	1,09	1,04	-5	593,0	607,2	2
Sa 9	1,12	1,04	-7	503,7	587,5	17
Sa 11	1,06	1,04	-2	1142,2	1191,8	4
Sa 15	1,07	1,05	-2	1867,4	1885,3	1
Medelvärde	1,13	1,05	-7	747,50	805,75	10

När Timbertrail styrdes och ställdes in på "strong" för Ground water sensitivity resulterade det i att körstråksindex minskade och längden ökade i alla de 10 analyserade trakterna (tabell 10). I genomsnitt sänktes körstråksindex med 7% och längden på körstråket ökade med 10%. De statistiska analyserna visade på signifikanta skillnader mellan inställningarnas körstråksindex ($p=0,008$) samt för längd ($p=0,005$).

4. Diskussion

4.1. Resultatdiskussion

Resultaten visar att Timbertrail, i de allra flesta fall, 11 av 15 för gallring och 13 av 15 slutavverkning, styr körstråket till terräng med lägre markfuktighet (körstråksindex) och därmed lägre risk för körskador. Medelvärde av förändringen i körstråksindex mellan det faktiskt använda körstråket och det av Timbertrail föreslagna körstråket blev för gallring -0,05 och för slutavverkning -0,04, tabell 5 och 6. Detta kan tas som ett första tecken på att Timbertrail faktiskt har potential att minska risken för körskador då torrare mark inte utgör en lika stor risk (Sonesson et al. 2012; Bergkvist et al. 2014; Laschi et al. 2016). I flera fall, fem trakter för både gallring respektive slutavverkning, ger förslagen från Timbertrail både ett kortare körstråk för att nå samma punkt, samt ett lägre körstråksindex, liknande resultat har påvisats under utvecklingen av verktyget Bestway (Flisberg et al. 2020). Samtidigt resulterar de flesta förslagen från Timbertrail i ett lägre körstråksindex, men på bekostnad av drivningsekonomi i form av ett längre körstråk. Detta bekräftar vad andra studier kommit fram till; att placeringen av körstråk är ett komplext problem med flera olika faktorer att ta hänsyn till (Hosseini et al. 2019). Andelen körning inom den, för körskador, kritiska markfuktigheten måste beaktas med bakgrund av STIG-projektets slutsatser vad gäller risken för körskador inom olika markfuktighetsklasser (Bergkvist et al. 2014), där risken för körskador blir betydligt högre när markfuktigheten går från *frisk* till *frisk/fuktig*. Just detta resultat blir därför intressant då antalet metrar inom den kritiska markfuktigheten är det som rent konkret behöver minskas för att minska risken för körskador. Att minskningen i antal metrar blir relativt hög, 40,1m respektive 38,9m, i relation till att Timbertrail endast förlänger det totala körstråket med 2,9m respektive 14,1m (tabell 7 och 8) kan ses som ett bevis på att Timbertrail verkligen optimerar relativt de körstråk som faktiskt använts, då minskningen i risk för körskador är betydligt större än ökningen i terrängtransportavstånd.

Vad gäller de trakter där Timbertrails förslag både sänker körstråksindex samt ger ett kortare körstråk behöver hänsyn tas till de tekniska hinder som Timbertrail inte kan hantera, framför allt blockighet. I dagsläget finns ingen data över blockighet som skulle kunna användas i denna typ av optimeringsverktyg, likt markfuktighetskarter, och därför ser detta ut att fortsatt vara en svaghet och osäkerhet. Det finns därför en risk att dessa trakter berörs av den typ av tekniska hinder som Timbertrail inte kan hantera, eftersom avverkningen utförts med ett längre körstråk.

Den statistiska analysen av skillnaden i körstråksindex visar på att Timbertrails förslag, även rent statistiskt, sänker medelvärdet för körstråksindex och därmed även risken för körskador.

Genom att betrakta de traktkartor som visar det utförda körstråket och förslagen från Timbertrail (bilaga 1) kan man dra vissa slutsatser. I flera fall ses att det utförda körstråket har dragits på mark som markfuktighetskartan visar som torr (Röd i markfuktighetskartan), medan Timbertrails förslag går på mark som i markfuktighetskartan framstår som fuktigare. Detta skulle kunna vara ett resultat av att Stora Ensos egna strategi för att, bland annat, undvika körskador har som mål att dra körstråk på den högsta punkten i terrängen (Hänninen, 2021). Detta, i kombination med att Timbertrail har inbyggda funktioner för att undvika lutning av en viss grad, skulle kunna leda till att det utförda körstråket dragits upp på torrare höjder, medan Timbertrail styrt om till flackare terräng där markfukten är marginellt högre. Samtidigt utgör intervallet för att exponeras som röd pixel i markfuktighetskartan (torr mark) endast 1 enhet (SLU markfuktighetsindex = 0), vilket innebär att körstråk dragna på "gul markfuktighet" i praktiken kan skilja sig från körstråket dragen på "röd markfuktighet" med endast en enhet (Ågren & Lidberg 2020).

En intressant del av resultatet är den påverkan som lutning har på Timbertrails förslag. Inställningen för Timbertrail gällande lutning var under analyserna satt till läge "Normal", vilket innebär att lutningar brantare än 30% undviks. Detta får till följd, både på gallringar och slutavverkningar, att Timbertrail ger ett förslag på vissa av trakterna som avviker kraftigt från det utförda körstråket för att undvika just lutning som överstiger 30%. Följden av att undvika denna gräns för lutning blir ofta ett avsevärt längre körstråk. I dessa lutningar har man alltså ändå kört vid de gallringar och slutavverkningar som analyserats. Att detta sker får naturligtvis påverkan på drivningsekonomi, men måste i det här sammanhanget också betraktas utifrån hur det kan påverka förekomsten av körskador. I analysen har inte lutning beaktats som en faktor som påverkar risken för körskador, men studier visar på att så kan vara fallet (Visser & Berkett 2015). Att vikta lutning mot

markfuktighet i fråga om risken för körskador är svårt, då det saknas forskning som undersökt just relationen mellan de faktorerna. I en studie gjord på lunnare visar man resultat där både markfuktighet och lutning, oberoende av varandra, har signifikant betydelse för förekomsten av körskador (Naghdi & Solgi 2014). När det gäller lutningens betydelse för risken för körskador pekar man bland annat på den lägre hastighet som maskiner håller i branta partier. Oaktat hur risken för körskador ser ut i brant lutning jämfört med fuktig mark kan man, med vetskapen om följderna som körskador i fuktiga miljöer och i vattendrags närhet kan få, argumentera för att dessa miljöer framförallt bör prioriteras vad gäller undvikande av körskador (Berg et al. 2010; Braaten & de Wit 2016; Kuglerová et al. 2021).

Regressionsanalysen som värderar sambandet mellan traktens höjdvariationer och förändringen i körstråksindex mellan utfört körstråk och Timbertrails förslag visar på att Timbertrail fungerar än bättre vid komplexare trakter, med mer höjdvariation. Förklaringsgraderna på 40,8% respektive 28,9% kan ses som att det finns ett tydligt samband. En förklaring skulle kunna vara att höjdvariation har en relativt stor vikt i modelleringen av SLU Markfuktighetskarta och därmed är det en avgörande faktor för Timbertrails framtagande av förslag (Lidberg et al. 2019). Resultatet av större höjdvariation blir att även värden för markfuktighet varierar mer och det finns potential för att skillnaderna mellan körstråk ska bli stor.

4.1.1. Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen visar på ett förväntat resultat där längden på körstråket i regel ökar, då modellen lägger större vikt vid att undvika fuktig mark. Förslaget ger också ett lägre medelvärde för markfuktighet, samt en minskad andel körning i området som klassas som kritisk. Körstråksindex sänktes med 7%, medan längden på körstråket förlängdes med 10%. I en studie som utvecklarna av Bestway gjort testas inställningarna på ett liknande sätt och man når där ett liknande resultat som i denna studie (Flisberg et al. 2020). I denna analys blir skillnaderna mellan inställningen ”normal” och inställningen ”strong” motsvarande som i Flisberg (et al. 2020), som uppnådde 8% minskning i markfuktighet. I jämförelsen ska dock beaktas att deras analys bygger på en DTW (Depth-to-water) markfuktighetskarta, vilken är framtagen med en helt annan teknik och ger en annan utsträckning av fuktig mark än SLU Markfuktighetskarta. Intressant är dock att tester visar på att DTW markfuktighetskarta visar en större andel blöta områden än SLU Markfuktighetskarta, vilket borde innebära att skillnaderna potentiellt kan bli större i en DTW markfuktighetskarta (Ågren & Lidberg 2020). En annan faktor som dock påverkar jämförelsen och som inte kan jämföras rättvist är att viktningen mellan Flisberg (et al. 2020)´s modell och Timbertrail inte framgår på ett jämförbart sätt.

4.2. Metoddiskussion

Metoden måste ses som en ytterst teoretisk metod för att jämföra Timbertrail mot verklig körning vid utförda avverkningar. Alternativet att anlägga ett försök på ett fåtal trakter och köra dem med och utan Timbertrail som verktyg övervägdes. Det prioriterades dock bort på grund av resursbrist både vad gäller maskiner och tid. Dessutom ansågs en analys på ett större antal trakter kunna korrigera i större grad för de osäkerheter och variationer som olika trakter kan innebära.

Analysens styrkor ligger framförallt i användandet av SLU Markfuktighetskarta, som anses vara den markfuktighetskarta som bäst fångar upp markens fuktvariationer (Ågren & Lidberg 2020). SLU Markfuktighetskarta är dessutom den karta som, i denna analys, legat till grund för Timbertrails modellering av förslag. Dessa två olika faktum låg till grund för att just denna markfuktighetskarta användes.

En annan styrka ligger i den populationsstorlek, antalet trakter, som analyserats. Antalet trakter får anses ha hjälpt till att eliminera traktvisa avvikelser som kan ha haft negativ påverkan på analysens kvalitet. Dessutom används samma antal trakter i studien av (Flisberg et al. 2020), där man analyserade samma typ av faktorer.

Antalet trakter var en avvägning mellan att ha så många trakter som möjligt för att uppnå ett resultat som täckte trakternas olika variationer, samt vara hanterbart ur ett tidsperspektiv. Vissa trakter besöktes i fält för att med drönare och GPS-loggning fastställa det faktiska körstråket. På resterande trakter ansågs positionsloggarna hålla så bra kvalitet att fältbesök inte var nödvändigt. Med ett mindre antal trakter kunde alla trakter ha besökts i fält och andra data ha inhämtats, exempelvis en inventering av förekomsten av körskador.

Analysens svagheter ligger i att trakterna som analyserats kan präglas av en struktur och variation som inte fångas upp av det data som ligger till grund för analysen, men som ändå kan påverka utfallet. Utfallet påverkas då genom att körstråken som användes kan ha placerats med hänsyn till information som inte fångats upp av den bakgrundsdata som Timbertrail använder sig av. Detta skulle exempelvis kunna handla om blockighet, då det är en faktor som inte Timbertrail tar med i beräkningarna i dagsläget. Dessutom läggs endast vikt vid markfuktighetens betydelse för risken för körskador, samtidigt som studier visar att flera parametrar påverkar, inte minst lutning och jordart (Naghdi & Solgi 2014; Visser & Berkett 2015). Dessutom har inte överfarter beaktats i studien. Överfarter över vattendrag är en situation där körskador ofta förekommer och lätt kan få allvarliga konsekvenser (Laudon et al. 2011; Sonesson et al. 2012; Bergkvist et al. 2014; Tiwari et al. 2016). I någon mån räknas ändå överfarter in i analysen då dessa

framkommer i markfuktighetskartan som blöta områden och därmed påverkar resultatet.

4.3. Framtida studier

Baserat på resultaten i denna studie så vore en djupare analys av effekterna av höjdskillnader mellan utförda körstråk och Timbertrails förslag intressant. Resultatet visar att Timbertrail undviker förslag som uppenbarligen har varit möjliga och blir avsevärt längre, men med det inte sagt att det utförda körstråket är bättre ur alla aspekter. I en sådan studie bör också faktorer som drivningsekonomi och säkerhet utvärderas. Innan ett optimeringsverktyg som Timbertrail integreras i en operativ verksamhet bör också de olika inställningsmöjligheter som finns tillgängliga utvärderas och deras bästa tillämpning i olika situationer bör fastställas. Här bör man analysera hur de olika inställningarna för känsligheten för markfukt kan användas utefter aktuellt väderläge och årstid.

En annan intressant aspekt är möjligheten att använda ett verktyg som Timbertrail som en vägledning vid prissättningen av avverkningstjänster. I många fall bedöms idag skotningsavståndet manuellt genom en relativt subjektiv bedömning och en mer objektiv metod skulle vara önskvärd (Brunberg & Mohtasami 2013). I Flisberg et al. (2020) tar man också upp ämnet och diskuterar kring hur skotningsavståndet i verktyget Bestway skulle kunna användas i prissättningen av drivningstjänster. En studie som hanterar ämnet skulle kunna analysera effekten av att implementera verktyget i bortsättningen samt hjälpa till att utveckla verktygets funktioner för ändamålet. Studier visar att tillförlitligheten mellan uppdragsgivare och entreprenörer är mycket viktig för att skapa ett framgångsrikt samarbete och en större objektivitet i prissättningen bör kunna ha positiv effekt på tillförlitligheten (Eriksson et al. 2017).

4.4. Tillämpning

Syftet med den här studien var att undersöka om användningen av ett planeringsverktyg, i det här fallet Timbertrail, kan hjälpa till att minska risken för körskador vid drivningsarbete. Analysen visar att Timbertrail kan användas vid traktplanering med en förväntan om att kvalitetssäkra arbetet mot körskador. Resultatet visar, på ett teoretiskt sätt, att Timbertrail kan minska andelen körning på mark där risken för körskador ökar, här även bevisat med statistisk signifikans. Som väntat innebär detta att man på flera trakter får ett längre körstråk för att undvika att köra genom de fuktigare partierna. I de fall som Timbertrail ger ett

förslag med väsentligt kortare körstråk än det redan utförda måste man beakta risken att traktens beskaffenhet kan ha påverkat dragningen av det utförda körstråket. Exempelvis skulle blockighet eller andra tekniska hinder ha kunnat påverka dragningen. Verktuget kan inte heller ta hänsyn till faktorer som befintliga och fortsatt lämpliga körstråk eller ägarförhållanden som påverkar placeringen av körstråk. En annan begränsning hos verktuget som vid operativt användande måste tas i beaktning är att förändringar i exempelvis vägnät, stående trädvolym, vattenflöden mm. måste registreras in i någon av de bakgrundsdata som Timbertrail använder sig av innan det kommer tas i beaktning av verktuget.

4.5. Slutsats

Sammantaget visar analysen att Timbertrail, enligt studiens sätt att beräkna risken för körskador, kan bidra till att minska risken för körskador i både gallring och slutavverkning med 5% respektive 4% med endast 2% respektive 1% i förlängning av körstråk. Detta är dock genomsnittliga siffror och studien visar att det råder osäkerhet i utfallet för en enskild trakt, då resultatet för enskilda trakter avviker väsentligt från medelvärdet.

Referenser

Personlig kommunikation:

Hänninen Sandra. (2021) Mailkonversation 2021-09-25. Planeringsledare Stora Enso Skog östra Dalarna.

Rönnqvist, Erik. (2021) Microsoft Teams-möte 2021-10-21. Creative Optimization.

Publicerade källor:

- Berg, R., Bergkvist, I., Lindén, M., Lomander, A., Ring, E. & Simonsson, P. (2010). *Förslag till en gemensam policy angående körskador på skogsmark för svenskt skogsbruk*. (731). Uppsala: Skogforsk.
- Bergkvist, I., Friberg, G., Mohtasami, S. & Sonesson, J. (2014). *STIG-projektet 2010-2014*. (818–2014). Uppsala: Skogforsk.
- Björkman, C. & Stenlid, J. (2013). *Svampar och insekter - Rapport från Future Forests 2009-2012*. (2013:5). Umeå: Future Forests, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Björnberg, K.A., Vahter, M., Grawé, K.P. & Berglund, M. (2005). Methyl mercury exposure in Swedish women with high fish consumption. *Science of The Total Environment*, 341 (1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.033>
- Braaten, H.F.V. & de Wit, H.A. (2016). Effects of disturbance and vegetation type on total and methylmercury in boreal peatland and forest soils. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 218, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.029>
- Brunberg, T. (2010). *Bränsleförbrukningen i skogsbruket*. Uppsala: Skogforsk.
- Brunberg, T. & Mohtasami, S. (2013). *Arbetsrapport - Datoriserad beräkning av terrängtransportavståndet*. (801–2013). Uppsala: Skogforsk.
- Cambi, M., Certini, G., Fabiano, F., Foderi, C., Laschi, A. & Picchio, R. (2015a). Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9, e1–e6. <https://doi.org/10.3832/ifor1382-008>
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F. & Marchi, E. (2015b). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
- Cambi, M., Giannetti, F., Bottalico, F., Travaglini, D., Nordfjell, T., Chirici, G. & Marchi, E. (2018). Estimating machine impact on strip roads via close-range photogrammetry and soil parameters: a case study in central Italy. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11 (1), 148. <https://doi.org/10.3832/ifor2590-010>

- Conallin, J. (2004). The Negative Impacts of Sedimentation on Brown Trout (*Salmo trutta*) Natural Recruitment, and the Management of Danish Streams. *The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies*, 3
- Cotel, S., Viville, D., Benarioumlil, S., Ackerer, P. & Pierret, M.C. (2020). Impact of the hydrological regime and forestry operations on the fluxes of suspended sediment and bedload of a small middle-mountain catchment. *Science of The Total Environment*, 743, 140228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140228>
- Drott, A. & Lomander, A. (2020). *Inverkan av skogsbruksåtgärder på kvicksilvers transport, omvandling och upptag i vattenlevande organismer*. (2020/1). Jönköping: Skogsstyrelsen.
- 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), 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.037>
- Eriksson, Hi., Bergqvist, J., Hazell, P., Isacsson, G., Lomander, A. & Black-Samuelsson, S. (2016). *Effekter av klimatförändringar på skogen och behov av anpassning i skogsbruket*. (2016:2). Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Eriksson, M., LeBel, L. & Lindroos, O. (2017). The Effect of Customer–Contractor Alignment in Forest Harvesting Services on Contractor Profitability and the Risk for Relationship Breakdown. <https://doi.org/10.3390/F8100360>
- Eriksson, M. & Lindroos, O. (2014). Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 25 (3), 179–200. <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.974309>
- Flisberg, P., Rönnqvist, M., Willén, E., Frisk, M. & Friberg, G. (2020). Spatial optimization of ground-based primary extraction routes using the BestWay decision support system. *undefined*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-natural-production-conditions-for-in-of-Shegelman-Budnik/f58e79c6ce840e459f4e49eeaec52395d84de351> [2021-09-15]
- Friberg, G. & Bergqvist, I. (2016). *Så påverkar arbetsrutiner och markfuktighetskartor körskador i skogsbruket*. (904–2016). Uppsala: Skogforsk.
- FSC, S. (2020). *Skogsbruksstandard 2020. FSC Sweden*. <https://se.fsc.org:443/se-se/standards/skogsbruksstandard-2020> [2021-09-19]
- Ghaffariyan, M., Apolit, R. & Kühmaier, M. (2018). A Short Review of Fuel Consumption Rates of Whole Tree and Cut-To-Length Timber Harvesting Methods. *Current Investigations in Agriculture and Current Research*, 52, 603–606. <https://doi.org/10.32474/CIACR.2018.05.000209>
- Hansson, L. (2019). Impacts of forestry operations on soil physical properties, water and temperature dynamics. *undefined*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Impacts-of-forestry-operations-on-soil-physical-and-Hansson/aa804ff8296e29d2faba34bd77bffd8b8bfa44b> [2021-11-02]
- Hoffmann, S., Schönauer, M., Heppelmann, J., Asikainen, , Cacot, E., Eberhard, B., Hasenauer, H., Ivanovs, J., Jaeger, D., Lazdiņš, A., Mohtashami, S., Moskalik, T., Nordfjell, T., Stereńczak, K., Talbot, B., Uusitalo, J., Vuillermoz, M. & Astrup, R. (2022). Trafficability Prediction Using Depth-to-Water Maps: the Status of Application in Northern and Central European Forestry. *Current Forestry Reports*, 3. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00153-8>
- Hosseini, A., Lindroos, O. & Wadbro, E. (2019). A holistic optimization framework for forest machine trail network design accounting for multiple objectives and machines. *Canadian Journal of Forest Research*, 49 (2), 111–120

- Häggström, C. & Lindroos, O. (2016). Human, technology, organization and environment – a human factors perspective on performance in forest harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 27 (2), 67–78. <https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1170495>
- Jakobsson, R., Olofsson, E. & Ambrose-Oji, B. (2021). Stakeholder perceptions, management and impacts of forestry conflicts in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 36 (1), 68–82. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1854341>
- Keskitalo, E.C.H., Bergh, J., Felton, A., Björkman, C., Berlin, M., Axelsson, P., Ring, E., Ågren, A., Roberge, J.-M., Klapwijk, M.J. & Boberg, J. (2016). Adaptation to Climate Change in Swedish Forestry. *Forests*, 7 (2), 28. <https://doi.org/10.3390/f7020028>
- Klaes, B., Struck, J., Schneider, R. & Schüller, G. (2016). Middle-term effects after timber harvesting with heavy machinery on a fine-textured forest soil. *European Journal of Forest Research*, 135 (6), 1083–1095. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2>
- Kronnäs, V., Hellsten, S. & Akselsson, C. (2012). *Kväveutlakning från skogsmark vid olika skogsbruksåtgärder*. (B2056). Göteborg: IVL - Svenska miljöinstitutet.
- Kuglerová, L., Hasselquist, E.M., Sponseller, R.A., Muotka, T., Hallsby, G. & Laudon, H. (2021). Multiple stressors in small streams in the forestry context of Fennoscandia: The effects in time and space. *Science of The Total Environment*, 756, 143521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143521>
- Labelle, E.R., Hansson, L., Högbom, L., Jourgholami, M. & Laschi, A. (2022). Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*,. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>
- Laschi, A., Neri, F., Brachetti Montorselli, N. & Marchi, E. (2016). A Methodological Approach Exploiting Modern Techniques for Forest Road Network Planning. *Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 37 (2), 319–331
- Laudon, H., Sponseller, R.A., Lucas, R.W., Futter, M.N., Egnell, G., Bishop, K., Ågren, A., Ring, E. & Högbom, P. (2011). Consequences of More Intensive Forestry for the Sustainable Management of Forest Soils and Waters. *Forests*, 2 (1), 243–260. <https://doi.org/10.3390/f2010243>
- Lidberg, W., Nilsson, M. & Ågren, A. (2019). Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape. *Ambio*,. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01196-9>
- Lindroos, O., La Hera, P.X. & Häggström, C. (2017). Drivers of Advances in Mechanized Timber Harvesting – a Selective Review of Technological Innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38, 243–258
- Lindroos, O., Lundqvist, L. & Hallsby, G. (2014). *Skogsskötselserien - Slutavverkning*. (Skogsskötselserien, 20). Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Marchi, E., Chung, W., Visser, R., Abbas, D., Nordfjell, T., Mederski, P.S., McEwan, A., Brink, M. & Laschi, A. (2018). Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment*, 634, 1385–1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>
- Murgaš, V., Sačkov, I., Sedliak, M., Tunák, D. & Chudý, F. (2018). Assessing horizontal accuracy of inventory plots in forests with different mix of tree species composition and development stage. *Journal of Forest Science*, 64 (2018) (No. 11), 478–485. <https://doi.org/10.17221/92/2018-JFS>

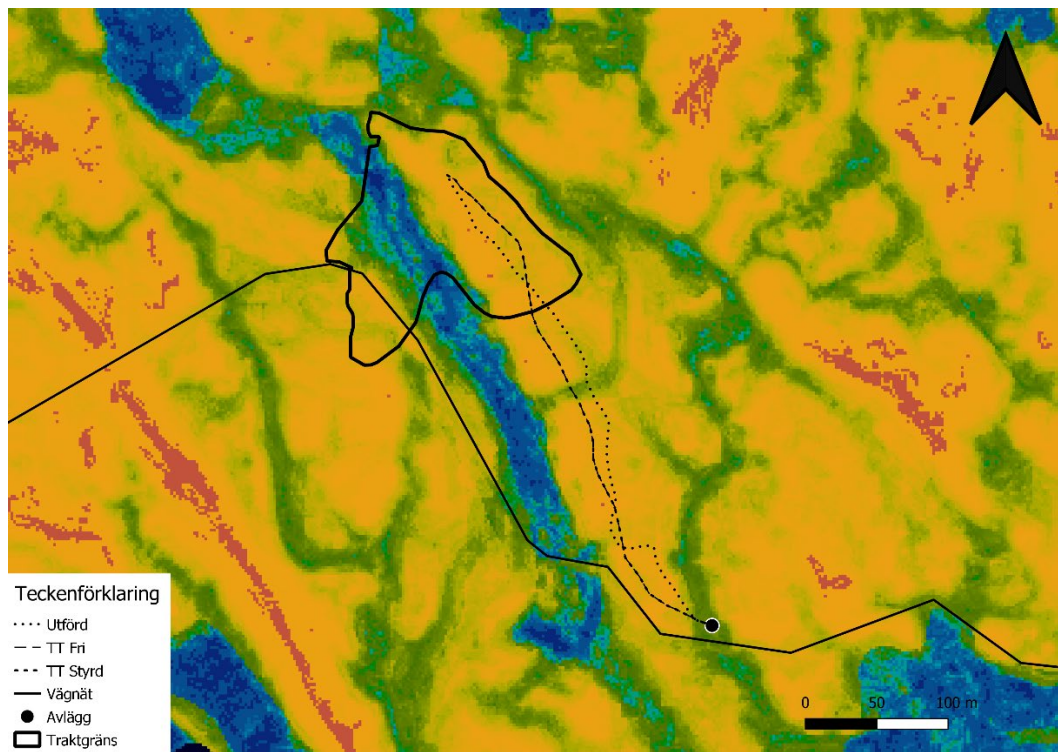
- Naghdi, R., Bagheri, I., Lotfalian, M. & Setodeh, B. (2009). Rutting and soil displacement caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Asalem forest northern Iran). *Journal of Forest Science*, 55, 177–183
- Naghdi, R. & Solgi, A. (2014). Effects of Skidder Passes and Slope on Soil Disturbance in Two Soil Water Contents. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 35, 73–80
- Nasr, M. & Arp, P. (2018). Total Mercury Concentrations in Lake and Streams Sediments Related to Wet-Area Coverage and Geogenic Sources within Upslope Basins. <https://doi.org/10.1080/15320383.2017.1378872>
- Nordfjell, T. (2020). *Skogsavverkning och markskador*. (Net4Forest). Umeå: Skogens biomaterial och teknologi.
- Panagos, P., Jiskra, M., Borrelli, P., Liakos, L. & Ballabio, C. (2021). Mercury in European topsoils: Anthropogenic sources, stocks and fluxes. *Environmental Research*, 201, 111556. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111556>
- PEFC (2017). *PEFC SWE 002:4 Svenska PEFC:s Skogsstandard*. Stockholm: PEFC.
- Proto, A.R., Macrì, G., Visser, R., Harrill, H., Russo, D. & Zimbalatti, G. (2018). Factors affecting forwarder productivity. *European Journal of Forest Research*, 137 (2), 143–151. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
- Skogsindustrierna (2013). *Branschgemensam miljöpolicy*. Skogsindustrierna. https://www.skogskunskap.se/contentassets/6b8dbf61bab74a418e0dd519141c5709/miljopolicy-2013_korskador.sv.pdf
- Sonesson, J., Mohtasami, S., Bergkvist, I., Söderman, U., Barth, A., Jönsson, P., Mörk, A., Jonmeister, T. & Thor, M. (2012). *Beslutsstöd och metod för att minimera markpåverkan vid drivning*. (772–2012). Uppsala: Skogforsk.
- Stenlid, J. (2005). Modeling infection and spread of *Heterobasidion annosum* in even-aged Fennoscandian conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 (1), 74–84. <https://doi.org/10.1139/x04-150>
- Thorsén, Å. & Thor, M. (2014). *Effektivt skogsbruk*. (91–2014). Uppsala: Skogforsk.
- Tiwari, T., Lundström, J., Kuglerová, L., Laudon, H., Öhman, K. & Ågren, A.M. (2016). Cost of riparian buffer zones: A comparison of hydrologically adapted site-specific riparian buffers with traditional fixed widths. *Water Resources Research*, 52 (2), 1056–1069. <https://doi.org/10.1002/2015WR018014>
- Transportstyrelsen (2021). *Drönare - Transportstyrelsen*. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/> [2021-12-25]
- Visser, R. & Berkett, H. (2015). Effect of terrain steepness on machine slope when harvesting. *International Journal of Forest Engineering*, 26 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1033211>
- Wang, L. (2012). *Impact of Heterobasidion spp. Root Rot in Conifer Trees and Assessment of Stump Treatment*. (ISSN 1652-6880). Alnarp. https://pub.epsilon.slu.se/9387/1/Wang_LY_130121.pdf
- Wang, L., Gunulf, A., Pukkala, T. & Rönnberg, J. (2015). Simulated *Heterobasidion* disease development in *Picea abies* stands following precommercial thinning and the economic justification for control measures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30 (2), 174–185. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.978887>
- Wu, P., Bishop, K., von Brömssen, C., Eklöf, K., Futter, M., Hultberg, H., Martin, J. & Åkerblom, S. (2018). Does forest harvest increase the mercury concentrations in fish? Evidence from Swedish lakes. *Science of The Total Environment*, 622–623, 1353–1362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.075>

Ågren, A. & Lidberg, W. (2020). *Dokumentation nya hydrografiska kartor – vattendrag och SLU Markfuktighetskartor*. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.

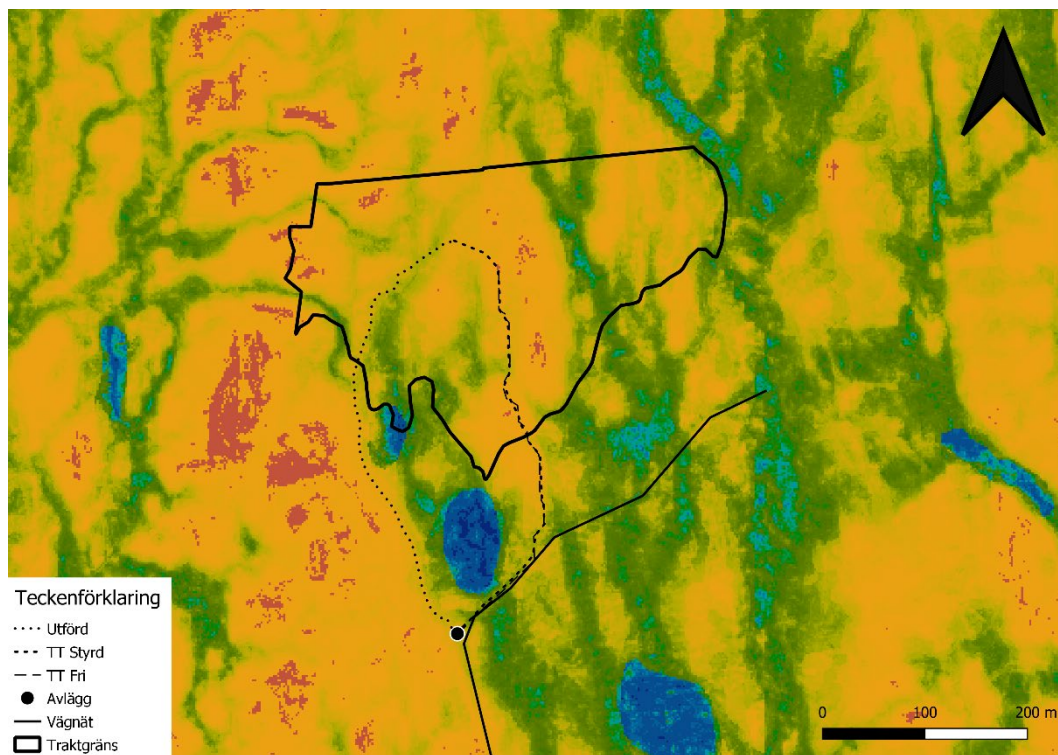


Bilaga 1

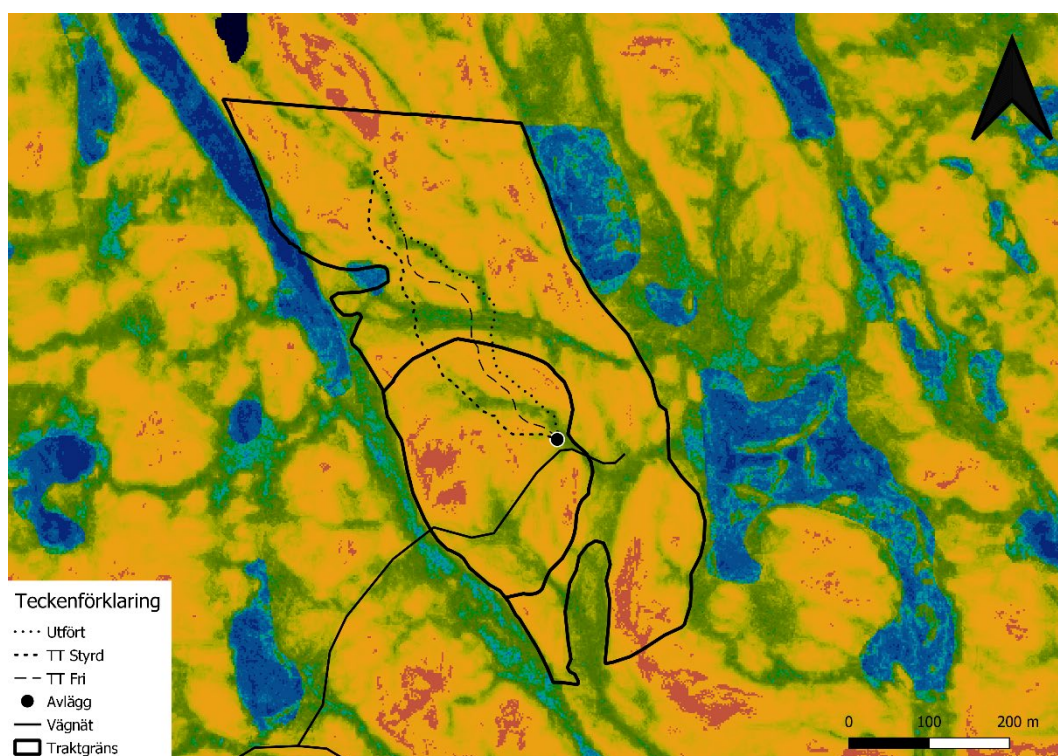
Nedan visas traktkartor över de trakter som ingått i studien. Bakgrunden för traktkartorna är SLU Markfuktighetskarta som analysen har grundats på. Markfuktighetskartan är färgkodad enligt: Röd = Torr mark, Gul = frisk mark, Grön = frisk-fuktig mark, Ljusblå = fuktig och Blå = Blöt mark.



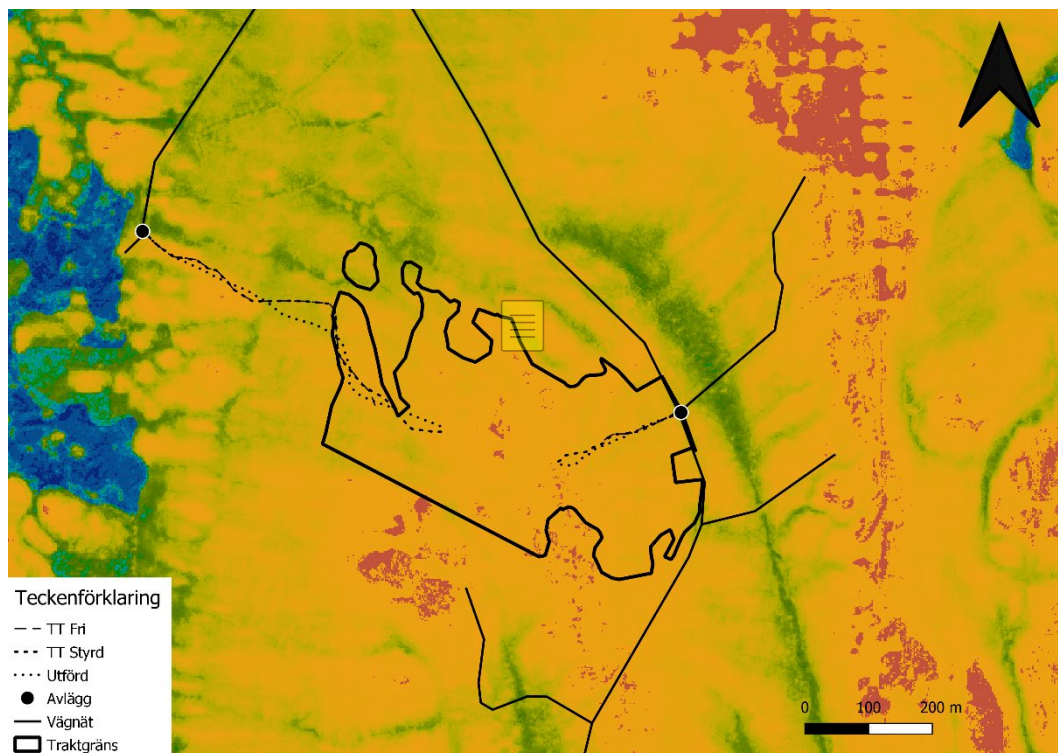
Ga 1



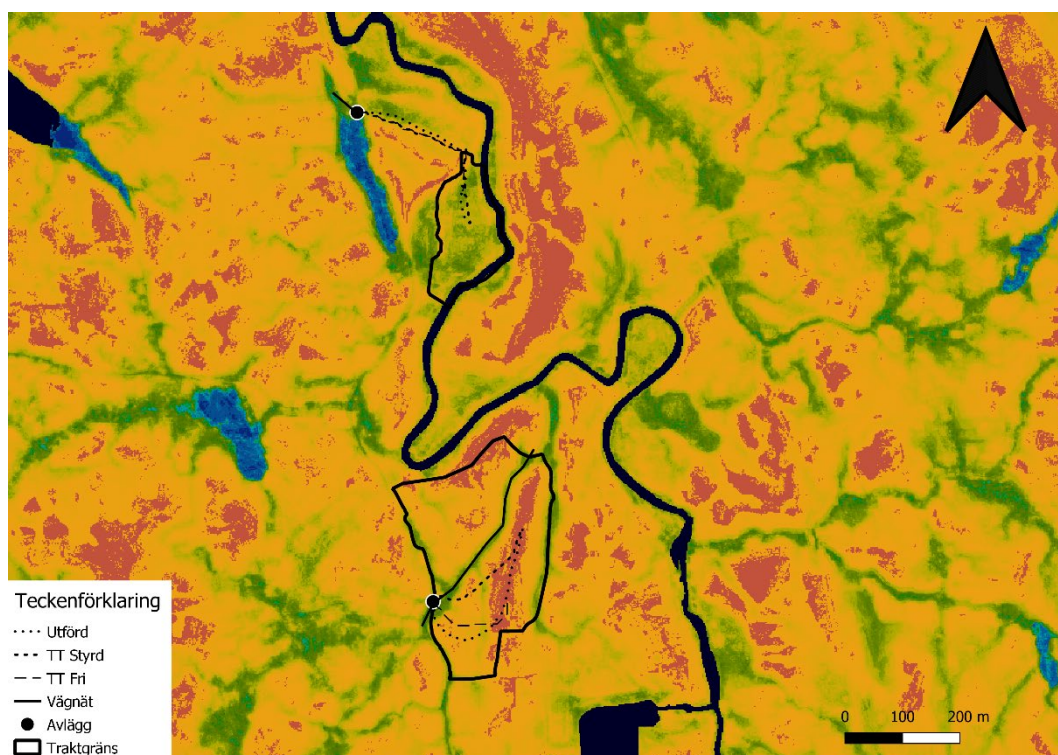
Ga 2



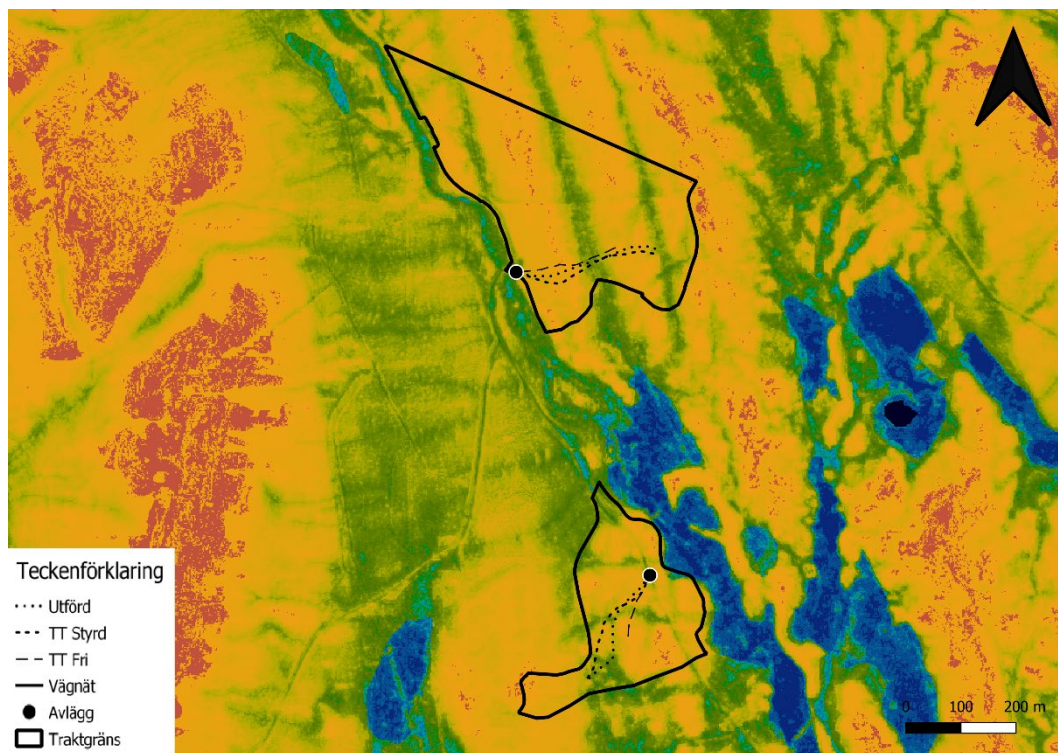
Ga 3



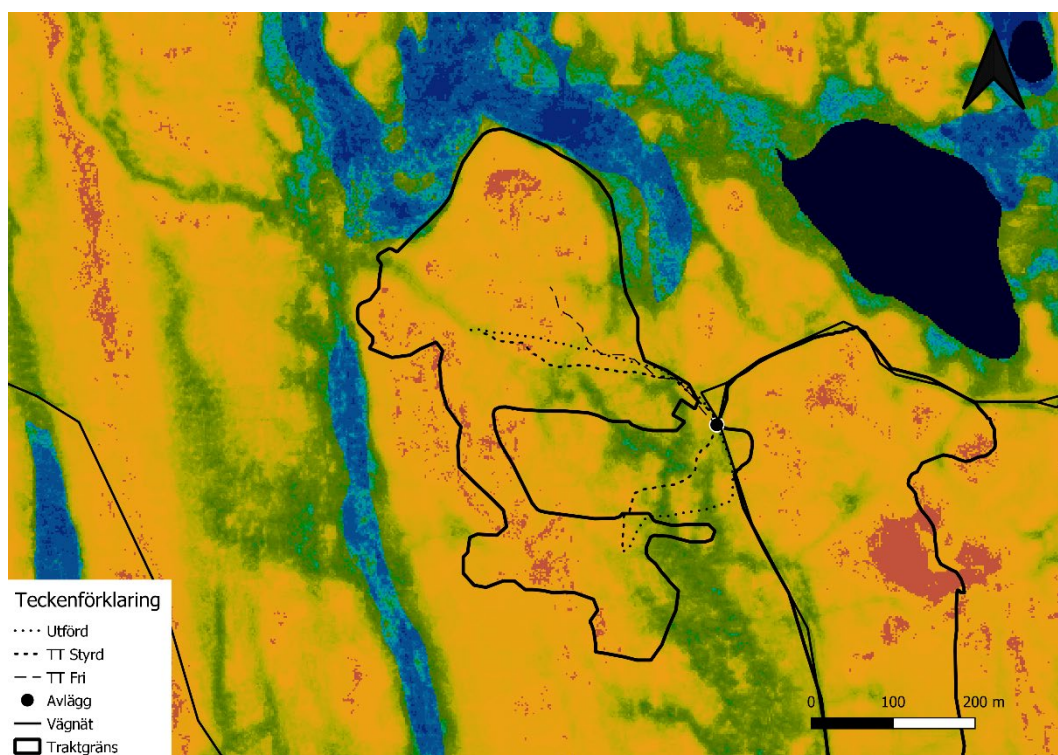
Ga 4



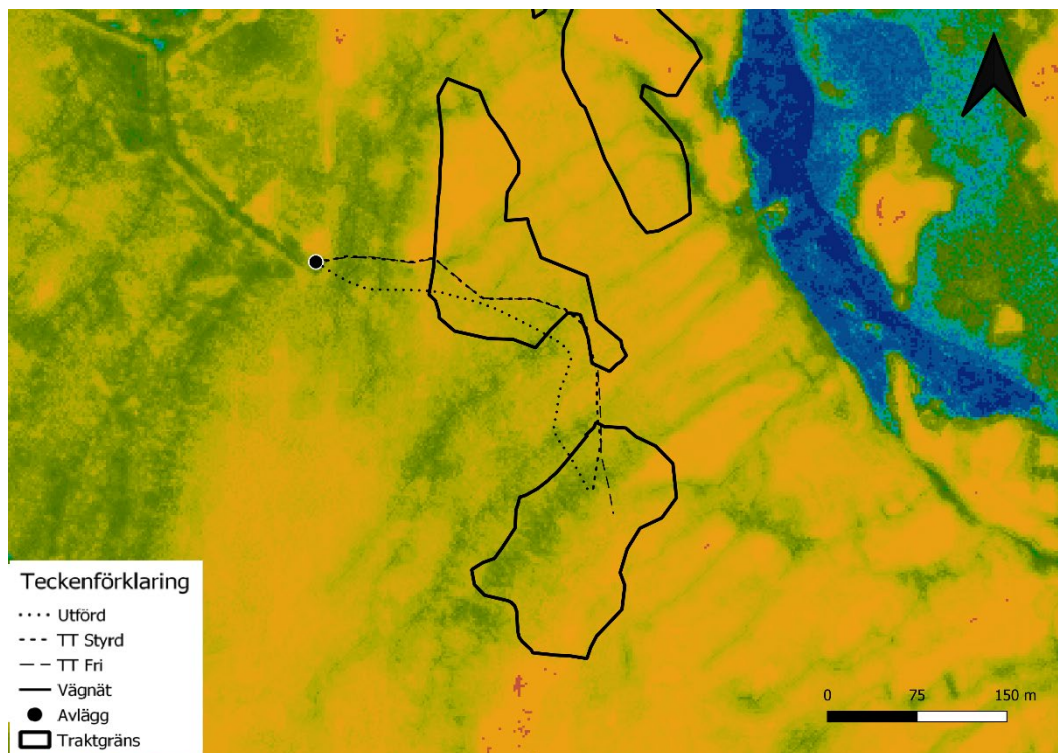
Ga 5



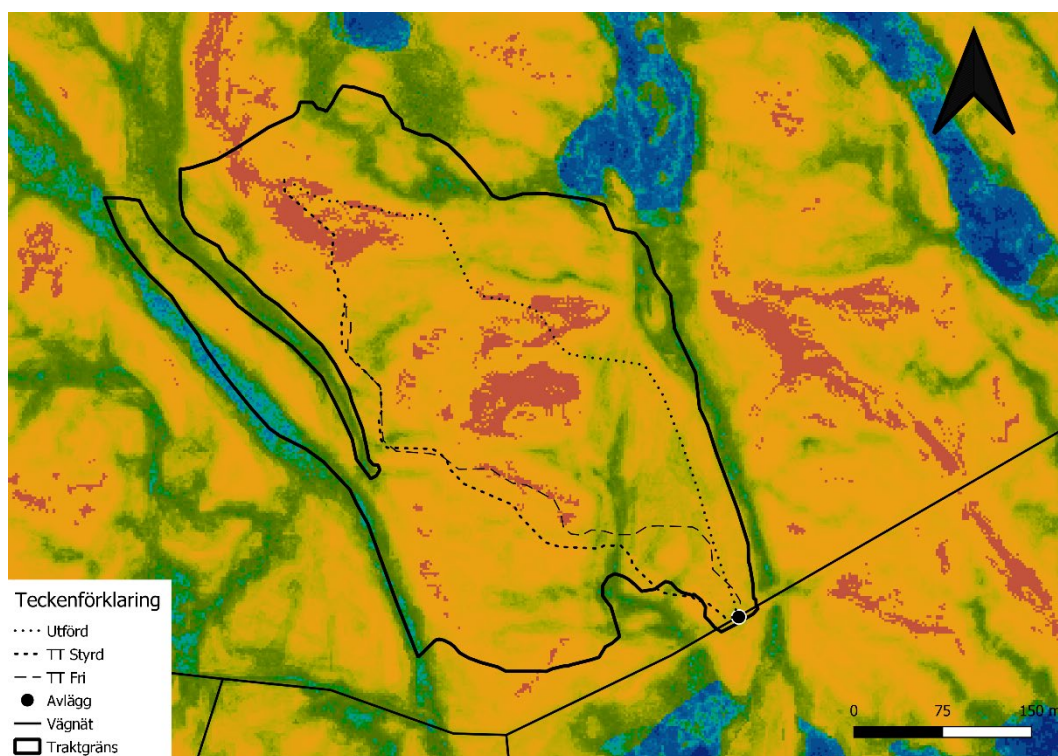
Ga 6



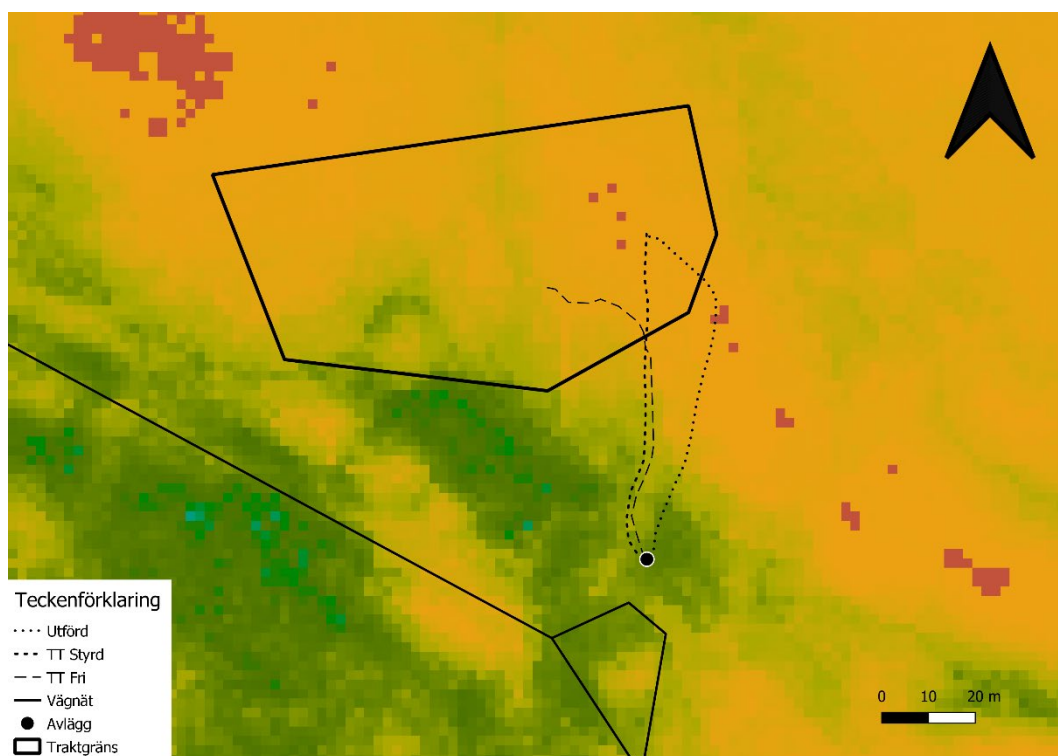
Ga 7



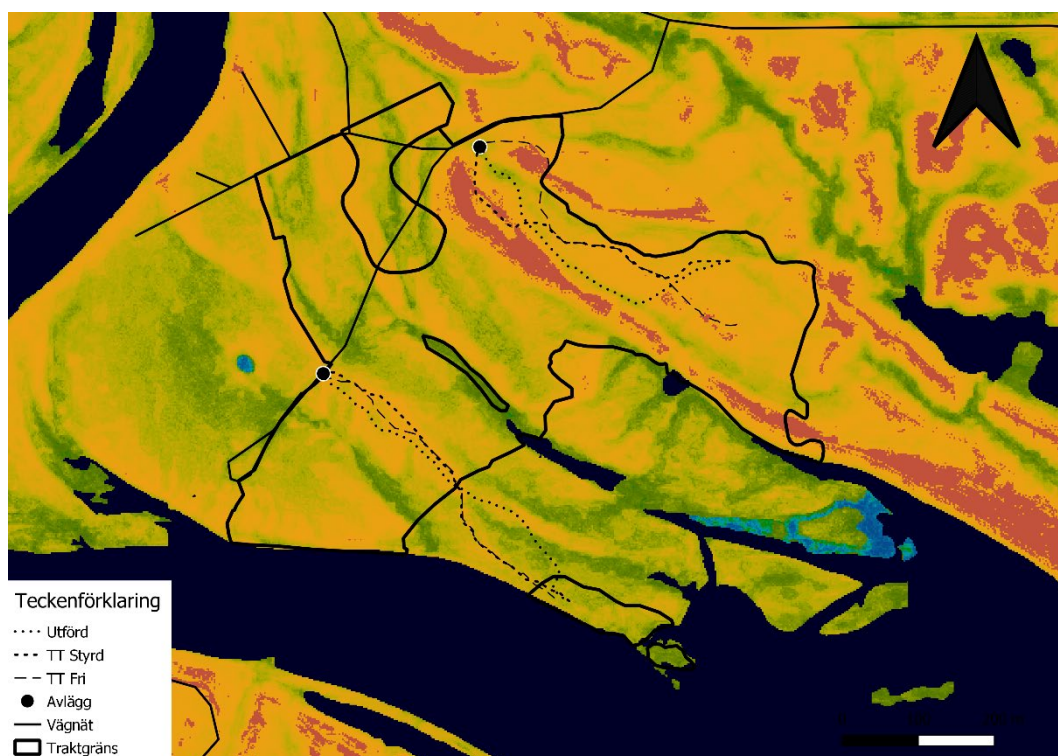
Ga 8



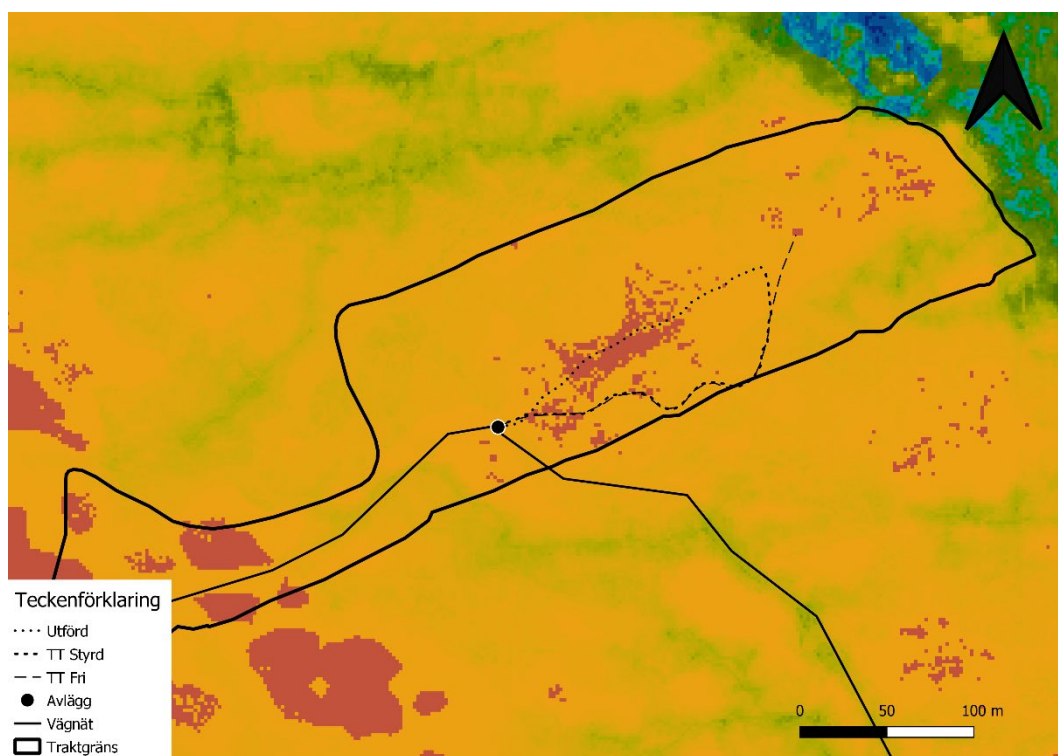
Ga 9



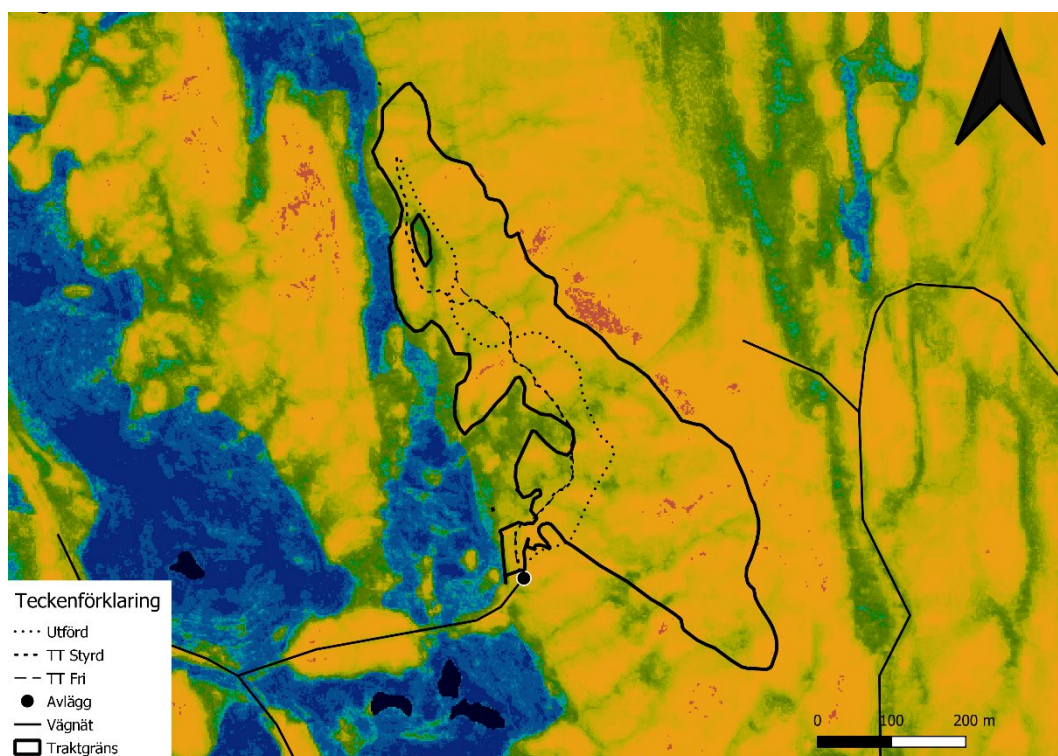
Ga 10



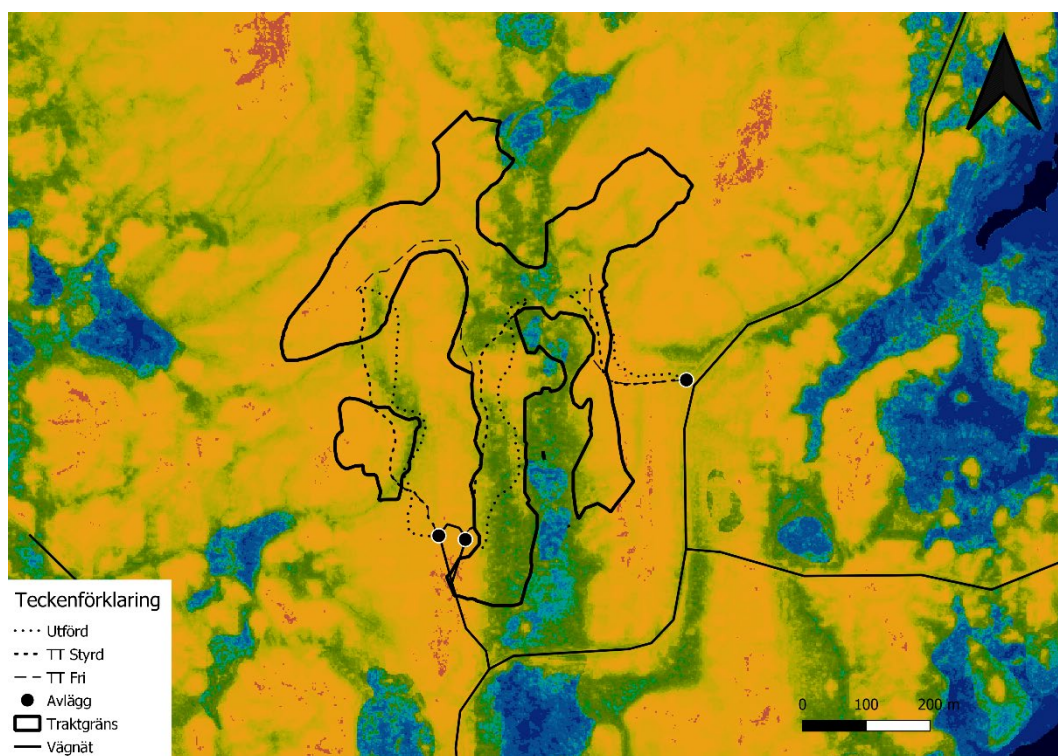
Ga 11



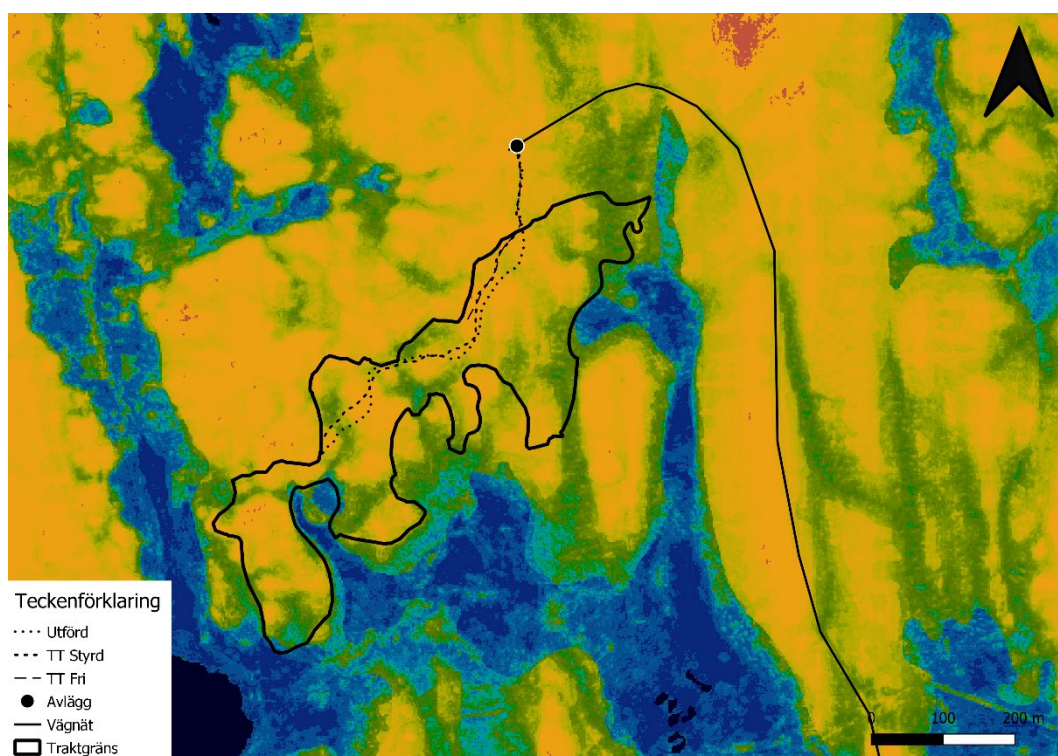
Ga 12



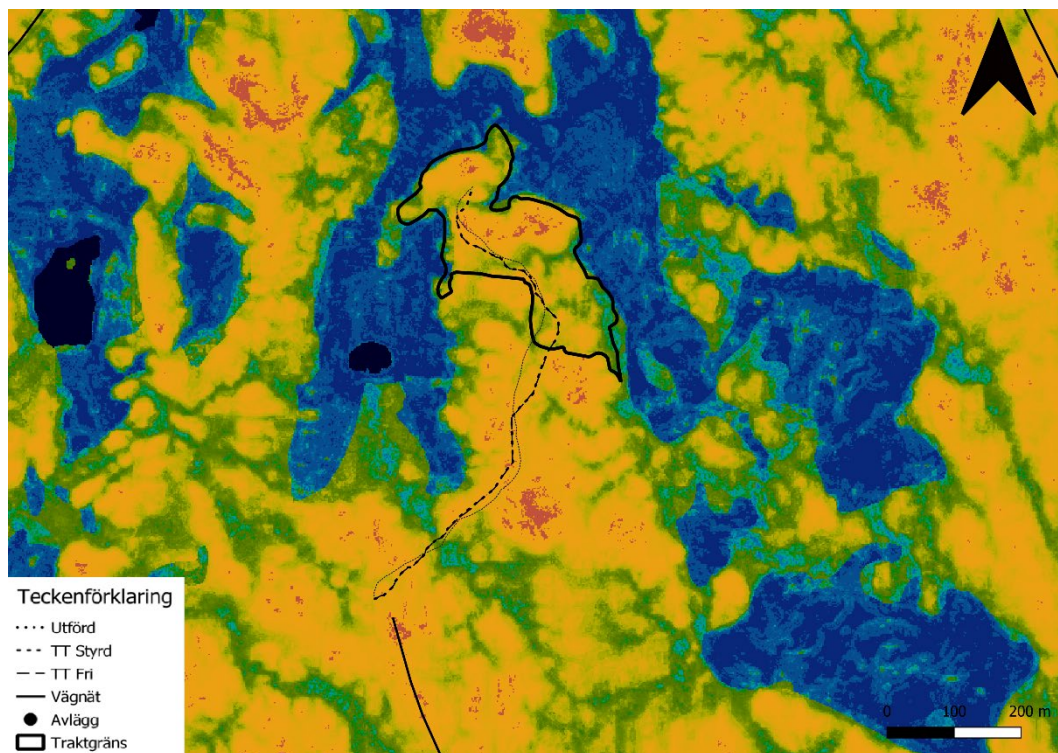
Ga 13



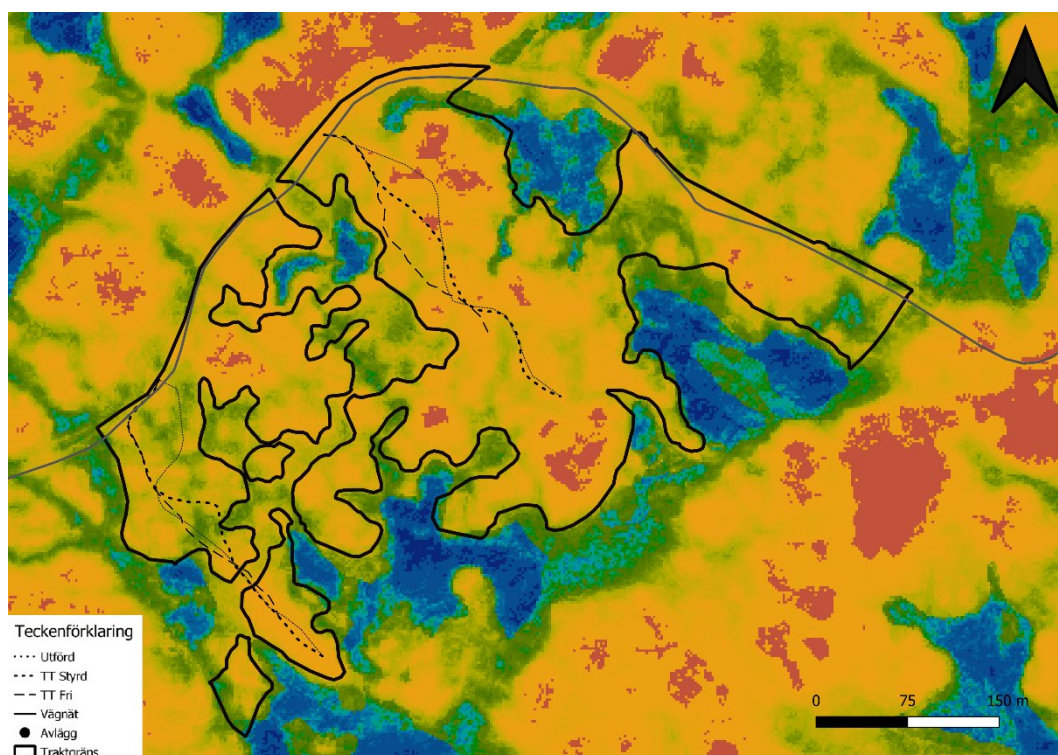
Ga 14



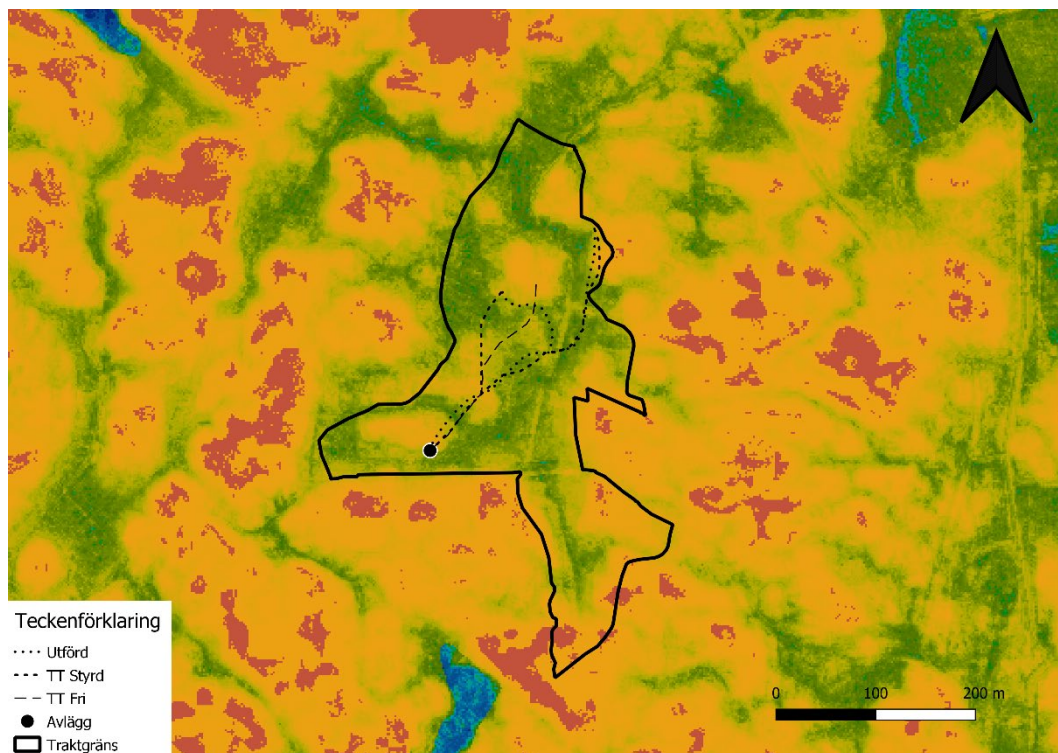
Ga 15



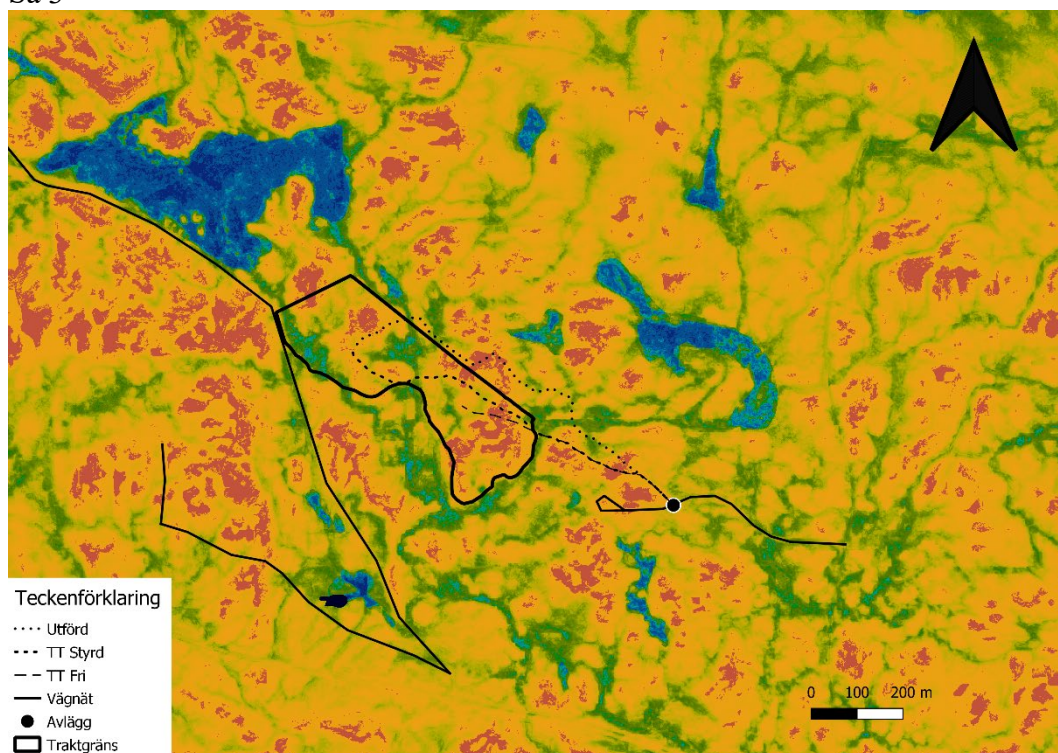
Sa 1



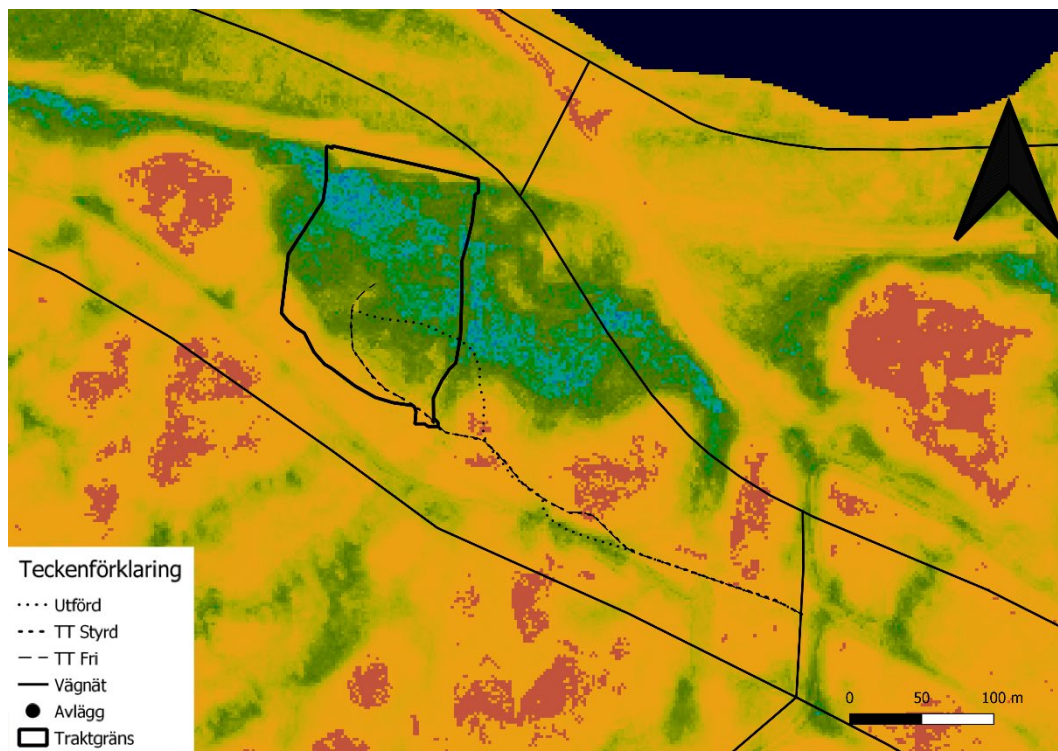
Sa 2



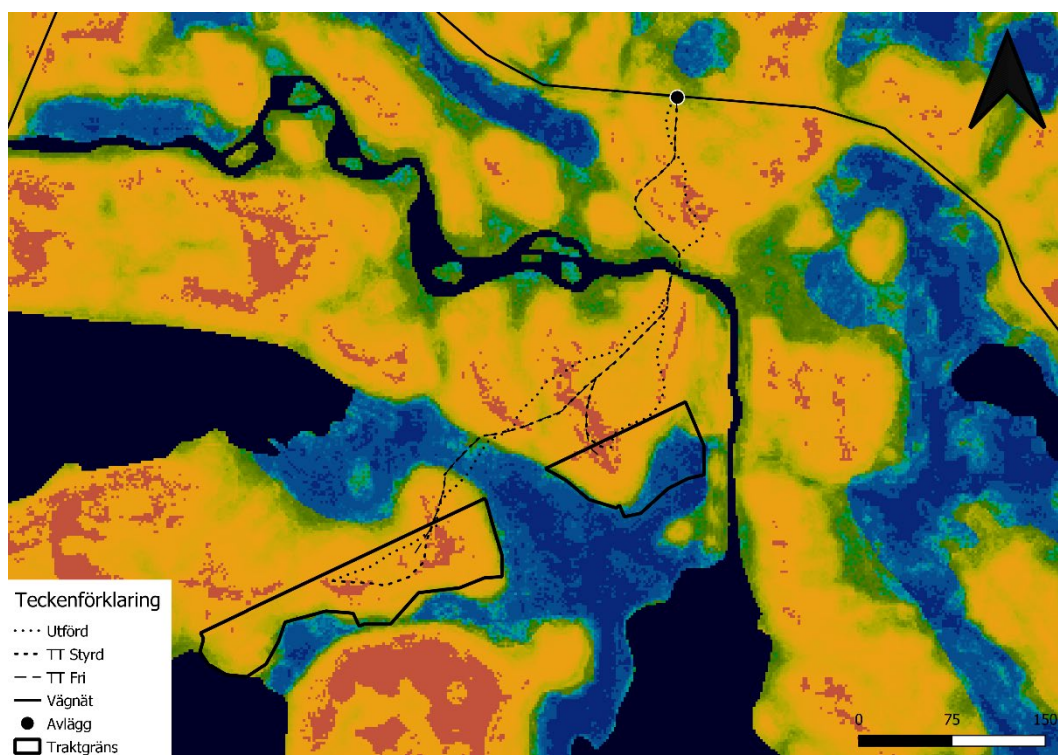
Sa 3



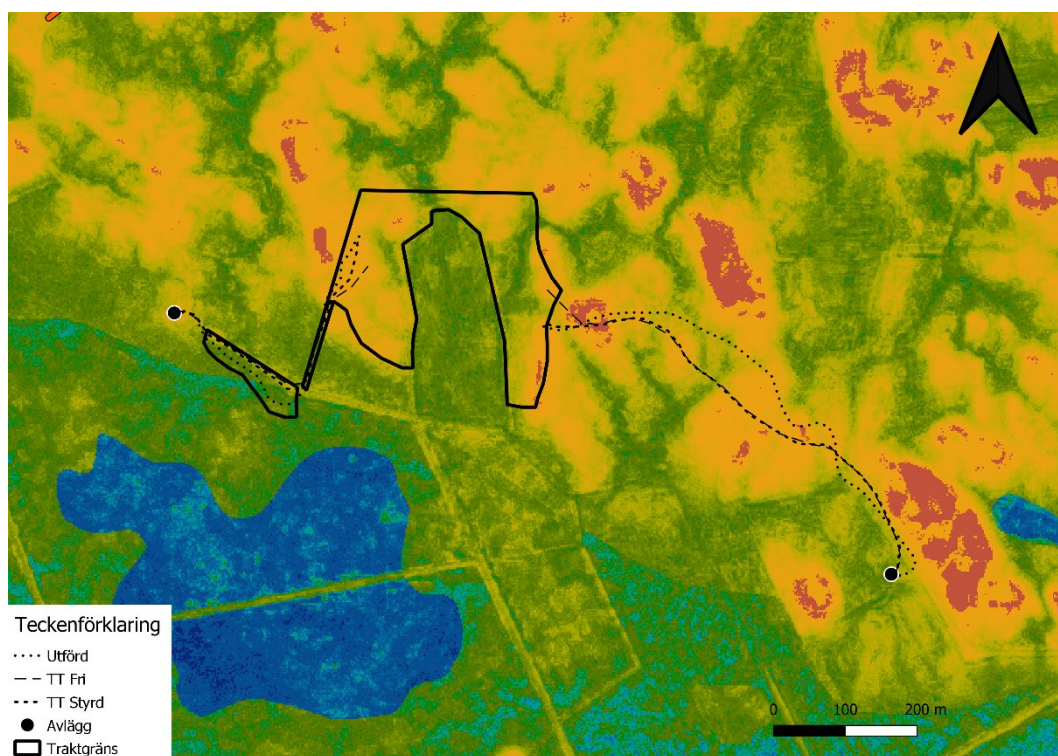
Sa 4



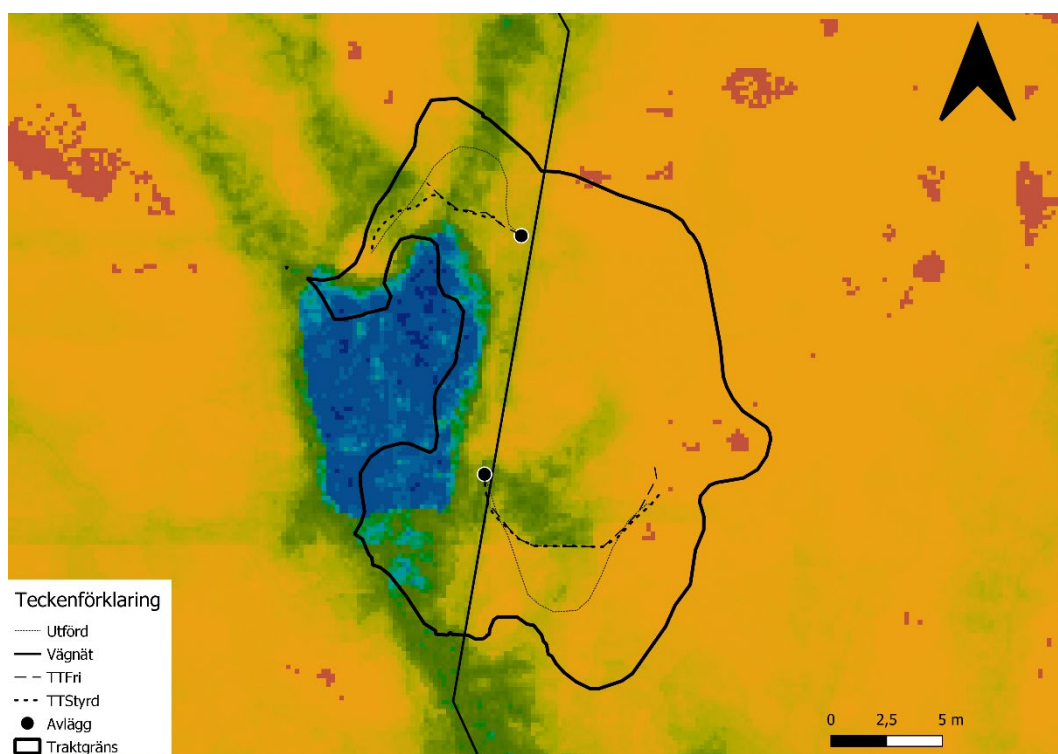
Sa 5



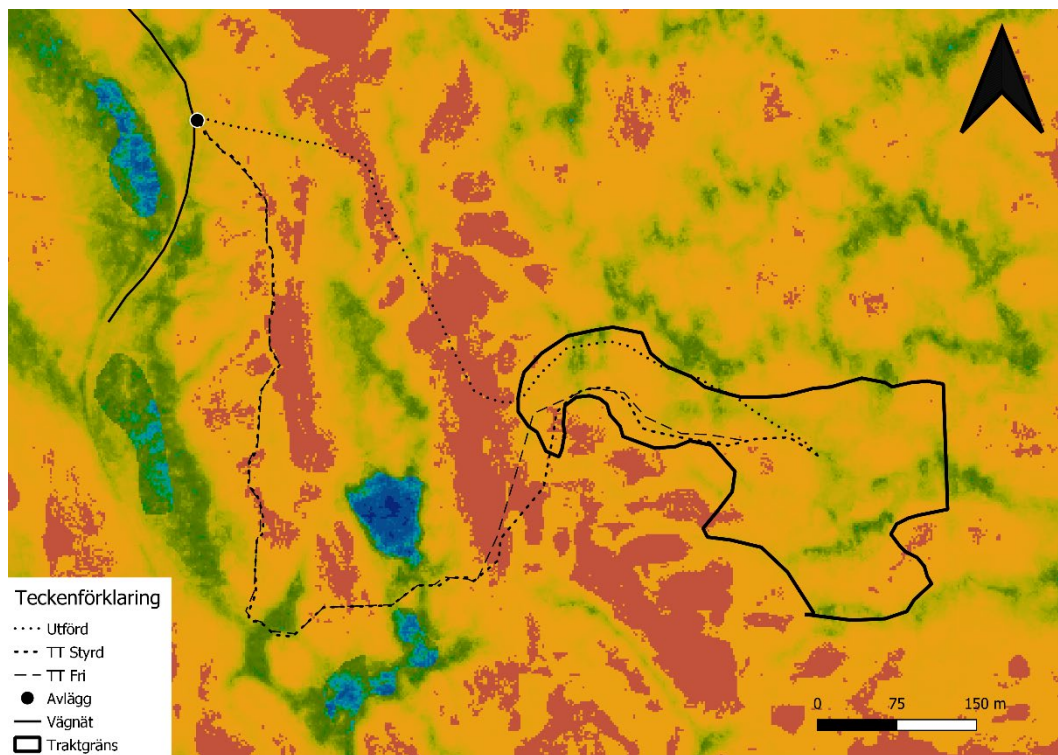
Sa 6



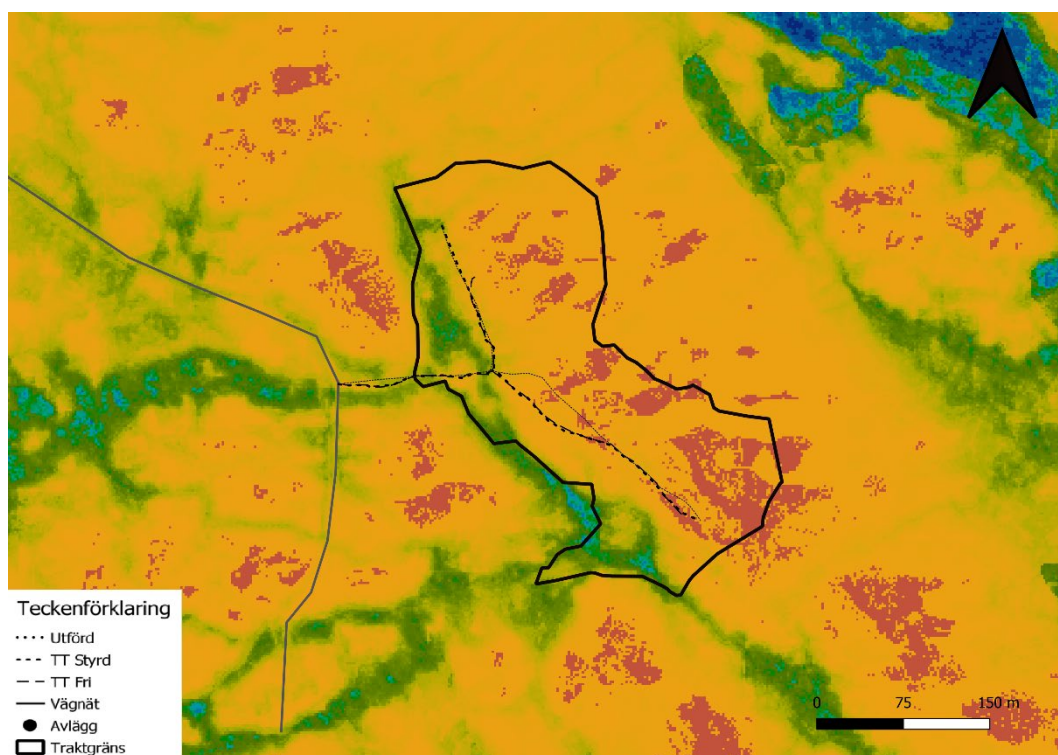
Sa 7



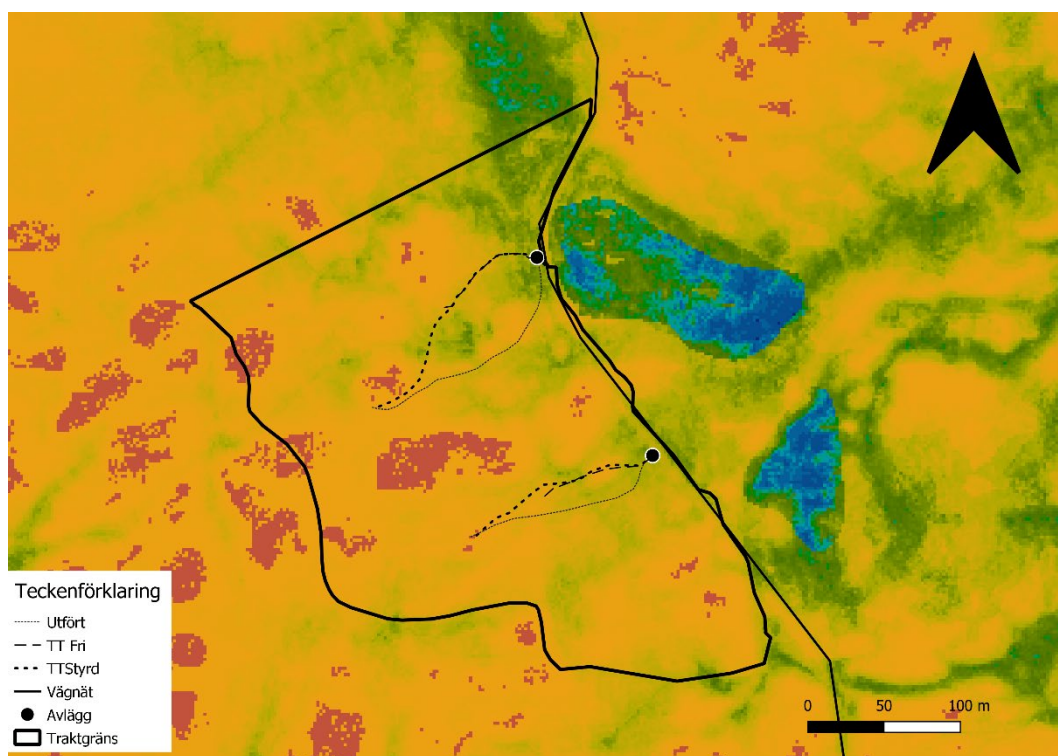
Sa 8



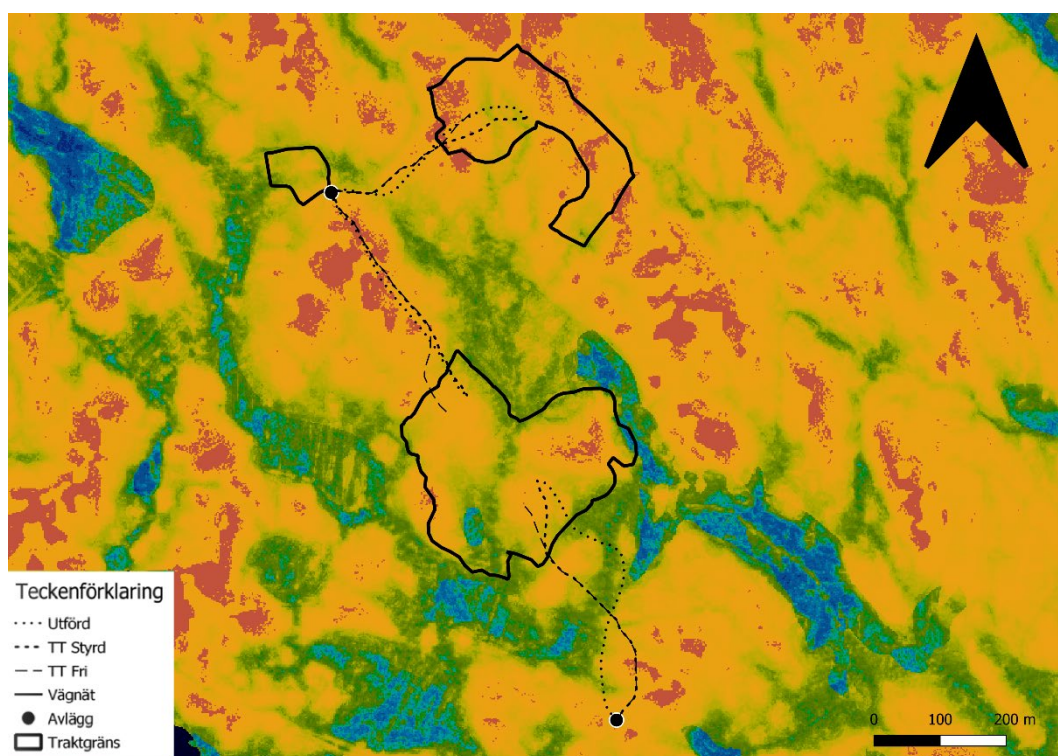
Sa 9



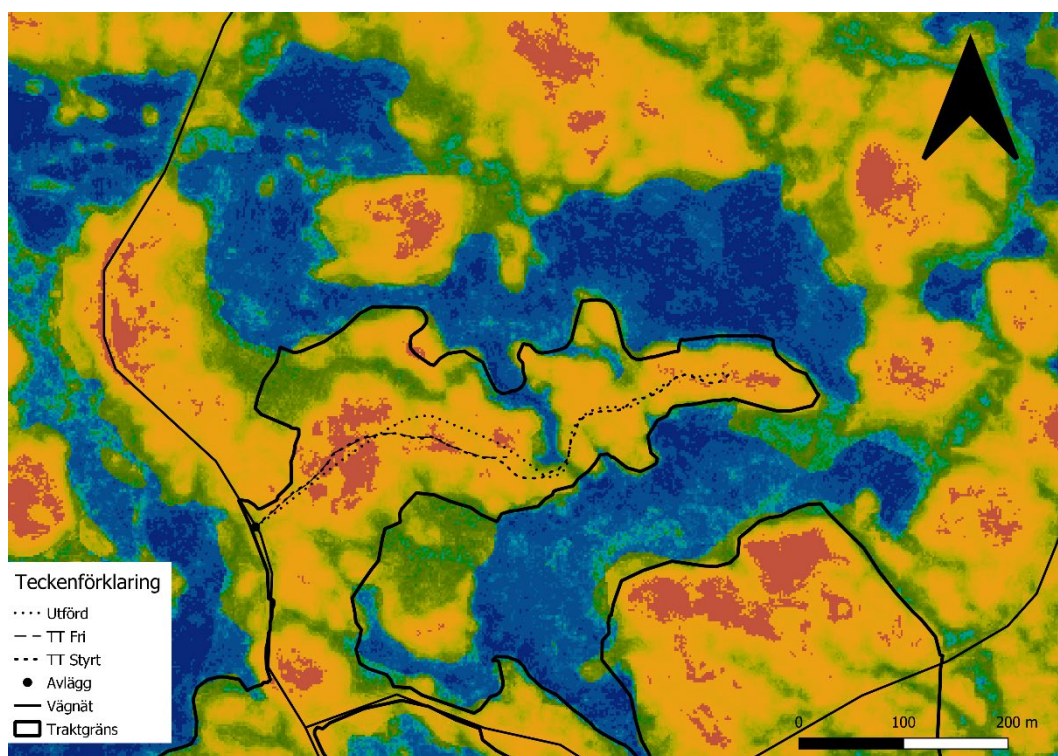
Sa 10



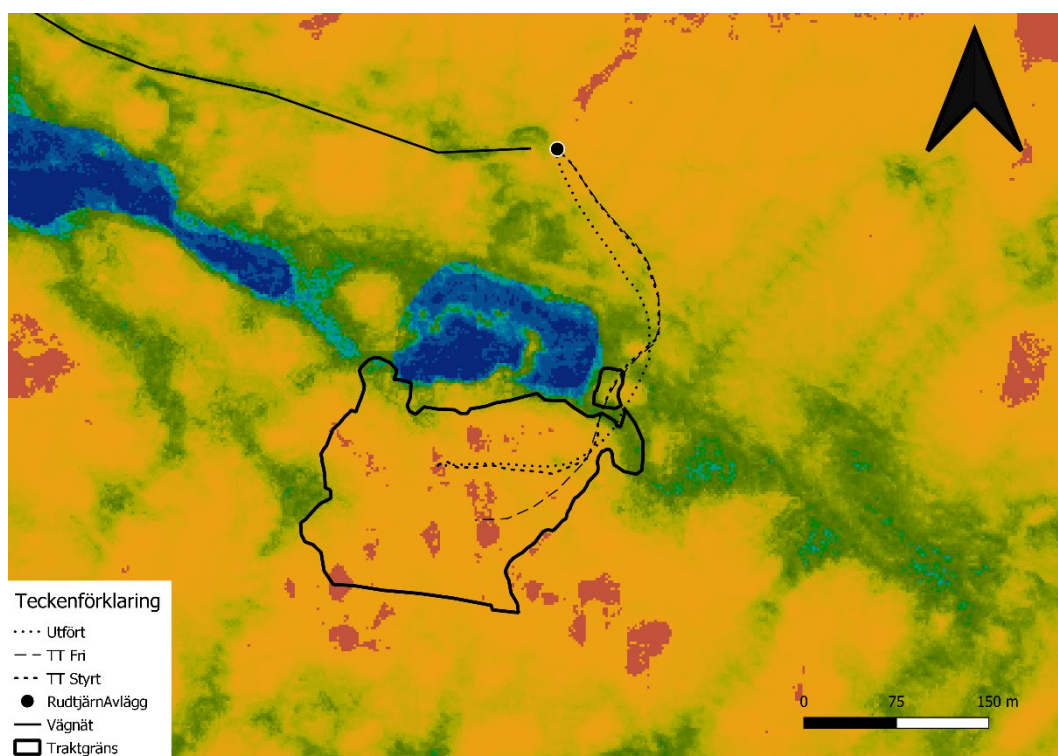
Sa 11



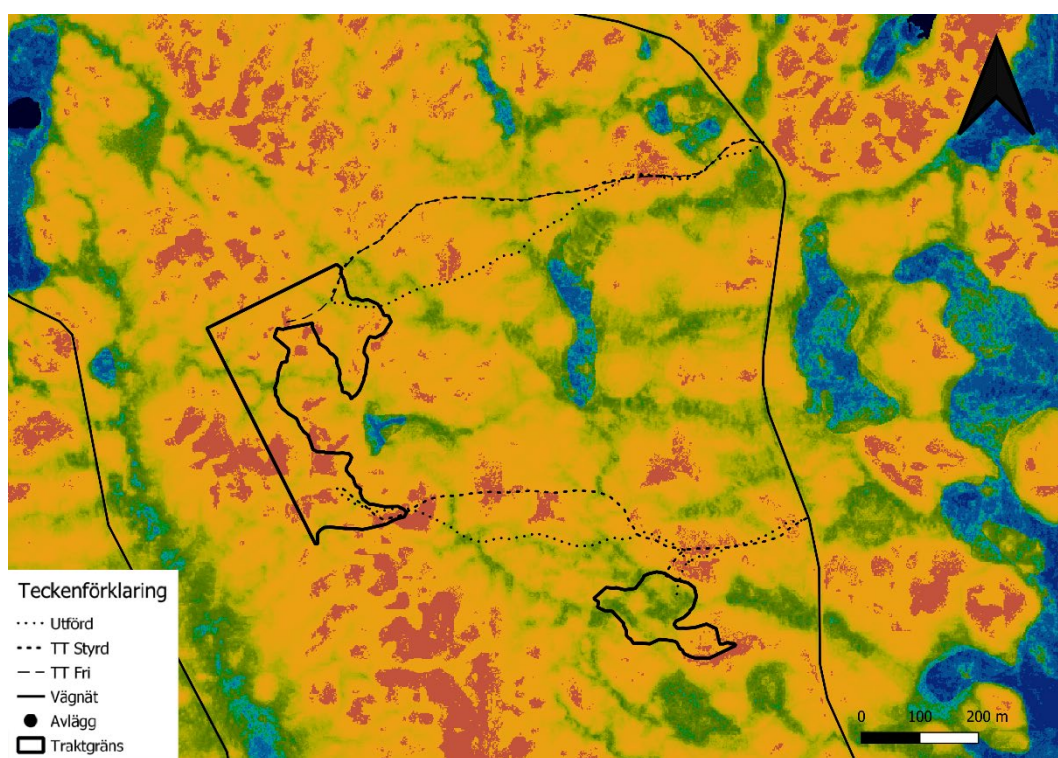
Sa 12



Sa 13



Sa 14



Sa 15