

Utvärdering av möjligheter att utveckla dagsaktuella riskindex för spårbildning

EVALUATION OF POSSIBILITIES FOR DEVELOPING A DAILY RISK INDEX FOR RUTTING



FOTO: LARS ELIASSON

Summary

Planning of harvesting operations can be improved by modelling temporal variation of the soil bearing capacity. This can assist in scheduling forest stands with insufficient ground bearing capacity for harvest during the winter periods with frozen soil, or in dry summers. The natural conditions in the soil in these periods are believed to improve ground bearing capacity, which reduces the risk of rutting after terrain transport.

We examined the relationships between rutting and several explanatory variables estimated by a hydrological model, S-HYPE (developed by Swedish Meteorological and Hydrological Institute), together with field and GIS data. The aim was to evaluate possibilities for developing an index describing the risk for rutting on a daily basis.

The results indicated that none of the S-HYPE variables, given current resolution, can effectively improve description of the variation of 'rut depth' within the stands or 'proportion of roads with ruts' between the stands. This could depend on several factors, including that the S-HYPE-model is mainly intended for simulating flow channels over large watershed areas (700-1000 ha). This may have caused the model to miss the variation in ground bearing capacity within/between stands, which is greatly affected by the spatial variation of soil type, moisture, and vegetation.

Further development of the model by using more local parametrization/validation is recommended to enable use of the S-HYPE model in developing a risk index for rutting on a daily basis. Using S-HYPE modelled soil moisture to adjust the threshold value of watershed area when producing DTW maps could be a possible alternative to generate more dynamic soil moisture maps.

Förord

I denna studie har vi utvärderat möjligheterna att utveckla dagsaktuella ”riskindex för spårbildning” med hjälp av en hydrologisk modell, framtagen av Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI), för att förbättra planering av avverkningarbeten. Vi vill tacka Stiftelsen Skogssällskapet för finansiering av projektet.

Uppsala, april 2020

Sima Mohtashami

Innehåll

Summary.....	2
Förord	3
Sammanfattning	5
Bakgrund	6
Målbeskrivning	7
Material och metod.....	8
Fältinventerade data	8
HYPE-data	8
GIS-data	8
Databearbetning och statistiska analyser	9
1) Analys av variationen av spårdjupen inom trakterna	9
2) Analys av variationen av andel skadad körväg mellan trakterna	10
Programvaror.....	10
Resultat	11
Semivariogram och identifiering av autokorrelationsavståndet	11
Val av minsta avstånd för resampling.....	12
Analys rörande variationen av spårdjupen inom trakter.....	13
PLS (Partial least square analysis)	13
Generaliserade linjära modeller	15
Analys av variationen av andel skadad körväg mellan trakterna	16
Diskussion	18
Slutsatser	20
Referenser.....	21
Bilaga. HYPE-modellerade variabler med respektive enhet och beskrivning	23

Sammanfattning

Avverkningsplaneringen kan förbättras genom att möjliggöra modellering av den temporala variationen av markens bärighet. Detta för att schemalägga avverkning av trakter med sämre markförhållanden till vinterperioder med tjäle (eller torrare sommarperioder) då markens bärighet har förbättrats, vilket minimerar spårbildning till följd av terrängtransporter. I den här studien har vi tittat på sambandet mellan spårbildning och en rad olika markvariabler skattade av en hydrologisk modell, S-HYPE utvecklad av SMHI, samt fält- och GIS-data. Syftet var att utvärdera möjligheten att utveckla ett dagsaktuellt ”riskindex för spårbildning”.

Resultatet visade dock att inga av S-HYPE-modellens markvariabler, givet dagens upplösning, kan förbättra förklaringen av variationen av ”spårdjupen” inom trakterna eller ”andel skadad körväg” mellan trakterna på ett effektivt sätt. Detta kan bland annat bero på att S-HYPE-modellen huvudsakligen är utvecklad för beräkning av utflöde över stora avrinningsområden (700–1000 ha) och därmed inte fångar upp variationen i markbärighet inom/mellan trakterna, vilken till stor del bestäms av den spatiala variationen av jordart, fuktighet och vegetation. Vidare utveckling av modellen genom mer lokal validering/parameterinitiering rekommenderas för att kunna utveckla det dagsaktuella indexet som beskriver risk för spårbildning. Att använda S-HYPE-modellerad markfukt för att justera tröskelvärdet på arealen av avrinningsområden vid tillverkning av DTW-kartor kan däremot vara ett möjligt alternativ för att skaffa mer dynamiska markfukthetskartor.

Bakgrund

Det har blivit ett allt större fokus på att minimera uppkomsten av körskador vid slutavverkning och gallring. Det helmekaniserade avverkningsarbetet i kombination med ett allt intensivare skogsbruk, med ökade krav på leveranser "just-in-time" året runt innebär högre risk för körskador. Denna risk ökar ytterligare på grund av förändringar i klimatet, mer nederbörd i form av regn tillsammans med längre vinterperioder utan tjäle minskar markens bärighet under delar av året. I en studie av hur avverkningsförhållandena påverkas av klimatförändringen i de boreala skogsmarkerna visar Lehtonen m.fl. (2019) att vinterperioderna med frusen mark, och därmed ökad bärighet för transport med tunga skogsmaskiner, kommer att bli ca en månad kortare redan vid mitten av tjugohundratalet.

Det finns en stor samsyn i skogsbruket om behovet av förbättrad hänsyn till mark och vatten och även skogsvårdslagen (2014 §7:28) ställer krav på detta. Skogsbruket har formulerat en gemensam policy för att minimera skadorna (Skogsindustrierna 2011) samt tillsammans med Skogsstyrelsen formulerat "Målbilder för god miljöhänsyn" (Andersson m.fl. 2013). Att nå de mål som fastställts i lag, policy och målbilder är en omfattande utmaning som kräver insatser inom flera områden. Skogforsk arbetar med att minska den skadliga markpåverkan genom att exempelvis utveckla definitioner för körskador samt beskriva och kvantifiera problemen (Berg 2011, Mohtashami m. fl. 2016), utveckla och testa nya maskiner och tekniska hjälpmedel (Löfgren 2016) samt förse skogsbruket med kartunderlag och beslutsunderlag för bättre traktplanering (Bergkvist m. fl. 2014).

Körskador kan orsaka tillväxtförluster och erosion, vara en inkörsport för röta, se illa ut och påverka markens funktion samt bidra till ökad metylering av kvicksilver. Skadorna kan grovt indelas i markkompaktering och spårbildning. Markkompaktering, som innebär minskad porvolym i marken, orsakar bland annat försämrad infiltration och vatten-transport i marken (Hansson m.fl. 2019), medan spårbildning ger ett negativt intryck och orsakar rotskador, vattensamlingar och risk för erosion (Cambi m.fl. 2015). Faktorer som maskinens axellast och marktryck, antal överfarter samt markens bärighet, som i sin tur är beroende av bland annat jordart och markens fuktighet, är betydelsefulla för både markpackning och spårbildning (Håkansson 2000, Eliasson 2005, Sakai m.fl. 2008, Ågren m.fl. 2015).

Att planera dragningen av bas- och stickvägar efter markfuktighetskarter är ett framgångsrikt sätt att minska spårbildningen (Friberg & Bergkvist 2016). Markfuktighetskarterna, eller Depth to Water (DTW) maps (Arp m.fl. 2008), används idag som ett stöd till maskinförarna så att de ska kunna undvika fuktiga partier och se var de bör förstärka vägarna med grenar och toppar för att minska risken för körskador. Kartorna är baserade på algoritmer som utifrån topografi, det vill säga höjd och lutning, beskriver hur regnvattnet rör sig i terrängen. Modellen inkluderar inte mängden nederbörd och levererar därför statiska skattningar på markens fuktighet. Att variera tröskelvärden för den storlek på avrinningsområdet som behövs för att initiera ett flöde och därigenom anpassa karterade vattenflöden och blöta områden efter årstiden är ett sätt att inkludera de temporala variationerna i DTW-karterna (White m.fl. 2012, Ågren m.fl. 2015). Jones m.fl. (2017) modellerade säsongsanpassade kartor som visualiserar risken för spårbildning av "all-terrain vehicles" över barmark i tre olika typer av skogar i Kanada genom att mäta och modellera markens konmotstånd och relatera detta till säsongsrepresentativa DTW-karter. De konstaterade att karteringsmetoden ännu är väldigt regional och fler studier behövs för att kunna generalisera metodiken över större arealer.

En möjlighet för att förbättra planering av körvägar är att styra avverkningen mot trakter med låg bärighet då marken är frusen eller torr och motsatt avverka trakter med hög bärighet under tjällossning och regniga höstar. Redan idag görs en grov sortering av trakterna baserad på under vilken årstid de lämpligen ska avverkas, men i många områden är det brist på trakter med tillräckligt hög bärighet. Marker med mycket goda grundförhållanden utgör endast 5,2 procent av skogsmarken (Svensson & Braide 1987); däremot återfinns 45,2 procent av marken i den näst bästa klassen och dessa marker kan avverkas under större delen av året om man tar hänsyn till markfukt och tjällossning (Berg 1982).

Ett, ännu outnyttjat, alternativ för traktval är att skatta markens bärighet med hjälp av hydrologiska modeller och därifrån utveckla ett index som beskriver risken för spårbildning. Beroende på syftet med utvecklingen av hydrologiska modeller, fokuserar de på olika processer som vattnet ingår i inom olika markskikt och därför kan markfuktighets-skattningar från olika hydrologiska modeller variera jämfört med varandra och jämfört med fältmätningar över ett område (Tyystjärvi 2019).

SMHI har sedan ca tio år utvecklat en hydrologisk modell, **HYPE** (**HY**drological **P**rediction for **E**nvironment) (Lindström m.fl. 2010) för simulering av vattenflöden och omsättning av vatten och näringsämnen som kväve och fosfor. Den uppsättning av HYPE-modellen som är utvecklad för svenska förhållanden heter S-HYPE och används sedan 2013 som underlag för den hydrologiska prognos- och varningstjänsten i Sverige. SMHI har goda beräkningsresurser och daglig övervakning av beräkningarna. För att skatta risken för körskadorna med hjälp av S-HYPE-variabler, exempelvis dagsaktuell markfuktighet, marktemperatur och tjäldjup, behöver man undersöka till hur stor del körskadorna kan förklaras av olika variabler från S-HYPE och hur stor del som förklaras av andra terrängfaktorer (jordart, topografi) och drivningsrelaterade parametrar (antal överfarter och förstärkning av vägarna med ris).

MÅLBESKRIVNING

Målet med studien var att undersöka möjligheten att utveckla ett dagsaktuellt "riskindex för spårbildning" baserat på S-HYPE-data, ungefär på samma sätt som vi idag har brand-riskindex beräknat av SMHI. Indexet skulle kunna vara uppdelat på avrinningsområde och jordart inom detta område. Indexet skulle också kunna möjliggöra en prognos för risken för spårbildning de kommande tio dygnet baserat på aktuell meteorologisk tiodygnsprognos. Riskindexet skulle kunna beräknas dagligen och göras tillgängligt av SMHI.

För att göra detta har sambandet mellan spårbildning samt dess variation inom och mellan avverkningstrakter och förklaringsvariabler från S-HYPE och skogliga register/kartmaterial analyserats. Detta görs för att utvärdera vilka förklaringsvariabler som skulle kunna användas för att utveckla dagsaktuella "riskindex för spårbildning", för att förbättra drivningsplaneringen.

Studien sökte svar på följande frågor:

1. Kan S-Hype-modellerade variabler förbättra beskrivningen av spårdjupens variation inom avverkningstrakterna?
2. Kan de S-Hype-modellerade variablerna förklara variationen i andel skadad körväg mellan de studerade avverkningstrakterna?

Material och Metod

I studien utnyttjades ett tidigare inventerat material över spårbildning som hade samlats in för utvärdering av implementeringen av markfuktighetskarter och nya arbetsrutiner i operativ drift (Friberg & Bergkvist 2016). I det projektet deltog åtta skogsföretag som försåg Skogforsk med ca fem avverkningstrakter vardera. Totalt avverkades 35 trakter med en total areal på 446 ha under avverkningssäsongen 2014–15. Trakterna är fördelade från 58:e till 65:e breddgraden i Sverige. Av detta material matchade 27 trakter, 341 ha, kraven för denna studie. Studiens ingående data utgörs av fältinventerade data av faktiska körspår, HYPE-data med hydrologiska variabler samt GIS-data med olika skikt.

FÄLTINVENTERADE DATA

På varje trakt totalinventerades spårbildning längs samtliga körvägar i form av punktobservationer, där ett körspår definieras av att mineraljord blottlagts och spåret är minst en decimeter djupt och en meter långt. En koordinatsatt observation i fält kan innehålla information om upp till fyra spår. Spårens djup och längd klassades okulärt i fördefinierade klasser, spårens djup i tre klasser: 10–20 cm, 21–50 cm eller > 50 cm, och spårens längd i fyra klasser: 1–5 m, 6–10 m, 11–20 m och > 20 m. Körvägen klassades också efter antal överfarter (avläggsväg, basstråk och körstråk) och dessutom angavs om körvägen var oskyddad eller skyddad genom tillfört ris, stockar eller brobygge. Den sistnämnda variabeln klassificerades sedan om till den binära formen skyddat/ej skyddat under attributen ”markskydd”.

HYPE-DATA

I den svenska HYPE-modellen (S-HYPE) är hela landet indelat i ca 37 000 hydrologiska delavrinningsområden med en typisk delområdesarea på ca 700–1000 ha. Dessa delområden är i sin tur indelade i totalt 65 kombinationer av markanvändning och jordart. Jordartsinformationen baseras på SGU:s jordartsdatabas, och de jordarter som används i S-HYPE är: torv, finjord/lera, silt, grovjord, morän, tunna jordar/kalt berg och isälvs-material. I S-HYPE beräknas olika hydrologiska variabler som kan påverka markens bärighet, bland andra markfuktighet, grundvattennivå, snöförhållanden, marktemperatur och tjäldjup i form av tidsserier (se bilaga). Dessa beräknas för alla delområden och för respektive jordart inom delområdet. Innan S-Hype-variablerna kunde användas i de statistiska analyserna extraherades först de aktuella värden som motsvarade avverkningsperioden för respektive trakt. Därefter vägdes S-HYPE-variablerna samman i de fall trakterna berörde flera delområden/jordarter. Detta genomfördes med hjälp av programvarorna ArcGIS 10.7 och MS Access.

GIS-DATA

Utöver S-Hype-data användes GIS-data i form av SGU:s jordartskarta, Skogsstyrelsens markfuktighetskarta och den digitala terrängmodellen (DTM). Markfuktighetskartorna klassificerades om till binärt blött/torrt-index för att förenkla hantering av det kartografiska fuktighetsindexet.

DATABEARBETNING OCH STATISTISKA ANALYSER

Variationen i materialet hanterades på två olika sätt: 1) analys av variationen av spårdjupen inom trakterna, 2) analys av variationen av andel skadad körväg mellan trakterna.

1) Analys av variationen av spårdjupen inom trakterna

Eftersom körspåren hade totalinventerats för annat ändamål än de nu utförda statistiska analyserna, var det ofta tätt mellan observationerna, så de behövdes glesas ut (resamplas) för att undvika redundans i databasen. Detta gjordes genom att först kontrollera för autokorrelation i variablerna körspårens djup och längd. Autokorrelation betyder i detta fall att körspår som ligger tätt sannolikt är likartade, och att sannolikheten för lika körspår avtar med avståndet mellan körspåren. Autokorrelation introducerar därmed en korrelationsstruktur som motsäger det grundläggande statistiska antagandet om oberoende observationer. Denna struktur kan modelleras och kompenseras för via konstruktionen av ett så kallat semivariogram. Semivariogrammet skapades med hjälp av ”Indicator Kriging anpassat för klassificerade data” i ArcGIS (Figur 2). Detta resulterade i ett genomsnittligt korrelationsavstånd om 114 meter, vilket är det minsta avstånd mellan körspår som genomsnittligt garanterar oberoende observationer. Att resampla från 10 meter till 114 meter innebar emellertid en alltför drastisk reduktion av körspårobservationer. Det hanterades genom att pröva resampling-tekniken i omgångar i GIS, för att testa hur provernas storlek varierar när olika avstånd, från 10–120 meter mellan körspåren ställs som villkor (Figur 3). Det optimala avståndet, där det resulterande samplet balanserar mellan rimligt stark kvarvarande autokorrelation och tillräcklig storlek, visade sig vara minst 35 meter mellan körspåren. Detta användes till det slutliga genomförandet av resampling-tekniken i GIS, som ledde till skapandet av två sampel bestående av 896 st och 860 st observationer ur det ursprungliga materialet, vilka gick vidare till den statistiska inferensen.

Koppling av S-Hype-variabler mot körspåren gjordes genom att väga samman variablerna från S-HYPE-modellerade tidsserier med hjälp av information om när avverkningar skedde, vilka de berörda avrinningsområdena var och vilka jordarter som fanns däri. Sammanvägning gjordes genom att först beräkna ett medianvärde på längd- och djupklasserna över de underliggande spåren till varje koordinatsatt observation, och skapa en buffert kring varje punkt med en radie på hälften av spårlängdens median. Sedan beräknades andelen olika jordarter till varje buffrad observation för att använda som proportionsfacit vid sammanvägningen av S-HYPE-variabler.

Förutom körspårobservationen skapades även två nya dataset bestående av punkter över körvägar utan körskador. På så sätt kunde vägarna med nollskador kombineras med de inventerade körspåren, för att därigenom öka kontrasten i materialet och undersöka skillnaden mellan skadade och icke-skadade körvägar. Till icke-skadade observationer valdes en buffertcirkel med 2 m radie för extrahering av berörda jordarter/avrinningsområde.

Den beroende variabeln i analysen av spårdjupens variation inom trakterna är frekvens per skadekategori (inom de fördefinierade klasserna), vilken torde följa en Poisson-fördelning. Förklaringsvariablerna, förutom S-Hype-variablerna, är vägklasser, markskydd, markfuktindex (DTW), höjd över havet (DTM), SGU:s jordarter, årstid då avverkning genomfördes samt alla relevanta interaktioner mellan dessa variabler.

För att kunna fånga upp variationen av körspårens djup utifrån de listade variablerna på ett effektivt sätt, det vill säga reducera dimensionaliteten i datasetet och samtidigt bibehålla den maximala variationen, genomfördes Partial Least Squares (PLS) Analysis. Med PLS extraheras oberoende komponenter som optimerar förklaringen av den variation som har observerats i den beroende variabeln. Analysen skapar därvid en rangordnad lista av förklaringsvariabler som fördes vidare till en generaliserad linjär modell som användes för att vidare inferera hur de landskapliga variablerna samverkar för att reglera spårbildningens omfattning. I det här steget används det ena av de två sampel som nämnts ovan som primärt ”analyssampel” och som ”korsvalideringssampel”. Detta tillåter den identifierade modellen att valideras med hjälp av ett dataset som inte har varit delaktigt i den primära modellutvecklingen. Denna procedur utfördes på två olikartade subset av förklaringsvariabler: 1) enbart data från fältinventeringar och GIS som förklaringsvariabler, 2) både data från fält och GIS samt S-HYPE-data som förklaringsvariabler. Hur stor andel av den observerade variationen av spårdjupen som de respektive modellerna lyckas förklara undersöktes genom en jämförelse av respektive Deviance-värden.

2) Analys av variationen av andel skadad körväg mellan trakterna

I denna analys sammanställdes de förklarande variablerna på traktnivå, och andel skadad körväg beräknades över olika kombinationer av väg- och markskyddsklasser (3*2 klasser). Detta gjordes genom att dela den totala längden körspår med motsvarande längd körväg i respektive skadeklass. Andelen fuktig markareal per trakt beräknades med hjälp av markfuktighetskartorna. S-Hype-variablerna hanterades på samma sätt som vid ovanstående beskrivning av hur körspårsbuffrar beräknades, fast med ny andel av jordart/avrinningsområde beräknat över trakterna.

Med ovanstående parametrisering blir den beroende variabeln ”andel skadad körväg” (ett tal mellan noll och ett) som analyseras med hjälp av en blandad linjär modell som utrustas med fixa och slumpmässiga variabler enligt nedan:

$$y_{ijklm} = \mu + a_i + b_j + c_k + s_m + e_{ijklm}$$

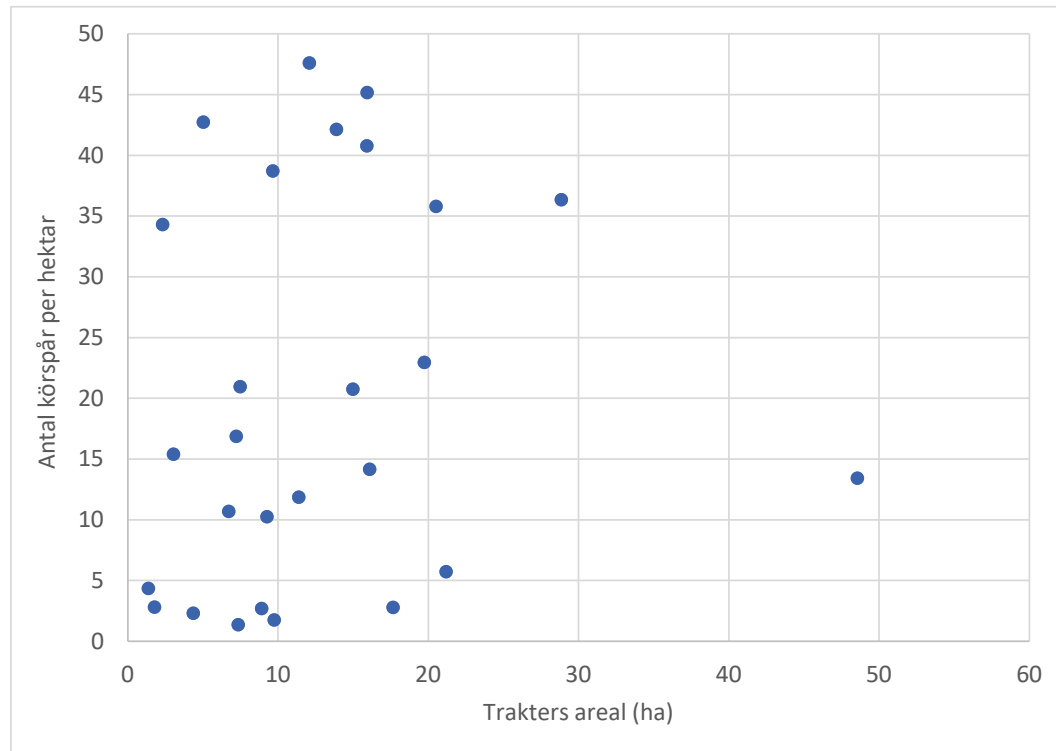
där y_{ijklm} är en logit-transformation av andelen skadad körväg för observationen $ijklm$, μ är overallmedelvärde, fixa faktorer är vägklass a_i , markskyddsklass b_j , samt c_k från de S-Hype-modellerade variabeln **Psim** som valdes med hjälp av PLS. s_m är den slumpmässiga effekten av trakterna, och e_{ijklm} det slumpmässiga residualfelet. Testets signifikansnivå sattes till standardmässiga $p < 0.05$.

PROGRAMVAROR

Kartbearbetning och Kriging-analyser genomfördes i ArcGIS 10.7. De multivariata analyserna (PLS och generaliserad linjär regression) genomfördes i Dell Statistica 13.0, och den blandade generaliserade modellen kördes i SAS Enterprise Guide 7.1 (PROC MIXED). Databashantering, där stora mängder data från olika källor sammanställdes, utfördes i ArcGIS 10.7, MS Excel och MS Access programvaror.

Resultat

Fördelningen av antal körspår per hektar över de inventerade trakternas areal visar att variationen i antalet körspår mellan olika trakter är stor, från 1 till över 48 registrerade spår per hektar (Figur 1). I diagrammet syns att nio trakter har ett relativt stort antal körspår jämfört med de övriga.



Figur 1. Fördelning av antal körspår per hektar över trakternas areal.

SEMIVARIOGRAM OCH IDENTIFIERING AV AUTOKORRELATIONSAVSTÅNDET

Ett semivariogram gällande de observerade körspåren skapades med hjälp av så kallad "Indicator Kriging". Semivariogrammet konstruerades, i princip, genom att plotta kvadratskillnaderna mellan parvisa spår djup observerade på avståndet h (Distans), mot avståndet h (Figur 2) enligt:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \times \sum_{n=1}^{N=h} [Z(n) - Z(n+h)]^2$$

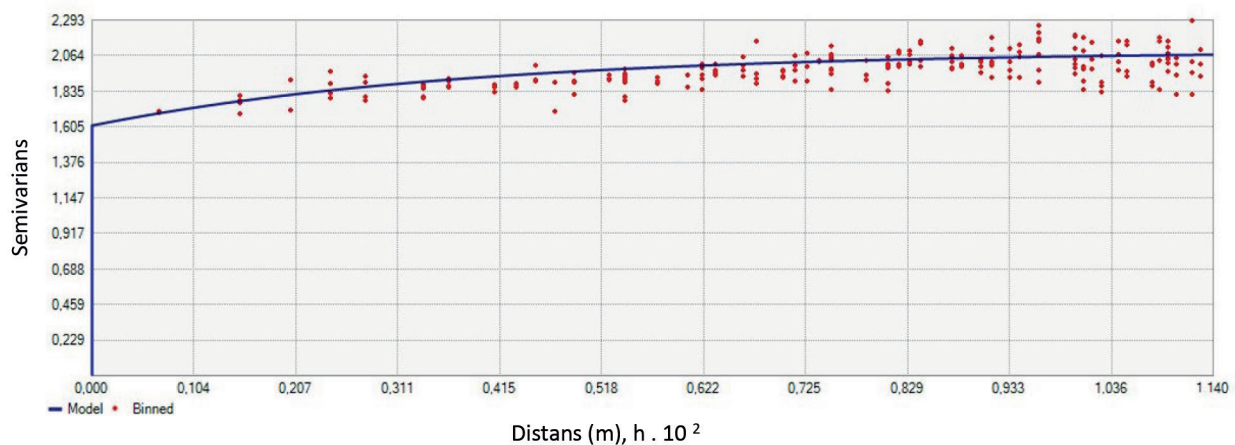
$\gamma(h)$: Semivariansvärdet

$N(h)$: antal parvisa observationer inom separeringsdistans h

$Z(n)$: spår djupet för observation n

$Z(n+h)$: spår djupet för observation $n+h$

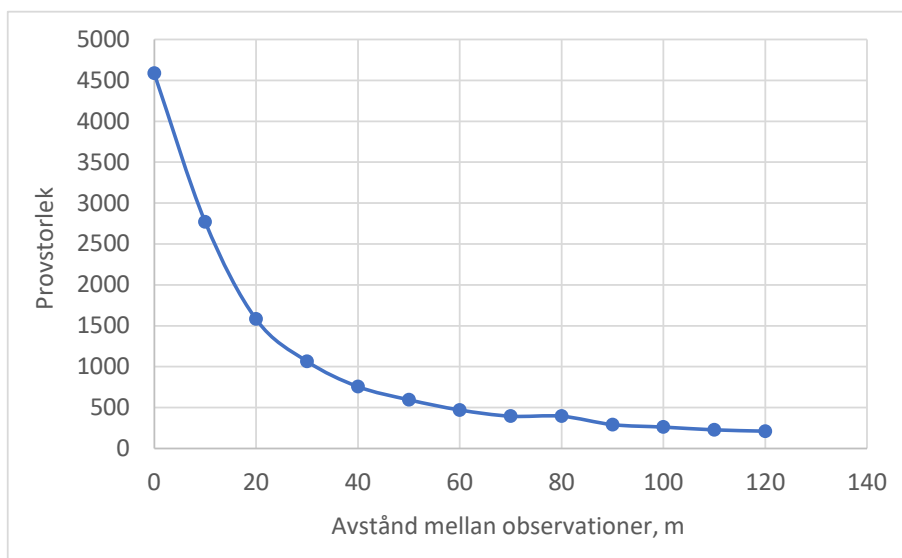
I semivariogrammet framgår att ju större avstånd mellan körspåren desto större skillnad i spår djup mellan observationerna. Den här trenden fortsätter tills avståndet mellan körspåren når ca 114 m, och därefter jämnas grafen ut; det vill säga ingen ytterligare ökning i värdena på Y-axeln observeras. Detta kallas för autokorrelationsavstånd (eller autokorrelationsradie), inom vilket de observerade körspåren sannolikt ligger över liknande markförutsättningar som leder till uppkomst av körspår med likartat djup. Detta betyder att observationer inom korrelationsradien riskerar att vara beroende. När körspåren blir mer avlägsna, det vill säga när avståndet mellan dem överstiger 114 m i detta fall, övergår autokorrelationen i naturlig variation, som innebär att spår djupen kan betraktas som relativt oberoende observationer. Därmed är ett grundläggande villkor för vidare statistisk inferens uppfyllt.



Figur 2. Semivariogram som visar hur kvadratskillnaden i spår djup varierar med distans. För att förenkla variansberäkningen grupperades (Binned) observationerna, det vill säga körspåren, baserad på en separeringsdistans (lag size) på 9,5 m i detta fall. Semivariogram-molnet modellerades sedan med en exponentiell funktion (blå line) för att visualisera variationen.

VAL AV MINSTA AVSTÅND FÖR RESAMPLING

När det minsta tillåtna avståndet ökar mellan de parvisa observationerna, minskar antalet observationer (provstorlek) som blir kvar i ett sampel som slumpats ut av det ursprungliga samplet (Figur 3). Som framgår av figuren börjar minskningen utjämnas vid ett avstånd på ca 35 m, vilket är det avstånd som valdes för slumpmässigt uttag av två nya sub-sampel ur det ursprungliga samplet (resampling utförd i ArcGIS).



Figur 3. Visualisering av hur provernas storlek minskar med ökat minsta avstånd mellan observationerna.

ANALYS RÖRANDE VARIATIONEN AV SPÅRDJUPEN INOM TRAKTER

PLS (Partial least square analysis)

PLS-analysen av resamplade observationer med fält- och GIS-data som förklaringsvariabler resulterade i identifieringen av två signifikanta komponenter som beskriver ungefär 8 procent av den variation som har observerats i den beroende variabeln, det vill säga i frekvensen spårdjup fördelat i de olika spårdjupklasserna (Tabell 1).

Tabell 1. Resultat av PLS-analys över resamplade observationer med fält- och GIS-data som förklaringsvariabler. 7,95 procent av variationen av spårdjupen inom trakterna förklaras av de två extraherade komponenterna.

Komponenter	Eigenvalue	Limit	R2Y (Cumul.)	Signifikans	Iterationer
1	2,54	0,00	0,035904	Signifikant	22
2	1,51	0,00	0,079523	Signifikant	2

Med PLS-analysen skapades även en rangordnad lista som beskriver hur mycket var och en av de fältinsamlade variablerna och GIS-variablerna har bidragit till de komponenter som har extraherats enligt ovan (Tabell 2).

Tabell 2. Rangordnad lista över vikten av fältinsamlade variabler och GIS-variabler i de extraherade komponenterna.

Variable	VIP	Importance order
Marskydd {Ej skyddat}	1,8	2
Marskydd {Skyddat}	1,8	2
Väggklass {Basstråk}	1,3	3
Jordart {Torv}	1,2	4
Årstid {Vår}	1,1	5
Väggklass {Körstråk}	1,1	6
Årstid {Sommar}	1,1	7
Jordart {Morän}	0,8	8
Årstid {Höst}	0,8	9
Väggklass {Avläggsavag}	0,7	10
DTM	0,7	11
Jordart {tunn jord och kalt berg}	0,6	12
Jordart {finjord/lera}	0,5	13
DTW {torr}	0,4	15
DTW {blött}	0,4	15
Årstid {vår}	0,2	16
Jordart {Isälvssediment}	0,2	17
Årstid {vinter}	0,1	18

När S-HYPE-variabler adderades till de ovan nämnda förklaringsvariablerna resulterade PLS-analysen i en enda komponent, varmed ungefär 3 procent av den observerade variationen av spårdjupen kunde förklaras. Komponenten är dock inte statistiskt signifikant (Tabell 3).

Tabell 3. Resultat av PLS-analysen över kombinationen av fältinsamlade variabler och GIS-variabler tillsammans med S-HYPE-variabler; 2,98 procent av variationen av spårdjupen inom trakterna förklaras av den extraherade komponenten.

Komponenter	Eigenvalue	Limit	R2Y (Cumul.)	Signifikans	Iterationer
1	5,357157	0,00	0,029811	Ej Signifikant	40

Den rangordnade lista som beskriver hur förklaringsvariablerna bidragit till den extraherade komponenten visas i Tabell 4.

Tabell 4. Rangordnad lista över vikten av fält-, GIS- och S-HYPE-variablerna i den extraherade komponenten.

Variable	VIP	Importance order
Jordart {Torv}	2,4	1
Årstad {Vår}	1,9	2
Smdf {HYPE}	1,9	3
Väggklass {Basstråk}	1,9	4
Väggklass {Körstråk}	1,8	5
Sml2 {HYPE}	1,7	6
Jordart {Morän}	1,6	7
Årstad {Höst}	1,4	8
Cprc {HYPE}	1,3	9
Prec {HYPE}	1,2	10
Psim {HYPE}	1,2	11
DTM	1,1	12
Som2 {HYPE}	1,0	13

Generaliserade linjära modeller

I nästa steg användes de fält- och GIS-variabler som har identifierats i PLS-analysen, tillsammans med adekvata interaktionstermer, i en baklänges stegvis generaliserad linjär regression. Detta förfarande resulterade i identifieringen av de variabler som optimerar modellbeskrivningen av hur spårens djup varierar inom trakterna (Tabell 5). Det mått som beskriver hur väl den resulterande modellen lyckas förklara den observerade variationen kallas allmänt "Goodness of fit", och det specifika mått som används när den statistiska populationen ej kan antas vara normalfördelad kallas "deviance" (avvikelse). Med de identifierade variablerna erhålls ett deviance-värde om 9,7 i analysprovet, och om 9,5 i korsvalideringsprovet.

Tabell 5. Den regressorbas som byggs i en baklänges stegvis generaliserad linjär regression över de topprankade fält- och GIS-variablerna enligt PLS-analysen.

Effekt	Degr. of Freedom	LogLikelihood	ChiSquare	p
Marksydd	1	-7283,89	15,98	0,000064
Väggklass	2	-7530,59	509,39	0,000000
Jordart	4	-7513,52	475,24	0,000000
Årstad	4	-7321,11	90,42	0,000000
DTW	1	-7374,65	197,51	0,000000
Väggklass*DTW	2	-7342,40	133,00	0,000000
Marksydd*Väggklass	2	-7310,82	69,86	0,000000
DTW*DTM	1	-7318,99	86,18	0,000000

När metoden ovan upprepas för de topprankade PLS-variablerna, där både fält- och GIS-variabler samt S-HYPE-variabler ingår, identifieras den regressorbas som beskrivs i Tabell 6. I detta fall deviance-värden om 9,5 i analysprovet och 9,3 i korsvalideringsprovet.

Tabell 6. Den regressorbas som byggs i en baklänges stegvis generaliserad linjär regression över de topprankade fält-, GIS- och S-HYPE-variablerna enligt PLS-analysen..

Effekt	Degr. of Freedom	LogLikelihood	ChiSquare	p
Sml2 {HYPE}	1	-7306,15	305,57	0,000000
Smdf{HYPE}	1	-7174,58	42,43	0,000000
Årstim	4	-7230,00	153,27	0,000000
Prec {HYPE}	1	-7174,85	42,97	0,000000
Psim {HYPE}	1	-7174,66	42,60	0,000000
DTM	1	-7225,08	143,33	0,000000
Som2 {HYPE}	1	-7193,33	79,93	0,000000
Vägryp	2	-7362,93	419,13	0,000000
Jordart	4	-7269,99	233,25	0,000000

En tolkning av detta är att introduktionen av S-HYPE-variabler inte tillför någon förklaringsgrad, jämfört med den precision som de ursprungliga fält- och GIS-variablerna erbjuder.

ANALYS AV VARIATIONEN AV ANDEL SKADAD KÖRVÄG MELLAN TRAKTERNA

Med hjälp av en blandad linjär modell analyserades en kombination av fält- och S-HYPE-variabler med avsikten att undersöka om variationen i andel skadad körväg (beroende variabel) mellan trakterna kan förklaras med en (ortogonal) linjärbesättning av regressorer (Tabell 7).

Tabell 7. Resultatet av en blandad linjär modell över ett urval av fält- och S-HYPE-variabler.

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effekt	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Marskydd	1	75	76,98	<0,0001
Vägryp	1	75	119,13	<0,0001
Psim	1	75	0,22	0,6371

Analysen resulterade i en modell där "markskydd" och "antal överfarter" identifieras som signifikanta förklaringsvariabler ($p < 0,0001$), medan Hype-mått för nederbörd (**Psim**), identifieras som icke signifikanta ($p < 0,64$). Interaktionen av variablerna "markskydd" och "vägtyp" testades också i modellen, vilken visade sig vara inte signifikant ($P < 0,53$).

Analys av "least square means" av signifikanta faktorer visade att körvägar utan markskydd fick högre andel skador (18 procent) jämfört med skyddade körvägar där skadeandelen var 0,3 procent. Andel skadad väg för basvägar (med 6 till 10 överfarter) var 30 procent medan bara 0,18 procent av körstråken (med 1 till 5 överfarter) uppvisade skador (Tabell 8).

Tabell 8. Least square means av kategoriska variabler i analys av "andel skadad körväg" mellan trakterna.

Effekt	Markskydd	Väggklass	Baktransformerade Estimat	Error	DF	t-value	Pr > t
Markskydd	Oskyddad		0,18	0,2659	74	-10,28	<,0001
Markskydd	Skyddad		0,003	0,2621	74	-17,22	<,0001
Väggklass		Basstråk	0,3	0,2659	74	-9,47	<,0001
Väggklass		Körstråk	0,0018	0,2621	74	-18,05	<,0001

Diskussion

Resultaten av PLS-analyserna gällande fördelningen av spårddjup över olika kombinationer av förklaringsvariabler; det vill säga (1) enbart fältinsamlade variabler och GIS-variabler, och (2) en kombination av fält-, GIS- och S-Hype-variabler; tyder på att S-Hype-variablerna inte ökar förklaringsgraden jämfört med de förklaringsmodeller som enbart baseras på fältinsamlade variabler och GIS-variabler. Med enbart fält- och GIS-variabler kunde 7,9 procent av den observerade variationen i spårddjupen förklaras, medan 2,9 procent kunde förklaras med kombinationen av fält-, GIS- och S-Hype-variabler. Detta kan bero på att S-HYPE-variablerna korrelerar med de redan introducerade fält- och GIS-variablerna i modellen och därför inte kan öka förklaringsgraden jämfört med den första modellen.

Analysen på traktnivå, gällande andelen skadad körväg, identifierar ”markskydd” och ”antal överfarter” som signifikanta förklaringsvariabler ($p < 0,0001$), medan Hype-mått för nederbörd (**Psim**) inte har någon signifikant påverkan på modellen ($p < 0,64$).

Resultaten av denna studie visar att inga av S-HYPE-modellens markvariabler, givet dagens upplösning, kan förklara variationen av varken ”spårddjupet” inom trakterna eller ”andel skadad körväg” mellan trakterna på ett effektivt sätt. Detta kan bland annat bero på en del osäkerheter som har funnits inbyggda i indata, eller på att S-HYPE-modellen utvecklats för andra mål än den här tillämpningen. S-HYPE-modellen är byggd över olika klasser av markanvändning (skogs-/åkermark), höjddata och jordart. Jordartsinformationen tillförs av SGU:s jordartskarta, som har en varierande kvalitet och upplösning över landet, och sedan generaliseras vidare för att genomföra hydrologiska beräkningar över förhållandevis stora arealer på 700–1000 ha, vilket är mycket större än arealen för en typisk avverkningstrakt. Detta innebär att markfuktighetsmodelleringar med S-HYPE inte har den spatiala upplösningen som krävs för att skatta markens bärighet inom trakter eller fånga upp bärighetsvariationen mellan trakterna. S-HYPE-modellen är huvudsakligen utvecklad för att beräkna vattenflöden och omsättning av näringsämnen, som exempelvis kväve och fosfor, och används för övervakning av vattenresursers kvalitet. Detta innebär att en del detaljerad information, som vegetation eller jordart, generaliseras i modellen utan att påverka huvudprodukterna negativt, medan de kan ha större inverkan på skattning av markens fuktighet i ett mindre område.

Kalibrering och validering av S-Hype-modellen görs också med hjälp av mätdata över homogena typområden av dominerande karaktär, och alltså inte med lokal anpassning till SMHI:s enskilda mätstationer. Den valda valideringsmetoden gör det svårt att validera småskaliga förändringar och leder till en mindre detaljeringsgrad än önskat för mindre trakter. Hade det funnits möjlighet för lokal parametrering/validering av modellen och att därefter genomföra en känslighetsanalys för att utvärdera effekten av olika parametrar, så hade möjligheten varit större att kvantifiera anledningen till de observerade avvikelserna mellan modellerade variabler och variation av spårbildningen.

I en finsk studie (Tyystjärvi 2019) jämfördes den spatiala och temporal variationen av markens fuktighet skattad av hydrologiska modeller JSBACH (Roekner 2003), SpAFHy (Launiainen m.fl. 2019) och Ecohydrotools (Maclean 2018, 2019) över ett studieområde i nordvästra Finland både mot varandra och mot fältmätningar av markens fuktighet. Resultatet av denna studie visade att samtliga modeller hade svårigheter vid simulering av småskaliga spatiala variationer främst för torra delar av terrängen medan de fungerade

bättre vid simulering av den temporala variationen, även om den modellerade fukthalten skilde sig från de aktuella mätningarna. Det konstaterades också att mer spatialdetaljerade indata skulle krävas för att uppnå mer aktuella skattningar.

S-HYPE-modellens styrka är att beskriva hur de hydrologiska förhållandena varierar över tid vid en och samma punkt, snarare än skillnaderna inom små avrinningsområden vid en och samma tidpunkt. Denna styrka kan möjligen bidra till förbättring av markfuktighetskarter (DTW-karter) genom att anpassa tröskelvärden på avrinningsområdenas arealer som krävs för att kartera fuktiga partier efter den S-HYPE-modellerade markfukten över tiden. Detta gör att den temporala variationen av markens fuktighet indirekt hanteras i karteringstekniken och bidrar till tillverkning av mer dynamiska fuktighetskarter. Nya studier skulle dock krävas innan man kan säkerställa att den S-HYPE-modellerade markfukten kan fylla den här funktionen.

Det inventeringsmaterial över spårbildning som användes för att utvärdera S-HYPE-variablerna hade samlats för att utvärdera hur användning av markfuktighetskarter kan bidra till minimering av spårbildning. Det innebär att maskinförare/traktplanerare hade tillgång till markfuktighetskarter innan drivningsarbetet och anpassade körvägarna efter dessa. Körningarna genomfördes därmed inte slumpmässigt över trakterna, vilket måste tas hänsyn till vid tolkningen av utfallet. Resultatet av denna studie pekar ändå på att maskinförarna/traktplanerarna, med stöd av markfuktighetskarta, topografi och egen erfarenhet, anpassat vägdragning och markskydd på ett tillfredställande sätt. Möjligen är detta en viktig orsak till att hydrologiska variabler från S-HYPE inte tillför ytterligare förklaring av variationen i spårbildning.

Slutsatser

För att kunna prognostisera dagsaktuella ”riskindex för spårbildning” med hjälp av en hydrologisk modell tillämpbar för avverkningsplanering krävs att modellen är uppbyggd för att ta hänsyn till den småskaliga spatiala variationen i framför allt jordart och vegetation som finns inom relativt små avverkningstrakter. Den ska ha mer lokal validering och initiering av modellparametrar i sina beräkningar och ska ha inkluderat/fokuserat på de processer som är av mest betydelse vid skattning av markens fuktighet. Dessa faktorer saknas i dag i S-HYPE-modellen, vilket gör att vidareutveckling av modellen rekommenderas om man vill göra den användbar vid schemaplanering av avverkningstrakter eller dragning av körvägar inom trakterna.

S-HYPE-modellens styrka är att beskriva hur de hydrologiska förhållandena varierar över tiden, vid en och samma punkt, snarare än skillnaderna inom små avrinningsområden vid en och samma tidpunkt. Möjligen hade S-HYPE tillfört en ökad förklaringsgrad om fältmätningarna hade samlats in vid fler tidpunkter. Att använda S-HYPE-modellerad markfukt för att justera tröskelvärden på arealen av avrinningsområden vid tillverkning av markfuktighetskartor kan däremot vara ett möjligt alternativ för att skaffa mer dynamiska kartor.

Referenser

- Andersson, E., Andersson, M., Birkne, Y., Claesson, S., Forsberg, O. & Lundh, G. 2013. Målbilder för god miljöhänsyn. En delleverans från Dialog om miljöhänsyn. Rapport 5. Skogsstyrelsen, ISSN 1100-0295.
- Arp, P., Ogilvie, J., Castonguay, M. & Murphy, P.N.C. 2008. Enhancement of operational forest management planning through water mapping. FRIAA's FORWARD-UNB wet-area mapping project. Final Report 2008.
- Berg, S. 1982. Terrängtypsschema. Skogforsk (Forskningsstiftelse Skogsarbete).
- Berg, S. 2011. Vad är en körskada? Skogforsk Resultat nr 3.
- Balland, V., Pollacco, J. A. P. & Arp, P. A. 2008. Modeling soil hydraulic properties for a wide range of soil conditions. *Ecological Modelling*, 219(3-4), 300-316.
- Bergkvist, I., Friberg, G., Mohtashami, S. & Sonesson, J. 2014. STIG-projektet 2010-2014. Skogforsk. Arbetsrapport 818-2014.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F. & Marchi, E. 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124-138. doi:10.1016/j.foreco.2014.11.022
- Eliasson, L. 2005. Effects of Forwarder Tyre Pressure on Rut Formation and Soil Compaction. *Silva Fennica*, 39(4), 549-557.
- Friberg, G. & Bergkvist, I. 2016. Så påverkar arbetsrutiner och markfuktighetskartor körskador i skogsbruket. Skogforsk. Arbetsrapport 904-2016.
- Hansson, L. 2019. Impacts on forest operations on soil physical properties, water and temperature dynamics. *Acta Universitatis Agriculturae Scieciae* 2019:18.
- Håkansson, I. 2000. Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning-effekter-motåtgärder. SLU, Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, no 99.
- Jones, M.-F. & Arp, P. A. 2017. Relating Cone Penetration and Rutting Resistance to Variations in Forest Soil Properties and Daily Moisture Fluctuations. *Open Journal of Soil Science*, 07(07), 149-171. doi:10.4236/ojss.2017.77012.
- Launiainen, S., Guan, M., Salmivaara, A. & Kieloaho, A.-J. 2019. Modeling boreal forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: a spatial approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3457-3480.
- Lehtonen, I., Venäläinen, A., Kämäräinen, M., Asikainen, A., Laitila, J., Anttila, P. & Peltola, H. 2019. Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1611-1631.
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J. & Arheimer, B. 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41.3-4, 295-319.
- Löfgren, B. 2016. <http://www.skogforsk.se/nyheter/2016/banddrivet-fordon-kan-revolutionera-terrangtransporterna>.

- Maclean, I. M., Mosedale, J. R. & Bennie, J. J. 2018. Microclima: An r package for modelling meso-and microclimate. *Methods in Ecology and Evolution* 10(2), 280–290.
- Maclean, I. M. 2019. Ecohydrottools. url: <https://github.com/ilyamaclean/ecohydrottools>.
- Mohtashami, S., Nordlund, S., Krook, M., Bergkvist, I., Ring, E. & Högbom, L. 2016. Körskador vid slutavverkning – en inventeringsstudie i Mälardalen. Skogforsk. Arbetsrapport 896-2016.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L. & Manzini, E. 2003 . The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.
- Sakai, H., Nordfjell, T., Suadiciani, 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.
- Skogsindustrierna. 2011. Branschgemensam miljöpolicy om körskador på Skogsmark.
- Strömquist, J., Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C. & Lindström, G. 2012 Water and nutrient predictions in ungauged basins: set-up and evaluation of a model at the national scale, *Hydrological Sciences Journal*, 57:2, 229-247.
- Svensson, S.A. & Braide, A. 1987. Tekniska skogsdata, SLU, Institution för skogstaxering, Arbetsrapport 1.
- Tyystjärvi, V. 2019. soil moisture in process based modelling. Master thesis , University of Helsinki, Helsinki.
- White, B., Ogilvie, J., Campbell, D.M.H., Hiltz, D., Gauthier, B., Chisholm, H.K., Wen, H.K., Murphy, P.N.C. & Arp, P.A. 2012. Using the Cartographic Depth-to-Water Index to Locate Small Streams and Associated Wet Areas across Landscapes. *Canadian Water Resources Journal* 37(4), 333-347.
- Ågren, A., Lidberg, W., Ring, E. 2015. Mapping Temporal Dynamics in a Forest Stream Network – Implications for Riparian Forest Management. *Forests*, 6(9), 2982-3001.

Bilaga.

HYPE-modellerade variabler med respektive enhet och beskrivning

Namn	Enhet	Definition
temp	°C	air temperature, provided in Tobs.txt/Tobs_nnn.txt
ctmp	°C	corrected air temperature
snow	mm	snow water equivalent
sdep	cm	snow depth
soim	mm	computed soil moisture (including standing water)
som2	mm	soil water of upper two soil layers (including standing water)
sml1	mm	soil moisture upper soil layer (not including standing water)
sml2	mm	soil moisture second soil layer
sml3	mm	soil moisture third soil layer
smrz	mm	soil moisture root zone (upper two soil layers) (not including standing water)
sm13	mm	soil moisture all soil layers (not including standing water)
stsw	mm	standing soil water
srff	–	soil moisture root zone (upper two soil layers) (not including standing water) as fraction of wcfc volume
smfd	–	soil moisture (not including standing water) as fraction of soil depth
srfd	–	soil moisture root zone (upper two soil layers) (not including standing water) as fraction of root depth
smfp	–	soil moisture (not including standing water) as fraction of pore volume
srfp	–	soil moisture root zone (upper two soil layers) (not including standing water) as fraction of pore volume
smdf	mm	soil moisture deficit to field capacity of upper two soil layers
gwat	m	groundwater level
sfst	cm	frost depth
stmp	°C	soil temperature
stm1	°C	upper soil layer temperature
stm2	°C	middle soil layer temperature
stm3	°C	lowest soil layer temperature
cout	m ³ /s	simulated outflow from lake/subcatchment
prec	mm/(period)	precipitation as provided in Pobs.txt/Pobs_nnn.txt
cprc	mm/(period)	corrected precipitation
crun	mm/(period)	calculated local runoff from land area. Note that this is not the same as the flow to the local stream if floodplains are used
cross	mm/(period)	simulated surface runoff (ros1+ros2). Note that this is not the same as the flow to the local stream if floodplains are used
psim	mm/(period)	precipitation including water that will be removed as “interception losses”