



# KOHTI LUONNONMUKAISTA TÄSMÄPUUKORJUUTA

Jori Uusitalo, Omid Abdi, Ville Laamanen & Veli-Pekka  
Kivinen  
Metsäpäivät 24.10.2024



# LUONNONMUKAINEN TÄSMÄPUUHAKKUU (LUOMUHAKKUU) (MMM/RRF 2022-2024)

LUOMUHAKKUU –konsortio

- **HY - Metsätieteet (Prof. Jori Uusitalo/Prof. Jari Vauhkonen)**
  - **Arbonaut Oy**
  - **Tredu (Tampereen kaupunki)**
  - **Ponsse (oma rahoitus/omat tavoitteet)**
  - Metsäviestintä Oy (Viestintä)
  - Trimble forestry (Alihankkija)
  - Metsähallitus, Finsilva, Metsä Group
  - Metsäkeskus, MTK
- Budjetti 1,1 M€ (0,78 M€)
    - HY 0,8 M€ (0,56 M€)
    - Arbonaut Oy
    - Tredu
  - Kesto 1.5.2022 – 30.11.2024



# FOREST TECHNOLOGY RESEARCH GROUP



Post doc Zhu Mao



Prof. Jori Uusitalo



Doctoral student  
Ville Laamanen

Doctoral students (working elsewhere) :

- Harri Lindeman
- Antti Raatevaara
- Antti Laakkonen



University lecturer Veli-  
Pekka Kivinen

Post doc Omid Abdi

Master thesis (hired for short periods):

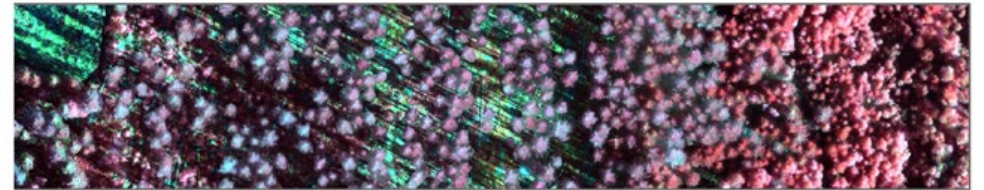
- Son Cao
- Kaarlo Koivukoski
- Tero Puukka



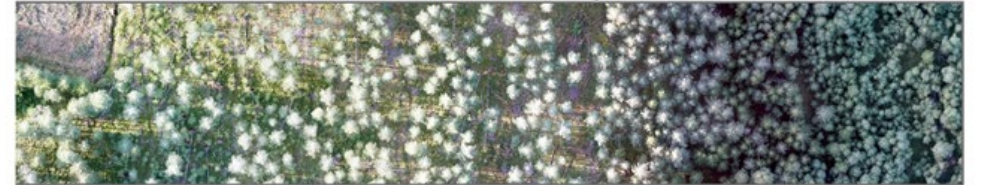
# LUOMUHAKKUU -TAVOITE

- **Tavoitteena** on kehittää, testata ja jalkauttaa käytäntöön joukko menetelmiä, joiden avulla metsäalan käytännön toimijat voivat toteuttaa luonnonmukaista täsmäpuukorjuuta
  - Puukarttatuotteet
  - Maalaji- ja kasvuolosuhde-ennusteet
  - Puuvalinta- ja metsänkäsittely
  - Ajoreittinen optimointi

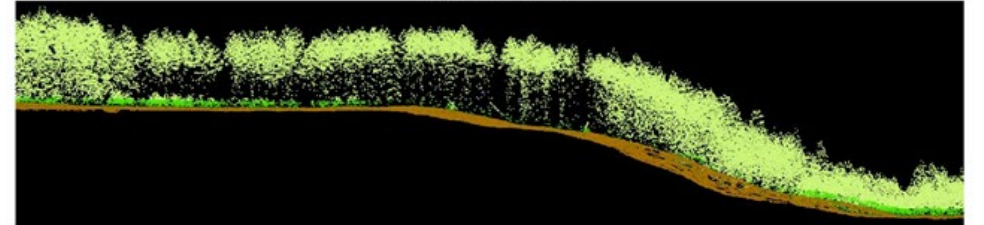
Multi-Spectral Data



Orthomosaic Image



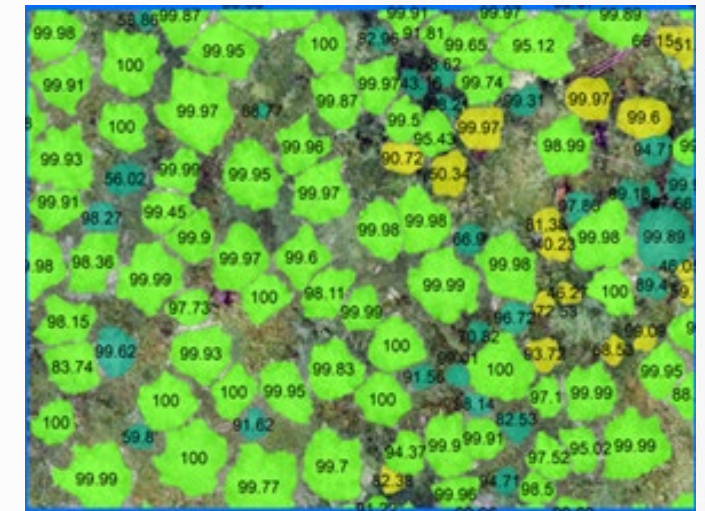
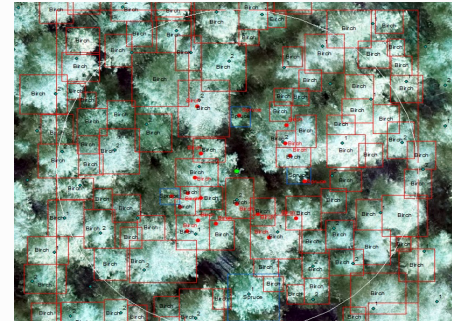
3D Point Clouds





# SYVÄOPPIMISEEN POHJAUTUVA PUUSTOTULKINTA

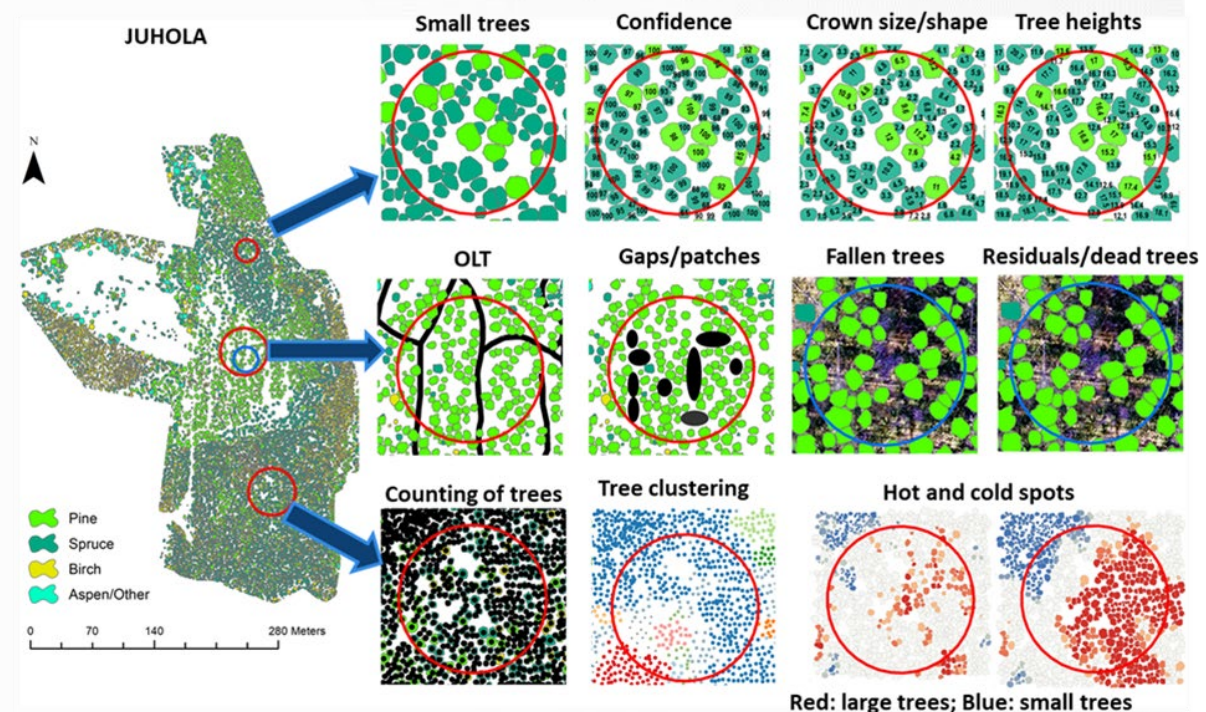
- Drone-inventointi (13 metsikköä)
  - Laserkeilaus (80-100 havaintoa/m<sup>2</sup>) + RGB ja Vääräväri (5 cm resoluutio)
- Puut opetetaan “labeloinnin” avulla
- Syväoppiminen vaatii valtavasti laskentatehoa – Tieteellinen laskentakeskus CSC Oy
- Valmiin mallin käyttö tavallisella mikrotietokoneella
- Puustotulkinnassa päästää yksittäisen puun osalta 80-90% tarkkuuteen





# SYVÄOPPIMISEEN POHJAUTUVA PUUSTOTULKINTA

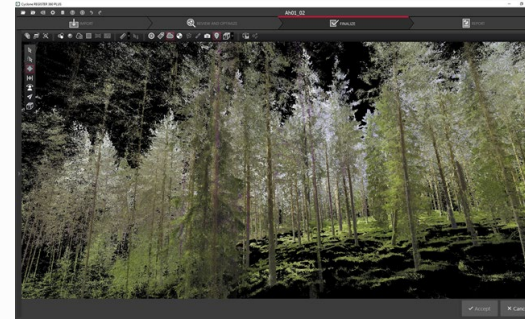
- Puustokartan avulla
  - Hakuutavan valinta (tasaikäis-/erikäiskasvatus)
  - Metsään syntyä luonnostaan vertikaalista ja horisontaalista vaihtelua – kunnioitetaan näitä (Luonnonläheisempi metsänhoito)
  - Metsänhoitopalstojen erottelu
  - Puuvalinta (Hakuukoneen kuljettajan työn tukeminen)



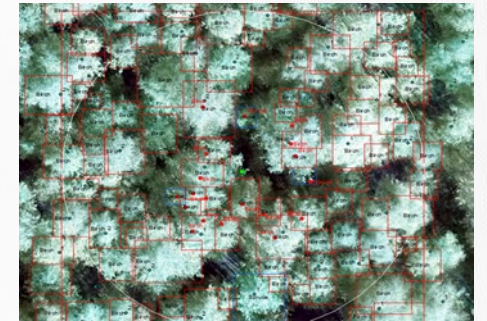


# LUONNON MONIMUOTOISUUDEN PAREMMIN HUOMIOON OTTAVA HAKKUUOPERAATIO

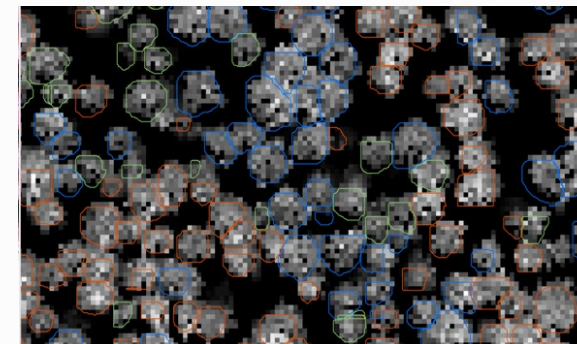
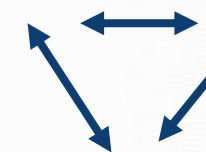
- Lentolaserkeilausdatan 1. sukupolvi – keskiössä puuston tilavuus
- Tulevaisuuden hakkuukartat – puukarttapohjainen visualisointi
  - Kuljettajan opastus puuvalinnassa
  - Metsän klusterointi
  - Metsikön luontaisten rakenteiden kunnioittaminen



TLS



HR-ALS/RGB/MS

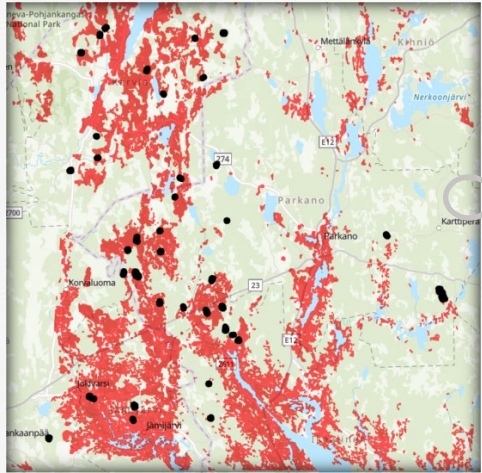


5p laser  
RGB 0,5m  
Vääräväri ,5 m



Koeleimikot

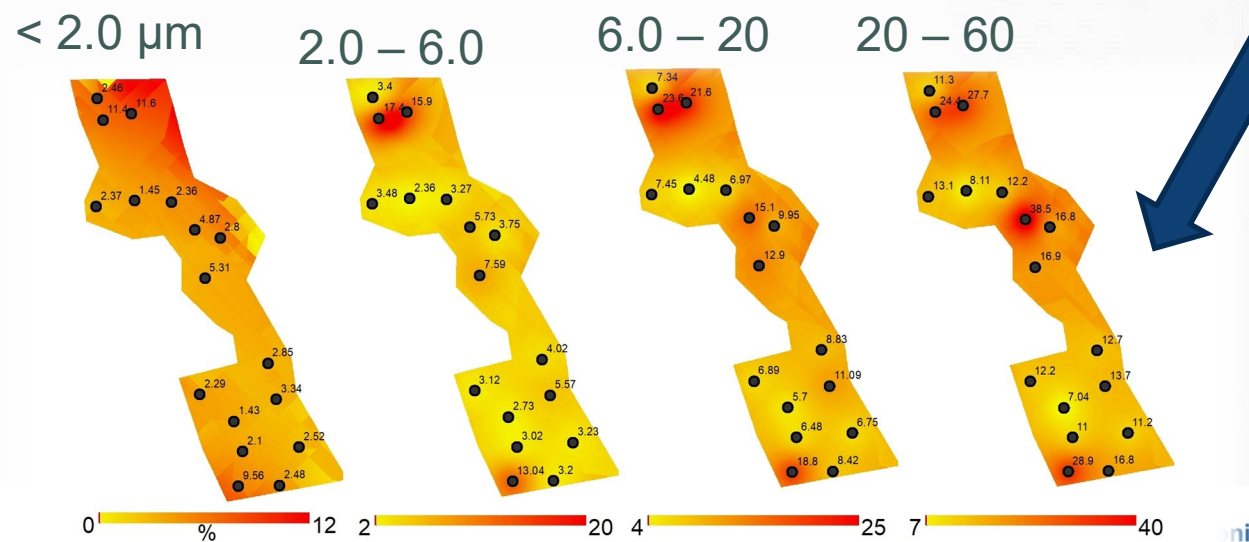
# MAALAJIN ENNUSTAMINEN – DIGITAL SOIL MAPPING



Coulter LS 230 Laser Diffraction



Raekokojakauma



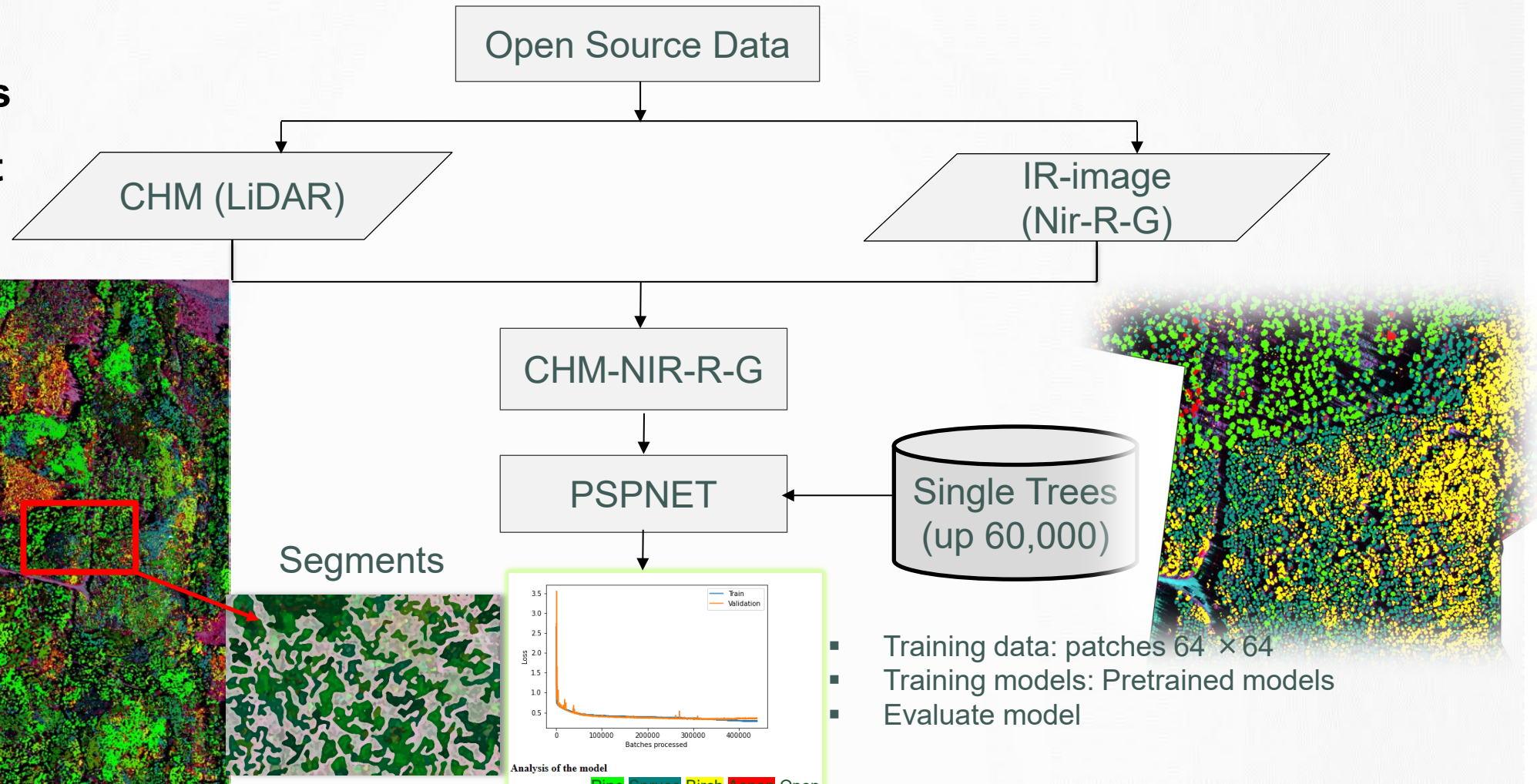
Cokringing Interpolointi





# METSÄN SEGMENTOINTI LOHKOIKSI

- Puulajitunnistus
- Puuryhmittymät





## LiDAR-based

# MUUTTUJAT

## Sentinel-based

### Geomorphometry

*Accumulation Curvature*  
*Curvedness*  
*Gaussian Curvature*  
*Horizontal Excess Curvature*  
*Vertical Excess Curvature*  
*Tangential Curvature*  
*Ring Curvature*  
*Plan & Profile Curvature*  
*Difference Curvature*  
*Mean & Total Curvature*  
*Min & Max Curvature*  
*Rotor*  
*Ruggedness Index*  
*Shape Index*  
*Slope*  
*Standard Deviation of Slope*  
*Unsphericity*  
*Aspect*  
*Diff From Mean Elev*  
*Downslope Index*  
*Wetness Index*  
*Roughness*  
*Openness*

### Hydrology

*Average Flowpath Slope*  
*Average Upslope Flowpath Length*  
*Quinn Flow Accumulation*  
*Hydrologic Connectivity (Upslope & Downslope)*

### Trees

*Mean Height*  
*Max Height*  
*Crown coverage*  
*Majority of Species*  
*Diversity of Species*

### Soil indices

$$bi = \sqrt{(R^2 + G^2)}/2$$

$$bi2 = \sqrt{(R^2 + G^2 + NIR^2)}/3$$

$$bsi = \frac{(SWIR2 + R) - (NIR + B)}{(SWIR2 + R) + (NIR + B)}$$

$$SATVI = \left( \frac{SWIR1 - R}{SWIR1 + R + L} \right) \times (1 + L) - \frac{SWIR2}{2}$$

$$Clay Index = \frac{SWIR1}{SWIR2}$$

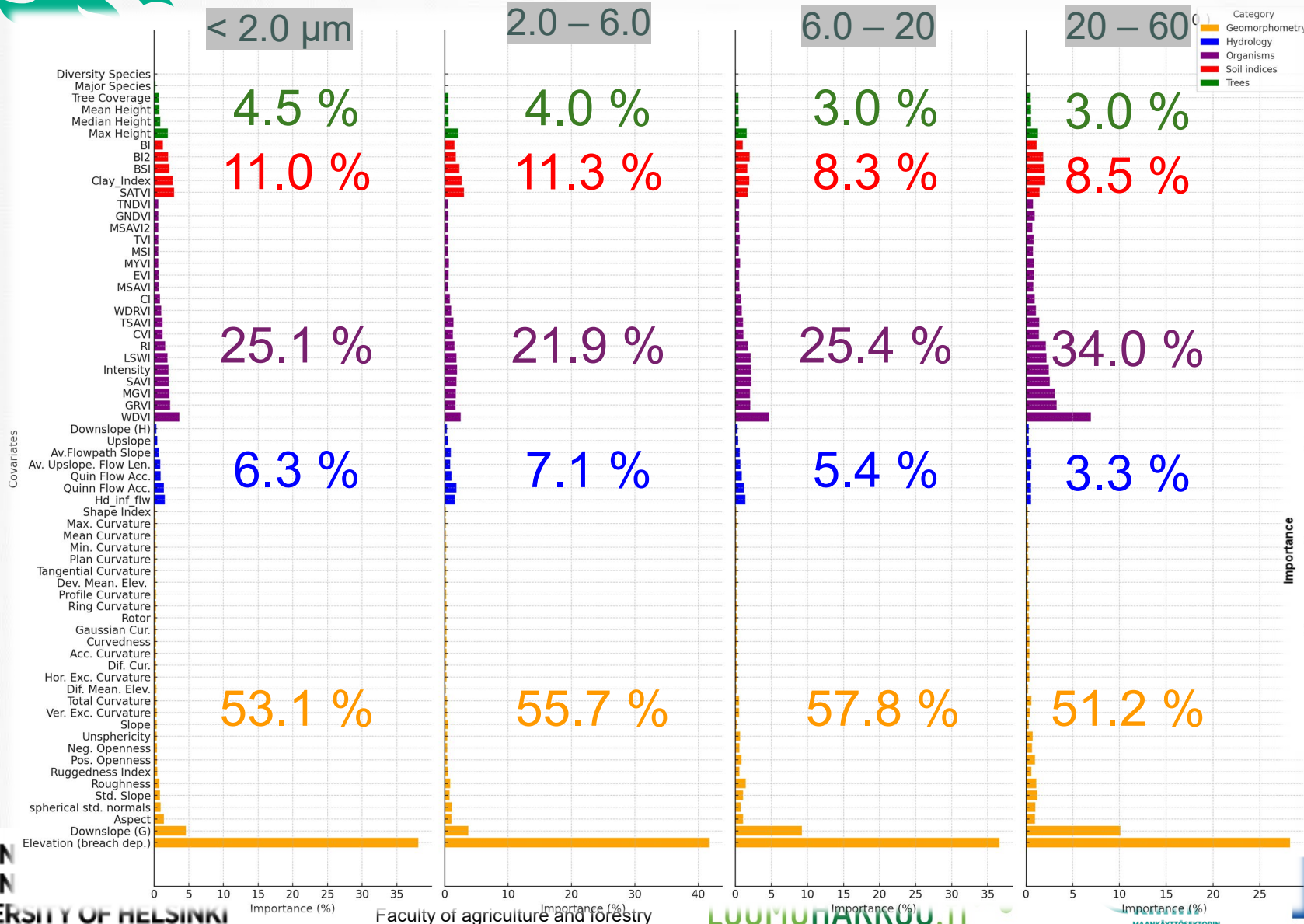
- Time series 2017- 2023 (May – November)
- Mask green vegetation (NDVI: - 0.15 – 0.20)
- Mask residuals (NBR2: - 0.15 – 0.15)

### Organisms

*TVI*  
*EVI*  
*SATVI*  
*SAVI*  
*MSI*  
*GNDVI*  
*GRVI*  
*LSWI*  
*TSAVI*  
*MSAVI*  
*MSAVI2*  
*WDVI*  
*RI*  
*CI*  
*TNDVI*  
*WDVI*  
*WDRVI*  
*MYVI*  
*MGVI*  
*Intensity*  
*CVI*

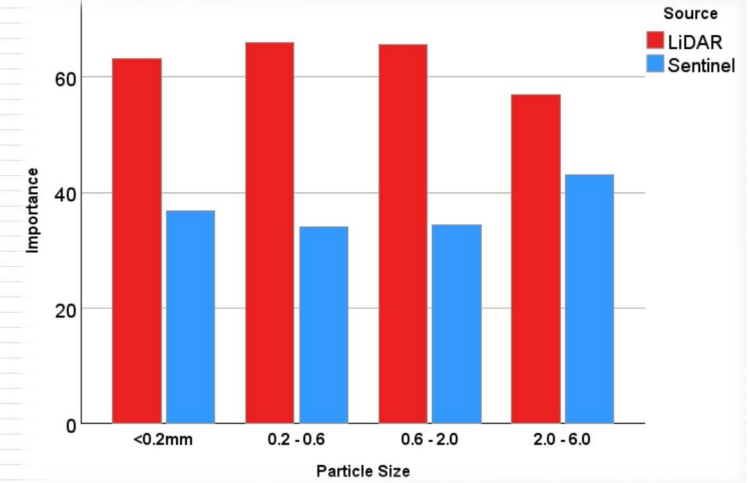


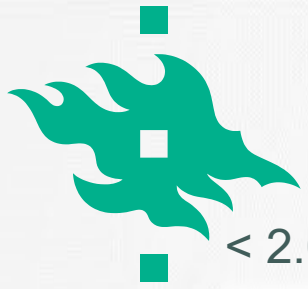
# MUUTTUJIEN MERKITSEVYYS



## Validation Data (R<sup>2</sup>)

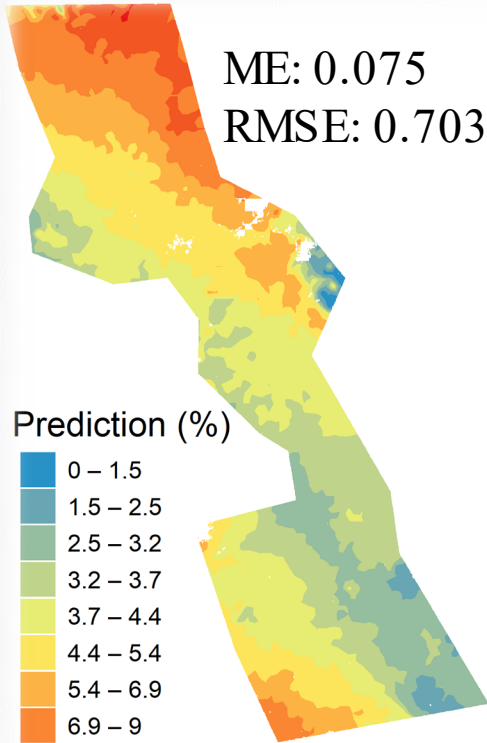
- 1: 0.865
- 2: 0.883
- 3: 0.870
- 4: 0.859



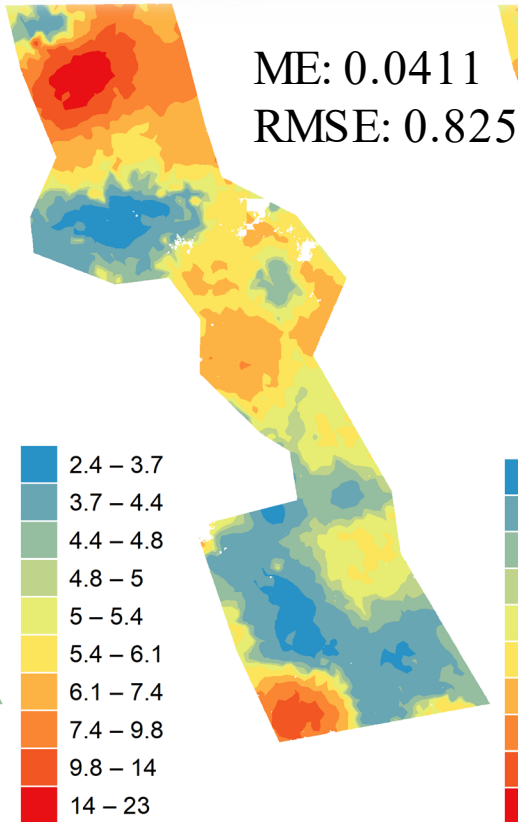


# MAALAJIKARTTA

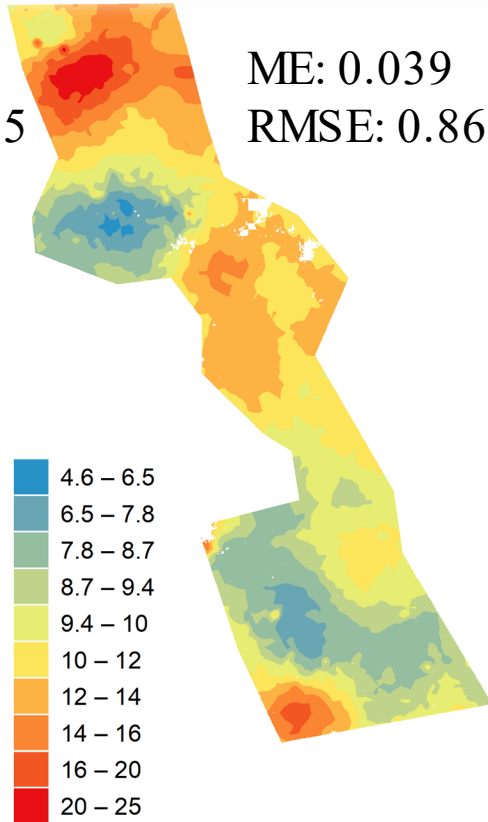
< 2.0  $\mu\text{m}$



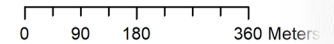
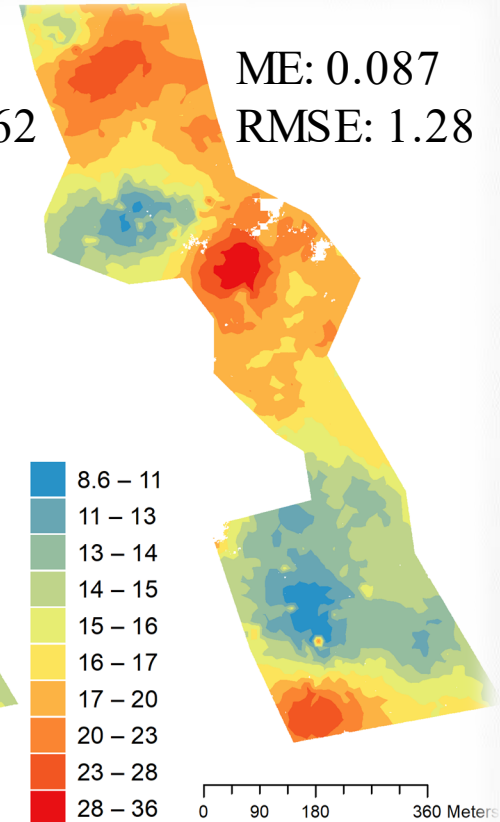
2.0 – 6.0



6.0 – 20



20 – 60



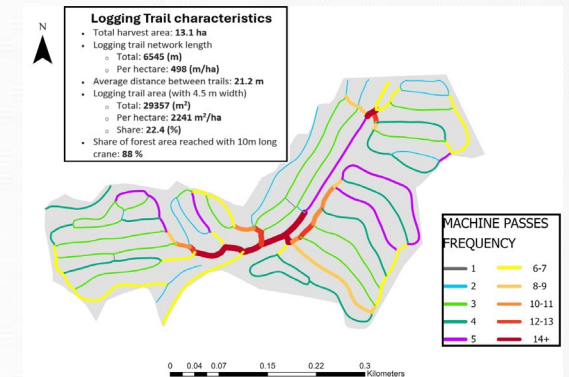
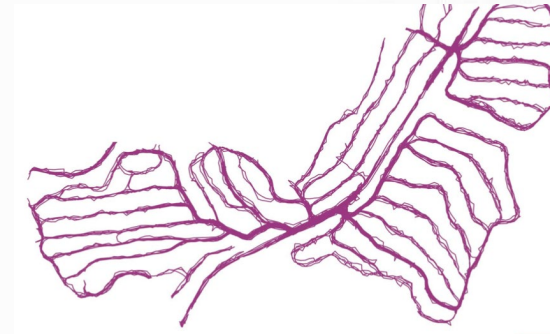


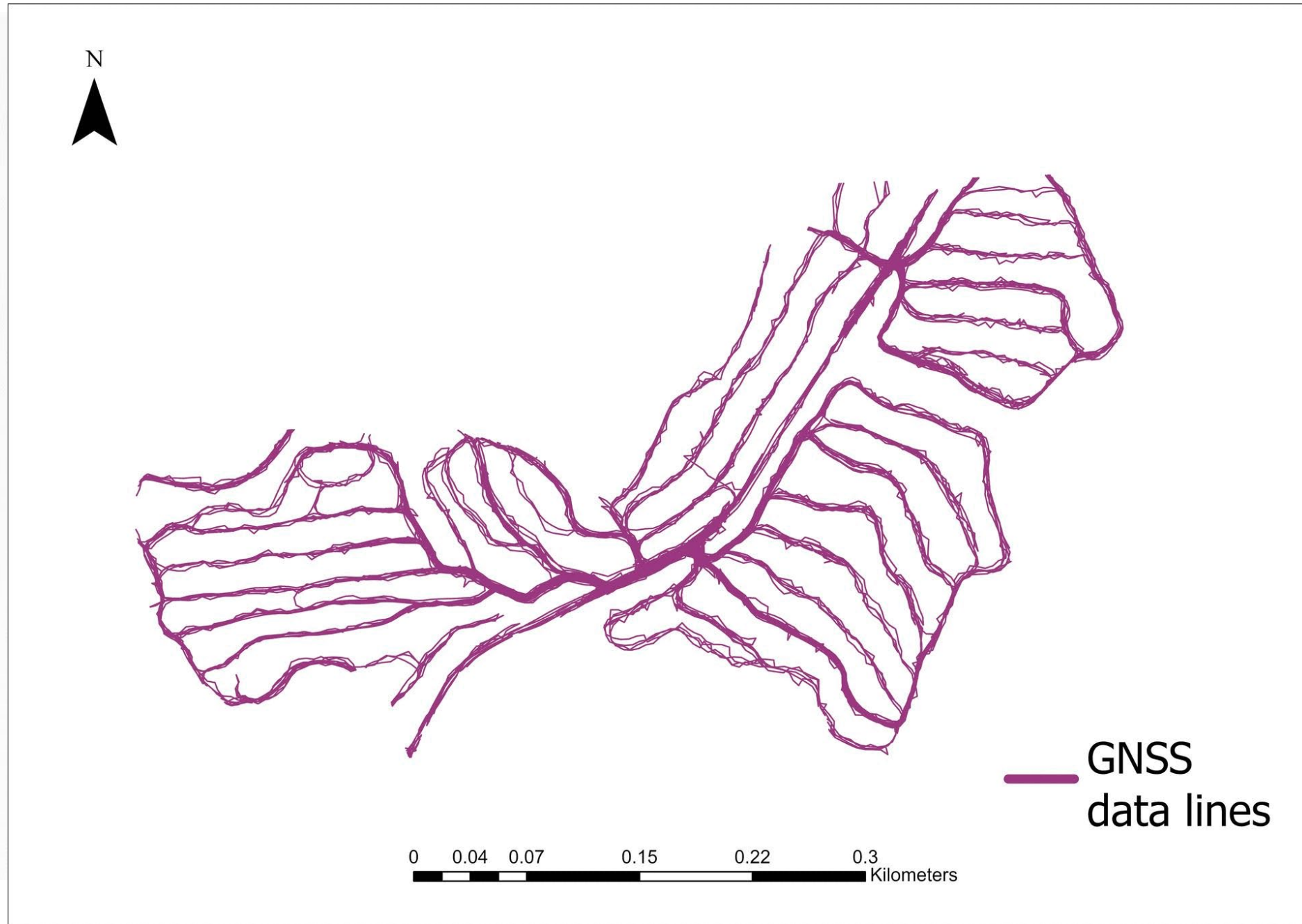
# AJOURAREITISTÖN OPTIMOINTI

- Vanhojen ajourien visualisointi



- Ajouran keskilinjän määrittäminen

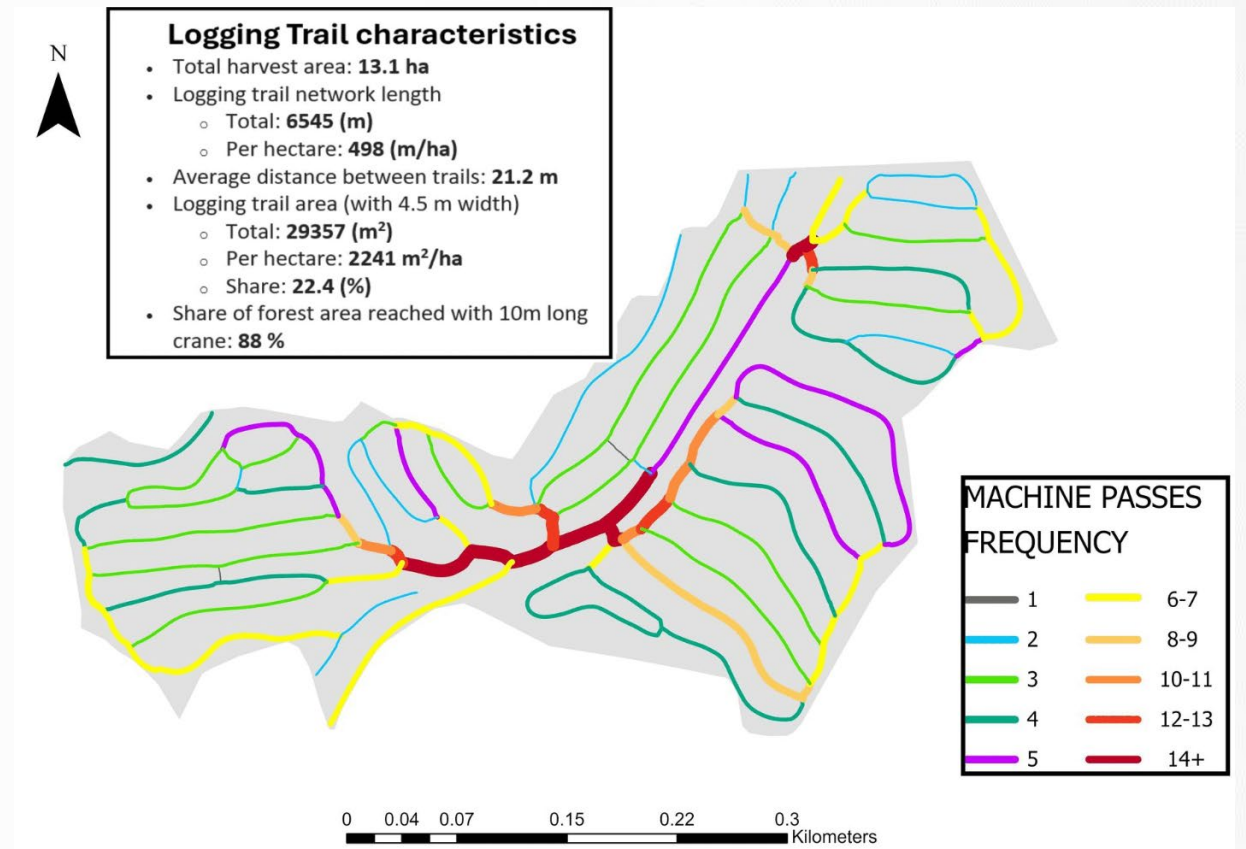






# AJOURAN TUNNUKSET

- Ajouraverkoston ja kuviopolygonin yhdistäminen
- Tärkeimmät ajouratunnukset
  - Tiheys (m/ha)
  - Ajouraväli (m)
  - Ajouratehokkuus
    - Verkoston avulla saavutettava metsäpinta-ala
    - Pällekkäisyys/katveet





<https://luomuhakkuu.fi/>



# VOIDAANKO KASVATUSHAKKUISSA POISTETTAVIEN PUIDEN VALINTA OPTIMOIDA METSÄNOMISTAJAN TAVOITTEIDEN MUKAAN?

**Mikko T. Niemi<sup>1,2</sup>, Jari Vauhkonen<sup>2</sup> & Jori Uusitalo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> University of Helsinki, <sup>2</sup> University of Eastern Finland



# TAVOITE

Kasvatushakkuussa jätettävien ja poistettavien puiden valinta siten, että kuviolle jätetään metsänomistajan tavoitteiden kannalta tärkeimmät puut ja säästöpuuryhmät.

1. **Numeerisesti vertailtavien kriteerien ja indikaattorien kehittäminen erilaisille tavoitteille**
2. **Monitavoiteoptimointi kehitetyillä päätöksentekokriteereillä**

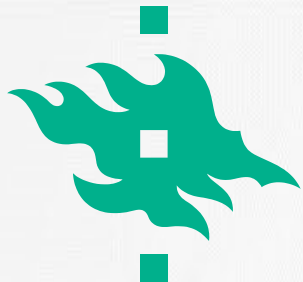


Harvennettu vs. harventamaton metsikkö. Kuva: Mikko Niemi



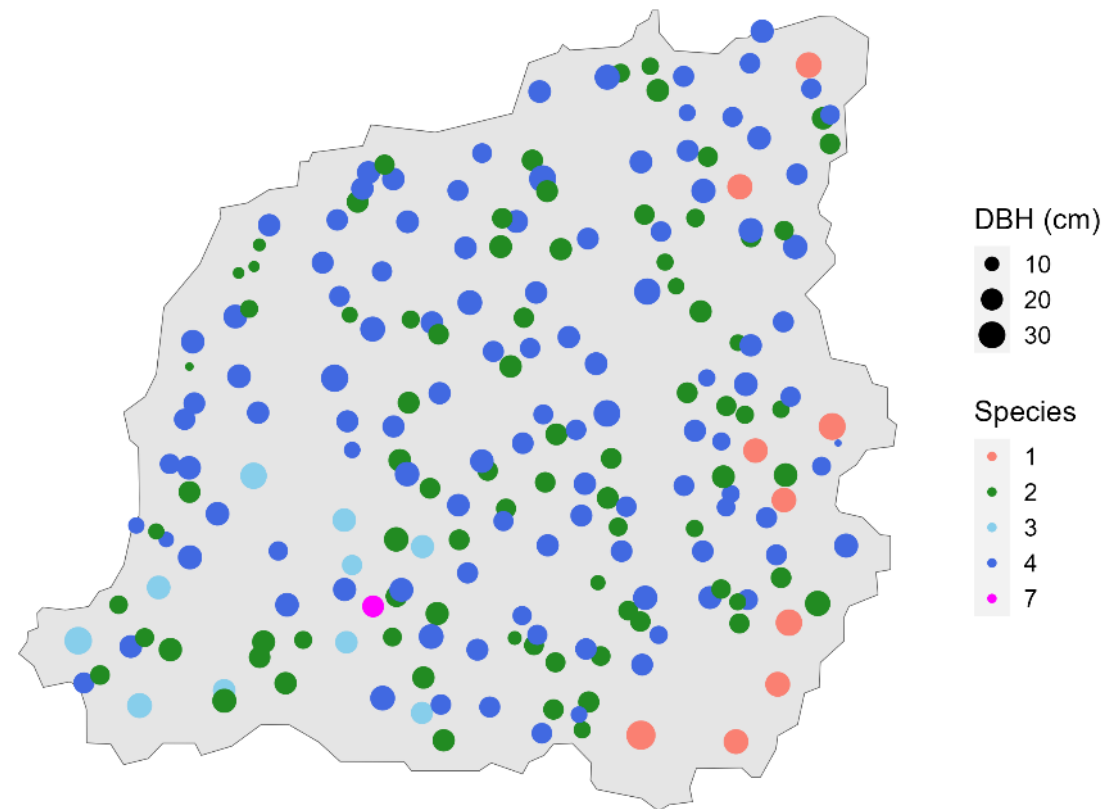
# KRITEERIT

1. Välittömät hakkuutulot
2. Hakkuuta seuraavien 10 vuoden suhteellinen arvokasvu (Pukkala ym. 2021)
3. Metsikön tuottoarvo (Ruotsalainen et al. 2021)
4. Läpimittajakauman epätasaisuus, Gini-kerroin (esim. Valbuena ym. 2012)
5. Vallitsevan puujakson tilajärjestys (Clark & Evans 1954)
6. Sekapuustoisuus (Bettinger & Tang 2015 soveltaen)
7. Suojeluarvoindeksi (Lehtomäki ym. 2015)
8. Maisema-arvo (Silvennoinen ym. 2001)



# AINEISTO

- Metsäkeskuksen puukarttakoealat (n=1068), joista valittiin 35 harvennusvaiheen metsikköä.
- **Mitattuja keskitunnuksia aineistosta:**
  - Keskokoko 0,13 ha, keskiläpimitta 21,2 cm, pohjapinta-ala 27,3 m<sup>2</sup>/ha, tilavuus 247 m<sup>3</sup>/ha
- **Laskettuja keskitunnuksia aineistosta:**
  - Puuston hakkuuarvo: 7 700 €/ha
  - Suhteellinen arvokasvu: 6,0 %
  - Gini-kerroin: 0,36
  - Clark-Evans indeksi (tilajärjestys): 1,30
  - Sekapuustoisuusindeksi: 0,37
  - Suojeluarvoindeksi: 12,8
  - Maisema-arvoindeksi: 0,51

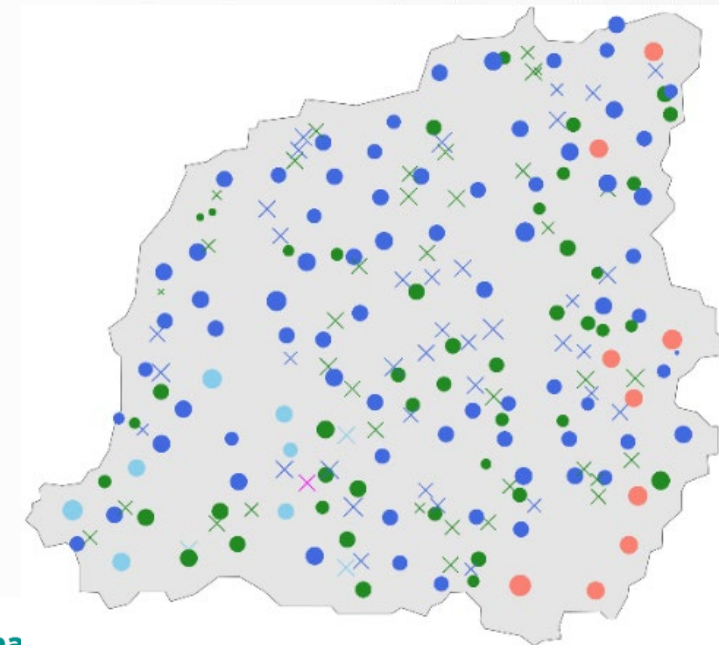
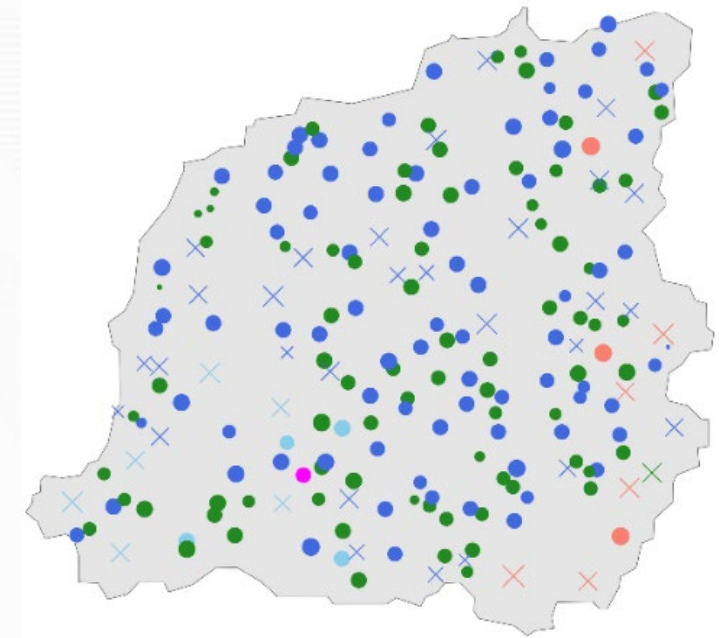
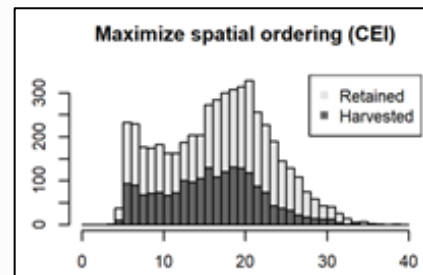
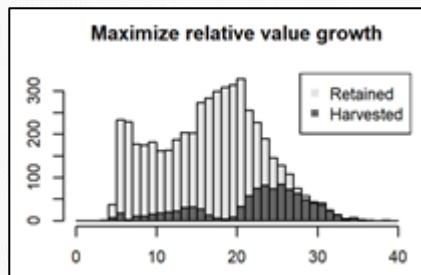


*Esimerkkikuva aineistosta (ID 3752). Tuore kangas.  
Runkoluku 1060 ha<sup>-1</sup>, D<sub>g</sub> 20,5 cm, PPA 28,7 m<sup>2</sup>/ha.  
Puulajikoodit: 1 = mänty, 2 = kuusi, 3 = rauduskoivu,  
4 = hieskoivu, 7 = tervaleppä.*



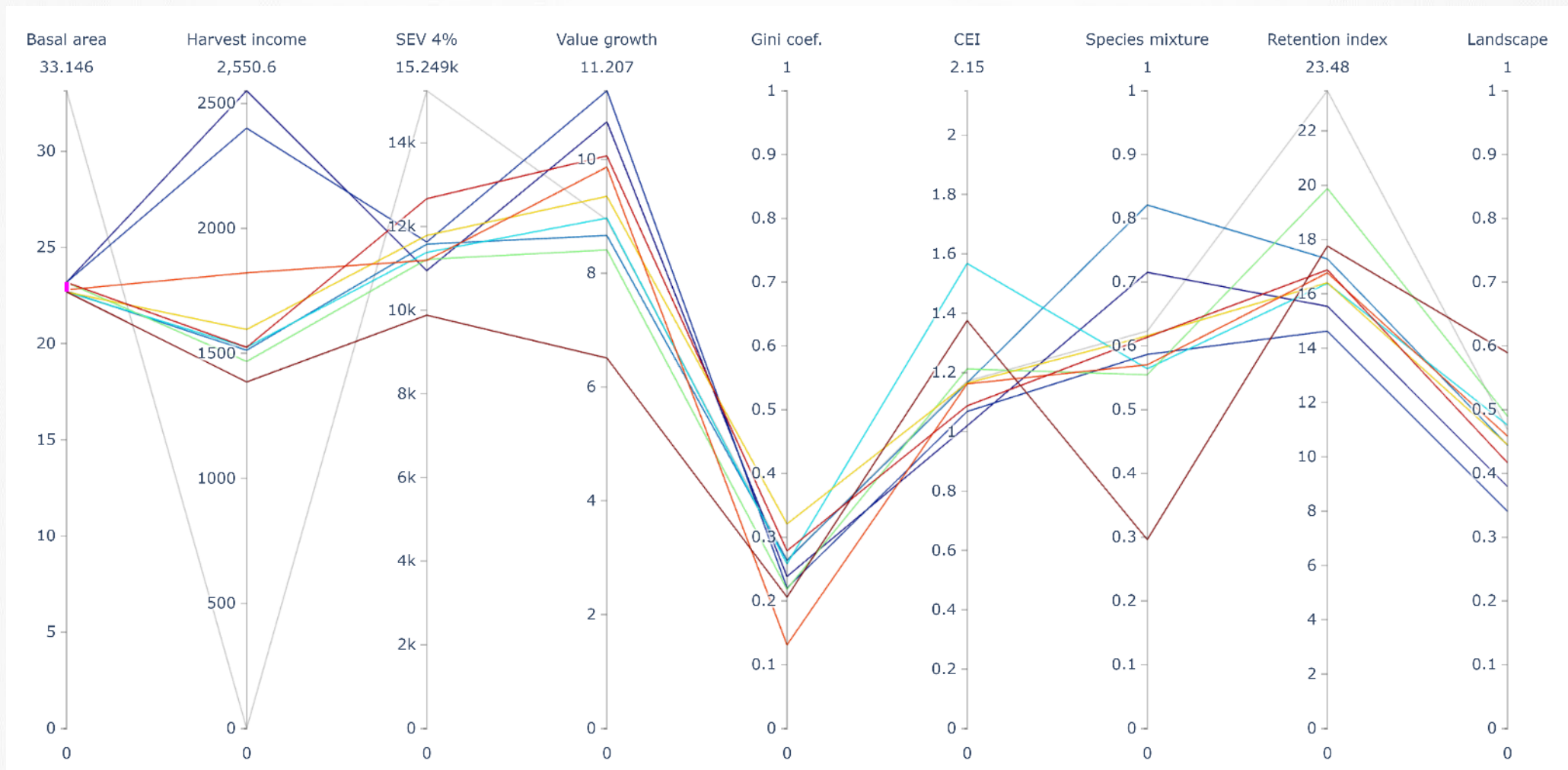
# HEURISTINEN OPTIMOINTI

- Jokainen puutason hakkuupäätös vaikuttaa koealatason kriteereihin. Parhaan mahdollisen ratkaisun löytäminen edellyttää heuristista optimointia:
  - Päätösmuuttujina yksittäisten puiden hakkuupäätös
  - Koealatason rajoitteena MHS:n mukainen pohjapinta-ala
- Tavoitefunktioista riippuen puuvalinta kohdistuu eri puulajien ja kokoluokkien puihin. Ylemmässä kuvassa optimoitu jäävän puuston suhteellista arvokasvua, ja alemmassa mahdollisimman tasaista tilajärjestystä.





# KRITEERIEN VÄLINEN VAIHDANTASUHDE





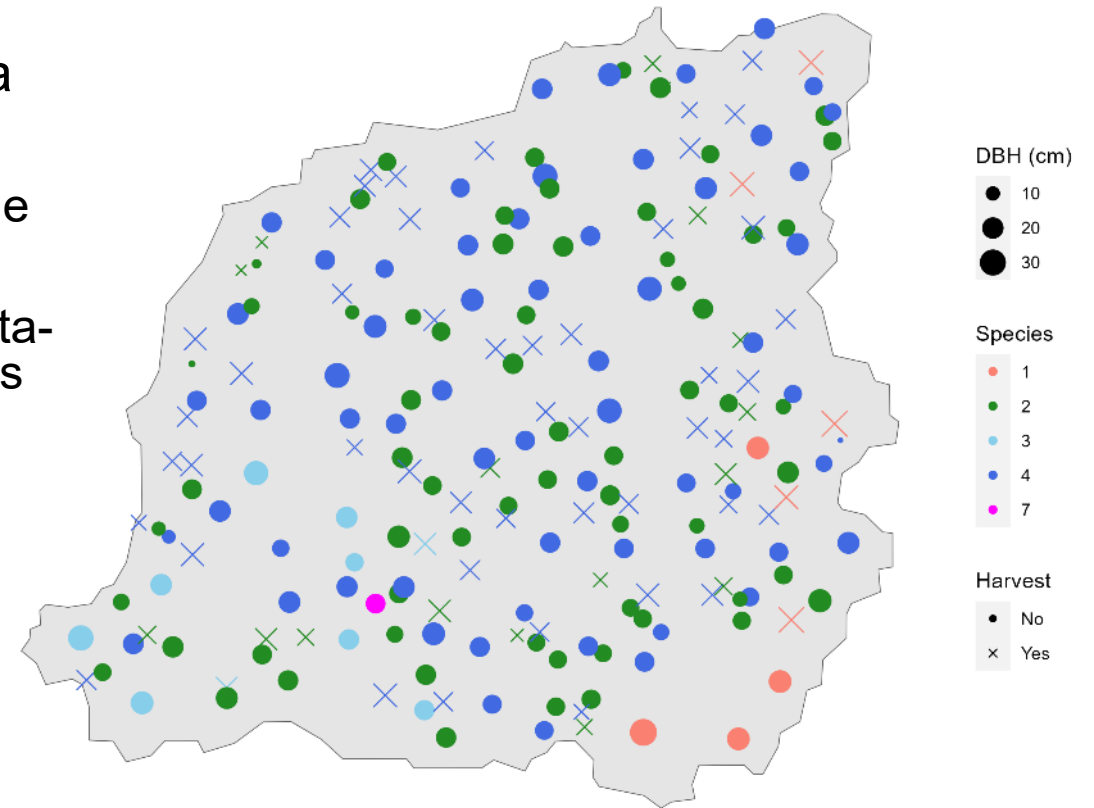
# MONITAVOITEOPTIMOINTI

- Monitavoiteoptimoinnissa huomioidaan, miten päätöksentekijä arvostaa eri tavoitteet suhteessa toisiinsa. Esimerkki:
  - Päätöksentekijä antaa jäävän puuston arvokasvulle 60 % painon ja sekapuustoisuudelle 40 % painon.
  - Lisäksi edellytetään, että jäävän puuston pohjapinta-ala vastaa metsänhoidon suosituksia ja tilajärjestys (CEI) saa vähintään arvon 1,3.

$$\max \left( 0.6 * \frac{value_{gr}}{value_{gr_{max}}} + 0.4 * sp_{mix} \right)$$

- $CEI \geq 1.30$

- $|BA(x_1, x_2, \dots, x_n) - BA_{target}| \leq 0.5$





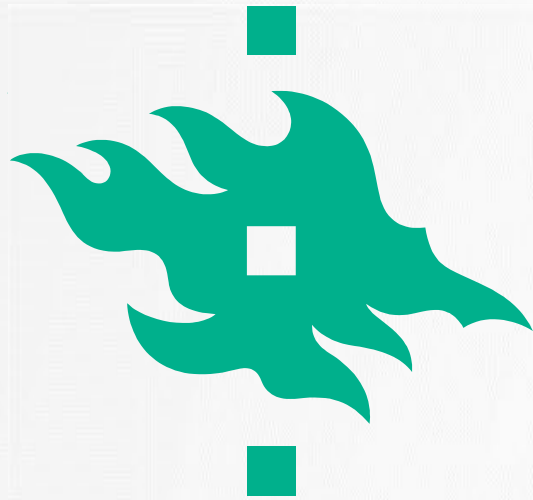
# JOHTOPÄÄTÖKSET

- Kasvatushakuissa poistettavien puiden valinnalla on pitkäkestoinen vaikutus metsän rakenteeseen ja ekosysteemipalveluihin.
- Yksittäisten tavoitteiden optimointi lisäsi ymmärrystä eri kriteerien välisestä vaihdantasuhteesta, mutta käytännön kannalta järkevien ehdotusten laatiminen edellyttää aina monitavoiteoptimointia.
- Jatkotutkimustarvetta:
  - Miten optimoidaan leimikkotason päätökset?
    - Samat vai vaihtelevat painotukset eri mikrokuvioille?
    - Korjuuteknisten asioiden huomiointi?
    - Säästöpuiden optimaalinen sijoittelu?
  - Optimointi epävarman tiedon kanssa?
  - Millainen aputieto oikeasti auttaa kuljettajan työtä?



Ponsse Cobra -harvesteri. Kuva: Jori Uusitalo





# KIITOS MIELENKIINNOSTA!

Artikkeli

*Trade-off analysis for multi-objective boreal forest thinning  
on parhaillaan vertaisarvioinnissa...*

**Mikko Niemi**

Postdoctoral Researcher

Department of Forest Sciences  
University of Helsinki

[mikko.t.niemi@helsinki.fi](mailto:mikko.t.niemi@helsinki.fi); [mikko.niemi@uef.fi](mailto:mikko.niemi@uef.fi)



@MikkoTNiemi  
@Luomuhakkuu

