



Esa-Jussi Viitala



Esa Uotila

Esa-Jussi Viitala ja Esa Uotila

Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta

Viitala, E.-J. & Uotila, E. 1999. Optimaalinen tietiheys yksityismetsätalouden kannalta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1999: 167–179.

Tutkimuksessa selvitetään, mikä on optimaalinen tietiheys nykyisillä tienrakennus- ja metsäkuljetuskustannuksilla yksityismetsissä. Peruslaskelman oletuksilla laskettuna se on Etelä-Suomessa 10,5 metriä hehtaaria kohti, jolloin keskimääräiseksi metsäkuljetusmatkaksi muodostuu 560 metriä. Pohjois-Suomessa, eli kolmen pohjoisimman metsäkeskuksen alueella, optimaalinen tietiheys on selvästi alhaisempi eli 6,1 m/ha ja keskimääräinen lähikuljetusmatka vastaavasti 980 metriä. Herkkyyksianalyysien mukaan tulokset ovat vakaita: tietiheys voi Etelä-Suomessa vaihdella välillä 7–16 m/ha ja Pohjois-Suomessa välillä 4–9 m/ha ilman, että syntyy merkittäviä, yli 10 prosentin lisäkustannuksia.

Asiasanat: metsätiet, optimitietiheys, optimaalinen metsäkuljetusmatka

Yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puh. (09) 8570 5745, sähköposti esa-jussi.viitala@metla.fi

Hyväksytty 15.4.1999

1 Johdanto

Puutavaran kaukokuljetus perustui Suomessa 1950-luvulle asti paljolti uittoon, joten puunhankinta-alueet muotoutuivat vesistöjen perusteella. Ajan mittaan vesireitit eivät kuitenkaan riittäneet turvaamaan kasvavan metsäteollisuuden puunsaantia. Vielä 1950-luvulla oli huonojen liikenneyhteyksien takia laajoja alueita, joilta pienpuuta ei kannattanut kuljettaa jalostettavaksi lainkaan. Katsottiin, että ”puun kuljetukset vaativat suureksi osaksi

kokonaan oman tarkoituksenmukaisen tieverkkonsa runko- ja imuteineen sekä huolellisesti valittuine lastaus-, kuormaus- ja varastoalueineen ja sivuuttamiskohtineen” (Puun maankuljetusolojen... 1952).

Metsäteiden rakentamiseen alettiin myöntää metsänparannusvaroja vuodesta 1948 alkaen. Teiden rakentaminen lisääntyi merkittävästi kuitenkin vasta 1960-luvun loppupuolella ja varsinainen huippukausi oli 1980-luvun alkupuolella, jolloin metsänparannusvaroin rahoitettuja metsäteitä tehtiin vuosittain noin 3 000 kilometriä. Nykyään metsäteiden merki-

tys metsätalouden kannalta on ratkaiseva, vaikka myös muut metsissä kulkevat yksityiset ja julkiset tiet palvelevat metsätaloutta. Niiden kokonaismäärästä on tekeillä selvitys Metsäntutkimuslaitoksessa.

Tähän mennessä metsäteitä on tehty yksityismetsiin metsänparannusvaroin lähes 70 000 kilometriä (Metsätaloustieteellinen... 1997). Viimeisen kymmenen vuoden aikana (1987–1996) valtio on investoinut avustuksina niiden suunnitteluun, työnjohtoon ja rakentamiseen nykyrahassa noin 630 miljoonaa markkaa. Metsänparannuslainoja on metsänomistajille myönnetty tietekoon samana aikana noin 640 miljoonaa markkaa, josta osa voidaan katsoa valtion tueksi lainaehtojen edullisuuden takia.

Yksityismetsätalouden kehittämisorganisaatiossa ja maa- ja metsätalousministeriössä tienrakennuksen tavoitteena on pidetty, että metsäkuljetuksen päättymiseen soveltuvaa tiestöä olisi Etelä-Suomessa noin 15 metriä ja Pohjois-Suomessa 6–8 metriä hehtaaria kohti (Kestävän... 1997, Niemelä 1997). Vastaaviksi puutavaran keskimääräisiksi metsäkuljetusmatkoiksi ilmoitetaan Etelä-Suomessa 200–300 metriä ja Pohjois-Suomessa 400–600 metriä. Tällä perusteella on arvioitu, että uusien metsäteiden lisätarve yksityismetsissä olisi vielä lähes 20 000 kilometriä (Niemelä 1997). Tämä taas merkitsisi nykykustannuksilla noin 1,3 miljardin markan investointia ja yli neljäsosan lisäystä metsänparannustuella rakennettujen metsäteiden kokonaismäärään.

Tietiheystavotteita on perusteltu puutavaran metsäkuljetusmatkan lyhenemisen ohella metsäteiden välillisillä hyödyillä. Näitä ovat muun muassa ympärivuotisen puunkorjuun yleistyminen, puutavaran laadun paraneminen, metsänhoitotöiden lisääntyminen sekä teiden myönteiset vaikutukset metsien monikäytölle, muille elinkeinoille ja paikallisliikenteelle (Niemelä 1991, Metsäkeskusten... 1997). Välillisten hyötyjen mittaaminen on kuitenkin vaikeaa ja osaan, kuten ympärivuotiseen puunkorjuuseen, liittyy myös haittoja.

Optimaalista tietiheyttä koskevia yleistettäviä laskelmia on Suomessa esitetty aiemmin vain Rysän (1971) tutkimuksessa. Siinä optimiratkaisu laskettiin olettamalla, että kaikki hakkuut tapahtuvat heti tienrakentamisen jälkeen, mikä harvoin kuitenkaan pitää paikkaansa yksityismetsätaloudessa.

Tämän jälkeen optimaalista tietiheyttä on Suomessa tutkinut ainoastaan Tan (1992). Hän arvioi

tapaustutkimuksessaan, että optimaalinen tietiheys olisi Kemijärven alueen valtionmetsissä noin 9 m/ha. Tietiheyteen vaikuttivat lähinnä alueen suuri hakkuumäärä ja välittömästi tapahtuviksi oletetut hakkuut. Niin kauan kun tietiheys vaihteli 20 prosenttia puoleen tai toiseen optimista, nettohyödyistä menetettiin vain alle 5 prosenttia. Kokonaiskustannukset nousivat selvästi, jos tietiheys jäi alle 7 m/ha. Tietiheyden ylittäessä 11 m/ha taloudelliset menetykset eivät lisääntyneet yhtä nopeasti kuin jos tietiheys laski alle 7 m/ha.

Ruotsissa edullisimman tietiheyden laskemista ovat viimeksi tutkineet Larsson ja Rydstern (1968) ja Yhdysvalloissa Peyton (1973), Peters (1978) ja Thompson (1988). Empiirisiä tuloksia näissä tutkimuksissa ei kuitenkaan ole esitetty, vaan ne ovat keskittyneet lähinnä tietiheyden laskentamenetelmien kehittämiseen. Pohjoisamerikkalaiset tulokset eivät yleensä olisikaan vertailukelpoisia korjuumenetelmien erilaisuuden vuoksi. Sen sijaan pienten alueiden tietiheyden optimointia on tutkittu huomattavan paljon. Erilaisia matemaattisia malleja ovat kehittäneet muun muassa Weintraub ja Navon (1976), Koger ja Webster (1984), Wijngaard ja Reinders (1985), Liu ja Sessions (1993), Thureson (1994) ja Greulich (1997).

Optimaalisen tietiheyden määrittäminen perustuu käytännössä pitkälti puutavaran metsäkuljetuskustannusten ja tien rakentamiskustannusten vertailuun. Vaikka kehitys puunkorjuussa on viimeisen parinkymmenen vuoden aikana ollut nopea, ei sen vaikutusta edullisimpaan tietiheyteen ole Suomessa selvitetty. Myöskään metsäteiden rakentamisen yksityistaloudellista kannattavuutta ei tietävästi ole tutkittu, vaikka tienrakennus on ollut metsänparannusrahoituksen merkittävimpiä kohteita.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mikä on kansantaloudellisesti optimaalinen tietiheys yksityismetsissä. Aihetta käsitellään vain metsätalouden kannalta, eikä metsäteiden käyttöä esimerkiksi virkistykseen tai paikallisliikenteen väylänä oteta huomioon. Muiden kuin metsätalouden hyötyjen (ja haittojen) selvittäminen ja arvottaminen vaatisi oman laajan tutkimuksensa, mihin ei tässä yhteydessä ollut mahdollisuutta. Tarkastelun ulkopuolelle rajataan myös metsäteiden metsänhoitotöitä aktivoiva vaikutus, koska sen empiirinen selvittäminen on erittäin vaikeaa. Myöskään tiestön alle jäävän

maapohjan arvoa, puuston kasvumenetystä tai tien aiheuttamaa maanarvon nousua ei laskelmissa oteta huomioon.

Tutkimus etenee siten, että aluksi esitetään tiestön optimoinnin periaate ja laskentamalli. Tämän jälkeen esitetään tehtävän peruslaskelman lähtöarvot ja lasketaan tulokset. Lopuksi testataan tulosten pysyvyyttä herkkyyksianalyysien avulla.

2 Metsäteiden optimi-tiheyden laskenta

2.1 Tiestön optimoinnin periaate ja tärkeimmät muuttujat

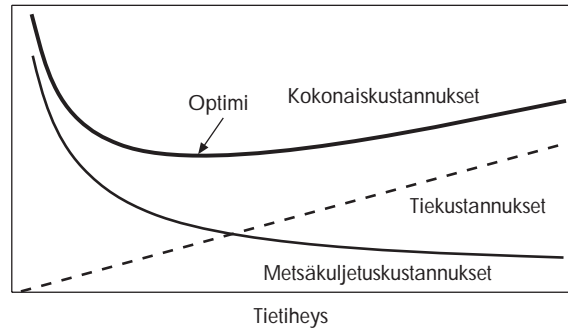
Optimaalinen tietiheys saadaan minimoimalla tien rakentamisesta ja ylläpidosta sekä metsässä tehtävistä kulku- ja kuljetusmatkoista aiheutuvat kokonaiskustannukset (kuva 1). Optimitilanteessa hyöty- ja kustannuskäyrien kulmakertoimet ovat itseisarvoltaan yhtäsuuria, eli puutavaran metsäkuljetuksessa saatava rajahyöty (lisäsäästö) on yhtä suuri kuin tien rakentamisesta aiheutuva rajakustannus (lisäkustannus).

Tärkeimmät tien rakentamisella saavutettavat hyödyt metsätaloudelle ovat säästöt puunkorjuussa sekä metsänhoito- ja perusparannustöissä. Varsinkin hakkuiden määrä ja ajoittuminen vaikuttavat säästöjen suuruuteen ja siten myös optimaaliseen tietihyteen. Selvästi suurimmat kustannukset puolestaan syntyvät tien rakentamisesta ja kunnossapidosta. Laskennassa huomioon otettavia hyöty- ja kustannustekijöitä voidaan kuitenkin karsia ilman, että optimoinnin tarkkuus oleellisesti kärsii. Seuraavaksi niitä tarkastellaan lähemmin.

Ajokustannukset

Puutavaran lyhentynyt metsäkuljetusmatka vaikuttaa varastopaikalta palstalle ja sieltä takaisin ajamisesta aiheutuviin kustannuksiin. Palstalla tehtävään kuormaukseen ja kuormausajoon sekä varastopaikalla tehtävään kuorman purkamiseen tienrakentamisella ei ole vaikutusta, joten niistä aiheutuvat

Kustannukset



Kuva 1. Optimaalisen tietiheyden määrittäminen.

kustannukset voidaan jättää laskelmien ulkopuolelle. Jatkossa puutavaran metsäkuljetuskustannuksista käytetään optimoinnin yhteydessä nimitystä ajokustannukset.

Hakkuiden ajankohta ja tien käyttöikä

Hakattavan puuston määrä on tietiheyden optimoinnissa tärkein yksittäinen tekijä. Aikaisemmissa tutkimuksissa tiestön optimointilaskelmia on yksinkertaistettu muun muassa olettamalla, että kaikki tien käyttöikä nä tehtävät hakkuut tapahtuvat välittömästi tien valmistuttua (Rysä 1971, Tan 1992). Kyseinen oletus johtaa kuitenkin metsäteiden hyötyjen yliarvioimiseen, sillä hakkuut, ja samalla myös puunkorjuun kustannussäästöt, jakaantuvat yleensä usealle vuodelle.

Suuremmissa tiehankkeissa ja pitkillä laskentakausilla parempi vaihtoehto onkin olettaa, että hakkuut jakaantuvat tasaisesti tien käyttöajalle. Tällöin joudutaan laskemaan hyötyjen nykyarvo, ts. diskonttaamaan ne laskenta-ajanjaksolta nykyhetkeen. Diskonttauksessa voidaan käyttää vuotuisia hakkuumääriä, koska ne kuvaavat suoraan metsäkuljetuksen kustannussäästöjä (Sundberg ja Silversides 1988).

Myös metsäteiden käyttöiällä (laskenta-ajanjaksolla) on keskeinen merkitys tien kannattavuuteen. Pitkä laskentajakso, kuten myös tulevan hakkuumäärän arvioiminen pitkän ajan hakkuukertymäsuunnitteen tai puuston kasvun avulla, sopii ensi

sijassa yleistä infrastruktuuria tukevia alue- ja runkoteitä koskeviin tietiheyslaskelmiin.

Metsänhoito, perusparannus sekä tien kunnossapitokustannukset

Pelkkien puutavaran ajokustannusten tarkastelu johdattaa metsäteiden hyötyjen aliarvioimiseen. Tieverkko alentaa myös metsänhoito- ja perusparannustöiden kustannuksia, sillä työvoiman ja kaluston kulku- ja kuljetusmatkat metsässä lyhenevät. Mainittujen kustannussäästöjen suhteellisiin osuuksiin vaikuttaa lähinnä tien vaikutuspiiristä hakattavissa oleva puumäärä: mitä suurempi se on, sitä vähäisempi on metsänhoitotöissä saavutettavien kustannussäästöjen suhteellinen merkitys. Aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan arvioida, että metsänhoidolle ja perusparannukselle koituvat kustannussäästöt ovat noin 10 prosenttia puunkorjuun säästöistä (Nurmikari 1985, Seilo 1994).

Teiden kunnossapitokustannukset aiheutuvat la- nauksesta, sorastuksesta ja aurauksesta. Ajan mittaan nämä kustannukset nousevat tien kantavuuden heikentymisen vuoksi. Käytännössä kunnossapitokustannukset kuitenkin vaihtelevat paljon yksittäisten teiden välillä ja niiden suuruuteen vaikuttaa etenkin raskaan liikenteen määrä ja ajankohta. Teiden vuotuisiksi kunnossapitokustannuksiksi on arvioitu yksi markka metriltä (Ranta 1984, Metsätalostolinen... 1996, 1997).

Tekemättä suurta virhettä voitaneen olettaa, että metsänhoidolle ja perusparannukselle koituvat hyödyt vastaavat tien kunnossapitokustannuksia (Hannu Niemelä, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, 10.2.1998, suull.). Tämä pätee ainakin lyhyehköillä, alle 15 vuoden laskentajaksoilla. Sen jälkeen kunnossapitokustannukset yleensä nousevat.

Kaukokuljetuksen kustannukset

Metsäteiden rakentaminen voi pidentää autokuljetusmatkaa metsäpäässä ja siten lisätä kaukokuljetuskustannuksia. Toisaalta puutavaran varastopaikat ovat yleensä metsäteillä paremmat kuin muilla teillä. Autokuljetuskustannukset ovat kuitenkin keskimäärin vain 0,03 mk/m³/100 m (Oijala ym. 1997)

eli pari prosenttia vastaavan ajomatkan kustannuksista metsässä. Vaikka metsäteillä autokuljetuksen kustannukset ovat keskimääräistä suurempia, ei niiden jättämisellä pois laskelmista ole kokonaisuuden kannalta käytännön merkitystä.

2.2 Tietiheyden optimointimalli

Kuten edellä esitettiin, tietiheyden optimointi voidaan pelkistää puutavaran metsäajosta ja tien rakentamisesta aiheutuvien yhteiskustannusten minimoinniksi. Lisäksi optimoinnissa oletetaan, että puutavaraa kuljetetaan tielle sen molemmilta puolilta ja että hakkuumahdollisuudet ovat jakaantuneet tasaisesti tien vaikutusalueelle. Näin laskien puutavaran keskimääräinen metsäkuljetusmatka olisi neljäsosa teiden välisestä etäisyydestä.

Käytännössä metsätraktorit eivät kuitenkaan aja suoraan lähimmälle tielle, vaan ne joutuvat kiertelemään esteitä ja varsinkin harvennushakkuissa ajamaan maastoon tehtyä pääuraa pitkin. Lisäksi puutavara kuljetetaan yleensä yhteen tienvarsivarastoon, eikä pieniin kasoihin tien varrelle. Siksi todellinen metsäkuljetusmatka on pitempi kuin laskennallisessa mallissa oletetaan. Tämä poikkeama otetaan huomioon *maastokorjauskertoimella*, joka kuvaa suoraviivaisen (laskennallisen) ja todellisen metsäkuljetusmatkan eroa.

Maastokorjauskertoimen suuruus riippuu erityisesti maaston vaikeudesta. Mitä suurempi kerroin on, sitä pitemmäksi ajettu metsäkuljetusmatka muodostuu ja sitä tiheämpi tieverkko tarvitaan. Maastokorjauskertoimen suuruutta onkin tutkittu varsin paljon (esim. Matthews 1942, Suddarth ja Herrick 1964, Peters ja Burke 1972, Peters 1978).

Rakennetut tietkään eivät ole suoria, yhdensuuntaisia ja säännöllisellä etäisyydellä toisistaan, kuten yksinkertaisessa laskennallisessa mallissa oletetaan. Etenkin varsitiet sijaitsevat pikemminkin verkkomaisesti, jolloin tiestön tehokkuus heikkenee, koska yhä suurempi osa metsistä on yhden tien sijasta kahden tien vaikutuspiirissä. Viime vuosina tieverkon mutkittelua ja *tiestön korjauskerrointa* on saattanut lisätä se, että teiden linjauksen vaihtelevuuteen ja ympäristönäkökohtiin on kiinnitetty aikaisempaa enemmän huomiota. Toisaalta suuri osa metsäteistä on linjattu aikana, jolloin maisemallis-

ten ja ympäristöhoidollisten tekijöiden merkitys oli vielä vähäinen.

Kun edellä olevat seikat otetaan huomioon, edullisin metsäkuljetusmatka (L_0) on laskettavissa kaavasta 1 ja sitä vastaava optimaalinen tietiheys (V_0) kaavasta 2. Kaavat on johdettu liitteessä 1. Samantyyppistä optimointimallia ovat aikaisemmin käyttäneet muun muassa Larsson (1959), von Segebaden (1964), Larsson ja Rydstern (1968), Rysä (1971), Peters (1978) sekä Sundberg ja Silversides (1988).

$$L_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_R \times M_{korj} \times T_{korj}}{Q \times a}} \quad (1)$$

$$V_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Q \times a \times M_{korj} \times T_{korj}}{C_R}} \quad (2)$$

missä

a = metsätraktorin ajokustannukset, mk/m³/100 m

C_R = tienrakentamisen kustannukset, mk/100 m

Q = tien vaikutusalueelta hakattava puumäärä, m³/ha

M_{korj} = maastokorjauskerroin

T_{korj} = tieverkon korjauskerroin.

2.3 Peruslaskelman lähtöarvot

Puutavaran metsäkuljetuksen kustannussäästöt

Peruslaskelmassa tien vaikutusalueelta hakattavaksi puumääräksi arvioitiin VMI:n tietojen pohjalta lasketun suurimman kestävän hakkuukertymäsuunnitteen perusteella Etelä-Suomessa 4,5 ja Pohjois-Suomessa 1,5 m³/ha/a (Metsäntutkimuslaitos, metsätalastollinen tietopalvelu 1997). Tämä oletus merkitsee vuosittain noin 50 miljoonan kuutiometrin hakkuuta yksityismetsistä, mitä on pidettävä varsin suurena keskimääräisarvona. Oletusta voidaan kuitenkin perustella sillä, että tienrakentaminen suuntautuu yleensä keskimääräistä runsaspuustoisemmille alueille. Metsäteiden käyttöikänä (laskentajaksona) käytettiin 30 vuotta eli tien teknistä enimmäiskäyttöikä (Niemelä 1997).

Metsäkuljetuskustannukset riippuvat kuljetuksen

tuottavuudesta ja metsätraktorin kustannuksista. Tuottavuuteen vaikuttavat etenkin keskiakuormat ja -nopeudet, metsätraktorin kustannukset taas koostuvat muuttuvista ja kiinteistä kustannuksista sekä työpalkoista. Jos oletetaan, että metsätraktorin keskiakuorma on 12 kuutiometriä, ajonopeus kuormattuna ja tyhjänä ajossa keskimäärin 50 m/min (Kuitto ym. 1994) ja käyttötuntikustannukset 252 markkaa, puutavaran ajokustannuksiksi saadaan 1,40 mk/m³/100 m. Kuormaus- ja purkamiskustannuksia ei oteta huomioon, koska tietiheys ei juurikaan vaikuta niihin.

Jatkossa oletetaan, että puutavaran ajonopeudet eivät muutu, vaikka alueelle rakennettaisiin metsäautotie. Tämä ei tarkkaan ottaen pidä paikkaansa, sillä lyhyillä, alle 200 metrin metsäkuljetusmatkoilla ajonopeudet ovat pienempiä ja yksikkökustannukset suurempia kuin pitkillä matkoilla (Kuitto ym. 1994). Käytetty yksinkertaistus ei kuitenkaan aiheuta suurta virhettä laskelmiin.

Metsäteistä aiheutuvat kustannukset

Metsäteiden rakentamiskustannuksina käytettiin metsäkeskusten johdolla vuosina 1986–1995 valmistuneiden teiden keski-kustannuksia, jotka olivat vuoden 1996 rahassa 6 600 markkaa sadalta metriltä (Metsätalastolliset vuosikirjat 1987–97). Niihin sisältyvät myös suunnittelu- ja työnjohtokustannukset. Kaikkien kustannusten katsottiin ajoittuvan tien luovutushetkeen. Koska tieprojektit kestävät yleensä kolme vuotta suunnittelun alkamisesta tien luovutukseen, kyseinen oletus johtaa rakentamiskustannusten lievään aliarvioon.

Kuljetusmatkojen korjauskertoimet

Tutkimuksissa käytetyt maastokorjauskertoimet ovat vaihdelleet 1,2:sta 1,5:een (von Segebaden 1964, Rysä 1971, Sundberg ja Silversides 1988). Viime vuosina niitä on voinut pienentää metsätraktoreiden maasto-ominaisuuksien kehittyminen, mutta toisaalta osa puutavarasta saatetaan nykyään kuljettaa aikaisempaa hankalammissa korjuuolosuhteissa. Tässä tutkimuksessa käytettiin maastokuljetuskerrointa 1,4, koska sen on Ruotsissa katsottu

vastaavan keskimääräisiä maastokuljetusolosuhteita (Sundberg ja Silversides 1988). Suomessa vastaavia selvityksiä ei ole tehty.

Tiestön korjauskertoimet ovat tutkimuksissa vaihdelleet 1,2:sta 2,0:aan lähinnä tieverkon säännöllisyyden mukaan (von Segebaden 1964, Rysä 1971, Sundberg ja Silversides 1988). Tässä tutkimuksessa tiestön korjauskertoimena oli 1,7, jonka on Ruotsissa havaittu vastaavan keskimäärin tilannetta suuralueilla (von Segebaden 1964). Sittemmin tieverkon kattavuuden lisääntyminen on saattanut lisätä teiden mutkittelua ja verkkomaisuutta, joten käytetty kerroin voi olla nykytilanteeseen nähden hieinan liian alhainen. Tutkimustietoa asiasta ei kuitenkaan ole.

Korkokanta

Korkona käytettiin peruslaskelmassa kolmea prosenttia, mutta laskelmat tehtiin vertailun vuoksi myös viidellä prosentilla. Tienrakennukseen myönnettyjen metsänparannuslainojen korko on viimeisen parinkymmenen vuoden aikana vaihdellut kolmen ja neljän prosentin välillä, mutta ennakkorahoituksen osalta se on ollut kuusi.

Peruslaskelman lähtöarvot on koottu taulukkoon 1.

3 Tulokset

3.1 Peruslaskelma

Peruslaskelman lähtöarvoilla laskettu optimaalinen tietiheys on Etelä-Suomessa 10,5 m/ha ja keskimääräinen metsäkuljetusmatka 560 metriä (taulukko 2). Pohjois-Suomessa, eli kolmen pohjoisimman metsäkeskuksen alueella, optimaalinen tietiheys on selvästi pienempi eli 6,1 m/ha ja edullisin keskimääräinen lähikuljetusmatka vastaavasti 980 metriä.

Metsätien välitön vaikutusalue voidaan laskea keskimääräisen metsäkuljetusmatkan ja maastokorjauskertoimen perusteella. Tämä tapahtuu siten, että todellinen metsäkuljetusmatka kerrotaan kahdella ja jaetaan maastokorjauskertoimella. Etelä-Suomessa peruslaskelman olosuhteissa välitön vaikutusalue ulottuu 800 metrin päähän tiestä, eli teiden tulisi si-

Taulukko 1. Peruslaskelman lähtöarvot.

Kustannustekijä	
Metsätraktorin ajokustannukset	1,40 mk/m ³ /100 m
Tienrakentamisen kustannukset	6 600 mk/100 m
Maastokorjauskerroin	1,4
Tieverkon korjauskerroin	1,7
Laskentajakso	30 vuotta
Korkokanta	3 %
Alueelta hakattava puumäärä	
Etelä-Suomi	88 m ³ /ha ¹⁾
Pohjois-Suomi	29 m ³ /ha ²⁾

- 1) 4,5 m³/ha/a 30 vuoden ajalta diskontattuna nykyhetken 3 %:n korolla
2) 1,5 m³/ha/a, aika ja korko kuten edellä

Taulukko 2. Peruslaskelman optimiratkaisu.

	Etelä-Suomi	Pohjois-Suomi
Tietiheys, m/ha	10,5	6,1
Kuljetusmatka keskimäärin, m	560	980
Tien välittömän vaikutusalueen etäisyys tiestä, m	800	1 400
Tiekustannukset laskentajaksolla, mk/ha	696	419

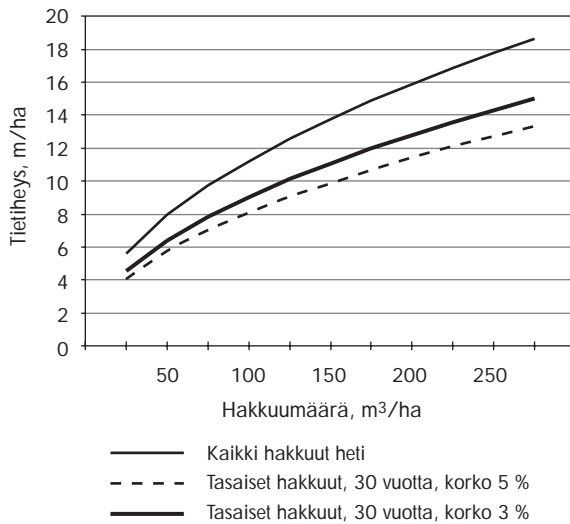
jaita keskimäärin 1,6 kilometrin etäisyydellä toisistaan. Pohjois-Suomessa välittömän vaikutusalueen raja on 1,4 kilometrin päässä tiestä.

Optimiratkaisussa tiestä ja puutavaran ajosta yhteensä aiheutuvat kustannukset ovat alimmillaan. Tällöin tiekustannukset ovat Etelä-Suomessa noin 700 ja Pohjois-Suomessa 420 markkaa hehtaaria kohti laskentajakson (30 vuotta) aikana.

3.2 Herkkyyksianalyysit

Hakkuumäärä, hakkuiden ajankohta ja korkokanta

Peruslaskelmassa vuotuiset, tasaiset hakkuumäärät 30 vuodelta (eli metsäkuljetuksen kustannussäästöt) diskontattiin nykyhetken kolmen prosentin korolla. Tällöin heti hakattava määrä oli Etelä-Suomessa



Kuva 2. Hakkuumäärän, hakkuiden ajoituksen ja korkokannan vaikutus optimaaliseen tietiheuteen.

88 kuutiometriä. Jos diskonttauksessa käytetään viiden prosentin korkoa, olisi heti hakattava määrä enää 69 kuutiometriä. Tällöin optimaalinen tietiheys laskee 9,3 metriin hehtaaria kohti (–1,2 m/ha) (kuva 2).

Jos taas oletetaan, että kaikki 30 vuoden hakkuut voitaisiin tehdä heti tienrakentamisen jälkeen, olisi välitön hakkuumäärä Etelä-Suomessa 135 kuutiometriä ($4,5 \text{ m}^3/\text{a} \times 30 \text{ a}$). Näin alueen optimaalinen tietiheys nousisi 13,1 metriin hehtaaria kohti (+2,6 m/ha). Vaikka tätä hakkuuoletusta ei voida pitää kovin realistisena, sen antama optimi kuvaa tulosten vakautta.

Kolmantena tapauksena voidaan esittää käytännössä todennäköinen tilanne, jossa hakkuut painotuvat tienrakentamista seuraavaan kymmenvuotiskauteen. Jos kokonaishakkuumäärä säilyy ennallaan, mutta hakkuita tehdään ensimmäisellä kymmenvuotiskaudella kaksinkertainen määrä keskiarvoon verrattuna, optimaalinen tietiheys nousee Etelä-Suomessa 11,1 (+0,6 m/ha) ja Pohjois-Suomessa 6,5 metriin hehtaaria kohti (+0,4 m/ha).

Pohjois-Suomen osalta tuloksia voidaan vielä tarkentaa. Jos Lappi erotetaan muusta Pohjois-Suomesta ja arvioidaan, että Kainuussa ja Pohjois-Pohjanmaalla suurin kestävä kertymäsuunnite on $1,9 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja Lapissa $1,0 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Metsäntutkimuslaitos,

metsätilastollinen tietopalvelu 1997), optimaalinen tietiheys putoaa Lapissa 5,0 metriin hehtaaria kohti (–1,1 m/ha). Kainuussa ja Pohjois-Pohjanmaalla se vastaavasti nousee 6,9 metriin hehtaaria kohti (+0,8 m/ha).

Käytännössä suurimmasta kestävästä hakkuukertymäsuunnitteesta on viime vuosina hakattu vain osa. Esimerkiksi vuosina 1987–1996 hakattiin yksityismetsistä Etelä-Suomessa keskimäärin 3,3 ja Pohjois-Suomessa 0,95 kuutiometriä hehtaarilta (Metsäntutkimuslaitos, metsätilastollinen tietopalvelu 1997). Jos hakkuut pysyvät jatkossakin tällä tasolla, on optimaalista tietiheyttä laskettaessa perusteltua korvata hakkuukertymäsuunnitteet toteutuneilla hakkuumäärillä. Tämän seurauksena optimaalinen tietiheys pienenee Etelä-Suomessa 9,0 (–1,5 m/ha) ja Pohjois-Suomessa 4,8 metriin hehtaarilta (–1,3 m/ha).

Laskentajakson pituus ja tien arvo sen jälkeen

Peruslaskelmassa tien hyödyt (ja kustannukset) laskettiin 30 vuoden jaksolta. Niemelä (1997) on esittänyt, että teiden kannattavuutta on järkevä arvioida enintään 20–30 vuoden aikajaksolla, koska tämä ”vastaa tien teknistä käyttöikää, kun välttämättömät kunnossapitotyöt toteutetaan”. Pitkää, 30 vuoden laskentajaksoa puoltaa myös se, että viimeaikoina rakennetut tiet on suunniteltu kestävämmän raskasta liikennettä, toisin kuin nyt perusparannusta kaipaavat metsätiet. Yleensä laskentajakson pituuden tulisi kuitenkin olla enintään 40 vuotta (Sundberg ja Silversides 1988, s. 110).

Peruslaskelmaa lyhyempää tarkastelujaksoa voidaan kuitenkin perustella sillä, että metsätalouden rahoituslainsäädännössä perusparannustukea voidaan antaa jo 20 vuotta vanhalle tielle (Kestävän... 1997). Jos laskentajakson pituus olisikin 30 vuoden sijasta 20 vuotta ja hakkuut tapahtuisivat tasaisesti tänä aikana, optimaalinen tietiheys laskisi Etelä-Suomessa 9,2 (–1,3 m/ha) ja Pohjois-Suomessa 5,3 (–0,8 m/ha) metriin hehtaaria kohti. Vastaavasti 40 vuoden tienpitoajalla optimaaliset tietihetydet olisivat 11,5 (+1,0 m/ha) ja 6,6 (+0,5 m/ha) metriä hehtaaria kohti. Muutokset ovat siis kokonaisuuden kannalta verrattain pieniä, ainakin jos niitä vertaamalla nykyisiin tavoitetietihetyksiin.

Tiellä on oma arvonsa myös teknisen käyttöikänsä jälkeen. Perusparannustilanteissa konkreettista hyötyä koituu lähinnä siitä, että varsinkin tien suunnittelukustannuksissa säästetään. Tämä koneinvestointien jäännösarvoon rinnastettava tiepohjan arvo voidaan ottaa mukaan optimointilaskelmiin tien rakennuskustannuksia alentavana tekijänä. Suunnittelukustannusten, jotka ovat noin 15 markkaa metriä kohti (Metsälautakuntien... 1992), poisjääminen perusparannustilanteessa vastaa tienrakentamiskustannusten 9 prosentin laskua (kolmen prosentin korolla). Tämän seurauksena optimaalinen tietiheys nousee Etelä-Suomessa noin 11,5 metriin hehtaaria kohti (+1,0 m/ha). Tiepohjan arvon mukaan ottaminen laskelmiin ei siis käytännössä juurikaan vaikuta tuloksiin.

Metsäkuljetus- ja tiekustannukset tulevaisuudessa

Tieinvestoinnit ovat pitkäaikaisia investointeja, joten nykytilanteen ohella on pyrittävä arvioimaan, miten optimaaliseen tietiheuteen vaikuttavat tekijät muuttuvat tulevaisuudessa. Puutavaran metsäkuljetuksen tuottavuus kohonnee edelleen, mutta huomattavasti hitaammin kuin tähän asti. Myös tienrakennuksen kustannukset saattavat alentua jonkin verran suunnittelun ja työnjohdon kilpailuttamisen myötä. Ne alenevat myös siinä tapauksessa, että ryhdytään entistä enemmän rakentamaan kevytrakenteisempia teitä, samoin kuin leimikkokohtaisia varsiteitä ja etenkin Pohjois-Suomessa talviteitä. Toisaalta helpoimmat tiekohteet lienee pääosin jo rakennettu, ja jäljellä olevien vaikeammat olosuhteet vaikuttavat tienrakennuskustannuksia lisäävästi.

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty, millainen vaikutus puutavaran metsäkuljetuksen ja tienrakentamisen kustannusmuutoksilla on optimaaliseen tietiheuteen ja lähikuljetusmatkaan. Jos puutavaran ajokustannukset nousisivat 20 prosenttia, optimaalinen tietiheys kasvaisi Etelä-Suomessa 11,6 metriin hehtaaria kohti (+1,1 m/ha) ja lähikuljetusmatka laskisi 510 metriin (kuva 3). Lähes vastaava vaikutus olisi sillä, että tienrakentamisen kustannuksia saataisiin alennetuksi 20 prosenttia (kuva 4).

Puutavaran metsäkuljetuksen ja tienrakentamisen erisuuntaisten kustannusmuutosten vaikutukset ovat siis keskenään samaa luokkaa ja suhteellisen pie-

niä. Jos molemmat kustannukset muuttuisivat samaan suuntaan, ne kumoaisivat toistensa vaikutusta. Jos kumpikin nousisi saman verran, optimi pysyisi ennallaan.

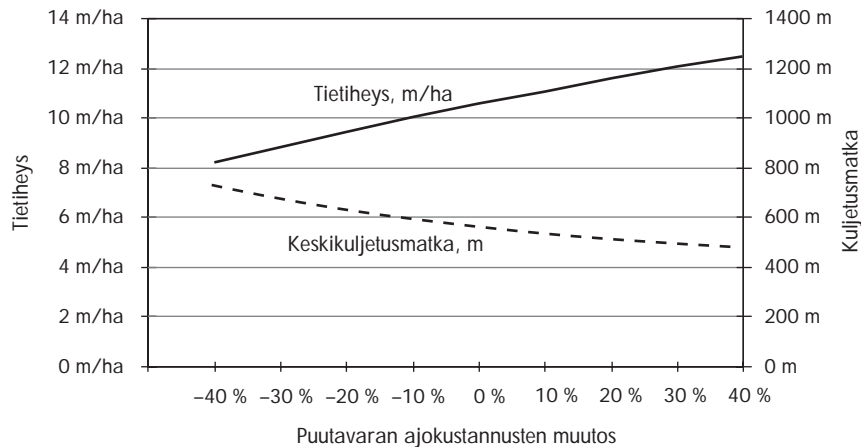
Peruslaskelmassa oletettiin, että metsäteiden kunnossapitokustannukset ja niiden metsänhoidolle ja perusparannukselle tuottamat kustannussäästöt ovat yhtä suuria. Todellisuudessa kunnossapitokustannukset saattavat kuitenkin olla metsänhoidon kustannussäästöjä suurempia. Tähän viittaa muun muassa tehty laskelma, jonka mukaan kunnossapitokustannusten mukaanottaminen (1 mk/m/a, korko 3 %, laskentajakso 30 vuotta) vastaisi tienrakennuskustannusten nousua 30 prosentilla, mutta teiden hyödyt metsänhoidolle ja perusparannukselle olisivat vain 10 prosenttia puunkorjuun hyödyistä. Näillä arvoilla laskien optimaalinen tietiheys putoaisi Etelä-Suomessa 9,5 metriin hehtaaria kohti (−1,0 m/ha) ja Pohjois-Suomessa 5,4 metriin hehtaaria kohti (−0,7 m/ha).

Kyseisten kustannusten vertailussa joudutaan kuitenkin tyytymään suhteellisen karkeisiin yleistyksiin. Tämä johtuu muun muassa siitä, että kunnossapitokustannukset ovat yleensä alkuvuosina vähäisiä, mutta kasvavat toisella kymmenvuotiskaudella. Metsänhoidolle ja perusparannukselle koituvista kustannussäästöistä taas huomattava osa realisoituu metsänviljelyn yhteydessä, eli ne riippuvat ennen muuta päätehdokuiden ajankohdasta.

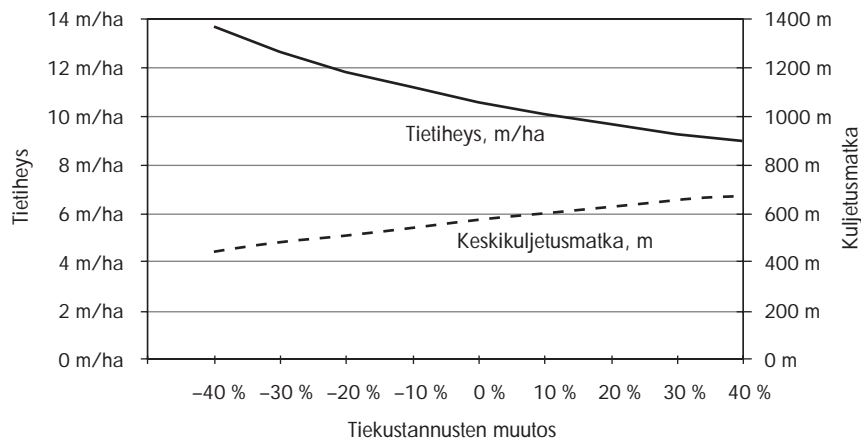
Korjauskertoimet

Myös maaston ja tieverkon korjauskertoimien merkitystä on syytä tarkastella, koska ne perustuvat pääosin arvioihin. Jos oletetaan, että puunkorjuuolosuhteet ovat esimerkiksi vesistöjen takia keskimääräistä vaikeammat (korjauskertoimet: tieverkko 1,9 ja maasto 1,6, tulo \approx 3,0), optimaalinen tietiheys nousee Etelä-Suomessa 11,8 metriin hehtaaria kohti (+1,3 m/ha) eli noin 10 prosenttia.

Jos taas oletetaan, että maasto-olosuhteet ovat Pohjois-Suomessa keskimääräistä helpompia ja tieverkko muuta maata yhdensuuntaisempi ja suurempi, voidaan Pohjois-Suomessa käyttää maastokorjauskerrointa 1,2 ja tieverkon korjauskerrointa 1,3 (tulo \approx 1,6). Tämän seurauksena alueen optimaalinen tietiheys laskisi 5,0 metriin hehtaaria kohti



Kuva 3. Optimaalinen tietiheys ja metsäkuljetusmatka Etelä-Suomessa, kun puutavaran ajokustannus poikkeaa lähtöarvostaan (1,4 mk/m³/100 m).



Kuva 4. Optimaalinen tietiheys ja metsäkuljetusmatka Etelä-Suomessa, kun tienrakennuskustannus poikkeaa lähtöarvostaan (6 600 mk/100 m).

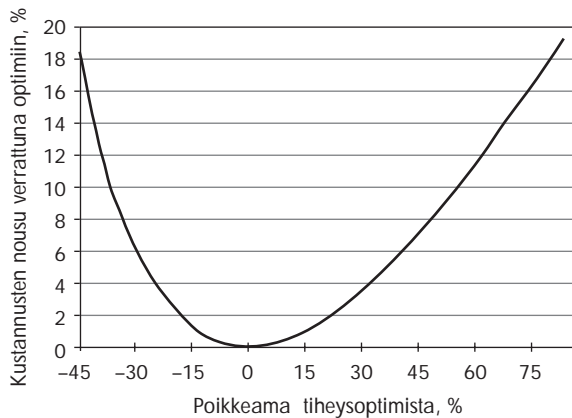
(-1,1 m/ha). Korjauskertoimien vaikutus optimaaliseen tietiheuteen saattaa siis enimmillään olla jopa 20 prosenttia.

Optimista poikkeamisen kustannusvaikutukset

Kokonaiskustannuksia kuvaavan käyrän (kuva 5) muodosta havaitaan, että optimia alhaisemmillä tietiheyksillä kustannukset nousevat jyrkemmin kuin

sitä suuremmilla tietiheyksillä. Tämä tarkoittaa sitä, että teiden ”liikarakentamisesta” ei aiheudu yhtä suuria lisäkustannuksia kuin liian harvasta tieverkosta.

Kustannusten nousu jää alle 5 prosenttiin, vaikka peruslaskelman optimista poiketaan 25 prosenttia suuntaan tai toiseen. Poikkeaman ollessa tätä suurempi alkavat kustannukset nousta nopeammin. Nousu jää kuitenkin suhteellisen pieneksi eli alle 10 prosenttiin niin kauan, kun tietiheys poikkeaa



Kuva 5. Optimiratkaisusta poikkeamisen kustannusvaihtokukset.

optimista $-35...+55$ prosenttia. Tämä tarkoittaa sitä, että tietiheys voi peruslaskelman oletuksilla vaihdella Etelä-Suomessa välillä $7-16$ m/ha ja Pohjois-Suomessa välillä $4-9$ m/ha ilman, että syntyy merkittäviä lisäkustannuksia.

Tavoiteltaessa Etelä-Suomessa 15 m/ha tietiheyttä poiketaan peruslaskelman optimista 40 prosenttia. Tällöin kokonaiskustannukset muodostuvat noin 6 prosenttia optimitalannetta suuremmiksi. Suhteellisesti ero on pieni, mutta markoissa se tarkoittaa useita kymmeniä miljoonia.

4 Tulosten tarkastelu

Suomessa metsäteiden rakentamisen tavoite on ollut alunperin metsätalouden ja etenkin nykyaikaisen puuhuollon kannalta välttämättömän infrastruktuurin luominen. Valtiovalta on tukenut tämän tavoitteen toteuttamista metsänparannusvaroin 50 vuotta. Tänä aikana metsäteiden tarvetta ja merkitystä metsätalouden kannalta ei ole kyseenalaistettu. Tienrakentamisen tavoitteet on päätetty ilman laajempaa keskustelua, saatikka syvällisempää tutkimusta tavoitteiden tasosta.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tiemäärän optimointia lähinnä puunkorjuun kannalta. Vaikka metsäteistä seuraa muitakin hyötyjä ja toisaalta haittoja, on puunkorjuun merkitys tienrakentamisen op-

timoinnissa keskeinen. Muiden tekijöiden poisjättämistä laskelmasta puoltaa osaltaan niiden arvottamiseen liittyvä epävarmuus.

Tietiheyden optimointi perustui muun muassa von Segebadenin (1964) sekä Sundbergin ja Silversidesin (1988) esittämään kaavaan, jossa hakkuumäärän sekä puutavaran ajo- ja tienrakennuskustannusten perusteella laskettua teoreettista optimia korjataan metsäkuljetusmatkan ja tiestön korjauskertoimilla. Optimitiemäärästä tehtiin peruslaskelma, jossa tulos laskettiin keskiarvotietojen perusteella. Tämän jälkeen tarkasteltiin eri tekijöiden muutosten vaikutusta herkkyyksianalyyysien avulla.

Peruslaskelman mukaan optimaalinen tietiheys on Etelä-Suomessa $10,5$ m/ha ja sitä vastaava keskimääräinen metsäkuljetusmatka 560 metriä. Pohjois-Suomessa vastaavat tulokset ovat $6,1$ m/ha ja 980 metriä. Optimiratkaisu ei ole herkkä laskentaperusteissa tapahtuville muutoksille ja tietiheys saa poiketa optimista varsin paljon ilman, että syntyy merkittäviä taloudellisia tappioita. Etelä-Suomessa tilanne muuttuu oleellisesti vasta, kun teitä on alle 7 tai yli 16 ja Pohjois-Suomessa alle 4 tai yli 9 metriä hehtaarilla. Tällöin kokonaiskustannukset muodostuvat vähintään kymmenen prosenttia optimiratkaisua suuremmiksi.

Peruslaskelmassa tehtiin joitakin suhteellisen karkeita yksinkertaistuksia, kuten että hakkuumahdollisuudet ovat jakautuneet tasaisesti tien vaikutusalueelle ja että puutavara voidaan kuljettaa tielle sen molemmilta puolilta. Siksi olisi mielenkiintoista verrata nyt saatuja tuloksia aikaisempiin. Vertailu on kuitenkin hankalaa, koska laskentaperusteet ovat eri tutkimuksissa kovin erilaisia. Esimerkiksi Rysä (1971) ei ottanut korkoa lainkaan huomioon ja Tan (1992) tarkasteli optimaalista tietiheyttä vain yhdellä Kemijärven alueella. On kuitenkin mielenkiintoista havaita, että kaikkien tutkimusten tulokset ovat vakaita, ts. ne eivät ole herkkiä lähtöarvojen muutoksille.

Etelä-Suomen osalta on maa- ja metsätalousministeriön määräyksissä (Kestävän... 1997) esitetty tiestön tavoitetiheydeksi 15 m/ha, joka on lähes puolitoistakertainen tässä tutkimuksessa laskettuun optimitietiheyteen verrattuna. Optimilaskelmaa korkeampaa tavoitetta on perusteltu puuntuotannon, puunkorjuun logistiikan ja monikäytön saamalla hyödyillä (Metsäkeskusten... 1997). Sitä voidaan

perustella myös sillä, että lyhyet metsäkuljetusmatkat vähentävät metsätraktoreiden aiheuttamia korjuuvaurioita ja helpottavat puunkorjuun järjestelyä, kun puutavaran kuljetusta naapurimetsälöiden kautta voidaan vähentää. Lisäksi tiheä tieverkko edesauttaa ympäristönäkökohtien huomioon ottamista parantamalla pienipiirteisen metsänkäsitteilyn kannattavuutta.

Ainakin puuntuotannon ja monikäytön hyödyt optimitiheyden nostajana voidaan kuitenkin osin kyseenalaistaa, sillä selvästi korkeimmat vaatimukset tietheyden ja myös tiestön laadun suhteen on puunkorjuulla. Lisäksi korkeampaa tavoitetta perusteltaessa ei ole otettu huomioon ympärivuotisen puunkorjuun lisääntymisen tai tiheän tieverkon ekologisia ja maisemallisia haittoja. Voidaan myös kysyä, kuinka merkittävä hakkuita tai metsänhoitotöitä aktivoiva vaikutus nyt laskettua puunkorjuuseen perustuvaa optimitiheyttä suuremmalla tietheydellä enää on.

Yksityismetsätaloudessa tietiheystavoitteet on suhteutettu pitkän aikavälin keskimääräisiin hakkuumahdollisuuksiin (Niemelä 1997) ja näin tehdään tässäkin tutkimuksessa. Keskimääräisten hakkuumahdollisuuksien käyttöä tiestön optimoinnin perusteena voidaan pitää perusteltuna, kun kysymyksessä on yleistä infrastruktuuria vahvistava runko- tai aluetie. Keskimittaisenkin metsätiehankkeen vaikutusalue on varsin laaja eli 300–600 hehtaaria, joten sen vaikutusalueella on useita metsätiloja ja päätöksentekijöitä. Tämä taas johtaa yleensä pienehköihin metsikkökuviioihin ja mosaiikkimaiseen metsien käsittelyyn, eli alueen hakkuut lähestyvät keskimääräisiä hakkuumahdollisuuksia.

Toinen vaihtoehto olisi optimoida tietiheys tapauskohtaisesti ja käyttää optimoinnissa päätöksentekohetken hakkuumahdollisuuksia. Tällöin tienrakennus olisi kiinteä osa puunkorjuuta, mikä on yleinen tilanne esimerkiksi Pohjois-Amerikassa. Tämän seurauksena teitä rakennettaisiin ensisijassa sinne, mihin hakkuut suunnataan. Optimaalinen tietiheys olisi tässä tapauksessa suurempi kuin keskiarvohakkuilla laskien, sillä hakkuumäärät olisivat suuremmat ja hakkuut ajoittuisivat lyhyemmälle ajalle.

Suomessa Metsähallituksella ja metsäteollisuusyrityksillä on ollut mahdollisuus perustaa metsätie-strategiansa edellä mainitulle ajattelulle; joskin huomattava osuus niidenkin teistä on rakennettu yhteis-

hankkeina. Myös yksityismetsätaloudessa runko- ja alueteitä täydentävien varsiteiden rakentaminen tulisi suunnata hakkuiden mukaan. Jos näin pystyttäisiin menettelemään, kannattaisi Etelä-Suomessa tavoitella jopa 15–18 m/ha tietiheyksiä. Samalla etenkin varsitiet muodostuisivat liiketaloudellisesti kannattaviksi ilman julkista tukeakin

Lopuksi on syytä korostaa, että metsäteiden kansantaloudellisia hyötyjä arvioitaessa on tehtävä selkeä ero nykyisen tieverkon ja uusien teiden vaikutusten välille. Oleellista on arvioida sitä, kuinka paljon *lisähyötyä* uusien teiden avulla on vielä saavutettavissa, kun vaihtoehtona on esimerkiksi nykyisen tieverkon kunnossapito ja parantaminen.

On selvää, että uusien teiden aikaansaama rajahyöty yhteiskunnan kannalta – oli kyse sitten puunkuljetuksista, tuoreen puun ympärivuotisesta saataavuudesta, metsien monikäytöstä tai maaseudun elinvoimaisuudesta – alkaa väistämättä laskea jossakin vaiheessa. Silloin on tärkeää tarkastella tienrakennuksen julkista tukea nykyistä kriittisemmin ja suunnata se sellaisiin kohteisiin, joissa sen kansantaloudelliset hyödyt ovat mahdollisimman suuret. Tässä suhteessa metsätienrakentamisen, ja yleensäkin metsätalouden julkisen tuen optimaalinen kohdentaminen vaatisi runsaasti lisätutkimusta.

Kiitokset

Kiitämme prof. Matti Keltikangasta, MML Antti Korpilahtea, MMM Hannu Niemelää, MH Tapani Honkasta, MMM, VTK Jukka Aarniota, MMT Heikki Pajuojaa, MMM Jouni Väkevää ja MMM Juha Rajamäkeä hyödyllisistä parannusehdotuksista.

Kirjallisuus

- Greulich, F.E. 1997. Optimal economic selection of road design standards for timber harvesting operations – a corrected analytical model. *Forest Science* 43: 589–594.
- Kestävän metsätalouden rahoituksesta annetun lain nojalla annettavat puuntuotannon kestävyuden turvaamiseksi tehtäviä töitä koskevat määräykset. 1997. Maa- ja metsätalousministeriön määräykset nro 66/97. 7 s.

- Koger, J.L. & Webster, D.B. 1984. L-O-S-T: Logging optimization selection technique. USDA Forest Service Research Paper SO-203. New Orleans. 66 s.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, J. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38 s.
- Larsson, G. 1959. Studies on forest road planning. Transaction of the Royal Institute of Technology 147. Stockholm. 136 s.
- & Rydstern, O. 1968. Economic design of motor truck haul road systems in forest areas. Acta Polytechnica Scandinavica Ci 52. Stockholm. 85 s.
- Liu, K. & Sessions, J. 1993. Preliminary planning of road systems using digital terrain models. Journal of Forest Engineering 4: 27–32.
- Mathews, D.M. 1942. Cost control in the logging industry. McGraw-Hill, New York. 374 s.
- Metsäkeskusten tavoitteet ja toimintojen vaikuttavuus. 1997. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Moniste. 27 s.
- Metsälautakuntien taloudellisuustunnukset 1992. 1993. Moniste. Metsäkeskus Tapio. 25 s.
- Metsätalastolliset vuosikirjat 1987–1997. Metsäntutkimuslaitos.
- Metsätalastollinen vuosikirja 1996. 1996. Metsäntutkimuslaitos. 352 s.
- Metsätalastollinen vuosikirja 1997. 1997. Metsäntutkimuslaitos. 348 s.
- Niemelä, H. 1991. Mikä on metsäteiden rakentamisen kannattavuus? Koneyrittäjä 8/1991. s. 22–23.
- 1997. Metsätiet. Tapion taskukirja. 23. painos. Metsälehti. Helsinki. s. 490–497.
- Nurmikari, P. 1985. Metsätiestä koituvasta hyödystä sekä hyödyn ja tien käytön välisestä suhteesta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, maanmittausosasto. 85 s.
- Oijala, T., Säteri, L. & Örn, J. 1997. Puunkorjuun ja puutavaran kaukokuljetuksen kustannukset vuonna 1996. Metsätehon katsaus 3/1997. 4 s.
- Peters, P.A. 1978. Spacing of roads and landings to minimize timber harvest costs. Forest Science 24: 209–217.
- & Burke, J.D. 1972. Average yarding distance on irregular-shaped timber harvest settings. USDA Forest Service Research Note PNW-178. Portland, Oregon. 13 s.
- Peyton, G. 1973. An approach to proper branch road layout. Pulp and Paper Magazine of Canada 74: 49–60.
- Puun maakuljetusolojen kehittäminen. Vuoden 1949 metsätaloustieteiden tutkimuskomitean mietintö n:o I. 1952. Silva Fennica 73. 72 s.
- Ranta, M. 1984. Metsäteiden kunnossapito, kunto ja kunnostustarve. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. 82 s.
- Rysä, M. 1971. Edullisimman autotietihyödyn ja lähikuljetusmatkan määrittäminen. Metsätehon tiedotus 305. 30 s.
- Segebaden, G. von. 1964. Studies of cross-country transport distances and road net extension. Studia Forestalia Suecica 18. Skoghögskolan, Stockholm. 69 s.
- Seilo, J. 1994. Puuston huomioon ottaminen yksityisten metsäteiden rakentamisen kustannusten osittelussa. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. 56 s.
- Suddarth, S.K. & Herrick, A.M. 1964. Average skidding distance for theoretical analysis of logging costs. USDA Forest Service Research Bulletin 789. Ind. Agric. Exp. Stn., Lafayette. 6 s.
- Sundberg, U. & Silversides, C.R. (toim.). 1988. Operational efficiency in forestry. Volume 1: Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 219 s.
- Tan, J. 1992. Planning a forest road network by a spatial data handling-network routing system. Acta Forestalia Fennica 227. 85 s.
- Thompson, M.A. 1988. Optimizing spur road spacing on the basis of profit potential. Forest Products Journal 38: 53–57.
- Thureson, T. 1994. Tactical planning in forestry. Estimation of cutting priorities, forest road optimization, present net value predictions and visualization of the future forests using satellite data and GIS. Swedish University of Agricultural Sciences, Section of Forest Mensuration and Management, Report 28. Umeå. 25 s.
- Weintraub, A. & Navon, D. 1976. A forest management planning model integrating silvicultural and transportation activities. Management Science 22: 1299–1309.
- Wijngaard, P.J.M. & Reinders, M.P. 1985. Optimization of a forest road network. Netherlands Journal of Agricultural Science 33: 175–179.

32 viitettä

Liite 1. Optimaalisen tietiheyden ja metsäkuljetusmatkan määrittäminen

(ks. esim. Segebaden 1964, s. 36–39; Sundberg ja Silversides 1988, s. 66–83).

Metsäkuljetuskustannukset lasketaan yleensä kuutiometriä ja tienrakennuskustannukset metriä kohti. Koska hakattavan puuston määrä on tärkein tietiheyteen vaikuttava tekijä, optimoinnissa on kuitenkin luontevaa laskea molemmat kustannukset kuutiometriä kohti.

Maastokorjauskertoimen ja tieverkon korjauskertoimen avulla laskennalliset suoraviivaiset etäisyydet metsässä muutetaan enemmän todellisuutta vastaaviksi, eli niiden avulla otetaan huomioon mm. metsätraktorin kiertely maastossa ja tieverkon mutkittelu. Tällöin saadaan

$$C_{\text{metsäkuljetus}} = C_1 + a \frac{S \times M_{\text{korj}}}{4} \quad (1)$$

$$C_{\text{tienrakennus}} = \frac{C_R \times T_{\text{korj}}}{QS} \quad (2)$$

missä

C_1 = metsätraktorin lastaus- ja purkamiskustannukset, mk/m³

a = metsätraktorin muuttuvat kuljetuskustannukset, mk/m³/100 m

S = teiden laskennallinen etäisyys toisistaan, 100 m

M_{korj} = maastokorjauskerroin

C_R = tienrakentamisen kustannukset, mk/100 m

T_{korj} = tieverkon korjauskerroin

Q = tien vaikutusalueen hakkuukertymä hehtaaria kohti, m³/ha.

Kaavan (2) nimittäjä kuvaa tien vaikutusalueen hakkuukertymää. Mitä enemmän alueella on hakattavaa puus- toa hehtaaria kohti (Q) ja mitä suurempi alue on kyseessä (S), sitä pienemmiksi tienrakentamisen kustannukset kuutiometriä kohti muodostuvat.

Kaavoihin voitaisiin vielä lisätä metsänhoidossa ja perusparannuksessa saavutettavat kustannussäästöt sekä tien ylläpitokustannukset, mutta koska näitä tekijöitä ei suoraan sisällytetty tehtyihin laskelmiin, ne jätettiin pois myös kaavoista. Metsänhoidon ja perusparannuksen kustannussäästöjen lisääminen edellyttäisi, että kustannuk-

set muutettaisiin hehtaarikohtaisiksi, jolloin niille saataisiin mielekäs tulkinta.

Kokonaiskustannusten minimoimiseksi merkitään

$$\begin{aligned} \text{Min}_S Z &= C_{\text{metsäkuljetus}} + C_{\text{tienrakennus}} \\ &= C_1 + a \frac{S \times M_{\text{korj}}}{4} + \frac{C_R \times T_{\text{korj}}}{QS} \end{aligned} \quad (3)$$

Optimipisteen löytämiseksi otetaan yhtälöstä 1. derivaatta, jolloin saadaan

$$\frac{\partial Z}{\partial S} = \frac{a \times M_{\text{korj}}}{4} - \frac{C_R \times T_{\text{korj}}}{QS^2} \quad (4)$$

Asettamalla tämän yhtälön arvo nolllaksi saadaan metsäteiden välinen (laskennallinen) optimaalinen etäisyys

$$S = 2 \sqrt{\frac{C_R \times T_{\text{korj}}}{Q \times a \times M_{\text{korj}}}} \quad (5)$$

Metsätraktorin lastaus- ja purkamiskustannukset eivät siis vaikuta optimiin. Koska todelliselle metsäkuljetusmatkalle (L_0) pätee

$$L_0 = \frac{S}{4} \times M_{\text{korj}} \quad (6)$$

saadaan optimaaliseksi todelliseksi lähikuljetusmatkaksi

$$L_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_R \times M_{\text{korj}} \times T_{\text{korj}}}{Q \times a}} \quad (7)$$

Vastaavasti koska optimaaliselle todelliselle tietiheydelle (V_0) pätee

$$V_0 = \frac{T_{\text{korj}}}{S} \quad (8)$$

saadaan optimaaliseksi tietiheydeksi

$$V_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Q \times a \times M_{\text{korj}} \times T_{\text{korj}}}{C_R}} \quad (9)$$