METSÄTEHON TIEDOTUS
METSÄTEHO REPORT

METSÄTEHO SUOMEN PUUNJALOSTUSTEOLLISUUDEN KESKUSLIITON METSÄTYÖNTUTKIMUSOSASTO
FOREST WORK STUDY SECTION OF THE CENTRAL ASSOCIATION OF FINNISH WOODWORKING INDUSTRIES

305

Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan määrittäminen

DETERMINATION OF THE MOST ECONOMIC MOTOR ROAD DENSITY AND SHORT-DISTANCE HAUL

MIKKO RYSÄ

HELSINKI 1971

Metsätehon tiedotus — Metsäteho Report 305

M E T S Ä T E H O
Suomen Puunjalostusteollisuuden Keskusliiton metsätyöntutkimusosasto
Forest Work Study Section of the Central Association of Finnish Woodworking Industries

E D U L L I S I M M A N
A U T O T I E T I H E Y D E N J A
L Ä H I K U L J E T U S M A T K A N M Ä Ä R I T T Ä M I N E N

Determination of the Most Economic Motor Road Density and Short-Distance Haul

Mikko Rysä

S I S Ä L L Y S L U E T T E L O
T a b l e o f C o n t e n t s

	Sivu Page
TIIVISTELMÄ	3
1 JOHDANTO	5
11 Tutkimuksen tarkoitus	5
12 Autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan optimoinnin periaate	5
2 LASKENTAPERUSTEET	6
21 Laskelmissa käytetyt metsätraktorityypit	6
22 Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset	7
23 Autotiekustannukset	8
24 Autotien rakentaminen leimikolle	9
25 Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan laskeminen teoreettisessa kuljetusmallissa	12
26 Maastokorjauskerroin	13
27 Tieverkon korjauskerroin	14
28 Edullisimman autotietiheyden ja sitä vastaavan lähikuljetusmatkan laskeminen todellisissa kuljetusolosuhteissa	15
3 TUTKIMUSTULOKSET	17
31 Edullisimmat autotietiheydet ja niitä vastaavat todelliset lähikuljetusmatkat	17
4 ERI TEKIJÖIDEN VAIKUTUS EDULLISIMPAAN AUTOTIETIHEYTEEN JA LÄHIKULJETUSMATKAAN	17
41 Muuttuvien traktorikuljetuskustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan	17
42 Autotiekustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan	18
43 Maaston ja tiestön vaikutusaste sekä edullisin autotietiheys ja lähikuljetusmatka	20
5 LISÄKUSTANNUKSET MUILLA KUIN EDULLISIMMILLA AUTOTIETIHEYKSILLÄ	21
6 OPTIMOINTILASKELMAN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	22
LIITTEET	26
KIRJALLISUUTTA — R e f e r e n c e s	28
S U M M A R Y (in English)	29

T I I V I S T E L M Ä

Tiedotuksessa on esitetty suunnittelumalli edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan määrittämiseksi. Suunnittelumalli on tarkoitettu käytettäväksi leimikon tai leimikkokeskityksen sisään rakennettavan autotieverkon suunnittelussa.

Laskelmat on suoritettu nykyisin käytössä oleville kuorma- ja runkojuontotraktoreille (vrt. taulukko 1, s. 6). Näiden traktoreiden muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, ts. lähikuljetuksen kustannukset ilman kuormausta ja purkamista, on esitetty taulukossa 2 (s. 8). Hinta- ja kustannustaso vastaa vuoden 1970 alkupuolta ja traktoreiden keskiajonopeudet ja kuormien keskikoot perustuvat Metsätehon ao. traktoreita koskeviin tutkimuksiin.

Autotiekustannuksia eri olosuhteissa ei tämän tutkimuksen yhteydessä käsitelty, vaan laskelmat suoritettiin erisuuruisille autotiekustannuksille.

Autotien rakentaminen leimikolle on yleensä ratkaistavissa pelkästään muuttuvien traktorikuljetuskustannusten, autotiekustannusten sekä leimikon koon perusteella. Kuvassa 2 (s. 12) on esitetty autotien rakentamisen kannattavuus erilaisilla muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla. Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat yleensä alhaisemmat leimikon ja olemassa olevan autotien välillä kuin leimikon sisällä. Tämä johtuu siitä, että leimikon ja olemassa olevan autotien välillä ajo ei ole enää keräilyn ja kokoamisen luonteista, kuten hakkuualueella.

Leimikon sisäisen tieverkon optimointimalli rakentuu kuvan 3 (s. 13) teoreettiseen kuljetusmalliin, joka muunnetaan vastaamaan todellisia kuljetusolosuhteita maastokorjauskertoimen (s. 13 – 14) ja autotieverkon korjauskertoimen (s. 14 – 15) avulla.

Taulukossa 3 (s. 16) on esitetty edullisimmat autotietiheydet ja näitä vastaavat keskimääräiset lähikuljetusmatkat eri traktorityypeillä, leimikkotiheyksillä ja autotiekustannuksilla. Edullisimmat tietiheydet on lisäksi esitetty kuvassa 4 (s. 16) ja niitä vastaavat keskimääräiset lähikuljetusmatkat kuvassa 5 (s. 16).

Muuttuvien traktorikuljetuskustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan on esitetty kuvassa 6 (s. 17). Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset vaikuttavat edullisimpaan autotietiheyteen siten, että mitä suuremmat ne ovat, sitä suurempi tulee autotietiheyden olla. Taulukossa 4 (s. 18) on esitetty korjauskertoimet autotietiheydelle ja lähikuljetusmatkalle, jos laskelmissa sovelletaan muita kuin taulukon 3 muuttuvia traktorikuljetuskustannuksia.

Autotiekustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan on esitetty kuvassa 7 (s. 19). Mitä korkeammat ovat autotiekustannukset, sitä pienempi on edullisin autotietiheys ja sitä pitempi vastaavasti edullisin lähikuljetusmatka. Taulukossa 5 (s. 19) on esitetty korjauskertoimet edullisimmalle autotietiheydelle ja lähikuljetusmatkalle muilla kuin taulukon 3 autotiekustannuksilla.

Maasto-olosuhteista ja rakennettavan autotieverkon muodosta johtuvat edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan korjauskertoimet on esitetty taulukossa 6 (s. 20). Mitä epäedullisemmat ovat ajon maasto-olosuhteet ja mitä enemmän rakennettava autotieverkko poikkeaa teoreettisen kuljetusmallin mukaisesta autotieverkosta, sitä suurempi on edullisin autotietiheys.

Jos edullisimmasta autotietiheydestä poiketaan, kuljetuksen kokonaiskustannukset kohoavat. Lisäkustannukset on esitetty suhteellisina kuvassa 8 (s. 21). Absoluuttiset lisäkustannukset eri leimikkotiheyksillä ja autotiekustannuksilla on esitetty taulukossa 7 (s. 22). Lisäkustannukset ovat vailla käytännöllistä merkitystä, kun edullisimmasta autotietiheydestä poiketaan alle 20 % suuntaan tai toiseen. Poikkeaminen edullisimmasta autotietiheydestä aiheuttaa aina sitä enemmän lisäkustannuksia, mitä alhaisempi on leimikon tiheys sekä mitä korkeammat ovat autotiekustannukset ja muuttuvat traktorikuljetuskustannukset leimikossa.

Kohdassa 6 (s. 22–25) on esitetty suunnittelumallin soveltaminen käytäntöön esimerkein.

1 JOHDANTO

11 Tutkimuksen tarkoitus

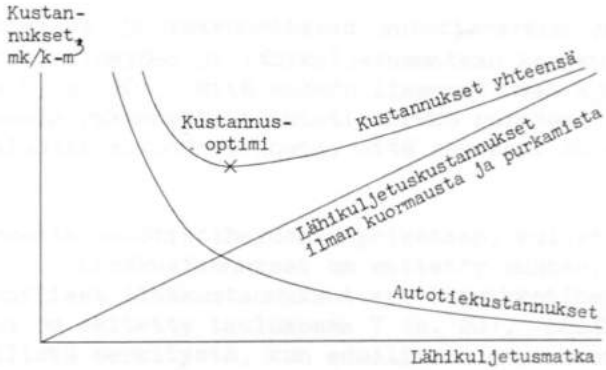
Puutavaran kuljetusten suunnittelussa muodostaa lähikuljetuksen ja autokuljetuksen liittäminen toisiinsa taloudellisesti edullisimmalla tavalla, ts. kokonaiskustannukset minimoiden, tärkeän osan. Käsillä olevassa tutkimuksessa pyritään selvittämään edullisin autotietiheys leimikossa ja sitä vastaava lähikuljetusmatka meillä yleisesti käytössä oleville metsätraktorityypeille sekä lähikuljetus- ja autotiekustannusten vaihteluiden vaikutus optimiratkaisuun. Koska valittu lähikuljetusmatka vaikuttaa aina korjuun kokonaiskustannuksiin, on pyritty selvittämään myös lähikuljetusmatkan vaihteluiden kustannusvaikutuksia. Tutkimustulokset on tarkoitettu käytettäviksi leimikon tai leimikkokeskityksen autotieverkon suunnittelussa.

12 Autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan optimoinnin periaate

Tiellä tapahtuvan autokuljetuksen kustannukset ovat matka- ja kuutioyksikköä kohti huomattavasti alhaisemmat kuin maastossa ja ajouralla tapahtuvan traktorikuljetuksen vastaavat kustannukset. Toisaalta taas autokuljetuksessa tarvittavien teiden rakentamiskustannukset tien pituusyksikköä kohti ovat yleensä suhteellisen korkeat. Tihentämällä autotieverkkoa hakkuualueella päästään lyhyempiin lähikuljetusmatkoihin, mutta samalla kohoavat tien rakennus- ja ylläpitokustannukset.

Edullisimman lähikuljetusmatkan määrittämisen periaate on esitetty kuvassa 1.

Edullisin autotietiheys ja lähikuljetusmatka määritetään käytettävän traktorin muuttuvien traktorikuljetuskustannusten, autotiekustannusten sekä leimikon tiheyden avulla. Muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla tarkoitetaan seuraavassa lähikuljetuksen kustannuksia ilman kuormausta ja purkamista. Autokuljetuksen kus-



Kuva 1. Edullisimman lähikuljetusmatkan määrittämisen periaate

tannuksilla ei ole käytännöllistä merkitystä tässä ratkaisussa. Lähikuljetusmatka on edullisin silloin, kun tiekustannukset ovat yhtä suuret kuin muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, molemmat kiintokuutiometriä kohti laskettuina.

2 LASKENTAPERUSTEET

21 Laskelmissa käytetyt metsätraktorityypit

Taulukossa 1 on esitetty seuraavissa laskelmissa käytettävä metsätraktorityyppien jaottelu.

Taulukko – Table 1

Metsätraktorityyppien jaottelu

Distribution of forest tractor types used

Traktorityyppi Tractor type	Metsätraktori- tyypin teho, hv Effect, HP	Hinta, mk Price, Fmk	Miehitys Crew
Pieni kuormatraktori Small forwarder	60...75	80 000...90 000	kuljettaja driver
Suuri kuormatraktori Big forwarder	130...140	140 000...160 000	kuljettaja driver
Pieni runkojuontotraktori Small skidder	70...80	60 000...90 000	kuljettaja + 1 apumies driver + helper
Suuri runkojuontotraktori Big skidder	110...130	100 000...120 000	kuljettaja + 1 apumies driver + helper

22 Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset

Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset lasketaan seuraavasti.

$$\text{Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m}^3 \text{ ja 100 m} = \frac{2 \times \text{traktorin käyttökustannukset, mk/min}}{\text{traktorin keskinopeus, 100 m/min} \times \text{kuorman keskikoko, k-m}^3}$$

Traktorin käyttökustannuksiin sisältyvät traktorin kiinteät ja muuttuvat kustannukset kokonaisuudessaan. Runkojuontotraktorin palkkakustannuksiin sisältyy myös apumiehen palkka. Käytetyt kustannukset vastaavat vuoden 1970 alkupuolen hinta- ja kustannustasoa, ja ne koskevat meillä tällä hetkellä yleisesti käytössä olevia metsätraktoreita. Vuotuisena käyttötuntimääränä on laskelmissa pidetty 1 750 tuntia.

Traktorin keskinopeudella tarkoitetaan tässä sitä nopeutta, jolla ajoneuvo keskimäärin (kuormattuna ja tyhjänä) ajon aikana liikkuu maastossa tai ajouralla. Seuraavien laskelmien yksinkertaistamiseksi on muuttuvia traktorikuljetuskustannuksia käsitelty ajomatkasta riippumattomina. Lyhyillä juontomatkoilla muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat kuitenkin suuremmat kuin pitkillä matkoilla. Virheen merkitys pienenee keskikuljetusmatkan pidetessä. Olennaista virhettä edullisimman autotietiheyden määrityksessä tämä yksinkertaistus ei yleensä aiheuta.

Muuttuvia traktorikuljetuskustannuksia laskettaessa on seuraavassa käytetty Metsätehon eri traktoreita koskevia aineistoja ja niiden keskimääräisiä kuorman keskikoko- ja traktorin keskinopeusarvoja. Saatuja keskiarvoja on verrattu ruotsalaisten tutkijoiden vastaavissa tutkimuksissa käyttämiin keskinopeus- ja kuorman keskikokoarvoihin.

Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan laskemisessa voidaan eri metsätraktorityypeillä käyttää taulukon 2 mukaisia muuttuvia traktorikuljetuskustannuksia. Taulukossa on myös esitetty muuttuviin traktorikuljetuskustannuksiin vaikuttavat tekijät ja näiden laskelmissa käytetyt arvot. Taulukon arvot perustuvat sulan maan aikana keskinkertaisissa maasto-olosuhteissa suoritettuihin tutkimuksiin.

Pienillä traktoreilla on seuraavissa laskelmissa käytetty sekä runkojuonto- että kuormatraktoreiden muuttuvina traktorikuljetuskustannuksina 0,40 mk:aa/k-m^3 ja 100 m sekä suurilla traktoreilla vastaavasti 0,30 mk:aa/k-m^3 ja 100 m.

Traktorin keskinopeuteen ja kuorman keskikokoon vaikuttavat käytettävän traktorin tekniset ominaisuudet, traktorin kuljettaja sekä lähikuljetuksen kuljetustekniset olosuhteet. Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset (keskinopeus ja kuorman keskikoko) on tämän vuoksi syytä tarkistaa kussakin yksityistapauksessa erik-

T a u l u k k o – Table 2

Eri metsätraktorityyppien käyttökustannukset, keskinopeudet, kuormien keskimääräiset koot sekä muuttuvat traktorikuljetuskustannukset

Operating costs, average speeds, average load sizes and variable tractor haulage costs for the different forest tractor types

Traktorityyppi Tractor type	Käyttö-kustannukset, mk/min Operating costs, Fmks/min	Keski-nopeus, 100 m/min Average speed, 100 m/min	Kuorman keskikoko, k-m³ Average load size, cu.m(s)	Muuttuvat traktorikuljetus-kustannukset, mk/k-m³ ja 100 m Variable tractor haulage costs, marks/cu.m(s) and 100 m
Pieni kuormatraktori Small forwarder	0,53	0.40	7.0	0,38
Suuri kuormatraktori Big forwarder	0,70	0.50	10.0	0,28
Pieni runkojuontotraktori Small skidder	0,50	0.60	4.0	0,42
Suuri runkojuontotraktori Big skidder	0,62	0.80	5.0	0,31

seen. Jos muuttuvat traktorikuljetuskustannukset poikkeavat selvästi taulukon 2 arvoista, autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan määrityksessä noudatetaan kohdan 41 (s. 17–18) mukaista menettelyä.

23 Autotiekustannukset

Autotiekustannuksiin kuuluvat tien rakennus- ja hoitokustannukset. Autotiekustannukset lasketaan kuljetusalueella kiintokuutiometriä kohti. Teiden rakentamiskustannuksiin vaikuttavat eri ajankohtina ko. alueelle ominaiset, paikalliset olosuhteet. Lisäksi autotiekustannukset riippuvat siitä, miten hyväksi tie rakennetaan ja minkälaisia vaatimuksia autokuljetuskalusto tielle asettaa. Mikäli autotiekustannukset vaihtelevat huomattavasti leimikon sisällä, leimikko voidaan jakaa osiin erilaisten tiekustannusten perusteella. Leimikon osien tulee kunkin muodostaa luonnollinen kuljetusalue ainakin yhdelle autotiehaaralle.

Tässä tutkimuksessa ei yksityisen leimikon sisään rakennettavan autotieverkon osalta ole otettu huomioon korkokustannuksia. Toisaalta ei laskelmissa ole myöskään otettu huomioon teiden myöhemmin tapahtuvaa käyttöä. Tämä edellyttää kuljetusten suorittamista keskitetysti lyhyen ajanjakson (1...2 vuoden) aikana asianomaisella kuljetusalueella.

Autotiekustannusten analysointi erilaisissa olosuhteissa ei kuulu tämän tutkimuksen piiriin, vaan tiekustannukset oletetaan tien pituusyksikköä kohti tunnetuik-

si. Seuraavissa laskelmissa autotiet jaetaan kolmeen tiekustannusluokkaan: 1 500, 3 000 ja 5 000 mk/km. Näillä tiekustannusluokilla lasketaan edullisin autotietiheys ja lähikuljetusmatka eri traktoreille. Jos autotiekustannukset poikkeavat merkittävästi näistä esimerkkiluokista, edullisin lähikuljetusmatka ja autotietiheys voidaan laskea kohdan 42 (s. 18–20) mukaisesti.

24 Autotien rakentaminen leimikolle

Siinä tapauksessa, että korjuualueelle ei ole tietä, on ensin ratkaistava, kannattaako tie yleensä rakentaa vai kuljetetaanko puutavara "tyhjän" alueen yli traktorilla. Tyhjällä alueella tarkoitetaan tässä sitä osaa traktorikuljetusalueesta, jolla ei ole hakattua puutavaraa. Sama ongelma koskee myös leimikon erillisiä osia, ts. on ratkaistava, onko jostakin leimikon osasta kannattavampaa kuljettaa puutavara traktorilla ja jättää autotie sinne rakentamatta. Ongelma ratkaistaan vertaamalla traktorikuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia vastaavaan autokuljetus- ja autotiekustannusten summaan.

Traktorikuljetuksen kustannuksia voidaan merkitä seuraavasti.

(1) $K_{tr} = K_m + K_r$, missä K_{tr} = traktorikuljetuksesta aiheutuvat kustannukset yht., mk/k-m^3 ja 100 m

K_m = muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m

K_r = traktoriuran raivauskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m

Autokuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia merkitään vastaavasti.

(2) $K_a = K_{ma} + K_t$, missä K_a = autokuljetuksesta aiheutuvat kustannukset yht., mk/k-m^3 ja 100 m

K_{ma} = muuttuvat autokuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m

K_t = autotiekustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m

Varsinaisten traktorivarsiteiden rakentaminen nykyaikaisille kalliille metsätraktoreille ei tavallisesti ole tarpeellista eikä kannattavaakaan, koska koneet on rakennettu nimenomaan maastossa liikkumista varten eikä tien rakentaminen lisää siinä määrin kuorman kokoa ja ajonopeutta, että tästä saatavat säästöt korvaisivat tienrakennuskustannukset. Maataloustraktoreilla tilanne on erilainen, sillä niillä voidaan tiellä ajaa huomattavasti suuremmin kuormin ja nopeuksin kuin maastossa. Traktorikuljetuksen helpottamiseksi raivattavien varsitieurien kustannukset (K_r yhtälössä 1) ovat yleensä nykyaikaista metsäkuljetuskalustoa käytettäessä

myös niin vähäiset, ettei niillä ole käytännöllistä merkitystä. Useimmissa tapauksissa traktorikuljetuksesta aiheutuvat kustannukset määräytyvät näin ollen yksinomaan muuttuvien traktorikuljetuskustannusten (K_m yhtälössä 1, s. 9) perusteella.

Traktorikuljetuksen olosuhteet tyhjän alueen yli ajettaessa ovat yleensä erilaiset kuin hakkuualueen sisällä. Tämä merkitsee sitä, että myös muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat erilaiset. Ajo leimikon ja olemassa olevan autotien välillä ei ole enää keräilyn ja kokoamisen luonteista kuten ajo hakkuualueella. Tällöin voidaan valita helpoin ajoreitti vapaasti ja ajoneuvon nopeus on useissa tapauksissa suurempi kuin hakkuualueella. Tyhjän alueen yli ajettaessa vältetään ajoa vajain kuormin ajomatkan pituuden vuoksi ja kuorman keskikoko on siten usein suurempi kuin hakkuualueella ajettaessa. Keskinopeuden ja kuorman keskikoon suureneminen merkitsee muuttuvien traktorikuljetuskustannusten alenemista, ja siten traktorikuljetuksen "kilpailukyky" autokuljetukseen verrattuna paranee. Jos esimerkiksi suurella kuormatraktorilla voidaan ajaa hakkuualueelta lähimmälle tielle 12 k-m^3:n keskikuormin ja keskinopeudella 80 m/min, muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat 0,15 mk/k-m^3ja 100 m. Taulukossa 2 (s. 8) vastaavan traktorin muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat 0,28 mk/k-m^3ja 100 m.

Autokuljetusvaihtoehdon kustannuksista (K_a yhtälössä 2, s. 9) muodostavat pääosan tiekustannukset (K_t yhtälössä 2). Muuttuvilla autokuljetuskustannuksilla (K_{ma} yhtälössä 2) on vain vähän merkitystä, mikäli kuorma-autolla voidaan ajaa täysin kuormin ja yli 15 km:n keskituntinopeudella. Seuraavassa asetelmassa on havainnollistettu kahden kuorma-autotyypin muuttuvia kuljetuskustannuksia erilaisilla huonolaatuisilla autoteillä.

	Auton keskinopeus, km/h	
	5	10
	Muuttuvat autokuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m	
2-akselinen auto + 1-aks. puoliperävaunu	0,05	0,02
3-akselinen auto + varsinainen perävaunu	0,03	0,02

Muuttuvien autokuljetuskustannusten vaihteluiden huomioon ottaminen on kuitenkin käytännössä varsin vaikeaa, koska auton nopeutta rakennettavalla autotiellä ei tarkoin tunneta. Mikäli näitä kustannuksia ei oteta huomioon kannattavuuslaskelmassa, on myös traktoriuran raivauskustannukset syytä jättää huomioon ottamatta traktorikuljetuksen kustannuksia määritettäessä. Muuttuvat autokuljetuskustannukset ja traktoriuran raivauskustannukset kiintokuutiometriä ja matkayksikköä kohti ovat samaa suuruusluokkaa, mutta ne vaikuttavat kannattavuuslaskelmassa erisuuntaisina (vrt. yhtälöt 1 ja 2, s. 9). Niiden pois jättämisestä aiheutuvat virheet tasoittavat näin ollen toisiaan.

Suoritetuissa laskelmissa ei ole voitu ottaa huomioon autokuljetuksen järjestelystä johtuvia, korjuuketjun muissa osissa joskus esiintyviä välillisiä kustannusvaikutuksia, joilla voi olla tietyissä tapauksissa varsin huomattava merkitys. Näillä välillisillä kustannuksilla tarkoitetaan tässä autokuljetusohjelmien muuttamisesta ja keskeytymisistä johtuvia kustannuksia. Ne syntyvät yleensä silloin, kun nykyisen autokuljetuskaluston tiestölle ja varastopaikoille asettamia vaatimuksia ei ole voitu riittävästi ottaa huomioon.

Kannattavuuslaskelmassa on siis tärkeintä arvioida mahdollisimman tarkoin, minkälaiset ovat traktorin keskikuormat ja keskinopeudet ajettaessa leimikolta olemassa olevalle tielle, ts. minkälaiset ovat muuttuvat traktorikuljetuskustannukset tyhjällä alueella. Toisaalta on leimikosta olemassa olevalle tielle rakennettavan autotien kustannukset pystyttävä arvioimaan etukäteen.

Seuraavassa on esitetty yksinkertainen esimerkki kannattavuuslaskelmasta, jossa traktoriuran raivauskustannuksia ja muuttuvia autokuljetuskustannuksia ei ole otettu huomioon. Laskelmassa on lisäksi edellytetty, että traktorikuljetuksen varsinaisen kuljetusvaiheen kustannukset eivät muutu leimikossa autotien rakentamisen johdosta.

E S I M E R K K I autotien rakentamisen kannattavuuden määrittämisestä

Leimikon koko 2 000 k-m^3

Leimikon etäisyys olemassa olevalta autotieltä 1 000 m

a) T r a k t o r i k u l j e t u s v a i h t o e h t o :

Traktorikuljetus:

Suuri kuormatraktori, keskinopeus tyhjällä alueella	80	m/min
Kuorman keskikoko	12	k-m^3
Käyttökustannukset	0,70	mk/min
Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset =	0,15	mk/k-m^3 ja 100 m

b) A u t o k u l j e t u s v a i h t o e h t o :

Autokuljetus:

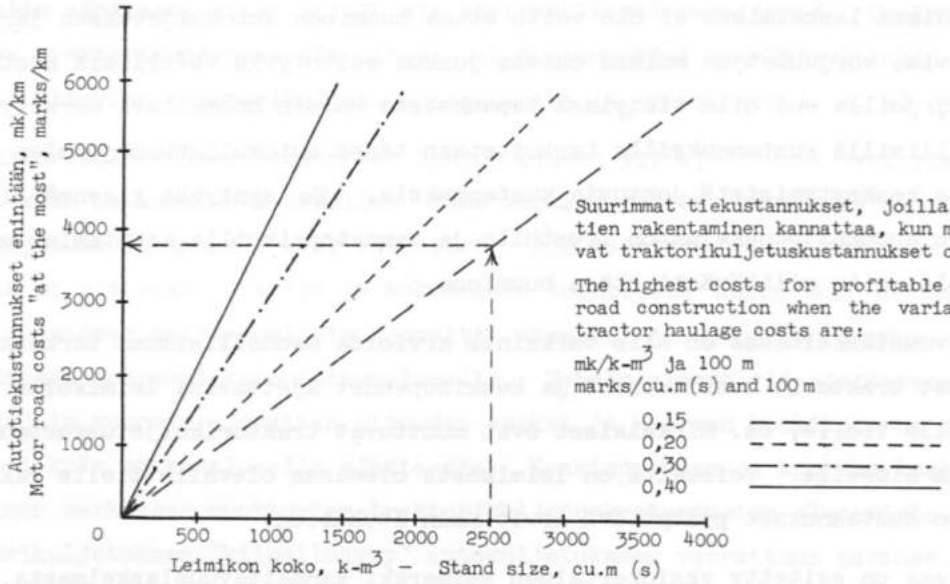
Autotien kustannukset yhteensä 4 000 mk eli 400 mk/100 m

400 mk/100 m : 2 000 k-m^3 = 0,20 mk/k-m^3 ja 100 m

Esimerkissä on traktorikuljetusvaihtoehto autotien rakentamista edullisempi.

Kuvaa 2 voidaan käyttää apuna leimikolle rakennettavan autotien kannattavuutta arvioitaessa. Kun muuttuvat traktorikuljetuskustannukset on selvitetty, voidaan kysymyksessä olevan leimikon koon perusteella lukea kuvasta 2, mitä rakennettava tie saisi enintään maksaa autotien pituusyksikköä kohti, jotta autotien rakentaminen olisi kannattavaa. Kuvassa 2 ratkaisu tehdään ainoastaan muuttuvien traktorikuljetuskustannusten ja autotiekustannusten perusteella, joten rajatapauksissa on syytä erikseen harkita traktoriuran raivaus- ja muuttuvien autokuljetuskustannusten vaikutusta vaihtoehtojen edullisuuteen.

Kuvan 2 hyväksikäyttöä havainnollistetaan kuvaa seuraavassa esimerkissä.



Kuva 2. Autotien rakentamisen kannattavuus tien pituusyksikköä kohti laskettujen tiekustannusten, leimikon koon ja muuttuvien traktorikuljetuskustannusten perusteella

Fig. 2. Profitability of the construction of a motor road on the basis of road costs per unit of length of the road, marked stand size and variable tractor haulage costs

E S I M E R K K I

Leimikon koko 2 500 k-m^3

Arvioidut muuttuvat traktorikuljetuskustannukset tyhjällä alueella 0,15 mk/k-m^3 ja 100 m

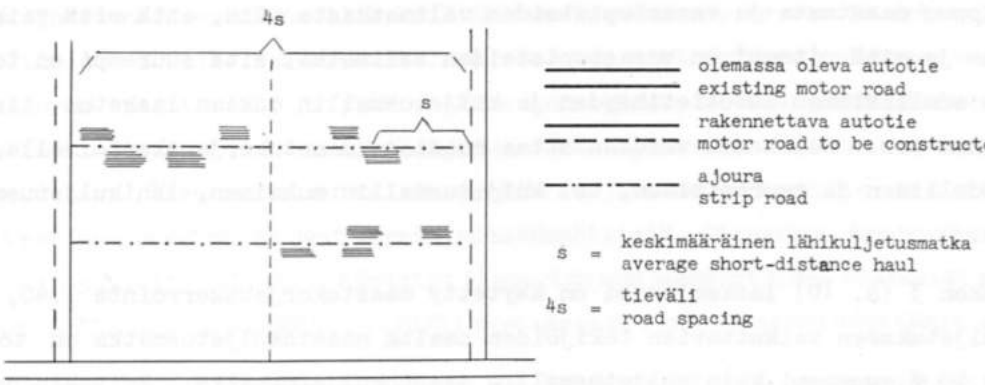
Autotie tyhjän alueen yli saa maksaa enintään 3 800 mk/km, jotta tien rakentaminen olisi kannattavaa. Jos tiekustannukset ovat yli 3 800 mk/km ao. alueella, kuljetus suoritetaan traktorilla.

Jos leimikolle on olemassa tai sinne päätetään rakentaa autotie, on seuraavaksi suunniteltava leimikon sisään rakennettava autotiestö.

25 Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan laskeminen teoreettisessa kuljetusmallissa

Kun autotieverkon ja autotien vaikutusalueen muoto sekä maaston muodot ovat todellisuudessa varsin epäsäännöllisiä, ei tieverkon ja lähikuljetusmatkan välillä ole yleistä tarkasti määritettävissä olevaa yhteyttä.

Ongelmaa voidaan helpoimmin käsitellä teoreettisen kuljetusmallin avulla, josta korjauskertoimien avulla pyritään todelliseen tilanteeseen. Kuljetusmallin autotiet ovat suoria ja yhdensuuntaisia ja liittyvät tasaisin välimatkoin jo olemassa olevaan tiehen. Lähikuljetus tapahtuu mallissa suoraan lähimmälle tielle. Teoreettinen kuljetusmalli on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Teoreettinen kuljetusmalli
Fig. 3. Theoretical transport model

Kuljetusmallissa edullisin autotietiheys on

$$(3) \quad v_o = 50\sqrt{\frac{K_m \times Q}{K_t}}$$

, missä v_o = edullisin autotietiheys, m/ha
K_t = autotiekustannukset, mk/100 m
K_m = muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m
Q = leimikon tiheys, k-m^3/ha

ja edullisin lähikuljetusmatka (s_o) on

$$(4) \quad s_o = 50\sqrt{\frac{K_t}{K_m \times Q}}$$

26 Maastokorjauskerroin

Kuvassa 3 esitetty kuljetusmalli ei vastaa todellisuutta lähikuljetuksen osalta muun muassa syystä, että

- lähikuljetusreitti ei aina ole kohtisuorassa tietä vastaan,
- lähikuljetusreitti ei ole suora, vaan siinä on aina jonkin verran mutkittelua,
- puutavara kuljetetaan tiettyihin tien varrella oleviin varastopisteisiin ja
- lähikuljetus ei aina tapahtu lähimmälle tielle.

Todellisuudessa edullisin autotietiheys on näin ollen aina suurempi ja vastaava lähikuljetusmatka pitempi kuin teoreettisessa kuljetusmallissa. Poikkeaman suu-

ruus riippuu maastosta ja varastopisteiden välimatkasta niin, että mitä vaikeampaa on maasto ja mitä pitempi on varastopisteiden välimatka, sitä suurempi on todellisuudessa edullisimman autotietiheyden ja kuljetusmallin mukaan lasketun tietiheyden välinen ero. Poikkeama voidaan ottaa huomioon maastokorjauskertoimella, joka kuvaa todellisen ja teoreettisen, ts. kuljetusmallin mukaisen, lähikuljetusmatkan suhdetta.

Taulukon 3 (s. 16) laskemisessa on käytetty maastokorjauskerrointa 1.40, ts. maastokuljetukseen vaikuttavien tekijöiden osalta maastokuljetusmatka on todellisuudessa 40 % suurempi kuin kuljetusmallin maastokuljetusmatka. Erittäin helpossa maastossa laskelmissa voidaan käyttää maastokorjauskerrointa 1.20 ja erittäin vaikeassa maastossa 1.60. Käytetyt maastokorjauskertoimien arvot perustuvat von SEGEBADENIN (1964) sekä GRINELLIN ja SUNDBERGIN (1970) tutkimuksiin.

27 Tieverkon korjauskerroin

Todellinen autotiestö poikkeaa teoreettisen kuljetusmallin (kuva 3, s. 13) tiestöstä muun muassa seuraavasti.

- Tiestön vaikutusalue on korkeussuhteiltaan vaihteleva
- Tiet eivät ole suoria
- Tiet eivät ole yhdensuuntaisia
- Tiet eivät ole joka kohdassa yhtä etäällä toisistaan
- Tiet eivät liity kohtisuorasti ja tasaisin välimatkoin jo olemassa olevaan tiestöön
- Teitä ei rakenneta loppupäästään leimikon reunaan saakka

Mitä enemmän todellisuudessa rakennettava autotieverkko poikkeaa esitetyn kuljetusmallin tieverkosta, sitä pitemmiksi tulevat lähikuljetusmatkat, kun tietä rakennetaan yhtä paljon pinta-alayksikköä kohti. Rakennettavan autotieverkon lähikuljetusmatkaa lyhentävä vaikutus, ts. tiestön vaikutusaste, on siis aina sitä huonompi, mitä mutkaisempia tiet ovat ja mitä epäsäännöllisempi on tieverkko kokonaisuudessaan. Hakkuualueen muodon epäsäännöllisyys vaikuttaa samalla tavalla, koska mallin mukainen säännöllinenkin tieverkko on vaikea saada tasaisesti peittämään korjuualue.

Tämän vuoksi edullisin autotietiheys on aina mallin mukaan laskettua tietiheyttä suurempi. Teoreettinen malli voidaan tältä osin muuntaa vastaamaan todellisia olosuhteita tieverkon korjauskertoimella. Tieverkon korjauskertoimena on seuraavissa laskelmissa (taulukko 4, s. 18) käytetty 1.30:tä, mikä vastaa vaikutusasteeltaan keskinkertaista tiestöä. Autotieverkko saadaan tällöin suhteellisen tasaisesti hakkuualueen peittäväksi, mutta tieverkon muoto jää kuljetusmallin tiestöön ver-

rattuna jokseenkin epäsäännölliseksi. Hakkuualueen muoto on samoin jokseenkin epäsäännöllinen. Edullisissa olosuhteissa, ts. kun tiet voidaan rakentaa tasaisesti korjuualueen peittäviksi ja yhtä etäälle toisistaan, voidaan käyttää tieverkon korjauskerrointa 1.10. Tiestön lähikuljetusmatkaa lyhentävä vaikutus on huono, kun tiet joudutaan rakentamaan mutkaisiksi, vain korjuualueen reunoille, ja kun tieverkko sekä korjuualueen muoto ovat varsin epäsäännöllisiä. Tieverkon korjauskertoimena on tällöin käytetty 1.50:tä. Käytetyt tieverkon korjauskertoimet vastaavat pääpiirteittäin GRINELLIN ja SUNDBERGIN (1970) vastaavassa tutkimuksessa käyttämiä arvoja.

Liitteissä 1 ja 2 (s. 26–27) tieverkon korjauskerrointa on havainnollistettu esimerkein.

28 Edullisimman autotietiheyden ja sitä vastaavan lähikuljetusmatkan laskeminen todellisissa kuljetusolosuhteissa

Kun teoreettinen kuljetusmalli muunnetaan vastaamaan todellisia olosuhteita maastokorjauskertoimen ja tieverkon korjauskertoimen avulla, edullisin tietiheys on laskettavissa kaavan 5 mukaan ja sitä vastaava todellinen lähikuljetusmatka kaavan 6 mukaan.

(5) $$v_o = 50\sqrt{\frac{K_m \times Q \times k}{K_t}}$$, missä

v_o = edullisin autotietiheys, m/ha

K_m = muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m

Q = leimikon tiheys, k-m^3/ha

K_t = autotiekustannukset, mk/100 m

k = maastokorjauskerroin x tieverkon korjauskerroin

(6) $$s_o = 50\sqrt{\frac{K_t \times k}{K_m \times Q}}$$, missä

s_o = edullisin keskimääräinen lähikuljetusmatka, m

Muut tekijät samat kuin kaavassa 5

Kaavan 5 perusteella voidaan lisäksi osoittaa, että

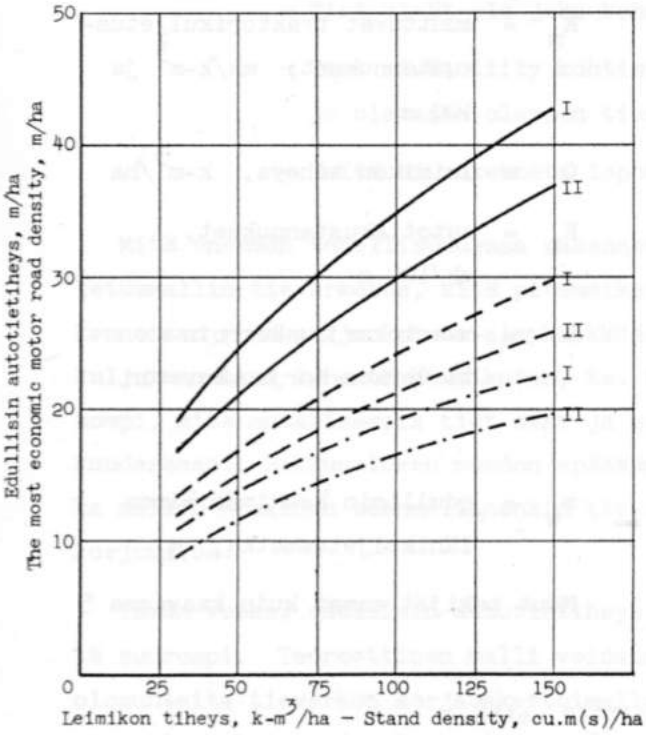
(7) $$s_o = \frac{2500 \times k}{v_o}$$

Taulukko – Table 3

Edullisin autotietiheys ja sitä vastaava lähikuljetusmatka

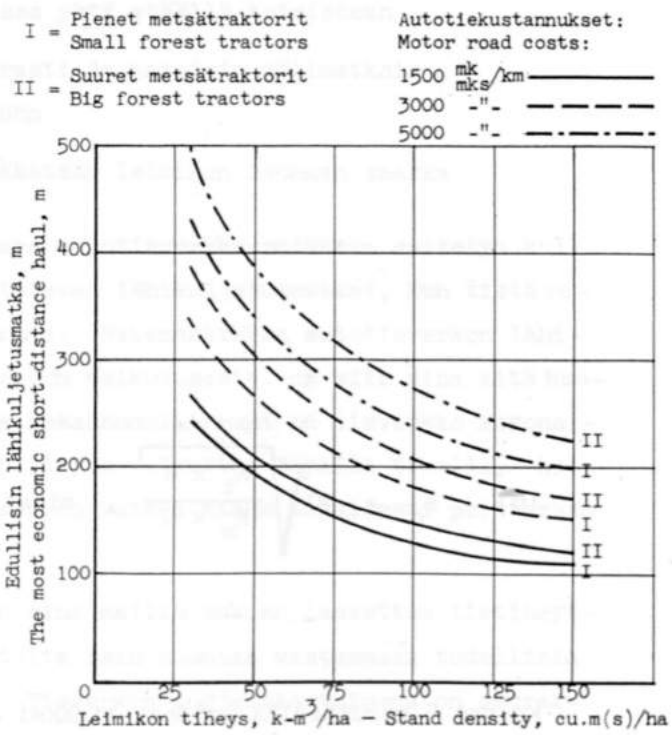
The most economic motor road density and the corresponding short-distance haul

Leimikon tiheys, k-m³/ha Stand density, cu.m(s)/ha	Autotie-kustannukset, mk/km Motor road costs, marks/km	Suuret traktorit, muuttuvat traktorikuljetuskustannukset 0,30 mk/k-m³ ja 100 m Big tractors, variable tractor haulage costs 0,30 marks/cu.m(s) and 100 m		Pienet traktorit, muuttuvat traktorikuljetuskustannukset 0,40 mk/k-m³ ja 100 m Small tractors, variable tractor haulage costs 0,40 marks/cu.m(s) and 100 m	
		Autotietiheys, m/ha Motor road density, m/ha	Lähikuljetus-matka, m Short-distance haul, m	Autotietiheys, m/ha Motor road density, m/ha	Lähikuljetus-matka, m Short-distance haul, m
30	1 500	17	280	19	240
	3 000	12	390	14	340
	5 000	9	500	10	440
50	1 500	21	210	25	190
	3 000	15	300	17	260
	5 000	12	390	14	340
75	1 500	26	170	30	150
	3 000	19	250	21	210
	5 000	14	320	17	280
100	1 500	30	150	35	130
	3 000	21	210	25	190
	5 000	17	280	19	240
150	1 500	37	120	43	110
	3 000	26	170	30	150
	5 000	20	230	23	200



Kuva 4. Edullisin autotietiheys eri leimikkotiheyksillä

Fig. 4. The most economic motor road density for different marked stand densities



Kuva 5. Edullisin lähikuljetusmatka eri leimikkotiheyksillä

Fig. 5. The most economic short-distance haul for different marked stand densities

3 TUTKIMUSTULOKSET

31 Edullisimmat autotietiheydet ja niitä vastaavat todelliset lähikuljetusmatkat

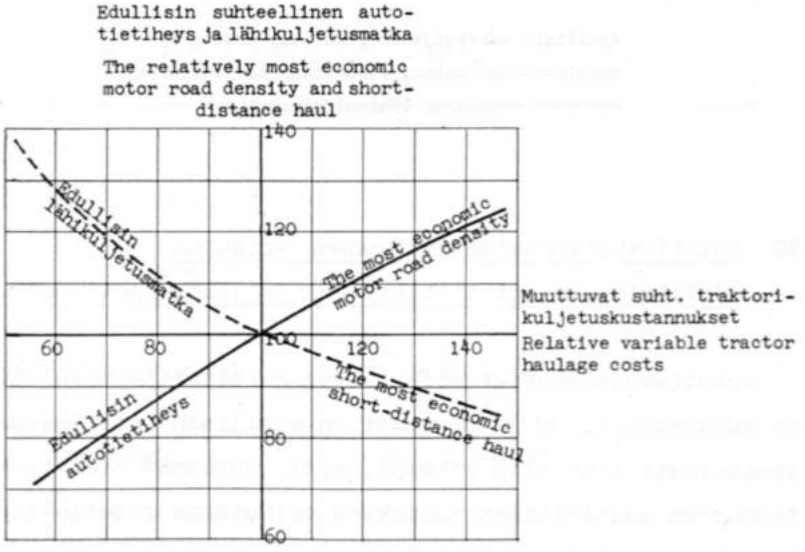
Taulukossa 3 on esitetty edullisimmat autotietiheydet ja niitä vastaavat keskimääräiset lähikuljetusmatkat eri traktorityypeillä, leimikkotiheyksillä ja autotiekustannuksilla. Taulukko 3 on laskettu lähikuljetuksen kannalta keskinkertaisille maasto-olosuhteille ja rakennettavan tiestön vaikutusasteen kannalta samoin keskinkertaisille olosuhteille (vrt. s. 13–15).

Edullisimmat autotietiheydet eri leimikkotiheyksillä on lisäksi esitetty kuvassa 4 ja niitä vastaavat todelliset lähikuljetusmatkat kuvassa 5.

4 ERI TEKIJÖIDEN VAIKUTUS EDULLISIMPAAN AUTOTIETIHEYTEEN JA LÄHIKULJETUSMATKAAN

41 Muuttuvien traktorikuljetuskustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan

Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset vaikuttavat edullisimpaan autotietiheyteen siten, että mitä suuremmat ne ovat, sitä suurempi tulee autotietiheyden olla. Näiden kustannusten pieneneminen taas tekee aina pienemmän autotietiheyden edullisemmaksi muiden tekijöiden pysyessä muuttumattomina. Muuttuvien traktorikuljetuskustannusten muutoksen vaikutusta edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan valaisee kuva 6.



Kuva 6. Muuttuvien traktorikuljetuskustannusten suhteellisen muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan. Traktorikuljetuskustannukset 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m = 100 ja sitä vastaava edullisin autotietiheys ja lähikuljetusmatka = 100

Fig. 6. Effect of the relative change in the variable tractor haulage costs on the most economic motor road density and short-distance haul. Tractor haulage costs 0.30 marks/solid cu.m and 100 m = 100 and the corresponding most economic motor road density and short-distance haul = 100

Mikäli laskelmissa päädytään käyttämään muita kuin taulukon 3 (s. 16) muuttuvia traktorikuljetuskustannuksia, on autotietiheyttä ja lähikuljetusmatkaa korjattava. Taulukossa 4 on esitetty korjauskertoimet, joilla taulukon 3 autotietiheys tai lähikuljetusmatka on kerrottava, kun muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat muut kuin 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m.

T a u l u k k o 4

Edullisimman autotietiheyden ja sitä vastaavan lähikuljetusmatkan korjauskerroin muilla muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla kuin 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m

E r i t t e l y	Metsätraktorin muuttuvat traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m^3 ja 100 m							
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	Korjauskerroin							
Edullisin autotietiheys	0.71	0.82	0.91	1.00	1.08	1.15	1.22	1.29
Edullisin lähikuljetusmatka	1.41	1.22	1.10	1.00	0.92	0.87	0.82	0.77

E S I M E R K K I taulukon 4 käytöstä

Autotiekustannukset	1 500 mk/km
Leimikon tiheys	50 k-m^3/ha
Traktorin käyttökustannukset	0,70 mk/min (42 mk/h)

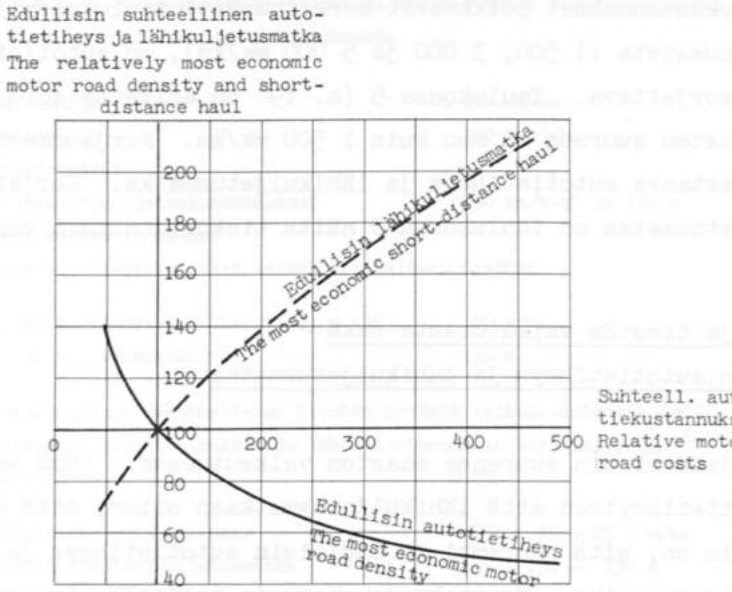
Traktorin keskikuorma ao. hakkuualueella 12 k-m^3, keskinopeus 80 m/min

Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset (vrt. s. 7) 0,15 mk/k-m^3 ja 100 m

Edullisin autotietiheys (taulukosta 3, s. 16)	21 m/ha
Edullisimman autotietiheyden korjauskerroin (muuttuvat trakt.kuljetuskustannukset 0,15 mk/k-m^3 ja 100 m)	0.71
Korjattu edullisin autotietiheys	0.71 x 21 = 15 m/ha
Edullisin lähikuljetusmatka (taulukosta 3)	210 m
Edullisimman lähikuljetusmatkan korjauskerroin	1.41
Korjattu edullisin lähikuljetusmatka	1.41 x 190 = 300 m

42 Autotiekustannusten muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan

Autotiekustannukset vaikuttavat autotietiheyteen siten, että mitä suuremmiksi ne muodostuvat, sitä pienempi on edullisin autotietiheys. Lähikuljetusmatka on vastaavasti aina sitä pitempi, mitä suuremmat ovat tiekustannukset. Autotiekustannusten suhteellisen muutoksen vaikutusta autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan havainnollistaa kuva 7.



Kuva 7. Autotiekustannusten suhteellisen muutoksen vaikutus edullisimpaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan. Autotiekustannukset 1 500 mk/km = 100

Fig. 7. Effect of the relative change in the motor road costs on the most economic motor road density and short-distance haul. Motor road costs 1,500 marks/km = 100

T a u l u k k o 5

Edullisimman autotietiheyden ja sitä vastaavan lähikuljetusmatkan korjauskerroin muilla tiekustannuksilla kuin 1 500 mk/km

E r i t t e l y	Autotiekustannukset, mk/km									
	300	500	1 000	1 500	2 000	3 000	4 000	5 000	7 000	10 000
	Korjauskerroin									
Edullisin autotietiheys	2.24	1.73	1.22	1.00	0.87	0.71	0.61	0.55	0.46	0.39
Edullisin lähikuljetusmatka	0.45	0.57	0.82	1.00	1.15	1.41	1.63	1.82	2.16	2.58

E S I M E R K K I taulukon 5 käytöstä

Autotiekustannukset 7 000 mk/km
Leimikon tiheys 100 k-m^3/ha
Suuri kuormatraktori
Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m

Edullisin autotietiheys (taulukosta 3, s. 16) 30 m/ha
Korjattu edullisin autotietiheys 0.46 x 30 = 14 m/ha

Edullisin lähikuljetusmatka (taulukosta 3) 150 m
Korjattu edullisin lähikuljetusmatka 2.16 x 150 = 320 m

Mikäli tiekustannukset poikkeavat merkittävästi taulukossa 3 (s. 16) käytetyistä tiekustannuksista (1 500, 3 000 ja 5 000 mk/km), on autotietiheyttä ja lähikuljetusmatkaa korjattava. Taulukossa 5 (s. 19) on esitetty korjauskertoimet, kun autotiekustannusten suuruus on muu kuin 1 500 mk/km. Korjauskertoimella kerrotaan taulukon 3 vastaava autotietiheys ja lähikuljetusmatka. Korjattava autotietiheys tai lähikuljetusmatka on taulukossa 3 näitä tiekustannuksia vastaava matka.

43 Maaston ja tiestön vaikutusaste sekä edullisin autotietiheys ja lähikuljetusmatka

Maastokorjauskerroin suurenee maaston vaikeutuessa. Tämä vaikuttaa sekä edullisimpaan autotietiheyteen että lähikuljetusmatkaan siten, että mitä suurempi maastokorjauskerroin on, sitä suurempi on edullisin autotietiheys ja sitä pitempi on edullisin lähikuljetusmatka. Maastokorjauskerroin selittää ainoastaan todellista lähikuljetusmatkaa verrattuna teoreettiseen lähikuljetusmatkaan (kuljetusmalli, kohta 25, s. 12–13) ja maaston vaikutus muuttuviin traktorikuljetuskustannuksiin on lisäksi otettava huomioon erikseen (kohdan 41 mukaisesti, s. 17–18).

Tieverkon korjauskertoimen vaikutus autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan on samanlainen kuin maastokorjauskertoimenkin. Mitä suurempi on tieverkon korjauskerroin, sitä tiheämpi on edullisin autotieverkko ja sitä pitempi edullisin lähikuljetusmatka.

Mikäli olosuhteet maaston ja autotiestön osalta poikkeavat keskinkertaisista, on taulukon 3 (s. 16) arvoja korjattava. Nämä maasto- ja tiestöolosuhteita kuvaavat korjauskertoimet on esitetty taulukossa 6. Oikeaan autotietiheyteen ja lähikuljetusmatkaan päästään kertomalla ao. autotietiheys tai lähikuljetusmatka (taulukko 3) todellisten olosuhteiden mukaisella korjauskertoimella.

Taulukko – Table 6

Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan korjauskerroin erilaisissa maasto- ja tiestöolosuhteissa

The correction coefficient for the most economic motor road density and short-distance haul in different topographical and road network conditions

Maasto Terrain	Rakennettavan autotiestön vaikutusaste Degree of influence of the motor road network to be constructed		
	good – hyvä	keskinkert.–average	huono – bad
	Edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan korjauskerroin Correction coefficient for the most economic motor road density and short-distance haul		
Helppo – Easy	0.85	0.93	0.99
Keskinkert. – Average	0.92	1.00	1.07
Huono – Difficult	0.99	1.07	1.15

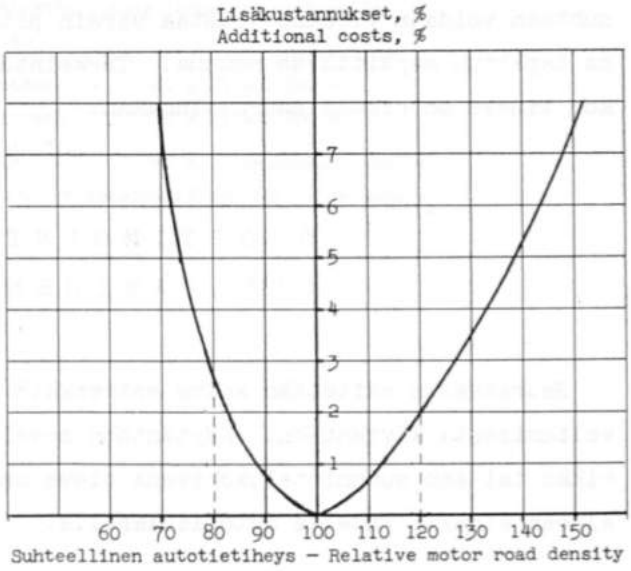
E S I M E R K K I maastokorjauskertoimen ja autotieverkon korjauskertoimen vaihteluiden vaikutuksesta

Autotiekustannukset	1 500 mk/km
Leimikon tiheys	100 k-m^3/ha
Suuri kuormatraktori	
Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset	0,30 mk/k-m^3 ja 100 m
Hakkuualueen maasto on helppo	
Rakennettava autotiestö saadaan vaikutusasteeltaan hyväksi	
Edullisin autotietiheys (taulukosta 3, s. 16)	30 m/ha
Edullisin lähikuljetusmatka - " -	150 m
Helposta maastosta ja rakennettavan tiestön hyvästä vaikutusasteesta johtuva edullisimman autotietiheyden ja lähikuljetusmatkan korjauskerroin taulukossa 6 on	0.85
Korjattu edullisin autotietiheys	0.85 x 30 = 25.5 m/ha
Korjattu edullisin lähikuljetusmatka	0.85 x 150 = 130 m

5 LISÄKUSTANNUKSET MUILLA KUIN EDULLISIMMILLA AUTOTIETIHEYKSILLÄ

Lähikuljetus- ja autotiekustannusten summa on pienin kustannusoptimissa (vrt. kuva 1, s. 6). Jos edullisimmasta autotietiheydestä poiketaan, kuljetuksen kokonaiskustannukset kohoavat. Autotiekustannusten ja lähikuljetuksen kuljetusvaiheen kustannusten summasta lasketut suhteelliset lisäkustannukset on esitetty kuvassa 8, kun autotietiheys poikkeaa edullisimmasta mahdollisesta.

Kiintokuutiometriä kohti lasketut absoluuttiset lisäkustannukset muilla kuin edullisimmilla autotietiheyksillä on esitetty taulukossa 7. Olosuhteet taulukossa 7 ovat samat kuin taulukossa 3 (s. 16). Taulukosta 7 käy ilmi, että lisäkustannukset ovat vailla käytännöllistä merkitystä, kun edullisimmasta autotietiheydestä poiketaan alle 20 % suuntaan tai



Kuva 8. Lisäkustannukset optimiratkaisun autotiekustannusten ja lähikuljetuksen kuljetusvaiheen kustannusten summasta, kun poiketaan edullisimmasta autotietiheydestä. Edullisin autotietiheys = 100

Fig. 8. Per cent additional costs to the sum of the most economic solution and the costs of the haulage phase of short-distance transport when the most economic motor road density is deviated from. Most economic motor road density = 100

Taulukko 7

Lisäkustannukset, kun poiketaan edullisimmasta autotietiheydestä

Leimikon tiheys, k-m³/ha	Autotie-kustannukset, mk/km	Suhteellinen autotietiheys (edullisin = 100)						
		70	80	90	100	110	120	130
		Lisäkustannukset, mk/k-m³						
30	1 500	0,11	0,05	0,01	0,00	0,01	0,03	0,06
	3 000	0,16	0,06	0,02	0,00	0,01	0,04	0,09
	5 000	0,20	0,08	0,02	0,00	0,02	0,05	0,11
50	1 500	0,09	0,04	0,01	0,00	0,01	0,02	0,05
	3 000	0,12	0,05	0,01	0,00	0,01	0,03	0,07
	5 000	0,16	0,06	0,02	0,00	0,01	0,04	0,09
75	1 500	0,07	0,03	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04
	3 000	0,10	0,04	0,01	0,00	0,01	0,03	0,06
	5 000	0,13	0,05	0,01	0,00	0,01	0,04	0,07
100	1 500	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
	3 000	0,09	0,04	0,01	0,00	0,01	0,02	0,05
	5 000	0,11	0,05	0,01	0,00	0,01	0,03	0,06
150	1 500	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
	3 000	0,07	0,03	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04
	5 000	0,09	0,04	0,01	0,00	0,01	0,03	0,05

toiseen. Lisäkustannukset ovat aina kuutioyksikköä kohti suuremmat korkeammilla autotiekustannuksilla, korkeammilla muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla ja pienemmillä leimikkotiheyksillä. Jos leimikon tiheys on suuri ja muuttuvat traktorikuljetuskustannukset sekä autotiekustannukset leimikossa ovat alhaiset, on rakennettavan autotieverkon tiheydessä varsin runsaasti pelivaraa, ilman että syntyy mainittavia lisäkustannuksia.

Edellä esitetty merkitsee sitä, että käytännön suunnittelussa autotietiheyden suhteen voidaan yleensä joustaa varsin pitkälle, ilman että kuljetuskustannuksissa tapahtuu merkittävää nousua. Tärkeintä onkin, että rakennettavan autotieverkon tiheys on oikeaa suuruusluokkaa.

6 OPTIMOINTILASKELMAN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

Seuraavassa esitetään kolme esimerkkiä edellä käsitellyn suunnittelumallin soveltamisesta käytäntöön. Käytäntöön soveltamisen edellytyksenä on se, että leimikko tai sen suunnittelukohteena oleva osa-alue muodostaa luonnollisen kuljetusalueen ainakin yhdelle autotiehaaralle.

E S I M E R K K I 1

Esimerkissä käsitellään tapausta, jossa leimikko sijaitsee olemassa olevan autotien välittömässä läheisyydessä. Tässä tapauksessa laskelma rajoittuu leimikon edullisimman autotietiheyden ja rakennettavan tien määrän selvittämiseen.

LÄHTÖKOHTATIEDOT

Hakkuualue on välittömässä kosketuksessa olemassa olevaan autotiehen

Leimikon tiheys	75 k-m^3/ha
Leimikon pinta-ala	80 ha
Autotiekustannukset alueella	3 000 mk/km

Maasto: keskinkertainen

Rakennettavan tiestön vaikutusaste: keskinkertainen

Lähikuljetus: suuri kuormatraktori,

muuttuvat traktorikuljetuskustannukset 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m

EDULLISIMMAN AUTOTIETIHEYDEN MÄÄRITTÄMINEN

Edullisin autotietiheys (taulukosta 3, s. 16) 19 m/ha

AUTOTIETIHEYDEN SALLITTU VAIHTELUVÄLI

Leimikon sisään rakennettavan autotiestön tiheys saa olla 20 % laskettua edullisinta autotietiheyttä suurempi tai pienempi, ilman että syntyy mainittavia lisäkustannuksia (vrt. taulukko 7).

Autotiestön tiheys on tällöin enintään 1.2 x 19 = 23 m/ha

ja vähintään 0.8 x 19 = 15 m/ha

LEIMIKON SISÄÄN RAKENNETTAVAN AUTOTIESTÖN PITUUS JA SEN SALLITTU VAIHTELU

Leimikon sisään rakennettavan autotiestön pituus lasketaan kertomalla leimikon pinta-ala autotietiheydellä.

Autotiestön pituus on tällöin enintään 80 x 23 = 1 840 m

ja vähintään 80 x 15 = 1 200 m

Autotietä rakennetaan hakkuualueelle 1 200...1 840 m. Jos hakkuualueelle rakennetaan tietä esimerkiksi 1 500 m, on keskimääräinen lähikuljetusmatka 250 m (taulukko 3, s. 16).

E S I M E R K K I 2

Esimerkissä hakkuualueelle ei ole valmista autotietä. Tällöin ratkaistaan ensin autotien rakentaminen leimikolle ja sen jälkeen hakkuualueelle rakennettavan autitieverkon tiheys.

LÄHTÖKOHTATIEDOT

Olemassa olevan autotien ja hakkuualueen välinen etäisyys on 1 km

Leimikon tiheys	50 k-m^3/ha
Leimikon pinta-ala	50 ha
Autotiekustannukset olemassa olevan autotien ja hakkuualueen välillä	6 000 mk/km
Autotiekustannukset leimikon sisällä	1 500 mk/km

Maasto hakkuualueella: helppo

Rakennettavan autotiestön vaikutusaste: hyvä

Lähikuljetus: pieni kuormatraktori, muuttuvat traktorikuljetuskustannukset

olemassa olevan autotien ja leimikon välillä	0,30 mk/k-m^3 ja 100 m
hakkuualueella	0,35 mk/k-m^3 ja 100 m

I AUTOTIEN RAKENTAMINEN LEIMIKOLLE

Autotiekustannukset, mk/k-m^3	6 000 : 2 500 = 2,40 mk/k-m^3
Traktorikuljetuskustannukset, mk/k-m^3	10 x 0,30 = 3,00 mk/k-m^3

Autotien rakentaminen on tässä tapauksessa edullisempi vaihtoehto (vrt. kohta 24 Autotien rakentaminen leimikolle, s. 9 – 12). Laskelmassa on edellytetty, että autokuljetuksen muuttuvat kustannukset hakkuualueen ja olemassa olevan tien välillä ovat vähäiset, mikäli tälle välille rakennetaan autotie.

II EDULLISIMMAN AUTOTIETIHEYDEN MÄÄRITTÄMINEN HAKKUUALUEELLA

Taulukon 3 (s. 16) mukainen edullisin autotietiheys 1 500 mk:n/km autotiekustannuksilla ja 0,30 mk:n/k-m^3 ja 100 m muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla on 21 m/ha. Koska todelliset muuttuvat traktorikuljetuskustannukset ovat 0,35 mk/k-m^3 ja 100 m ja maasto on helppo sekä rakennettavan autotiestön vaikutusaste hyvä, on taulukosta 3 saatua edullisinta autotietiheyttä korjattava.

Muuttuvat traktorikuljetuskustannukset	0,35 mk/k-m^3 ja 100 m
Edullisimman autotietiheyden korjauskerroin	1.08 (taulukko 4, s. 18)

Maasto helppo ja tiestön vaikutusaste hyvä; korjauskerroin 0.85 (taulukko 6, s. 20)

Korjattu edullisin autotietiheys on 1.08 x 0.85 x 21 = 19 m/ha

AUTOTIETIHEYDEN SALLITTU VAIHTELUVÄLI

Autotiestön tiheys on enintään	1.2 x 19 = 23 m/ha
ja vähintään	0.8 x 19 = 15 m/ha

LEIMIKON SISÄÄN RAKENNETTAVAN AUTOTIESTÖN PITUUS JA SEN SALLITTU VAIHTELU

Autotiestön pituus on enintään	50 x 23 = 1 150 m
ja vähintään	50 x 15 = 750 m

Autotietä rakennetaan leimikon sisään 750...1 150 m

E S I M E R K K I 3

Esimerkissä hakkuualueella on jonkin verran käyttökelpoista autotietä. Tällöin ratkaistaan aluksi edullisin autotietiheys. Rakennettavan autotien määrä saadaan vähentämällä edullisimman autotieverkon pituudesta olemassa olevan käyttökelpoisen autotien pituus.

LÄHTÖKOHTATIEDOT

Leimikolle on autotie ja hakkuualueella on lisäksi autokuljetuksessa käyttökelpoista autotietä 300 m

Leimikon tiheys 50 k-m^3/ha

Leimikon pinta-ala 100 ha

Autotiekustannukset hakkuualueella 4 000 mk/km

Maasto hakkuualueella: keskinkertainen

Rakennettavan tiestön vaikutusaste: keskinkertainen

Lähikuljetus: suuri kuormatraktori, suuri runkojuontotraktori, muuttuvat traktorikuljetuskustannukset 0,30 mk/k-m^3 ja 100 m

EDULLISIMMAN AUTOTIETIHEYDEN MÄÄRITTÄMINEN

Taulukon 3 (s. 16) mukaan edullisin autotietiheys on 1 500 mk:n/km autotiekustannuksilla ja 0,30 mk:n/k-m^3 ja 100 m muuttuvilla traktorikuljetuskustannuksilla 21 m/ha. Koska autotiekustannukset ovat todellisuudessa 4 000 mk/km, on taulukosta 3 saatu edullisin autotietiheys korjattava todellisia autotiekustannuksia vastaavaksi.

Autotiekustannukset 4 000 mk/km

Edullisimman autotietiheyden korjauskerroin 0.61 (taulukko 5, s. 19)

Edullisin autotietiheys 0.61 x 21 = 13 m/ha

AUTOTIETIHEYDEN SALLITTU VAIHTELUVÄLI

Autotiestön tiheys on enintään 1.2 x 13 = 16 m/ha
ja vähintään 0.8 x 13 = 10 m/ha

LEIMIKON SISÄÄN RAKENNETTAVAN AUTOTIESTÖN PITUUS JA SEN SALLITTU VAIHTELU

Autotiestön pituus on enintään 100 x 16 = 1 600 m
ja vähintään 100 x 10 = 1 000 m

Hakkuualueella jo olemassa oleva käyttökelpoinen autotie on vähennettävä autotiestön pituudesta, jotta päästään rakennettavan tien määrään.

Rakennettavan tien tai tiestön pituus on enintään 1 600 − 300 = 1 300 m
ja vähintään 1 000 − 300 = 700 m

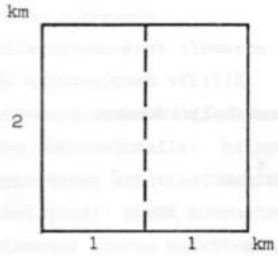
Hakkuualueelle rakennetaan uutta autotietä 700...1 300 m

LIITE 1

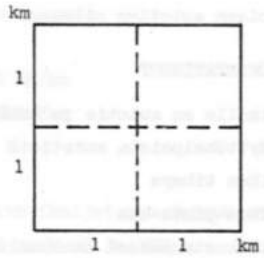
AUTOTIEVERKON KORJAUSKERROIN ERILAISISSA TIEVERKKOMALLEISSA

(von Segebaden 1964)

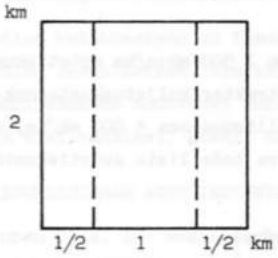
s = teoreettinen lähikuljetusmatka
v = autotietiheys



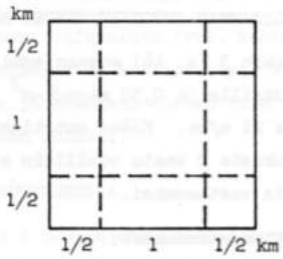
s = 500 m
v = 5 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.00



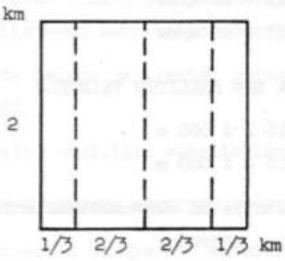
s = 333 m
v = 10 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.33



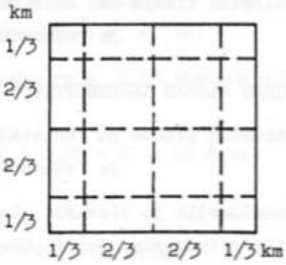
s = 250 m
v = 10 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.00



s = 167 m
v = 20 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.33



s = 167 m
v = 15 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.00



s = 111 m
v = 30 m/ha
Autotieverkon korjauskerroin 1.33

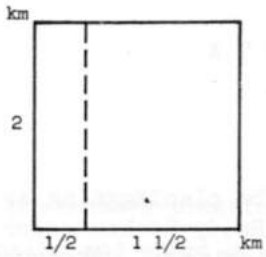
LIITE 2

AUTOTIEVERKON KORJAUSKERROIN ERILAISISSA TIEVERKKOMALLEISSA

(von Segebaden 1964)

s = teoreettinen lähikuljetusmatka

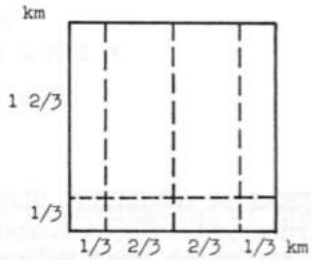
v = autotietiheys



s = 625 m

v = 5 m/ha

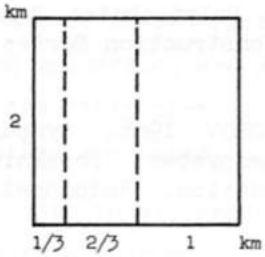
Autotieverkon korjauskerroin 1.25



s = 148 m

v = 20 m/ha

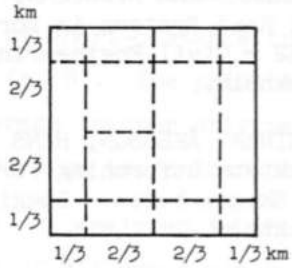
Autotieverkon korjauskerroin 1.19



s = 333 m

v = 10 m/ha

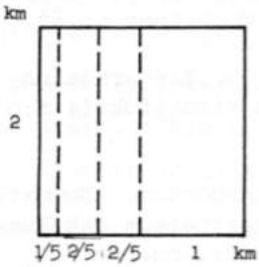
Autotieverkon korjauskerroin 1.33



s = 120 m

v = 27.5 m/ha

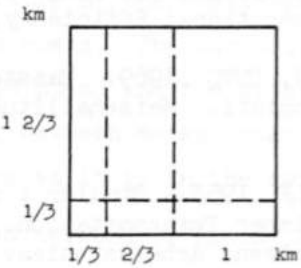
Autotieverkon korjauskerroin 1.32



s = 300 m

v = 15 m/ha

Autotieverkon korjauskerroin 1.80



s = 253 m

v = 15 m/ha

Autotieverkon korjauskerroin 1.52

K I R J A L L I S U U T T A

R e f e r e n c e s

GRINELL, ANDERS ja SUNDBERG, ULF 1970. Mall för planläggning av skogsbilvägarnas ytterförgreningar. Summary: A Ready Reckoner for the Planning of Branch Road Networks for Logging Trucks. Skogshögskolan, Institutionen för skogsteknik – Royal College of Forestry, Department of Operational Efficiency, Rapporter och Uppsatser nr – Research Notes No. 36. Stockholm.

LARSSON, GERHARD and RYDSTERN, OLOF 1968. Economic Design of Motor Truck Haul Road Systems in Forest Areas. Acta Polytechnica Scandinavica Ci 52 – Civil Engineering and Building Construction Series No. 52. Stockholm.

MALMBERG, EINAR, ÅKESSON, HANS ja NILSSON, PER OLOV 1966. Synpunkter på vägnätets utformning för några avverkningssystem. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten – Logging Research Foundation, Redogörelse nr 3. Stockholm.

von SEGEBADEN, GUSTAF 1964. Studier över terrängtransportens längd och vägnätets utbyggnad (An abridged version of this report, Studies of Cross-Country Transport Distances and Road Net Extension, is published in English as No. 18 of Studia Forestalia Suecica). Skogshögskolan, Institutionen för skogsteknik – Royal College of Forestry, Department of Operational Efficiency, Rapporter och Uppsatser nr 23. Stockholm.

SILVENNOINEN, UNTO 1969. Maastokuljetusmatkan ja tieverkoston tiheyden optimointi. Metsähallituksen teknillisiä tiedoituksia n:o 68. Hirvas.

SUNDBERG, ULF 1953. Studier i skogsbrukets transporter. Summary: A Study of Timber Transportation. Föreningen Skogsarbetens och Kungl. Domänstyrelsens Arbetsstudieavdelning, SDA, Meddelande nr 48. Stockholm.

Determination of the Most Economic Motor Road Density and Short-Distance Haul

By Mikko Rysä

SUMMARY

The report presents a planning model for the determination of the most economic motor road density and short-distance haulage. The model is intended for use in the planning of a motor road network inside a marked stand or group of marked stands.

The calculations were performed for skidders and forwarders. The variable tractor haulage costs of these tractors, i.e. costs of short-distance transport without loading and unloading, are shown in Table 2 (p. 8). The price and cost levels are those for the first part of 1970 and the average tractor driving speeds and average load sizes are based on Metsäteho's studies on these tractors.

Motor road costs in different conditions were not analysed in this study; the calculations were performed for motor road costs of different sizes.

The construction of a motor road to the marked stand can generally be decided simply from the variable tractor haulage costs, motor road costs and the marked stand size. Fig. 2 (p. 12) shows the profitability of the construction of a motor road for different variable tractor haulage costs. The variable tractor haulage costs are generally lower between the marked stand and the existing motor road than within the stand. This is because driving between marked stand and existing motor road is no longer collecting and gathering as it is in the cutting area.

The optimation model for the intra-stand road network is based (Fig. 3, p. 13) on a theoretical transport model which is converted to apply to the real transport conditions by means of a terrain correction coefficient and the correction coefficient for the motor road network.

Table 3 (p. 16) shows the most economic motor road densities and the average short-distance haul for them for different tractor types, marked stand densities and motor road costs. The most economic road densities are also presented in Fig. 4 (p. 16) and the corresponding average short-distance hauls in Fig. 5 (p. 16).

The effect of the change in the variable tractor haulage costs on the most economic motor road density and short-distance haul is given in Fig. 6 (p. 17). The higher the variable tractor haulage costs, the greater must the motor road density be.

The effect of the change in motor road costs on the most economic motor road density and short-distance haul is illustrated in Fig. 7 (p. 19). The higher the motor road costs, the lower the most economic road density and the longer the most economic short-distance haul.

The correction coefficient for the most economic motor road density and short-distance haul in different topographical conditions and the shape of road network to be constructed is given in Table 6 (p. 20). The more unfavourable the terrain for driving is and the more the motor road system to be constructed differs from a motor road network in accordance with the theoretical transport model, the higher is the most economic motor road density.

A departure from the most economic motor road density will raise overall transportation costs. The additional costs are presented in relative terms in Fig. 8 (p. 21). Additional costs lack practical significance when the deviation from the most economic motor road density is less than 20 per cent in one direction or another. Departure from the most economic motor road density always adds more to the additional costs the lower the marked stand density and the higher the motor road costs and variable tractor haulage costs in the marked stand.