

**Metsätehon raportti 192**  
**17.8.2006**

ISSN 1459-773X (Painettu)  
ISSN 1796-2374 (Verkkajulkaisu)



## **Rengaspaineiden säädön merkitys puutavaran kuljetuksissa**

**Kirjallisuuskatsaus**

*Kaarlo Rieppo*

**METSÄTEHO OY**

PL 101 (SNELLMANINKATU 13)

00171 HELSINKI

PUH. 020 765 8800

FAKSI (09) 659 202

WWW.METSATEHO.FI

# **Rengaspaineiden säädön merkitys puutavaran kuljetuksissa**

**Kirjallisuuskatsaus**

**Kaarlo Rieppo**

Metsätehon raportti 192  
17.8.2006

ISSN 1459-773X (Painettu)  
ISSN 1796-2374 (Verkkajulkaisu)

Asiasanat: rengaspaine, säätöjärjestelmät, kelirikko

Kuvalähteet:

1	Metsätehon raportti 153
2–4, 9–11	Tireboss Däcktrycksystem
5	Skogforsk
6–8, 18	TPC International
12	CM Automotive Systems
13–14	Blair ja Bradley 2005
15	Löfgren 1991
16	Eliasson 2005
17	Bradley 1997

© Metsäteho Oy

Helsinki 2006

## SISÄLLYS

<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 YLEISTÄ.....</b>	<b>5</b>
1.1 Kelirikko ja liikenteen rajoittaminen .....	5
1.2 Kelirikon taloudelliset vaikutukset .....	6
1.3 Rengaspaineiden alentamisella liikennöintikykyä .....	7
<b>2 RENGASPAINOIDEN SÄÄTÖ .....</b>	<b>7</b>
2.1 Paineensäätömenetelmät .....	7
2.1.1 Rengaspaineiden säätöjärjestelmät.....	7
2.1.2 Paineiden säätö ilma-aseilla .....	9
2.1.3 Alennetut vakiopaineet .....	9
2.2 Rengaspaineiden vaikutukset.....	9
<b>3 RENGASPAINOIDEN SÄÄTÖJÄRJESTELMIEN TOIMITTAJIA.....</b>	<b>11</b>
3.1 TPC International.....	11
3.2 Muita toimittajia.....	12
<b>4 TUTKIMUKSIA RENGASPAINOIDEN SÄÄDÖN MERKITYKSESTÄ.....</b>	<b>13</b>
4.1 Kokeet puutavara-autoilla .....	13
4.1.1 Yhdysvaltalaiset kokeet.....	13
4.1.2 Kanadalaiset kokeet .....	15
4.1.3 Ruotsalaiset kokeet .....	19
4.2 Kokeet kuormatraktoreilla .....	21
<b>5 RENGASPAINOIDEN SÄÄDÖN EDUT JA HAITAT.....</b>	<b>25</b>
5.1 Edut .....	25
5.2 Haitat.....	27
<b>6 RENGASPAINOIDEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN KUSTANNUKSET JA HYÖDYT.....</b>	<b>28</b>
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET .....</b>	<b>31</b>
<b>8 LÄHTEET.....</b>	<b>33</b>

## TIIVISTELMÄ

Rengaspaineiden alentamisella saavutettavaa pintapaineen ja muunkin tierasituksen vähentymistä puutavarakuljetuksissa on tutkittu mm. USA:ssa ja Kanadassa jo 1990-luvun alussa. Sääätöjärjestelmiä on kehitetty ja otettu ensin käyttöön sotilasajoneuvoihin. 1990-luvulla niitä on alettu soveltaa siviilikäyttöön mm. Pohjois-Amerikassa, Australiassa ja Uudessa Seelannissa. Ruotsissa kokeiltiin kuormatraktorin rengaspaineiden säätöä 1990-luvun alussa ja parhaillaan kokeilussa on 12 rengaspaineiden säädöllä varustettua puutavara-autoa. Myös Kanadassa rengaspaineiden säätöjärjestelmien käyttötutkimukset jatkuvat Tässä raportissa esitetään rengaspaineiden säätöjärjestelmiä ja niiden käytöstä ja kokeiluista puutavarakuljetuksissa saatuja tuloksia.

Rengaspaineiden pienentämisellä vaikutetaan erityisesti pehmeäpintaisilla teillä liikkumiseen. Kun pintapaine tiehen pienenee, niin raiteenmuodostus vähenee ja pyörän pitokyky suurenee. Lisäksi saavutetaan muita hyötyjä: polttoaineen kulutus pienenee ja kaluston rikkoutuminen vähenee. Rengaspaineiden säädöstä muualla saadut tutkimustulokset ja kokemukset osoittavat selvästi, että sen avulla voitaisiin merkittävästi parantaa puutavara-autojen ja metsäkoneiden toimintakykyä ja lisätä niiden käyttöaikaa kelirikon ja sulan maan aikaan. Metsätraktoreiden kehityksessä ei pintapaineiden suhteen ole tapahtunut parina viimeisenä vuosikymmenenä muutoksia. Uudesta teknologiasta olisi kuitenkin paljon hyötyä kelirikko- ja kesäaikaisessa puun korjuussa ja kuljetuksessa. Metsien rakenteen ja energiapuun korjuun vuoksi harvennushakkuiden määrä suurenee nykyisestä. Myös metsätraktoreissa rengaspaineiden säätöjärjestelmät parantaisivat toimintaedellytyksiä.

Suomen oloihin sovellettavissa olevia tutkimustuloksia tulisikin tarkastella huolellisesti. Nyt saadut tiedot viittaavat niin selviin myönteisiin seikkoihin, että myös Suomessa tulisi valmistella rengaspaineiden säätöjärjestelmällä varustettujen puutavara-autojen käyttökokeilu.

# 1 YLEISTÄ

## 1.1 Kelirikko ja liikenteen rajoittaminen

Puuhuollolle ja metsätaloudelle on Suomessa tyypillistä voimakas kausivaihtelu. Pääsyyinä siihen on sorateiden kelirikko. Kelirikolla tarkoitetaan tien kantavuuden ja kulkukelpoisuuden tilapäistä heikkenemistä. Kelirikko voi johtua roudan sulamisesta tai runsaista sateista. Sorateiden kelirikkorajoitukset estävät puukuljetukset useiksi viikoiksi keväisin ja joskus myös syksyisin ennen tiepohjien jäätymistä. Kevätkelirikon laajuus vaihtelee vuosittain huomattavasti riippuen edellisen syksyn, talvikauden ja kevään sääolosuhteista. Kevätkelirikon lisäksi joinain sateisina syksyinä pintakelirikko rajoittaa puukuljetuksia. (Pennanen ja Mäkelä 2003, Mäkelä ja Pennanen 2005.)

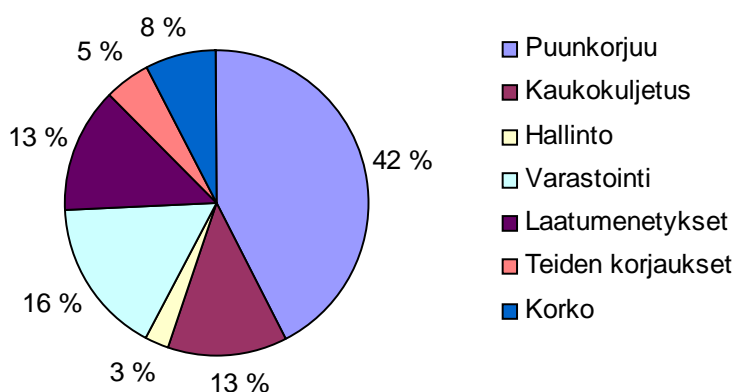
Koko maassa yleisillä teillä kelirikkoisia tienkohtia on vuosittain noin 2000 kilometriä. Kun kelirikkovaroitukset tai painorajoitukset asetetaan koko tieosuudelle, yksittäinen kelirikkokohta estää liikenteen koko tieosalla tai laajemminkin. Niiden tieosien yhteispituus, joilla jossain kohdalla esiintyy kelirikkoa, on runsaat 15 000 km. Tällä perusteella voidaan arvioida, että kelirikko haittaa liikennettä yli 60 %:lla soratieverkkoa. Liikenteen rajoittamisella kelirikkoaikana pyritään vähentämään raskaan liikenteen aiheuttamien teiden vaurioitumista ja välttämään kyseisten teiden vuotuisen hoito- ja kunnostustarpeen kohtuuton lisääntyminen. Rajoitusten avulla pyritään turvaamaan elintärkeiksi katsottavat kuljetukset vähintään minimitasolla (Mäkelä ja Pennanen 2005). Yleisten teiden lisäksi myös yksityis- ja metsäauto-teillä on kelirikosta aiheutuvia rajoituksia.

Ruotsissa yleisen tieverkon sulkemiset tai raskaan liikenteen rajoitukset kevätkelirikon aikaan ovat laajoja, erityisesti Pohjois- ja Keski-Ruotsissa. Myös syksyllä voidaan monia teitä sulkea jatkuvan sateen vuoksi. (Andersson ja Granlund 1994, CTI på virkesfordon 2004, Granlund 2004.)

Monissa Kanadan läntisimmän provinssin, Brittiläisen Kolumbian, osissa 70–75 %:n kuormarajoituksia asetetaan teille keväällä roudan sulamisesta alkaen, ja ne kestävät 6–12 viikkoa. Rajoitukset kohdistuvat yleensä 2-luokan teihin, ja ne muodostavat esteen puutavaran kaukokuljetukselle. Hyötykuorman merkittävä pieneneminen nostaa kuljetuskustannuksia niin paljon, että kuljetus ei kannata. (Blair 2001, Bradley 2005.)

## 1.2 Kelirikon taloudelliset vaikutukset

Kelirikosta aiheutuu Suomen metsäteollisuudelle noin 100 miljoonan euron vuotuiset kustannukset. Siitä noin 65 milj. euroa johtuu maanteiden kelirikosta. Ruotsissa huonokuntoisten teiden arvioidaan aiheuttavan metsätaloudelle lähes miljardin kruunun kustannukset vuosittain. Lisäkustannukset koostuvat raakapuun ylimääräisestä varastoinnista ja siitä johtuvista laatumenetyksistä sekä puunkorjuu- ja autokuljetuskaluston käytön epätasaisuudesta (kuva 1). Vaikka kelirikon laajuus vaihtelee vuosittain, sitä ei juurikaan voida ennakoida ja ottaa huomioon metsäteollisuuden kuljetuksissa, vaan siihen varaudutaan lähes samalla vakavuudella joka kevät. (CTI på virkesfordon 2004, Granlund 2004, Mäkelä ja Pennanen 2005, Kelirikkokohteet 2006, Kelirikkokorjauksilla 2006.)



Kuva 1. Kausivaihtelun puuhuollolle aiheuttamien kustannusten jakauma eri tekijöihin.

Kelirikon vuoksi puun korjuuta ja kuljetuksia ei voida järjestää tasaisesti tehtaiden puunkäyttöä vastaavasti. Kevään kelirikkoon varaudutaan lisäämällä puun korjuuta ja kuljetuksia talvikaudella, jolloin kaikki metsäkoneet ja puutavara-autot ovat täystyöllistettyjä. Kelirikkoaikana kalusto puolestaan seisoo jopa useita viikkoja. Kaikelle kausihuippua varten varatulle konekalustolle ei ole täysimääräisesti töitä ympäri vuoden, mikä näkyy muun muassa vajaatyöllistettyjen metsäkone- ja kuljetusyrittysten heikkona kannattavuutena. Ylikapasiteetti on yksi suurimmista lisäkustannuksia aiheuttavista tekijöistä. (Mäkelä ja Pennanen 2005, Kelirikkokorjauksilla 2006.)

Tehtaiden puunsaanti kelirikon aikana turvataan kasvattamalla varastoja. Ylimääräinen varastointi aiheuttaa lisäkustannuksia puutavaran käsittelyn, suojaamisen, raaka-aineen laadun heikkenemisen sekä varastoihin sitoutuneen pääoman vuoksi. Ruotsissa kelirikkokustannusten katsotaan aiheutuvan ennen muuta puun varastointikustannusten suurentumisesta. Kelirikkoaikana kuljetuskelpoisista leimikoista maksetaan korkeaa hintaa ja vaurioituneita teitä joudutaan korjaamaan. Pahimmillaan on jouduttu jopa supistamaan teollisuuden tuotantoa, kun puutoimitukset ovat pysähtyneet kelirikon takia. (CTI på virkesfordon 2004, Granlund 2004, Mäkelä ja Pennanen 2005, Kelirikkokorjauksilla 2006.)

### **1.3 Rengaspaineiden alentamisella liikennöintikykyä**

Rengaspaineiden alentamisella saavutettavaa pintapaineen ja muunkin tie-  
rasituksen vähentymistä puutavarakuljetuksissa on tutkittu mm. USA:ssa ja  
Kanadassa jo 1990-luvun alussa ja myöhemmin Ruotsissa ja kiinnostus asi-  
aan on vain kasvanut viime vuosina. Ruotsissa on varustettu rengaspainei-  
den säädöllä 12 puutavara-autoa kokeiluun ja kokeiluja on tehty myös puu-  
tavarankuljetuksissa kuormatraktoreilla.

Rengaspaineiden pienentämisellä vaikutetaan erityisesti pehmeäpintaisilla  
teillä liikkumiseen. Kun pintapaine tiehen pienenee, niin raiteenmuodostus  
vähenee ja pyörän pitokyky suurenee. Ajo-olosuhteiden mukaisella rengas-  
paineiden säädöllä saavutetaan lisäksi monia muita hyötyjä, kuten polttoai-  
nekulutuksen ja kaluston rikkoutumisen vähentymistä. Tässä raportissa esi-  
tetään rengaspaineiden säätöjärjestelmiä ja niiden käytöstä ja kokeiluista  
puutavarakuljetuksissa saatuja tuloksia.

## **2 RENGASPAINIEN SÄÄTÖ**

### **2.1 Paineensäätömenetelmät**

#### **2.1.1 Rengaspaineiden säätöjärjestelmät**

Rengaspaineiden säätöjärjestelmät ovat tekniikoita, joilla kuljettaja voi ajon  
aikana muuttaa rengaspaineita (esim. CTI på virkesfordon 2004, Bulley ja  
Blair 2001). Järjestelmistä käytetään kahta lyhennettä: CTI ja TPCS. CTI  
(Central Tire Inflation) viittaa vanhempaan, yksinkertaisempaan tekniik-  
kaan, joka kehitettiin sotilassovelluksiin. Siitä puuttuu monta tietokone- ja  
turvallisuusominaisuutta, jotka ovat välttämättömiä kaupallisissa ajoneuvo-  
sovelluksissa. TPCS (Tire Pressure Control System) viittaa monipuoliseen,  
tietokonehallittuun järjestelmään, joka hoitaa jopa kolmen rengasryhmän  
valvonnan, täytön ja tyhjentämisen. Tätä järjestelmää käytetään siviiliajo-  
neuvoissa. (Bradley 2003.)

Rengaspaineiden säätöjärjestelmiä on eniten käytössä Pohjois-Amerikassa.  
USA:ssa CTI-järjestelmä on yli 25 000 sotilasajoneuvossa (What is 2006).  
Kanadassa oli Bradley'n (2003) tutkimuksen aikaan käytössä noin 350 järjes-  
telmää pääasiassa Albertan provinssissa, mutta järjestelmät olivat saavutta-  
massa hyväksynnän myös muissa provinssissa ja muissakin kuin metsäso-  
velluksissa, esim. maataloudessa, betoni- ja öljyteollisuudessa (kuvat 2–5).

Rengaspaineiden säätöjärjestelmien viimeaikaisessa kehittämisessä on pyrit-  
ty parantamaan ominaisuuksia ja ohjelmoitavuutta, pienentämään ja keven-  
tämään komponentteja sekä alentamaan hankintahintaa (Bradley 2003).



Kuva 2. Rengaspaineiden säätöjärjestelmällä varustettu puutavara-auto Brittiläisessä Kolumbiassa Kanadassa.



Kuva 3. Rengaspaineiden säätöjärjestelmällä varustettu puutavara-auto Ruotsissa.



Kuva 4. Rengaspaineiden säätöjärjestelmällä varustettu betoniauto Kanadassa.



Kuva 5. Vetävien pyörien painetta säädetään ulkopuolisten ilmaletkujen avulla. Ohjattaviin pyöriin ja perävaunun pyöriin ilmanpaine tulee akseleiden kautta.



### 2.1.2 Paineiden säätö ilma-asemilla

Puun kuljetusreittien varrelle sopiviin paikkoihin voidaan sijoittaa kiinteitä paineilma-asemia, joissa renkaiden ilmanpaineita voidaan säätää. Tällaiset ilma-asemat voisivat olla taloudellinen vaihtoehto rengaspaineiden säätöjärjestelmille epäsäännöllisessä käytössä, esimerkiksi jollakin tieosuudella liikennöimiseksi, vaikka pysähtyminen rengaspaineiden säätöön lisää reittiaikaa (Bulley ja Blair 2001).

### 2.1.3 Alennetut vakiopaineet

Renkaiden ajon aikaisten paineiden säätämisen sijasta joissakin tapauksissa renkaiden paineiden säätäminen pysyvästi alennettuun paineeseen (CRP = Constant Reduced Pressure) voi olla käypä vaihtoehto kuljetuksissa, joissa

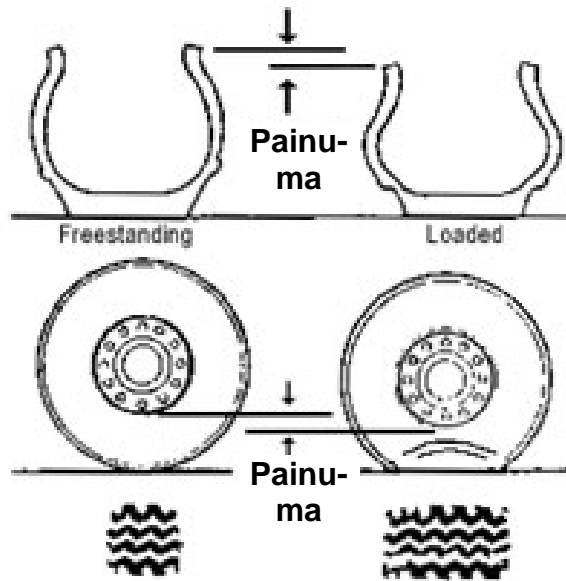
- kuormattuna ajoa valtiatiellä on enintään 30 minuuttia kuormauskertaa kohti
- ei edellytetä parhaimpien tieluokkien akselipainoja
- ei selvästi voida osoittaa CTI -järjestelmän kannattavuutta (Fraser 2002).

Alennetut vakiopaineet ovat toimiva vaihtoehto myös silloin, kun kuormatut autot ajavat pienillä, esimerkiksi alle 60 km/h, nopeuksilla läpi reitin (Bulley ja Blair 2001).

## 2.2 Rengaspaineiden vaikutukset

Ajonopeus ja renkaan kuormitus (kuorman massa) ovat päätekijät, jotka määräävät turvallisen minimipaineen ajoneuvon renkaille. Nopeuden tai kuorman kasvattaminen ja/tai paineen alentaminen lisäävät renkaiden joustoa. Sen seurauksena renkaan vaippa lämpiää ajon aikana. Jos vaipan lämpötila tulee liian suureksi, rengas voi rikkoutua. Rengaspaineiden säätöjärjestelmissä (TPCS) on turvallisuusvahteja, jotka automaattisesti säätävät renkaiden ilmanpaineet turvalliselle tasolle ajonopeuden mukaan. Jatkuvasti alennetuilla paineilla tätä suojaa ei ole. (Fraser 2002.)

Kun renkaan ilmanpaine laskee, renkaan kosketuspinta-ala tiehen suurenee (kuva 6). Granlund ja Andersson (1998) selvittivät ilmanpaineen vaikutusta 425/65R22,5-perävaunupyörällä. Pyörän leveys on aina 30,4 cm. Jotta se voi kestää lastatun ajoneuvon 9 000 kg:n akselikuorman suurella nopeudella ajettaessa, rengaspaineen tulee olla 740 kPa. Silloin kosketuspinnan pituus on 22,6 cm. Ilman kuormaa akselikuorma on vain 1 800 kg ja samalla rengaspaineella kosketuspinnan pituus 8,1 cm. Taulukossa 1 on esitetty vastaavat kosketuspinta-alat ja samat myös CTI:llä varustetulle renkaalle. (Granlund ja Andersson 1998.)



Kuva 6. Renkaan painuma ja kosketuspinta-ala.

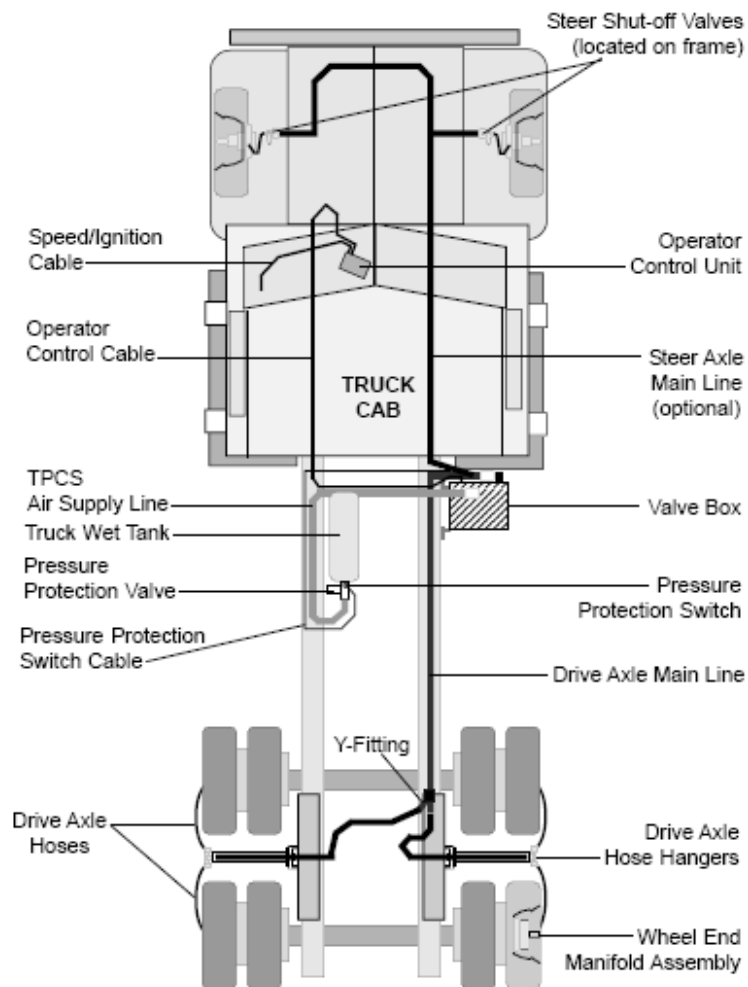
TAULUKKO 1. Perävaunurenkaan 425/65R22,5 kosketuspinnan pituudet ja pinta-  
alat vakio paineisella ja säätö paineisella renkaalla (arvot suoraan tai määritetty  
lähteen Granlund ja Andersson 1998 perusteella).

Suure	Tavallisella ajoneuvolla		CTI:llä varustetulla ajoneuvolla		
	Kuormat- tuna	Tyhjänä	Asfaltti- tiellä	Soratiellä	Hätätilan- teessa
Kosketuspinta- ala, cm <sup>2</sup>	687	247	687	797	1 075
Kosketuspinnan pituus, cm	22,6	8,1	22,6	26,2	35,4

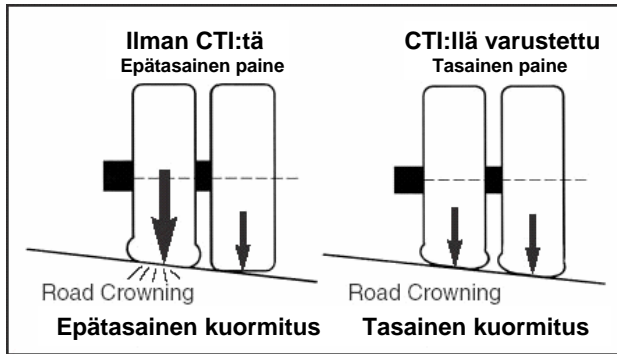
### 3 RENGASPAINEIDEN SÄÄTÖJÄRJESTELMIEN TOIMITTAJIA

#### 3.1 TPC International

Kanadalaisen TPC Internationalin (Tire Pressure Control International Ltd.) Tireboss-järjestelmiä (aiempi malli Redline-Eltek TPCS) on käytössä Kanadan lisäksi Yhdysvalloissa, Australiassa, Uudessa-Seelannissa ja Ruotsissa (kuvat 7 – 11). Yritys aloitti laitteiden toimitukset 1996. Laitteita käytetään pääasiassa metsä-, öljy- ja betoniteollisuuden kuljetusvälineissä. Esimerkiksi eräällä kanadalaisella betoniyrittäjällä järjestelmä on käytössä yli sadassa betoniautossa. Järjestelmä voidaan siirtää auton vaihdon yhteydessä autosta toiseen, mikä pienentää pääomakustannuksia. Peruslaite painaa 66 kg ja sen maksimipaine on 828 kPa (120 psi, 8,3 bar). (TPC International 2006.)



Kuva 7. Tireboss-järjestelmän yleiskuva.



Kuva 8. Paineen- ja kuormituksen jakautuminen paripyörissä ilman CTI:tä ja CTI:llä.



Kuva 9. TPC International mainostaa järjestelmänsä hyvää kestävyyttä vaikeissakin olosuhteissa.



Kuva 10. Takaa katsottuna nähdään, että ilmalitkut tulevat vain vähän auton sivureunaa ulommaksi.



Kuva 11. TPC Internationalin järjestelmän näyttö- ja ohjausyksikkö sijaitsee auton ohjaamossa.

### 3.2 Muita toimittajia

TPC International lienee tällä hetkellä merkittävin puutavara-autoihin rengaspaineiden säätöjärjestelmiä toimittava laitevalmistaja. Aiemmin kirjallisuuden perusteella on joissakin kokeissa käytetty myös Eatonin laitteistoja (Eaton Corporation). Nykyään Eatonin rengaspaineiden säätöjärjestelmät tunnetaan nimellä Dana Spicer® Tire Pressure Control System, ja niitä valmistaa Dana Corporation. Dana Corporationilla on järjestelmät sotilaskäyttöön ja kaupallisiin, raskaisiin ajoneuvoihin (Abelson 2002, Obringer).



Kuva 12. CM Automotive Systemsin CTI-järjestelmällä varustettu sotilasajoneuvo.

Rengaspaineiden säätöjärjestelmiä pääasiassa sotilassovelluksiin toimittaa Yhdysvalloissa myös CM Automotive Systems, Inc (kuva 12). Yhtiö on perustettu 1986 ja referenssinä mainitaan mm. Patria AMV 8x8 -ajoneuvo. (CM Automotive Systems.)

Syegon, joka on Giat Industriesin tytäryhtiö, on ranskalainen rengaspaineiden säätöjärjestelmiä toimittava yritys. Se toimittaa laitteistoja sotilas-, maatalous- ja erikoisajoneuvoihin sekä nelivetoautoihin. Sen referenssilistalla mainitaan metsätalous, ja yhdessä verkkosivujen kuvassa esitetään myös puutavara-auto (Syegon).

## 4 TUTKIMUKSIA RENGASPAINIEN SÄÄDÖN MERKITYKSESTÄ

### 4.1 Kokeet puutavara-autoilla

#### 4.1.1 Yhdysvaltalaiset kokeet

##### Altunel ja de Hoop (1998)

Oregonissa USA:ssa tehdyn tutkimuksen mukaan pienien rengaspaineiden käyttö raskaissa ajoneuvoissa vähensi metsätiellä tien pinnan ainesosien sekoittumista keskimäärin 80 % yli kolmen vuoden testijakson aikana.

Nevada Automotive Test Centerin (NATC) tutkimuksen mukaan matalapaineiset renkaat välittivät 85 % vähemmän iskuja ja värähtelyjä puutavara-auton jousitukseen, auton komponenttien rikat vähentyivät 87 % ja korjauskustannukset 83 %. Pienet rengaspaineet näyttivät vähentävän tärinätasoa kuljettajan istuimella 10 - 25 % tien päällyksestä riippuen.

### Sturos ym. (1995)

Nevada Automotive Test Centerin (NATC) tutkimuksessa verrattiin kahta 18-pyöräistä puutavara-autoa, joista toisessa oli korkeat ja toisessa matalat rengaspaineet. Tulosten mukaan:

- Korkeapainerenkaisen auton huolto ja korjauskulut olivat 8 kertaa suuremmat kuin matalapainerenkaisen
- Korkeapainerenkaisen auton komponentit saivat kiihtyvyyssantureilla mitaten 2–10 kertaa enemmän iskuja kuin matalapainerenkaisen
- Matalapainerenkaisen auton renkaat kuluivat 15 % vähemmän
- Korkeapainerenkaiset autot aiheuttivat enemmän sorahävikkiä kaarteissa
- Tärinäkuoppia ei syntynyt matalapainerenkaisella, mutta ne lisääntyivät korkeapainerenkaisella autolla
- Ajomukavuus oli matalapainerenkaisella autolla selvästi parempi.

Moores Creek Timber Salen testissä tutkittiin rengaspaineiden vaikutusta neljällä 18-pyöräisellä puutavara-autolla. Niiden rengaspaineet olivat korkeapaineisina 621 kPa (90 psi) ja matalapaineisina niin, että painuma oli 21 %. Paineet säädettiin manuaalisesti ilma-aseamalla ja automaattisilla tyhjennysventtiileillä. Testitulosten mukaan:

- Tien kunnossapito väheni matalapaineisilla renkailla (3–4 tuumaiset urat verrattuna 16 tuumaisiin)
- Matalapainerenkaisella autolla voitiin toimia useina sellaisina päivinä, jolloin liikennöinti ei olisi ollut mahdollista korkeapainerenkaisella autolla
- Ajomukavuus oli parempi matalapaineisin renkain kuin korkeapaineisin
- Matalapaineisilla renkailla ei sattunut rengasrikkoja.

The Forestry Sciences Laboratoryn testi tehtiin kahdella CTI-varusteisella 10-pyöräisellä puutavara-autolla. Hiekkainen tieosuus oli jaettu kolmeen mailin pituiseen osaan. Ensimmäisellä osuudella ajettiin 690 kPa:in (100 psi, 10 %:n painuma), toisella 448 kPa:in (65 psi, 20 %:n painuma) ja kolmannella 207 kPa:in (30 psi, 30 %:n painuma) paineilla 268 kertaa kuormattuna ja 90 kertaa tyhjänä.

Tieosuus, jolla ajettiin 690 kPa:in paineilla, petti ja muuttui kulkukelvottomaksi testin lopussa. Tieosuuksilla, joilla ajettiin 448 ja 207 kPa:in paineilla, kuluminen oli hyvin vähäistä. Vetokokeessa 448 kPa:in paineilla varustetun auton vetokyky oli hiekkatiellä 34 % ja savitiellä 17 % suurempi kuin 690 kPa:in paineilla varustetulla autolla. Merkittävää eroa vetokyvyssä ei ollut 448 ja 207 kPa:in paineisilla renkailla varustettujen autojen välillä.

Forest Service teki tutkimuksen CTI:stä 11-akselisella (6 akselia vetoautossa, 5 perävaunussa) puutavara-autolla. Tutkimuksessa tehtiin ilmanpaineen säätöjärjestelmän eduksi seuraavat havainnot:

- Vähemmän vaurioita tielle
- Parantunut ajo
- Parempi vetokyky 6-akselisella vetoautolla lumessa, jäällä ja löysällä hiekalla
- Vähäisempi vierintävastus 5-akselisella perävaunulla löysällä hiekalla
- Vähäisempi soran tarve. Tiekustannuksissa säästettiin 62 %.

Lisäksi todettiin, että laitteiston ilman suodatusta ja kuivausta kylmissä olosuhteissa tulisi kehittää. Ongelma tosin saattoi olla ominainen tähän tapaukseen suunnitellulle laitteistolle. Suurilla rengaspaineilla täytyi pahimpia kuoppia ylitettäessä käyttää vähintään yhtä pykälää pienempää vaihdetta kuin alennetuilla rengaspaineilla. Kuormittamattomana matalapainerenkaisen auton vetovoima oli tuoreella, tiivistyneellä lumella 31 ja jäisellä tiellä 37 % parempi kuin suurilla rengaspaineilla. Kuormitettuna vetokyky parani 6 % jäisellä tiellä, mutta tuoreella, tiivistyneellä lumella ei ollut eroa matala- ja korkeapainerenkaisen auton välillä.

#### **4.1.2 Kanadalaiset kokeet**

FERIC (Forest Engineering Research Institute of Canada) toi kaupallisen CTI-järjestelmän Kanadaan 1990 ja on ollut aktiivinen järjestelmän kehittämisessä ja käyttöönotossa siitä lähtien (Bradley 1997).

##### Bulley ja Blair (2001a, 2001b)

Kanadan läntisimmän provinssin, Brittiläisen Kolumbian, sisäosissa päänäkökohta puutavaran kaukokuljetuksessa on autojen mäennousukyky. Nousukyvyllä tarkoitetaan maksimikaltevuutta, jonka auto voi nousta säilyttäen riittävän hallinnan. Lokakuussa 2000 FERIC teki teoreettisen analyysin ja kenttäkokeen, joissa tutkittiin vetävien pyörien ilmanpaineen vaikutusta kuormattujen puutavara-autojen mäennousukykyyn.

Kokeessa vetävien pyörien ilmanpaine alennettiin 690 kPa:sta (100 psi) 414 kPa:iin (60 psi). Renkaan jäljen pituus kasvoi näin 28:sta 38 cm:iin. Alennetuilla rengaspaineilla autot kykenivät nousemaan mäen auttamatta, kun normaalein rengaspainein varustetut autot tarvitsivat vetoapua jokaisella kuormalla. Tämä toi seuraavia etuja:

- Ajokerta-ajat tehtaalta varastolle ja takaisin pienenivät 3 %, kun ei tarvittu vetoapua.
- Kustannukset pienenivät myös siksi, että ei tarvittu avustavaa ajoneuvoa.
- Paremmalla mäennousukyvyllä saavutettavat kustannussäästöt riippuvat kuljetettavan puutavaran ja kyseisellä tienosalla kuljetettavien kuormien määrästä.
- Riski kuljettajille ja kalustolle väheni.

### Fraser (2002)

Kokeessa ajettiin soran ja lentotuhkan kuljetusautoilla jatkuvasti alennetuin painein. Minimipaine kylmissä renkaissa oli 448 kPa (65 psi). Lentotuhkan kuljetuksessa kuormattuna ajonopeus oli noin 60 km/h ja ajon kesto 80 minuuttia. Soran kuljetuksessa nopeus oli vain 44 km/h ja kesto 75 minuuttia. Nopeudet olivat merkittävästi pienempiä kuin alennetuilla rengaspaineilla sallittu 80 km/h. Kokeissa renkaiden maksimilämpötilaksi arvioitiin renkaan pintalämpötilojen mittauksen perusteella 78 °C. Renkaat eivät saavuttaneet kriittistä lämpötilaa, mikä oli kyseisille renkailla valmistajan mukaan 105 °C. Renkaiden lämpötilat näyttivät nousevan ulkolämpötilan noustessa saman verran asteina.

Jatkuvaa alennettua painetta käytettäessä hyvä renkaan huolto on tärkeää, koska renkaan hidas tyhjeneminen (6,9 kPa eli 1 psi kuukaudessa normaalia) aiheuttaa nopeasti paripyörän toiselle renkaalle lisäkuorman ja se voi tulla ylikuormitetuksi. Hyvä huolto on tärkeää myös siksi, että jatkuvasti käytetty alennettu paine on lähempänä renkaalle sallittua minimipainetta kuin tavanomainen rengaspaine.

### Bradley (2003)

Lokakuussa 1999 FERIC ja SHT (Saskatchewan Highways and Transportation) tekivät kenttäkokeen kahdella ns. B-train -tyyppisellä puutavara-autojoukolla. Toisen autojoukon rengaspaineet säädettiin tavanomaisesti suositeltuun 690 kPa:iin (100 psi). Toisen autojoukon paineita säädettiin paineensäätöjärjestelmällä rengasvalmistaja Michelinin suosituksen mukaisesti. Autojoukot ajoivat vierekkäisiä kaistoja maaseututietä, jolla oli tiivis savipinta ja sen päällä ohut kerros soraa vetokyvyn parantamiseksi märällä säällä.

Säädetyin rengaspainein varustettu autojoukko teki ilman kuormaa ajettaessa vain kolmasosan liikennekuoppia kuin korkeammilla rengaspaineilla varustettu autojoukko. Kuormattuna säädetyin rengaspainein varustettu autojoukko aiheutti tien pinnalle huomattavasti vähemmän vaurioita kuin korkeammilla rengaspaineilla varustettu autojoukko. Savipinta urautui kovin vähän, ja erot urasyvytydessä eivät olleet merkityksellisiä.

SHT:n jatkoi tutkimuksia vuonna 2000 optimaalisten rengaspaineiden potentiaalini määrittämiseksi maaseututeiden tievahinkojen minimoimiseksi. Kokeessa tehtiin kaksi testiä: saman akselikuorman testi ja saman hyötykuorman testi. Molemmat testitiet olivat kaksikaistaisia, leveydeltään 7,2 - 8,0 metriä ja rakennettu paikallisesta savityyppisestä moreenimaasta. Päällyskerroksen paksuus oli vähintään 150 millimetriä. Tien päälle oli lisätty ohut kerros (3-5 mm) soraa vetovoiman parantamiseksi märällä säällä. Normaalipaine renkaissa oli 690 kPa (100 psi). Alennetut paineet olivat 552 kPa (80 psi) ohjattaville pyörille, 414 kPa (60 psi) vetoakselipyörille ja 345 kPa (50 psi) perävaunun pyörille.



Saman **akselikuorman** testi tehtiin viiden auton joukolla (9-akselinen B-train). Autojoukko ajoi vuoropäivin (140 ohitusta/päivä) alennetuin ja normaalein painein testitietä omaa kaistaansa niin kauan kuin tien vauriot pysyivät hyväksyttävänä.

Saman **hyötykuorman** testi tehtiin kahdella erilaisella autojoukolla. Optimoidun rengaspaineen autojoukko muodostui viidestä autosta (9-akselinen B-train), joiden maksimipaino oli 70,5 tonnia. Normaalein painein varustettu autojoukko koostui seitsemästä autosta (neljä 8-akselista B-trainautoa ja kolme 6-akselista puoliperävaunuautoa). Niiden maksimipainot olivat 54,5 ja 40 tonnia.

Saman akselikuorman testissä normaalein painein ajaneen autojoukon kaista suljettiin 200 ajokerran jälkeen laajojen vaurioiden vuoksi. Optimoiduin painein ajaneen autojoukon ajokaista säilyi kulkukelpoisena koko testin ajan (721 ajokertaa). Autojoukon ajo olisi voinut jatkua 800 ajokertaan ja ylikin, ennen kuin samantasoisia vaurioita kuin normaalein painein ajossa olisi syntynyt. Saman akselikuorman testin jälkeen optimoiduilla rengaspaineilla oli kuljetettu 3,5 kertaa niin suuri hyötykuorma kuin normaalein rengaspainein (34 100 tonnia / 9 460 tonnia).

Saman hyötykuorman testissä normaalein painein varustetun autojoukon kaista jouduttiin usein sulkemaan korjausten takia. Maapintaisen tieosuuden pinta leikkautui normaalein painein varustetulla autojoukolla 60 %:lla kais-tan pituudesta ja optimaalisilla paineilla varustetulla autojoukolla vain 10 %:lla. Optimaalisin rengaspainein varustettu autojoukko aiheutti vähemmän muitakin tievaurioita kuin normaalein painein varustettu autojoukko huolimatta korkeammista akselikuormista. Rengaspaineiden lisäksi se johtuu siitä, että tällä autojoukolla tarvittiin vähemmän ajokertoja. Optimoiduin rengaspainein varustetulla autojoukolla kuljetettiin 32 % enemmän hyötykuor-maa (17 970 tonnia) kuin normaalein painein varustetulla autojoukolla (13 634 tonnia).

Renkaiden huippupintalämpötilat optimoiduin painein - vetoakseleiden renkaissa 44 °C ja perävaunun renkaissa 42 °C - olivat korkeammat kuin normaalein painein. Lämpötilan nousu oli rengasvalmistaja Michelinin mukaan hyväksyttävissä rajoissa eikä aiheuttanut syytä huoleen. Saman akselikuor-man testissä polttoaineen kulutus oli optimoiduin rengaspainein 9 % pie-nempi kuin normaalein rengaspainein. Aiemmissä tutkimuksissa on todettu 1 - 3 %:n polttoaineen säästöjä kun ajetaan alennetuin rengaspainein pääl-lystämättömillä tai pehmeillä teillä. Polttoainetalouden parantuminen johtuu sekä pyörien luiston vähenemisestä (parempi pito, vähemmän energian huk-kaa) että pienemmästä urautumisesta (vähemmän liikevastusta).

#### Blair ja Bradley (2005)

Kun B-train-tyyppisissä puutavara-autoissa käytettiin optimoituja rengas-paineita, raiteet jäivät vastarakennetulle leimikkotielle runsaaseen puoleen siitä mitä vastaavasti kuormatut autot suurin rengaspainein aiheuttivat. Liik-kuvuuskokeessa kaksi B-train-tyyppistä puutavara-autoa suurin painein

juuttui kiinni. Kun rengaspaineita sitten alennettiin TPCS-järjestelmällä, autot pystyivät peruuttamaan juuttumiskuopista pois ja ajamaan kyseisen kohdan yli. Suurilla rengaspaineilla autot jättivät syvät urat (kuva 13). Näitä uria voidaan alennetuilla paineilla "parantaa" ajamalla eri linjoja (kuva 14).



Kuva 13. Tie kahden ajokerran jälkeen kun oli käytetty suuria rengaspaineita.



Kuva 14. Sama tienkohta, kun uria on madallettu ajamalla eri linjoja alennetuilla rengaspainein.

### Bradley (2005)

FERIC:issä kehitetyllä tietokonemallilla voidaan arvioida, milloin testiajoneuvot voivat aloittaa puutavaran kuljetuksen painorajoitusten alaisilla teillä aiheuttamatta suurempia vaurioita kuin tavanomainen liikenne painorajoitusten poistamisen jälkeen. Kevään 2003 kokeessa ajo aloitettiin kuukautta ennen painorajoitusten poistamista ja tehtiin 360 ajokertaa aiheuttamatta tielle painumia tai halkeamia.

Keväällä 2004 B.C. Ministry of Transportation alkoi antaa renkaiden paineen säätöjärjestelmällä varustetuille puutavara-autoille liikennöintilupia painorajoitetuille teille kelirikkoaikaan. Uuden menettelytavan mukaan tehtiin keväällä 2004 neljä koetta. Kolmessa näistä meneteltiin FERICin kehit-

tämän tietokonemallin mukaan ja niissä saavutettiin kahdesta kuuteen viikkoon ylimääräistä kuljetusaikaa painorajoitusten aikaan lisäämättä päällystykseen vaurioita. Neljännessä kokeessa kuljetus aloitettiin ennen kuin tien päällyys oli saavuttanut FERICin kuvaaman lujuuden ja jonkin verran päällysvaurioita aiheutui.

#### **4.1.3 Ruotsalaiset kokeet**

##### Granlund ja Andersson (1998)

Ruotsalaisten CTI-kokeessa keväällä 1997 Jämtlandissa päällimmäisenä kerroksena koetiessä oli 15 cm soraa, sen jälkeen 25 cm turvetta ja sitten hietaa kahteen metriin saakka. Koehetkellä routa oli 50 cm:ssä. Autot ajoivat rinnakkain yli koealueen. Jo ensimmäisen ajon jälkeen tavanomaisella rengasvarustuksella ollut vertailuauto jätti selvän jäljen, mutta CTI-auto ei aiheuttanut minkäänlaista raiteenmuodostusta. Kuuden ajokerran jälkeen vertailuautolla ajo oli lopetettava kiinnijuuttumisriskin vuoksi. Raiteensyvyys oli tuolloin 17 cm, kun se CTI-autolla oli vain 3 cm. CTI-autolla ajo lopetettiin 30 ajokerran jälkeen, vaikka vielä olisi voitu ajaa useita kertoja. Raiteensyvyys oli tuolloin 15 cm.

Vetovoimakokeessa mittaukset tehtiin asfalttitiellä ajonopeudella 2 km/h. Kun ilmanpaine alennettiin 600:sta 350 kPa:iin, vetovoima kasvoi 31 %. Laskettaessa ilmanpaine edelleen 170 kPa:iin, vetovoiman nousu oli 55 % alkuperäiseen 600 kPa:in ilmanpaineella saavutettuun vetovoimaan verrattuna.

##### Granlund ym. (1999)

CTI-tekniikkaa testattiin viidellä painorajoitetulla tiellä toukokuusta syyskuuhun 1998. Neljällä kohteella tieluokat olivat 8/12:ta, mikä tarkoittaa tietä, jossa on sallittu enintään 8 tonnin akselipaino tai 12 tonnin telipaino. Suurin kokonaispaino on 37 tonnia. Näin tavanomainen puutavara-auto voi ottaa vain 15 tonnin kuorman, jos kuormain on kuljetettava mukana. Yhdellä kohteella painorajoitus oli 12 tonnia eli tie oli suljettu raskaalta liikenteeltä kokonaan. Tielaitos antoi erivapauden CTI-järjestelmällä varustetulle autolle ajaa teillä 2-3 kuormaa päivässä täydellä kuormalla. Tämä vastasi suurin piirtein normaalia kuljetustarvetta.

Kun voitiin ajaa täydellä kuormalla ja vältettiin uudelleenkuormaukset, säästyivät 604 työtuntia. Tuntikustannuksen ollessa 520 kr tuli säästöksi yli 300 000 kr, mikä vastasi keskimäärin 30 kruunua tonnia kohti. Lisäksi polttoainetta säästyivät 12 000 litraa. Päästövähennykset olivat: CO<sub>2</sub> 32 000 kg, NO<sub>x</sub> 550 kg ja SO<sub>2</sub> 60 kg. Tielaitos ei teiden jälkitarkastuksessa löytänyt mitään merkittäviä vaurioita. Tulokset kohteittain on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. CTI-varustetun puuvara-auton käyttö painorajoitetuilla teillä verrattuna tavanomaisen puutavara-auton käyttöön.

Kohde	1	2	3	4	5
Tieluokka	8/12	8/12	8/12	8/12	raj. 12 tn
Matka tieluokassa, km	37	14	6	12	42
Puumäärä, tn	1 300	1 200	1 750	3 900	1 930
Kuormamäärä	32	30	43	95	47
Säästyneet ajokerrat	110	100	148	330	164
Säästynyt terminaaliaika, h	32	30	43	95	47
Säästynyt ajoaika, h	75	30	19	84	149
Säästynyt ajomatka, km	3 500	1 400	890	3 960	6 980
Säästö, kr/tn	43	26	18	24	53

CTI på virkesfordon (2004), Granlund (2004), Granlund ja Löfroth (2006)

Ruotsissa käynnistettiin keväällä 2003 kolmevuotinen CTI-projekti rengaspaineiden säädöllä saavutettavien hyötyjen osoittamiseksi. Hankkeeseen osallistuivat ruotsalaiset metsäyhtiöt, puutavara-autovalmistajat ja Vägverket. Skogforsk vastaa hankkeen vetämisestä. Hankkeessa varustettiin 12 puutavara-autoa eri puolilla Ruotsia kanadalaisella Tirebossin CTI-järjestelmällä. Projektin aikana on seurattu järjestelmän teknistä luotettavuutta sekä sen vaikutuksia teihin, ajoneuvoihin, renkaisiin, kuljettajan olosuhteisiin ja talouteen. Ajoneuvot, jotka varustettiin CTI-järjestelmällä, saivat projektin ajaksi Vägverketiltä erivapauden ajaa täydellä kuormalla painorajoitettuja teitä myös huonon kantavuuden aikana.

Rengaspaineiden säätökokeilusta on julkaistu seuraavia tietoja:

- Teiden kuluminen vähenee, koska matalampi ilmanpaine antaa suuremman kosketuspinta-alan ja rengas ei luista ja kaivaudu yhtä herkästi kuin suuria paineita käytettäessä.
- Autojen vetovoima kasvaa jopa 140 %, kun ilmanpainetta säädetään optimaalisesti.
- Vetoakseleiden renkaiden käyttöikä nousee 30 000 - 40 000 km, koska kuormittamattomien renkaiden luisto poistuu.
- Tärinä hytissä vähenee ja kuljettajien niska-, selkä- ja hartiavaivat vähenevät, kun rengaspaineet säädetään ajo-olosuhteiden mukaan. Erään kokeen mukaan tärinä hytissä laski keskimäärin 8 % kierroksella tehtaalta tehtaalle ja jopa 15 %, kun ajettiin kuormittamattomana huonolla tiellä. Keskimääräistä 8 %:n laskua pidetään suurena ja se vahvistaa sitä, mitä CTI:llä varustettujen autojen kuljettajat ovat sanoneet: CTI:llä saadaan paljon paremmat tärinäolosuhteet.

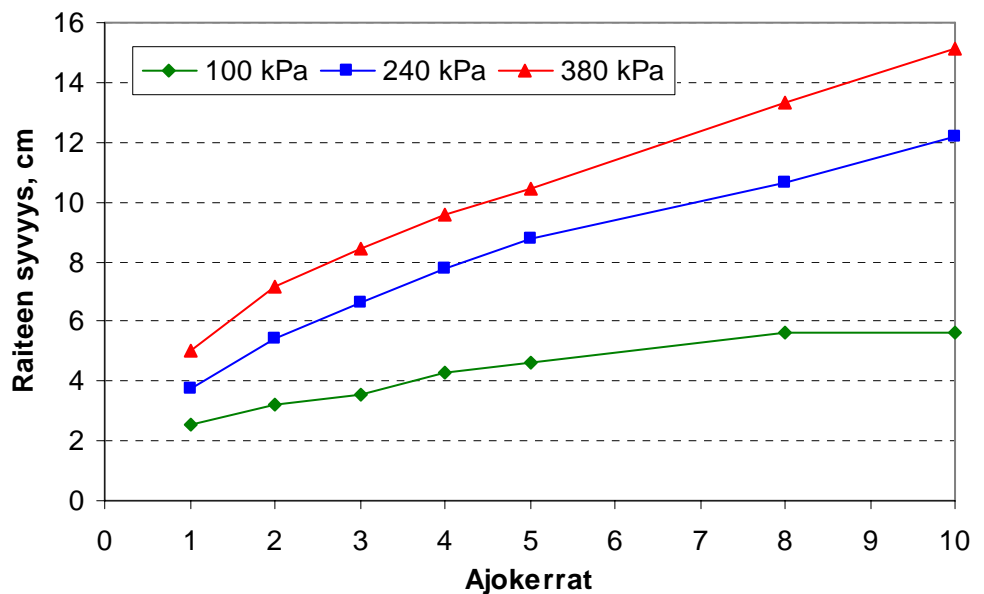
- Erivapaudet yleisillä teillä kelirikon aikana sekä ajo BK2- (51 tn) ja BK3-teillä (37 tn) toimivat moitteettomasti vuoden 2005 aikana.
- Tielaitos kehittää toimivaa erivapausprosessia koko maahan projektin loppuun kesään 2006 mennessä.

## 4.2 Kokeet kuormatraktoreilla

### Löfgren (1991)

Ruotsalaiset kokeilivat CTI-järjestelmää metsätraktoriin jo 1990-luvun alussa. Kokeissa mitattiin keskikokoisen metsätraktorin aiheuttamaa raiteensyvyyttä, kun kuormankokoa ja rengaspaineita muutettiin. Koneena oli Kockum 83-35, jossa oli jatkettava kuormatila. Koneessa oli Trelleborg Twin 500-22,5 -renkaat ja koneen omapaino oli 12,0 tonnia.

Kokeet tehtiin pellolla, jonka ylin kerros muodostui 5-8 cm:n paksuisesta juurimatosta. Koneella ajettiin kussakin testin osassa kymmenen kertaa sama rataosuus. Käytetyt kuormakoot olivat 3,7, 5,3 ja 7,9 tonnia ja vastaavat kokonaispainot 15,7, 17,3 ja 19,9 tonnia. Tulokset osoittivat, että raiteensyvyys pienenee olennaisesti, kun renkaan ilmanpainetta pienennetään (kuva 15). CTI mahdollistaa toimimisen alueilla, missä tavanomainen konekalusto ei selviä vaatimuksista tai aiheuttaa lisäkustannuksia erityisjärjestelyjen takia. Laskelmien mukaan CTI:n hyödyksi harvennuksessa vähempien konesiirtojen ja sen takia säästyneen työajan vuoksi määritettiin 1 kr/m<sup>3</sup> Pohjois- ja 3 kr/m<sup>3</sup> Etelä-Ruotsissa.



Kuva 15. Kuormatraktorin muodostaman raiteen syvyyden riippuvuus renkaiden ilmanpaineesta täydellä kuormalla.

### Löfgren ym. (1996)

Testatussa 8-pyöräiseen FMG 250 -kuormatraktoriin asennetussa CTI-järjestelmässä renkaiden paine oli säädettävissä kolmelle tasolle: matala, keskimääräinen ja korkea. Kahden tason välisen paine-eron nostoon kului 4-5 minuuttia. Vastaava paineen lasku kesti pari minuuttia. Etu- ja takatelien renkaissa käytettiin erisuuruisia ilmanpaineita.

Turpeisella peltomaalla raidesyvyys vähentyi 40 - 45 % sekä 600 että 800 mm leveillä renkailla, kun paine laskettiin korkeasta matalaan. Ero raidesyvyydessä korkean ja keskimääräisen rengaspaineen välillä oli kuitenkin pieni. Suurta eroa raidesyvyydessä ei ollut 800 mm:n korkea- tai keskipaineisilla ja 600 mm:n matalapaineisilla renkailla, eli matalapaineisilla 600 mm:n renkailla muodostuu sama raidesyvyys kuin normaalipaineisilla 800 mm:n renkailla.

Matalalla rengaspaineella kovalla alustalla polttoainekulutus kasvoi 20 - 25 %, mutta kovalla alustalla ei tulekaan käyttää matalaa painetta. Pehmeällä alustalla tilanne on päinvastainen. Paine tulee sovittaa maan kantavuuden mukaan. Vetovoimatarve oli 600-renkailla täydellä kuormalla 50 % ja tyhjänä 35 % pienempi kuin 800-renkailla. Suhteellisen suuri ero johtuu 800-renkaiden paljon suuremmasta vierintävastuksesta ja työntövoimista käännöksessä kuin 600-renkailla.

Tärinä ohjaamossa on matalapaineisilla renkailla pienempi kuin korkeapaineisilla. 800-renkailla tärinä on pienempi kuin 600-renkailla. Vähemmän kokovartalotärinän vuoksi kuljettajat voivat paremmin ja työskentelevät tehokkaasti. Lisäksi kuljettajien sairauspoissaolot voivat vähentyä.

Vähemmällä maastovaurioilla ja siten vähemmällä vaurioilla puiden juuristolle on selvä positiivinen vaikutus puuntuotantoon. CTI:tä käytettäessä koneiden siirrot vähenisivät.

### Eliasson (2005)

Ruotsissa avohakkuu tehdään tavallisesti suurilla hakkuukoneilla ja kuormatraktoreilla. Suuri hakkuukone voi painaa yli 20 tonnia ja kuormattu suuri kuormatraktori yli 40 tonnia. Siksi riski maastovaurioihin, ts. raiteistumiseen ja maan tiivistymiseen on suuri epäsuotuisissa maasto-olosuhteissa. Keskikokoisia ja suuria kuormatraktoreita koskevissa tutkimuksissa on havaittu maan tiivistyneen syvemmältä kuin 40 cm. Maan tiivistyminen voi aiheuttaa kasvun hidastumista seuraavassa puusukupolvessa. Kun hakkuutähteet kerätään energian tuotantoon, ei ole mahdollista käyttää niitä vahvistamaan ajouria. Muita menetelmiä maan tiivistymisen estämiseksi ovat suuremmat renkaat, matalampi renkaan ilmanpaine ja telat.

Suurten kuormatraktoreiden rengaspaineet ovat korkeita koska pyöräkuormat ovat suuret ja koneita käytetään epätasaisessa maastossa, jossa on esteitä, kuten kiviä ja kantoja.

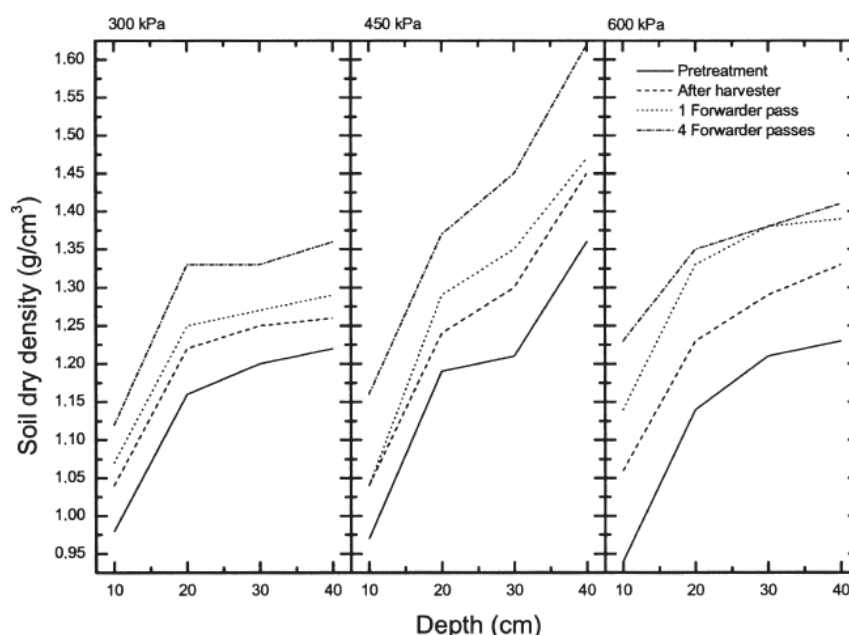
Tutkimuksessa selvitettiin sitä, voidaanko renkaan paineen alentamisella vähentää raiteistumista ja maan tiivistymistä avohakkuussa, kun hakkuutähteitä ei käytetä ajouran vahvistamiseen. Kokeessa käytettiin kolmea rengaspainetta, jotka olivat 300, 450 ja 600 kPa. Ensimmäinen ajokerta kokeessa tehtiin 19,7 tonnia painavalla hakkuukoneella. Ajokerrat kahdesta viiteen tehtiin kuormatulla, 37,8 tonnia painavalla, 8-pyöräisellä kuormatraktorilla. Koekohteita oli kolme, joista kaksi oli kuivalla ja yksi kostealla, hiekkaisella moreenimaalla. Maaperän kantavuus luokiteltiin melko hyväksi.

Tulosten mukaan renkaiden ilmanpaine ei vaikuttanut raiteen syvyyteen merkittävästi, sen sijaan kulkukertojen lukumäärä vaikutti merkittävästi (taulukko 3). Hakkuukone lisäsi maan kuivatiheyttä merkittävästi kaikilla muilla syvyyksillä paitsi 40 cm:ssä. Maan kuivatiheys suureni merkittävästi kuormatraktorin ajokerroilla (kuva 16).

Renkaiden ilmanpaine ei vaikuttanut merkittävästi kuivatiheyden muutokseen, mutta kulkukertojen ja renkaiden ilmanpaineen yhteisvaikutus oli lähes merkittävä. 600 kPa:in paineisilla renkailla ajo lisäsi maan kuivatiheyttä aikaisemmin kuin 300 ja 450 kPa:in paineisilla renkailla ajo. (Eliasson 2005.)

TAULUKKO 3. Raiteen syvyys (cm) kuormatraktorin renkaiden ilmanpaineen ja ajokertojen määrän mukaan.

Ajokertoja	Kuormatraktorin renkaiden ilmanpaine (kPa)		
	300	450	600
1 (hakkuukone)	3,3	3,2	3,2
2	5,2	4,5	4,7
5	8,0	6,0	9,2



Kuva 16. Maan kuivatiheys syvyyden ja ajokertojen määrän mukaan. Yhtenäinen viiva edustaa kulkematonta maata.

Matalien rengaspaineiden on todettu vähentävän maan tiivistymistä maataloudessa. Syy siihen, että renkaiden paineilla ei tässä tutkimuksessa ollut merkittävää vaikutusta raiteistumiseen ja maan tiivistymiseen, voi osittain selittyä sillä, että tutkimuksessa matalinkin rengaspaine oli maatalouskoneissa käytettyihin mataliin paineisiin (jopa alle 100 kPa) verrattuna korkea.

Ajourilla, joilla ajetaan kuormatraktorilla useita kertoja, ei maan tiivistymistä voida välttää renkaan ilmanpaineita alentamalla. Urilla, joilla kuormatraktorilla ajetaan vain kerran tai kahdesti, alempi rengaspaine voisi rajoittaa maan tiivistymisen lähes sille tasolle, jonka hakkuukone aiheuttaa.

### Muut kokeilut

Skogforsk on jo kymmenen vuotta sitten hahmotellut erilaisia ratkaisuja. Metsätraktori voitaisiin esimerkiksi varustaa itsevaaittuvalla kuormatilalla, jolloin koneen painopiste siirtyy koneen kallistuessa. Nykyisin koko paino kohdistuu sivukallistuksessa alapuolelle ja silloin tietysti vauriot lisääntyvät. Kuormatraktori voidaan varustaa myös CTI-järjestelmällä. Silloin kuljettaja voi alentaa rengaspaineita, kun kuormatraktorilla ylitetään pehmeä alue. Kun kuormatraktori pääsee jälleen kantavalle maaperälle, pumpataan renkaisiin normaalit ilmanpaineet. Konevalmistajat eivät ole tunteneet tarvetta tällä alueella tehtävään kehittämiseen. Konevalmistajien kannalta on välttämätöntä, että kehittämiselle esitetään selvä tarve ja taloudellinen kannattavuus, jotka takaavat kehittämistuloksen ottamisen käyttöön. (Markskador 2005.)

Kun kuormatraktorin renkaiden ilmanpainetta vähennettiin 40 %:iin normaalista, puolittui uransyvyys kymmenellä ajokerralla täydellä kuormalla. Matalapaineiset renkaat ovat herkkiä renkaan sivujen rikkoutumiselle. Siksi on tarpeen käyttää suuria rengaspaineita kivisillä ajouraosuuksilla. (Staland ja Larsson 2002.)

Maan voimakas tiivistyminen aiheuttaa puiden kasvun hidastumista. Painu-  
maurista voi tulla myös kanavia pintavesivirtauksille ja siten ne aiheuttavat eroosiota, kun sadeveden imeytyminen maahan vähenee. Näistä syistä on suositeltavaa, että urien muodostuminen ja maan tiivistyminen metsätoissa minimoidaan. (Bygdén ym. 2004.)

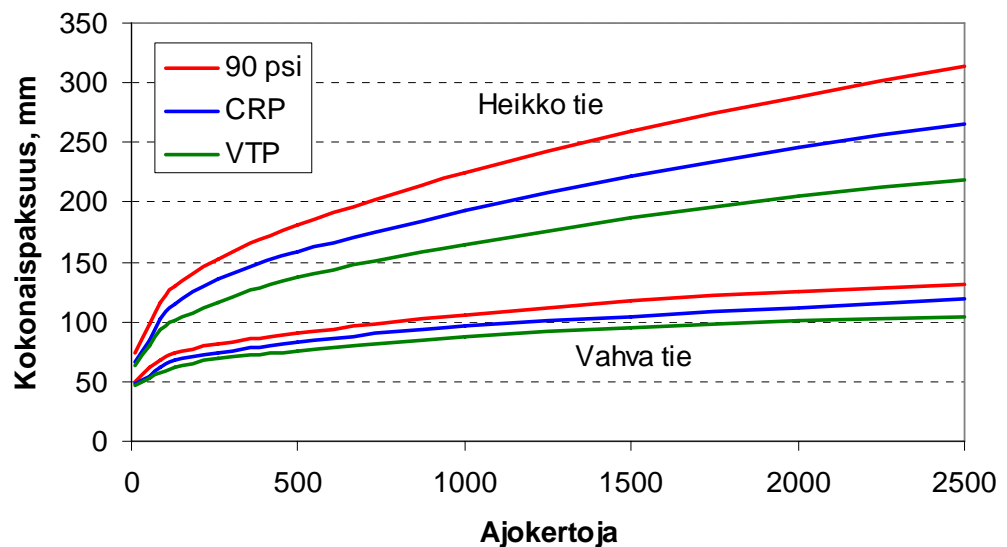


## 5 RENGASPAINIEN SÄÄDÖN EDUT JA HAITAT

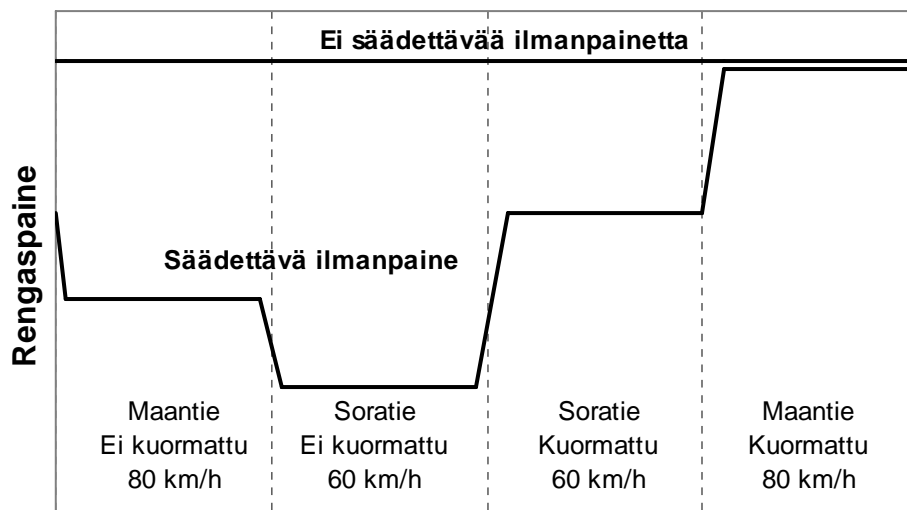
### 5.1 Edut

Kun renkaan ilmanpainetta vähennetään, niin renkaan tietä vasten oleva pinta-ala suurenee, ja kuorman paino jakautuu suuremmalle alalle. Renkaan sivureunan lisääntyneen jouston vuoksi renkaan luisto vähenee ja renkaan aiheuttama tien pinnan leikkautuminen pienenee, mikä johtaa pienempään urautumiseen ja muodostuneet uratkin ovat leveitä ja matalia. Pyörän paineen alentaminen parantaa myös sen iskunvaimennuskykyä. Matalammalla paineella pyörä hypähtelee vähemmän ja sen pito paranee. Siitä on seurauksena vähemmän liikennekuoppia, soran menetyksen väheneminen 25–40 %, tien materiaalikerrosten sekoittumisen väheneminen ja lopulta alentuneet tien hoitokustannukset. (Bradley 1997, Fraser 2002, Bradley 2003.)

Amerikkalainen STP-malli (USDA Forest Service's Surfacing Thickness Program) ennustaa, että tyypillisillä amerikkalaisilla metsäteillä ja puutavara-autoilla on mahdollista pienentää tien pinnan kokonaispaksuutta 25–30 %, kun rengaspaineita säädellään (kuva 17) (Bradley 1997). Andersonin ja Granlundin (1994) lähteen mukaan US Forest Servicen tekemien laajojen käytännön kokeiden perusteella voidaan tien päällyskerroksen paksuutta ohentaa 25–50 % säilyttäen sama kantavuusluokka. Myös Menziesin (2006) mukaan teillä, joilla käytetään TPCS:llä varustettua autokalustoa, voidaan käyttää 25 % vähemmän soraa ja tiet kestävät silti hyvin.



Kuva 17. Vaadittava tien pinnan kokonaispaksuus heikko- ja hyvälaatuisella tiellä, jotta raidesyvyys ei ylitä 50:tä mm. Ajoneuvona 5-akselinen pylväsauto, jonka rengaspaineet ovat 90 psi = 621 kPa, CRP = Constant reduced tire pressure, VTP = Variable Tire Pressure.



Kuva 18. Kun rengaspaineita säädetään, niin suurinta painetta käytetään vain hyvälaatuisilla teillä kuormattuna ajettaessa (TPC International 2006 aineiston mukaan).

CTI-järjestelmällä varustetun auton renkaiden ilmanpaineita voidaan säätää tie- ja kuormaolosuhteiden mukaan. Tämä parantaa ajoneuvon etenemiskykyä huonosti kantavilla teillä. Ilman CTI:tä täytyy ilmanpaine valita maksiminopeuden ja -kuorman mukaan. Tästä johtuen ajoneuvolla on tarpeettoman korkeat ilmanpaineet, kun sillä ajetaan huonoilla teillä pienillä nopeuksilla (kuva 18). Tämä tekee ajosta epätasaista. (Granlund 2004.)

Matalampi rengaspaine antaa pehmeämmän kulun, vähentää tärinää ja siten vähentää myös kuljettajan ja auton rasituksia. Polttoainekulutus kasvaa muutamia prosentteja ajettaessa soratiellä. Renkaiden kulumisen on sama tai tietyissä tapauksissa vähäisempi CTI-autoilla (Andersson ja Granlund 1994). Menziesin (2006) mukaan rengaspaineiden säätöjärjestelmän on todettu pidentävän renkaiden käyttöikää 30–40 %.

Alennetuin rengaspainein todennäköisyys luistoon pienenee, ja enemmän vääntövoimaa välittyy tiehen vetovoimaksi. Ennen menetelmän soveltamista on varmistettava, että auton voimansiirron komponentit ovat kunnossa. (Bulley ja Blair 2001.)

Kun rengaspaineiden säätöjärjestelmän ansiosta raaka-aine saadaan tehtaille tuoreempuna, saavutetaan Bradleyyn (2005) mukaan taloudellisia säästöjä:

- parantuneena tuotteen laatuna
- pienentyneenä hukkana varastoinnissa ja käyttöönnotossa
- pienempinä ja halvempina puun varastointeina sekä
- mahdollistamalla metsätoimintojen jatkamisen tai siirtämisen talvesta keväeseen.

Kanadalaisen Timber Service Ltd:n huomioimia TPCS:n etuja ovat

- parantunut ajo ja vähemmän tärinästä aiheutuneita vahinkoja ajoneuvoille
- parempi pito ja liikkuvuus kesällä ja talvella
- vähemmän juuttumistapauksia
- 5–8 päivää vähemmän menetettyä aikaa pehmeän tai märän tien takia kesällä
- vähäisempi renkaiden kuluminen
- vähemmän renkaiden puhkeamisia ja rikkoutumisia
- vuotavien renkaiden huomaaminen ja täyttö sekä
- vähemmän renkaisiin liittyviä huoltokutsuja tienpäältä.

Huomattavaa etua saadaan myös siinä, että renkaiden ilmanpaineita ei tarvitse miestyönä tarkastaa. (Bradley 2005.)

Melkein kaikki CTI-testeihin osallistuvat kuljettajat ovat ilmaisseet ajoneuvon ajettavuuden parantuneen ja päivän ajon jälkeisen väsymyksen vähentyneen. Optimaaliset rengaspaineet parantavat kuljettajan turvallisuutta parantamalla ajoneuvon hallittavuutta ja jarrutuskykyä. Kuormatun puutavara-auton pysähtymismatkat lyhenevät sekä kuivalla päällysteellä että sorapinnalla, kun renkaiden paineita alennetaan. (Altunel ja de Hoop 1998.)

## 5.2 Haitat

Ruotsalaisessa kesällä 2006 päättyvässä hankkeessa CTI:n haitoiksi on todettu suuremmat investointikustannukset, tekniikan lisääntyminen ja vanteiden lyhempi käyttöikä (Granlund 2006). Bradleyn (1997) mukaan käyttämällä yhtä korkeata painetta pyörissä voidaan säästää mahdollisesti polttoaineen kulutuksessa, mutta se lyhentää renkaan käyttöikää, pienentää vetovoimaa ja ajon mukavuutta ja lisää tievaurioita.

Granlundin ja Anderssonin (1998) tutkimuksessaan käyttämä CTI-järjestelmä oli amerikkalainen ja tämä aiheutti heidän mukaansa ongelmia, koska Ruotsissa käytetään eri tyyppisiä ajoneuvoja, kantavuuksia ja ajonopeuksia. Järjestelmä antoi esimerkiksi 6,4 barin maksimipaineen, kun Ruotsissa ja Euroopassa käytetään paineita jopa 8,5 bariin asti. CTI-järjestelmä käyttää paljon ilmaa, mutta kuorma-autoissa olevat kompressorit on mitoitettu vain jarrujen ja mahdollisesti ilmajousituksen mukaan. Siksi täyttöajat ovat melko pitkiä, jopa 40 minuuttia, kun painetta lisätään maantien eikuormitetusta paineesta soratien kuormitettuun paineeseen. Paineen muutokseen saisi kulua aikaa enintään viisi minuuttia.

## 6 RENGASPAINOIDEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN KUSTANNUKSET JA HYÖDYT

Teollisuuden vaatimus tuoreen raaka-aineen tasaisesta virrasta metsästä tehtäville edellyttää tieverkosta varmaa liikennöitävyyttä. Kun tiestöllä voidaan liikennöidä lähes rajoituksetta, niin

- kelirikon aikaista varastointia, ja siten varastointikustannuksia, voidaan vähentää
- korjuuresursseja, jotka on mitoitettu suuren kausivaihtelun ja varastojen teon mukaan, voidaan pienentää
- korjuu- ja kuljetussuunnittelu helpottuu
- metsä voi tarjota teollisuudelle tasaisemmat toimitukset oikeaa tavaramallia. (Andersson ja Granlund 1994.)

Ruotsissa on arvioitu 1990-luvulla puutavara-auton CTI -järjestelmän maksavan 100 000–150 000 kruunua. Jotta investointi katettaisiin, puutavara-auton vuotuista käyttöaikaa tulisi lisätä 100–150 tuntia. Silloisen käsityksen mukaan rengaspainoiden säätö vaikuttaa käyttökustannuksiin vähän, mutta todennäköisesti positiiviseen suuntaan. Scaniaan mukaan tehdasasennettuna erikoisvarusteena CTI maksaisi 60 000–70 000 kruunua. Siten investointikustannukset voivat puolittua, jos järjestelmä asennetaan auton valmistusvaiheessa eikä jälkeen päin. (Andersson ja Granlund 1994, Granlund ja Andersson 1998, Granlund ym. 1999.)

Granlund ja Andersson (1998) esittivät seuraavan laskelman. Jos metsänomistajayhdistyksen alueelta hankitaan vuosittain 700 000 m<sup>3</sup>, täytyy alueella olla vähintään 50 000 m<sup>3</sup>:n kelirikkovarasto, jotta toimitukset voidaan hoitaa. Puolet tästä määrästä täytyy kuljettaa autolla välivarastoon ei-kelirikkoisen tien varteen. Suorat kustannukset, jotta kelirikosta selvittää, ovat 15 kr/m<sup>3</sup> varastoidulle puumäärälle eli yhteensä 750 000 kruunua. Tämän lisäksi tulevat laatutappiot, jotka voivat olla huomattavasti korkeammat kuin suorat kustannukset. Jos viisi alueella käytettävästä 25 autosta varustetaan CTI:llä, riittää niiden investointikustannusten kattamiseen se, että kelirikkovaraston kokoa pienennetään 15 000 m<sup>3</sup>:llä.

Erään Keski-Ruotsissa sijaitsevan kuljetusyrityksen laskelmien mukaan heidän alueellaan noin joka kymmenennen puutavara-auton tulisi olla varustettu CTI:llä, jotta painorajoitettujen ja vaikeiden kelirikkoiteiden alaisista hakuista selvittäisiin. (Granlund ym. 1999.)

Granlund ja Andersson (1998) arvioivat 1990-luvun lopulla rengaspainoiden säätöjärjestelmän investointikustannusten olevan liian suuret, jotta tekniikkaa laajemmin sovellettaisiin. Koko kustannus kohdistuu ajoneuvoyrittäjälle. Tämä täytyisi kompensoida lisääntyneenä ajoneuvon käyttönä tai rahdinantajan tai tieviranomaisen investointitukena, esimerkiksi CTI:llä varustettujen autojen verotuksena. Jotta CTI:stä saadaan täysi hyöty, edellytetään esimerkiksi poikkeuslupia CTI-ajoneuvoille kelirikkoiteilla.

Granlundin ja Löfrothin (2006) mukaan ajoneuvon varustaminen CTI-järjestelmällä maksaisi tällä hetkellä Ruotsissa 150 000–200 000 kruunua (16 000–21 500 €). Tämä investointi, kun ei oteta huomioon järjestelmän positiivisia vaikutuksia, lisää kuljetusyrittäjän kustannuksia 1,7 % kuljetettua tonnia kohti. Kun otetaan huomioon käytön lisääntyminen kelirikon aikana, CTI-järjestelmän (10 vuotta) puutavara-autoa (5 vuotta) pidempi käyttöikä, suurentunut ajonopeus kiinnijuuttumisen poistuessa ja renkaiden pidempi käyttöikä, saadaan 0,5 %:n kustannuslennus kuljetettua tonnia kohti.

Kuljetuksen ostajalle hyödyt tulevat ennen kaikkea pienentyneistä varastointikustannuksista kelirikon aikaan. Tästä aiheutuvat kustannukset ovat Ruotsissa 900 milj. kruunua vuodessa ja CTI-ajoneuvoja käyttäen nämä voidaan suurin piirtein puolittaa. Jos teiden rakentaminen sovitetaan CTI-ajoneuvojen mukaan, voidaan kustannuksia vähentää 30–60 milj. kruunua vuodessa. Tien kunnossapito voidaan puolittaa teillä, joilla liikennöidään vain CTI-varusteisilla ajoneuvoilla. (CTI sparar 2006, Granlund ja Löfroth 2006.)

Säästöpotentiaaliksi kohteilla, joilla CTI:tä käytetään, on esitetty 18 – 53 kr/t (1,9 - 5,7 €/t). Jotta CTI:n potentiaali voidaan hyödyntää, tarvitaan viranomaisilta myötävaikutusta, jotta tietyin sopimuksin 60 tonnin kuormilla voidaan ajaa painorajoitetuilla teillä kelirikon aikaan. (Granlund ja Löfroth 2006.)

Bradleyn (2005) mukaan vuosittaisten työtuntien määrän lisääminen on varmimpia tapoja kattaa TPCS-laitteiston hankinta- ja kunnossapitokustannukset. Kuljetuskauden pidentäminen mahdollistaa yrittäjän kuljettaa suuremman määrän puuta samalla kuljetuskalustolla. Vaihtoehtoisesti kuljetuskauden pidentäminen ja siksi kaluston tuottavuuden kasvaminen mahdollistaa yrittäjän vähentää kaluston määrää ja siten pääomakustannuksia. Kaluston määrän vähentäminen helpottanee kuljettajien hankkimista, koska ammattitaitoisista kuljettajista on puute. Pidempi kuljetuskausi tasoittaa liikennettä ja luo turvallisemmat kuljetusolot, vähentää jonotusaikaa purkamisessa ja parantaa yleisesti ajo-olosuhteita (esim. vähemmän väsymystä ja selkävaivoja, parempi mäennousukyky, nopeampi jarrutus, vähemmän rengasrikoja ja vähemmän rengasrikoista johtuvaa seisonta-aikaa ja parempi liikkuvuus pehmeillä teillä ilman vetoavun tarvetta).

Erään kanadalaisen yrityksen mukaan he säästäisivät noin 0,80 CAD/m<sup>3</sup> (0,57 €/m<sup>3</sup>), jos sen kuljetusyrittäjät voisivat kuljettaa puuta ylimääräiset kuusi viikkoa keväällä painorajoitusten aikaan (Bradley 2005). Blairin (2001) testissä koetieosuudella tieystävällisten tekniikoiden, erityisesti CTI:n, käyttö pidensi kaukokuljetuskautta 22 päivää sallien kaukokuljetuksen jatkumisen ennen perinteistä rajoitusten poistumisen ajankohtaa. Säästö pidentyneestä kaukokuljetuskaudesta oli 0,60 CAD/m<sup>3</sup> (0,43 €/m<sup>3</sup>).

Metsäautoteiden kuluja voidaan vähentää USDA Forest Servicen tutkimuksen mukaan 62 % TPCS:n ansiosta (Menzies 2006).

Rengaspaineiden säätöjärjestelmän pääoma- ja käyttökustannusten selvittämiseksi Jokai ja Bradley (2000) FERICistä seurasivat kahta järjestelmää (Redline-Eltek TPCS, Eaton TPCS) yli kolmen vuoden ajan. Tutkimuksessa oli mukana 24 puutavara-autoa erilaisin yhdistelmin ja niitä käytettiin kuudella paikkakunnalla Länsi-Kanadassa Brittiläisessä Kolumbiassa ja Albertassa. Aineisto kerättiin vuosina 1995–1998 ja se sisälsi yli 180 000 käyttötuntia. Laitteistojen hinnat olivat 10 000 – 27 000 CAD riippuen valmistajasta, paineensäätöalueiden (TPCS:llä varustetut akselit, jotka on yhdistetty ja hallitaan yhtenä ryhmänä) ja -järjestelmällä varustettujen akseleiden määrästä.

Pääomakustannukset vuotuisella 1 800 käyttötunnilla olivat 2,14–3,35 CAD/h (1,53–2,39 €/h; valuuttamuunnokset 27.4.2006 kurssilla) ja 3 600 käyttötunnilla 1,37–2,70 CAD/h (0,98–1,93 €/h).

Käyttökustannukset vaihtelivat autoryhmittäin välillä 0,98–2,04 CAD/h (0,70–1,46 €/h).

Pienimmät kokonaiskustannukset 2,35–3,12 CAD/h (1,68–2,23 €/h) olivat 2-alueisella Redline-Eltekin järjestelmällä (akseleita 4 - 5). Kokonaiskustannusten edullisuus johtui siitä, että ohjausakselilla ei ollut paineensäätöä. Sen vuoksi ei tarvittu tehokkaampaa paineilmajärjestelmää ja myös käyttökustannukset alentuivat.

Eatonin 3-alueisen TPCS:n kokonaiskustannukset olivat 3,88–5,11 CAD/h (2,77–3,65 €/h) riippuen auton rakenteesta (akseleita 5,6 tai 8) ja käytöstä. Vastaavasti Redline-Eltekin TPCS:n kokonaiskustannukset olivat 3,40–4,43 CAD/h (2,43–3,16 €/h), kun akseleita oli 6–8. (Jokai ja Bradley 2000)

Jokain ja Bradleyn (2000) tutkimuksessa olleiden TPCS-autojen käyttö lisääntyi 0–90 % verrattuna autoihin, joissa ei ollut TPCS:ää. Jotkut kykenivät lisäämään auton vuosittaisen käytön yksivuorossa 2 800 tuntiin ja kahdessa vuorossa yli 3 600 tuntiin. Vuosittaisten käyttötuntien nousun myötä kiinteät kustannukset käyttötuntia kohti pienenevät.

Kuormatun auton matalapaineisten renkaiden on todettu johtavan auton runkoon vain noin puolet pystysuuntaisesta energiasta verrattuna korkeapaineisiin renkaisiin liikennekuoppatestissä (NATC 1987). Pitkällä aikavälillä iskujen ja tärinöiden vähentymisen odotetaan vähentävän tärinälle alttiiden komponenttien vikaantumista. Se on jo todettu Washingtonin osavaltiossa toimivista TPCS-varustetuista autoista (Kreyns 1993). Myös kuljettajan niska-, selkä- ja hartiarasitukset vähenevät kun rengaspaineet sovitetaan alustan mukaan, ja tärinää on vähemmän (CTI sparar 2006).

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Rengaspaineiden säätöjärjestelmiä on käytetty jo 1940-luvulta lähtien lähinnä sotilassovelluksissa. Yhdysvaltojen armeija on CTI-järjestelmien ansiosta kyennyt saavuttamaan 10 % enemmän Pohjois-Amerikan maa-alueesta. (What is 2006.)

Rengaspaineiden säätöjärjestelmien soveltuvuutta puutavara-autoihin on tutkittu 1980-luvulta alkaen ensin Yhdysvalloissa ja sitten aktiivisesti Kanadassa. Laitteistot ovat viime vuosina yleistyneet, kun niiden edut on huomattu. Kanadassa, lähinnä lännessä, on tällä hetkellä jo satoja laitteistoja käytössä metsä-, öljy- ja betoniteollisuudessa. Nyt myös Itä-Kanadassa on kiinnostuttu lännen tulosten perusteella rengaspaineen säätöjärjestelmistä ja FERICin johdolla on käynnistetty syksyllä 2005 tähän liittyvä hanke Ontariossa. Varsinaiset kokeet käynnistyivät huhtikuussa 2006 (FERICin www-sivut).

Kanadan Brittiläisen Kolumbian provinssi hyväksyi helmikuussa 2004 automaattisella renkaiden paineensäätöjärjestelmällä varustettujen autojen käytön sellaisena aikana, jolloin liikennöinti aiemmin oli rajoitettua. Autoon asennettu tiedonkeruulaite rekisteröi paineen muutokset, ja ajonopeudet on jälkepäin yhdessä ajoneuvon painojen kanssa viranomaisien tarkastettavissa. (New policy extends 2004.)

Tähän mennessä julkaistut tulokset raportointivaiheessa olevasta laajasta ruotsalaisesta CTI-tutkimuksesta osoittavat, että järjestelmä tuo etuja. On todennäköistä, että rengaspaineiden säätöjärjestelmän soveltamisen edut Suomessa eivät merkittävästi poikkea ruotsalaisista.

Kiinnostus rengaspaineiden säätöjärjestelmiä kohtaan ja niistä saadut tutkimustulokset viittaavat siihen, että säätöjärjestelmät tulevat yleistymään sekä metsä- että muilla sovellusaloilla. Sääolot vaihtelevat maassamme myös talviakaan ja Etelä-Suomessa on vain harvoin metsäkoneet hyvin kantavaa routaa. Rengaspaineiden säädöstä muualla saadut tutkimustulokset ja kokeemukset osoittavat selvästi, että sen avulla voitaisiin merkittävästi parantaa puutavara-autojen ja metsäkoneiden toimintakykyä ja lisätä niiden käyttöaikaa kelirikon ja sulan maan aikaan.

Suomessa tulisi käynnistää rengaspaineiden säätöjärjestelmän etujen selvittämiseksi ja käyttökokemusten hankkimiseksi vastaavanlainen puutavara-autoihin liittyvä hanke, mikä Ruotsissa on tämän raportin kirjoittamisaikaan päättymässä. Siinä varustettiin 12 puutavara-autoa eri puolilla maata rengaspaineiden säätöjärjestelmillä ja niitä seurattiin kolmisen vuotta.

Metsäkoneiden nykyisestä rakenteesta johtuen korjuujäljet maanpintaan ovat ongelma. Metsään jää helposti syviä uria sekä aiheutuu juuristovaurioita jääviin puihin. Tulevaisuudessa on löydettävä uutta teknologiaa muun muassa kesäaikaiseen korjuuseen, jonka osuus kasvaa nykyisestä. (Asikainen ym. 2005.)

Metsätraktoreiden kehityksessä ei pintapaineiden suhteen ole tapahtunut parina viimeisenä vuosikymmenenä muutoksia. Koneiden massat ovat suurentuneet ja renkaita on levennetty, mutta pintapaineet eivät ole muuttuneet. Leveämmät kuin 800-millimetriset renkaat eivät puolestaan sovellu hyvin harvennuksille, koska ne lisäävät koneen leveyttä. Myös metsätraktoreissa rengaspaineiden säätöjärjestelmät parantaisivat toimintaedellytyksiä. Metsätraktoreihin menetelmää ei kuitenkaan kannattane lähteä kokeilemaan ennen kuin on saatu kokemusta ja osaamista järjestelmistä puutavara-autoissa. Metsätraktoreihin valmiita CTI-järjestelmiä ei tällä hetkellä liene saatavissa (Staland ja Larsson 2002).

Uusien järjestelmien käyttöönotto tutkimusvaiheineen – vaikka järjestelmät olisivat valmiina ja muualla jo käytössä – vie helposti vuosia. Tämän vuoksi liikkeelle on syytä lähteä pikaisesti.



## 8 LÄHTEET

- Abelson, P. 2002. Land Line Magazine, The Business Magazine for Professional Truckers, March/April 2002. Tire monitoring and inflation systems – When pressure is good for you. Saatavissa: [http://www.landlinemag.com/Archives/2002/Mar2002/misc/modern\\_techniques.htm](http://www.landlinemag.com/Archives/2002/Mar2002/misc/modern_techniques.htm) [Viitattu 9.5.2006].
- Altunel, A. & de Hoop, C. 1998. The effect of lowered tire pressure on a log truck driver seat. Journal of Forest Engineering, July, 1998 Vol. 9 No. 2.
- Andersson, G. & Granlund, P. 1994. Lätta trycket med CTI. Skogforsk, Resultat 3. 4 s.
- Asikainen, A., Ala-Fossi, A., Visala, A. & Pulkkinen, P. 2005. Metsäteknologiasektorin visio ja työkartta vuoteen 2020. Metlan työraportteja 8. 91 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp008.pdf>
- Blair, C. 2001. Using road-friendly technologies to extend the haul season on thawing roads. FERIC, Advantage Vol. 2 No.48. Restricted\*. 12 s.
- Blair, C. & Bradley, A. 2005. Enhancing the mobility of B-train log trucks in Saskatchewan using TPCS. Summary of 2003 Field Demonstration. FERIC. February 8, 2005. 2 s. Saatavissa: <http://www.tirepressurecontrol.com/pdf/FERICMobilitySummary.pdf>
- Bradley, A. 1997. A literature review on the effect of variable tire pressures on roads: summary field note. Field Note No: Loading and Trucking-54. FERIC. 2 s.
- Bradley, A. 2003. Using optimized truck tire pressures to minimize damage to rural roads: summary of two trials in Saskatchewan. FERIC, Advantage Vol. 4 No. 10. 12 s.
- Bradley, A. 2005. Using road-friendly technologies to carry full legal axle weights on seasonally weight-restricted pavements in British Columbia. FERIC, Advantage Vol. 6 No. 30. Restricted\*. 26 s.
- Bulley, B. & Blair, C. 2001a. Using reduced tire pressure for improved gradeability - a proof of concept trial. FERIC, Advantage Vol. 2 No. 25. Restricted\*. 4 s.
- Bulley, B. & Blair, C. 2001b. Using reduced tire pressure for improved gradeability - a proof of concept trial. The International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium 2001. s. 162-167. Saatavissa: <http://depts.washington.edu/sky2001/proceedings/papers/Bulley.pdf> [Viitattu 9.5.2006].
- Bygdén, L., Eliasson, L. & Wästerlund, I. 2004. Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. Journal of Terramechanics 40(3): 179-190
- CM Automotive Systems, Inc. Verkkosivut. Saatavissa: <http://www.cmautomotive.com/mainindex.htm>. [Viitattu 9.5.2006].

- CTI på virkesfordon - presentation av ett forskningsprojekt. 2004. Skogforsk. 2 s.
- CTI sparar pengar och skonar vägnätet. Pressmeddelande från Skogforsk 2006-02-10. 1 s.
- Eliasson, L. 2005. Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. Metsäntutkimuslaitos. Silva Fennica 39(4): 549-557.
- FERICin (Forest Engineering Research Institute of Canada) verkkosivut. Saatavissa: <http://www.feric.ca> → Program Activities → Spring Haul Season Extension. [Viitattu 9.5.2006].
- Fraser, G. 2002. Using constant reduced tire pressures on heavy trucks: a case study. FERIC, Advantage No. 39. Restricted\*. 7 s.
- Granlund, P. 2004. Lugnage körning och mindre vibrationer med CTI på virkesfordon. Skogforsk, Resultat nr 22. 4 s.
- Granlund, P. 2006. Tryck och energi i transportererna. Skogforsk. Esitys. 9 kalvoa.
- Granlund, P. & Andersson, G. 1998. CTI på virkesfordon ger bättre framkomlighet och större dragkraft. Skogforsk, Resultat nr 2. 4 s.
- Granlund, P., Eliasson, T. & Ersson, B. 1999. Bra affär med CTI på virkesbilen. Skogforsk, Resultat nr 4. 4 s.
- Granlund, P. & Löfroth, C. 2006. Tryck- och energi i transportererna. Skogforsk. Utvecklingskonferens. 5 s.
- Jokai, R. & Bradley, A. 2000. Ownership and operating cost analysis of log trucks equipped with CTI systems or TPCS. FERIC, Advantage Vol. 1 No. 30 Restricted\*. 16 s.
- Kelirikkokohteet maksavat itsensä takaisin reilussa vuodessa. 2006. Verkkojulkaisu. Saatavissa: [www.metsateho.fi/Tuotteet/Lastuja/Kelirikko](http://www.metsateho.fi/Tuotteet/Lastuja/Kelirikko) [Viitattu 9.5.2006].
- Kelirikkokorjauksilla on saatavissa merkittävät säästöt. 2006. Verkkojulkaisu. Saatavissa: [www.tiehallinto.fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/30.1.2006](http://www.tiehallinto.fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/30.1.2006) [Viitattu 9.5.2006].
- Kreyns, K. 1993. Benefits and effects of central tire inflation on USDA forest service vehicles. Pages 31 - 35 in Central tire inflation systems: Managing the vehicle to surface (SP-1061). Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa. SAE Technical Paper Series 933032.
- Löfgren, B. 1991. Lägre lufttryck ger mindre spårdjup. Skogsarbeten, Resultat nr 23. 4 s.
- Löfgren, B., Landström, M. & Nordén, B. 1996. CTI för terrängtransporter i skogsbruket. Skogforsk, Resultat nr 25. 4 s.
- Markskador - en fråga om attityder. 2005. Skogforsk Nytt nr 4. s. 6
- Menzies, J. 2006. Are you in control? Canadian Forest Industries, January/February 2006. s.18-19

- Obringer, LA. How self-inflating tires work. <http://auto.howstuffworks.com/self-inflating-tire3.htm> [Viitattu 9.5.2006].
- Pennanen, O. & Mäkelä, O. 2003. Raakapuukuljetusten kelirikkohaittojen vähentäminen. Metsätehon raportti 153. 19.8.2003. 42 s. + liitt. 11 s.
- Mäkelä, O. & Pennanen, O. 2005. Raakapuukuljetukset ja tiestön kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 56/2005. 50 s. + liitt. 31 s.
- Nevada Automotive Test Center (NATC) 1987. Final report: Central tire inflation. Prepared for USDA Forest Service, San Dimas Equipment Development Center. Carson City, Nev. Contract no. 53-9JA9-6-SD647.
- New policy extends hauling season, protects roads. 2004. British Columbia. Ministry of Transportation, Ministry of Public Safety and Solicitor General. News Release, Feb. 8, 2004. 2 s. Saatavissa: [http://www2.news.gov.bc.ca/nrm\\_news\\_releases/2004TRAN0003-000104.htm](http://www2.news.gov.bc.ca/nrm_news_releases/2004TRAN0003-000104.htm) [Viitattu 9.5.2006]
- Staland, F. & Larsson, K. 2002. Bra planering och rätt teknik minskar risken för markskador. Skogforsk, Resultat nr 4. 4 s.
- Sturos, J., Brumm, D. & Lehto, A. 1995. Performance of a logging truck with a central tire inflation system. U.S. Department of Agriculture. Forest Service, North Central Forest Experiment Station. Research Paper NC-322. 10 s.
- Syegonin verkkosivut. Saatavissa: <http://www.syegon.com/index2.htm> [Viitattu 9.5.2006].
- Tireboss™ Däcktrycksystem. Kalvosarja, saatu P.Granlundilta Skogforskista 28.2.2006
- TPC International. (Tire Pressure Control International Ltd.). Verkkosivut. Saatavissa: <http://www.tirepressurecontrol.com/index.htm> [Viitattu 6.3.2006].
- What is Central Tyre/Tire Inflation? Background on the Development of the CTI - Central Tyre/Tire Inflation System. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://www.ctibigfoot.co.nz/whatiscti.html>. [Viitattu 24.4.2006].

*Restricted\* = Julkaisu rajoitettu vain FERIC:in jäsenille. Raportin kirjoittajalla henkilökohtainen lupa FERIC:in länsidivisioonan johtajalta käyttää rajoitettua materiaalia lähteenä.*