

ERIKOISKULJETUKSET

**KULJETUSKALUSTO JA TEOREETTISIA LASKELMIA
SEN TIERAKENTEELLE AIHEUTTAMISTA
RASITUKSISTA**

**TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS
KÄYTTÖOSASTO, LIIKENNETOIMISTO
INSINÖÖRITOIMISTO MH-KONSULTIT OY
VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS**

08

TIE -



86:823/2

ERIKOISKULJETUKSET
KULJETUSKALUSTO JA TEOREETTISIA LASKELMIA
SEN TIERAKENTEELLE AIHEUTTAMISTA
RASITUKSISTA

TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS
KÄYTTÖOSASTO, LIIKENNETOIMISTO

INSINÖÖRITOIMISTO MH-KONSULTIT OY
VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS

TVH 741835

HELSINKI 1986

ISBN 951-46-7323-9

ESIPUHE

Kesällä 1984 tie- ja vesirakennushallituksen johdolla toimiva erikoiskuljetusyhteistyöryhmä käynnisti erikoiskuljetuskalustoja koskevan selvitystyön. Työryhmään ovat kuuluneet kuljetustaodelinen asiamies Maire Kaartama Teollisuuden Keskusliitosta, osastopäällikkö Tapani Karonen Suomen Maanrakentajien Keskusliitosta, liikenneinsinööri Heikki Lehtonen Suomen Kaupunkiliitosta, osastopäällikkö Markku Maukonen Suomen Kuorma-autoliitosta, apulaisjohtaja Paavo S. Vepsä Keskuskauppakamarista sekä yli-insinööri Kirill Härkänen, toimistoinsinööri Mikko Ojajärvi ja diplomi-insinööri Jouko Kangas tie- ja vesirakennushallituksesta. Tarkoituksena oli tutkia, millaisilla kuormitustapauksilla siltojen yli voitaisiin kuljettaa mahdollisimman suuret hyötykuormat ja toisaalta miten tällaiset kalustot saataisiin mahdollisimman vähän varsinaista tierakennetta rasittaviksi.

Selvitystyötä ryhtyi ohjaamaan tie- ja vesirakennushallitus. Selvitysten suorittajiksi valittiin ajoneuvotekniikan osalta Insinööritoimisto MH-konsultit Oy ja teoreettisten laskelmien osalta Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Selvityksen alkuvaiheessa havaittiin, että sillat jäävät tarkastelun ulkopuolelle tutkimusten hankaluuden vuoksi. Tämän johdosta tarkastelut kohdistuivat alkuperäisten tavoitteiden mukaisina pelkästään tierakenteisiin.

Tie- ja vesirakennushallituksen edustajina selvitystä ovat ohjanneet toimistoinsinööri Mikko Ojajärvi liikennetoimistosta ja tarkastaja Reijo Orama maatutkimustoimistosta. Insinööritoimisto MH-konsulttien osuuden on laatinut dipl.ins. Ismo Mäkinen. Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen osalta tarkastelun ovat suorittaneet dipl.ins. Matti Huhtala ja dipl.ins. Markku Pienimäki.

Helsingissä, 1.9.1986

Erikoiskuljetusyhteistyöryhmän puheenjohtaja
Yli-insinööri

K. Härkänen

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE

TIIVISTELMÄ

SAMMANDRAG

SUMMARY

TERMILUETTELO

- 1 JOHDANTO
- 2 YLIRASKAAT ERIKOISKULJETUKSET
 - 2.1 Liikennöinti
 - 2.2 Tarkistuspunnitukset
3. KULJETUSKALUSTO
 - 3.1 Nykyinen kalusto
 - 3.2 Kalustoteknisiä kehitysnäkymiä
- 4 TIESTÖN RASITTUMINEN
 - 4.1 Tiehen kohdistuvien rasiusten arviointimenetelmiä
 - 4.2 Yliraskaiden erikoiskuljetusten merkitys
 - 4.3 Teoreettinen rasiustarkastelu
 - 4.31 Tiehen kohdistuvat rasiukset
 - 4.32 Laskelmien taustatiedot
 - 4.33 Laskelmien tulokset
 - 4.331 Standardiakseli
 - 4.332 Vetoauto
 - 4.333 Vetoauto ja välivaunu
 - 4.334 Lavetti I (8 rengasta)
 - 4.335 Lavetti II (16 rengasta)
 - 4.336 Nosturi I
 - 4.337 Nosturi II
- 5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET
- 6 YHTEENVETO
- 7 KIRJALLISUUSLUETTELO

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Yliraskaat erikoiskuljetukset-tutkimus sisältää katsauksen erikoiskuljetuskaluston määrälliseen ja rakenteelliseen kehitykseen sekä tarkastelun kaluston tiehen aiheuttamista rasituksista. Tarkastelua on pidettävä aiheen esitutkimuksena.

Erikoiskuljetuskaluston rakenteen yleisiä kehitysnäkymiä on selvitetty haastattelemalla erikoiskuljetuskaluston valmistajia, myyjiä ja käyttäjiä. Merkittävä osa kaluston kehittymistä koskevista tiedoista on saatu työn aikana suoritetun ATK-perusteisen kirjallisuushaun avulla.

Tutkimuksen toisen osan muodostavissa teoreettisissa rasituslaskelmissa on selvitetty kuuden erilaisen erikoiskuljetusyksikön ns. vastaavuuskertoimet siten, että BISAR-monikerrostietokoneohjelmalla on laskettu pyöräpainojen aiheuttamat rasitukset ja niistä ratkaistu muodonmuutosten perusteella akseleiden vertailuarvot ja ajoneuvojen vastaavuuskertoimet. Lisäksi tutkimuksessa on tarkasteltu lyhyesti muutamia menetelmiä erilaisten pyöräpainojen tiehen kohdistamien vaikutusten selvittämiseksi ja vertailtu niitä keskenään. Vertailu osoittaa, että menetelmien tulokset saattavat raskaiden kuormien tapauksissa poiketa huomattavastikin toisistaan.

Käytetty tarkastelumenetelmä osoittaa havainnollisesti erilaisten kalustojen erilaiset vaikutukset tierakenteelle. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi valitsemalla tierakenteelle parhaiten soveltuva kalusto. Lisäksi tulosten perusteella esitetään muutamia parannusehdotuksia erikoiskalustojen rakenteille.

SAMMANDRAG

I denna utredning om övertunga specialtransporter granskas utvecklingen av specialtransportfordonens kvantitet och konstruktion samt de påkänningar som fordonen förorsakar vägarna. Utredningen bör närmast betraktas som en förundersökning.

Den allmänna utvecklingen i fråga om specialtransportfordonens konstruktion har utretts genom att intervjua tillverkare, försäljare och användare av specialtransportfordon. En betydande del av uppgifterna om fordonens utveckling har erhållits genom ADB-baserad litteratursökning.

I de teoretiska påkänningskalkylerna i utredningens andra del har ekvivalentfaktorerna för sex olika specialtransportenheter beräknats. Man har med hjälp av BISAR-flerskiktsdataprogrammet beräknat de påkänningar som hjultrycken förorsakar och därefter på basen av deformationerna räknat ut referensvärden för axlarna och ekvivalentfaktorer för fordonen. Vidare har man i korthet granskat några metoder för beräkning av olika hjultrycks inverkan på vägen samt jämfört dessa metoder sinsemellan. Jämförelsen visar att metoderna ger mycket varierande resultat beträffande tunga laster.

Den använda granskningsmetoden visar åskådligt hur olika fordon påverkar vägkonstruktionen på olika sätt. Denna egenskap kan utnyttjas vid val av fordon. På basen av resultaten presenteras dessutom några förslag till förbättring av specialtransportfordonens konstruktion.

SUMMARY

The purpose of this study was to examine the quantitative and technical development of overweight transport equipment and the response that the equipment causes on the pavement. The study should be considered a pilot study.

The general development with regard to the structure of overweight transport equipment was examined by interviewing manufacturers, sellers and users of overweight transport equipment. A large part of the data on the development of the equipment was obtained by means of a computer based literature search.

In the latter part of the study the equivalent factors for six different overweight transport units were determined by theoretical calculations. The response caused by the weight of wheels was calculated with the BISAR computer program. BISAR is a general purpose program for elastic multilayered system calculations. Load equivalence factors for the axles were calculated on the basis of horizontal strains at the bottom of the bituminous layers and on the basis of vertical stresses on the subgrade. The load equivalence factors were then converted into vehicle equivalence factors. The study also presents a few methods for investigating the effect of different wheel loads on the pavement as well as a comparison of these methods. The comparison indicates that the results may differ widely when these methods are used with overweight vehicles.

The method used gives a clear picture of how different kinds of equipment affect the road structure in different ways. This characteristic may be utilized by choosing the most suitable equipment for the road structure concerned. A few examples for improving the structure of overweight transport equipment are also given.

TERMILUETTELO

Tätä tutkimusta varten katsottiin tarpeelliseksi määritellä seuraavat käsitteet:

Ajoneuvolla tarkoitetaan tässä tavaran kuljetuksessa tai muussa tiellä liikkumisessa käytettävää moottori-käyttöistä laitetta (esim. kuorma-auto, täysperävaunullinen kuorma-auto).

Ajoneuvoyksikkö on ajoneuvon itsenäisesti toimiva osa (esim. vetoauto, välivaunu, perävaunu).

Vetoauto on ajoneuvoyhdistelmän (yksinkertaisimmillaan auto+perävaunu) vetoyksikkö, joka on yleensä raskas kolmiakselinen kuorma-auto.

Välivaunu on kuormituksen jakamiseksi vetoauton ja perävaunun väliin sijoitettava apuvaunu (kts. kuva 13).

Perävaunu on itsenäinen ajoneuvoyksikkö, joka ei kuitenkaan pysty liikkumaan ilman erillistä vetoyksikköä, esimerkiksi vetoautoa. Jos perävaunu kantaa kokonaan oman painonsa ja siinä olevan kuorman painon kyseessä on varsinainen perävaunu. Jos vetoyksikkö kantaa osan perävaunun ja sen kuorman painosta kyseessä on puoliperävaunu.

Erikoiskuljetusperävaunu on nimenomaan tiettyyn erikoiskuljetukseen rakennettu perävaunu. Tyypillinen esimerkki on ylliraskaisiin kuljetuksiin rakennettu raskaskuljetusperävaunu, josta tässä selvityksessä on käytetty nimitystä lavetti.

Ylliraskas erikoiskuljetus on ajoneuvo, joka ylittää yhden tai useamman ajoneuvoasetuksessa määritellyn painon.

Pyörästöllä tarkoitetaan ajoneuvon tai ajoneuvoyksikön kaikkia pyöriä (pyörän sijainti usein merkityksellinen).

Akselisto käsittää ajoneuvon tai ajoneuvoyksikön kaikki akselit.

Paripyörä on kahden toisiinsa kiinnitetyn pyörän muodostama yksikkö, joka toimii periaatteessa yksittäispyörän tapaan. Esimerkkinä kuorma-auton taka-akselin paripyörä.

Yksittäisakseli on ajoneuvon alustassa selvästi muusta akselistosta erillään oleva akseli esimerkiksi kuorma-auton etuakseli.

Yksittäispyörä on muista pyöristä selvästi erillään oleva erillinen pyörä esimerkiksi kuorma-auton etupyörä. Nimitystä käytetään erottamaan yksittäinen pyörä selvästi paripyörästä.

Ajoneuvon kokonaispaino on ajoneuvon oman painon ja kuorman summa.

Akselipaino on se paino, joka ajoneuvon kokonaispainosta akselin välityksellä kohdistuu tiehen.

Telipaino on telirakenteisen ajoneuvon telin akselipainojen summa.

Pyöräpaino (L) on se osa akselipainosta, joka pyörän välityksellä kohdistuu tiehen.

Rengaspaine (p) on paine, joka vallitsee renkaan sisällä.

Kosketuspinnan säde (a) on renkaan ja tien ympyränmuotoiseksi ajatellun yhteisen pinnan säde.

Redusoitu pyöräpaino on se yhdelle pyörälle tuleva kuorma, joka tiehen kohdistuvilta vaikutuksiltaan vastaa rengasryhmää, jolla on yhteisvaikutusta tarkasteltavassa pisteessä.

Teliväli on teliakseliston akseleiden välinen etäisyys.

Pyöräväli on samalla akselilla olevien pyörien välinen etäisyys (myös paripyörillä) renkaan keskeltä renkaan keskelle mitattuna.

Akseliväli on peräkkäisten akseleiden tai akselin ja telin keskipisteen välinen etäisyys.

Raideväli on samalla akselilla olevien äärimmäisten pyörien välinen etäisyys. Mitataan yksittäisrenkailla renkaan keskeltä renkaan keskelle ja paripyörillä pyöräparien keskeltä pyöräparien keskelle.

Kuormituskertaluku (N) ilmaisee montako standardiakselia (Suomessa 100 kN) määrättyssä ajassa ylittää tien poikkileikkauksen (sallittu kuormituskertaluku N_{sall} on tien mitoitusajan kuormituskertaluku).

Ajokerta syntyy ajoneuvon tai ajoneuvoyksikön ylittäessä tien poikkileikkauksen.

Akselin vertailuarvo (LEF, load equivalence factor) ilmaisee montaako standardiakselia tarkasteltava akseli vastaa.

Vastaavuuskerroin (VEF, vehicle equivalence factor) ilmaisee montaako standardiakselia ajoneuvo tai ajoneuvoyksikkö vastaa.

1. JOHDANTO

Tieliikenteessä normaalisti käytettävien ajoneuvojen suurimmista sallituista painoista ja mitoista on säädetty ajoneuvoasetuksen (233/83) 33-36 §:issä. Määräykset koskevat suurinta osaa käytössä olevasta ajoneuvokalustosta, ja tärkeimmät poikkeuksena olevat ajoneuvoryhmät ovat eräät tienpidon ja maatalouden moottorityökoneet ja hinattavat laitteet sekä erityiset sotilastarkoituksiin rakennetut, valtiolle kuuluvat ajoneuvot ja laitteet. Lisäksi kuljetusten kokoa on rajoitettu asetuksen 59 §:n 3 momentissa. Kun edellä mainittuja suurimpia sallittuja painoja ja mittoja on muutettu, on aina selvitetty, mitä vaikutuksia muutoksilla on tiestöön ja erityisesti siltoihin ja miten nämä vaikutukset tulisi ottaa huomioon. Yliraskaissa erikoiskuljetuksissa käytettävästä kalustosta ei sen sijaan ole tehty juuri lainkaan selvityksiä, joissa olisi tarkasteltu kaluston kehittymisen vaikutuksia tie- ja siltarakenteisiin, vaan kehitystä ovat ohjanneet kaluston, lähinnä erikoiskuljetuserävaunujen ja ajoneuvonostureiden valmistajien kulloisetkin arviot optimikalustosta.

Tämän selvityksen tavoitteena oli tarkastella yliraskaissa erikoiskuljetuksissa käytettävää kuljetuskalustoa tierakenteisiin kohdistuvien rasitusten kannalta ja toisaalta laatia kirjallisuusselvitys yliraskaissa kuljetuksissa käytettävän erikoiskuljetuskaluston kehitysnäkymistä. Alunperin suunnitelmisissa ollut siltojen kantavuustarkasteluja koskeva osuus jouduttiin jättämään pois jo ennen työn varsinaista käynnistämistä, koska jo alkuvaiheessa kävi selväksi, että tämä olisi johtanut liian suureen työmäärään ilman, että kuitenkaan olisi saatu riittävän yleistäviä tuloksia.

2. YLIRASKAAT ERIKOISKULJETUKSET

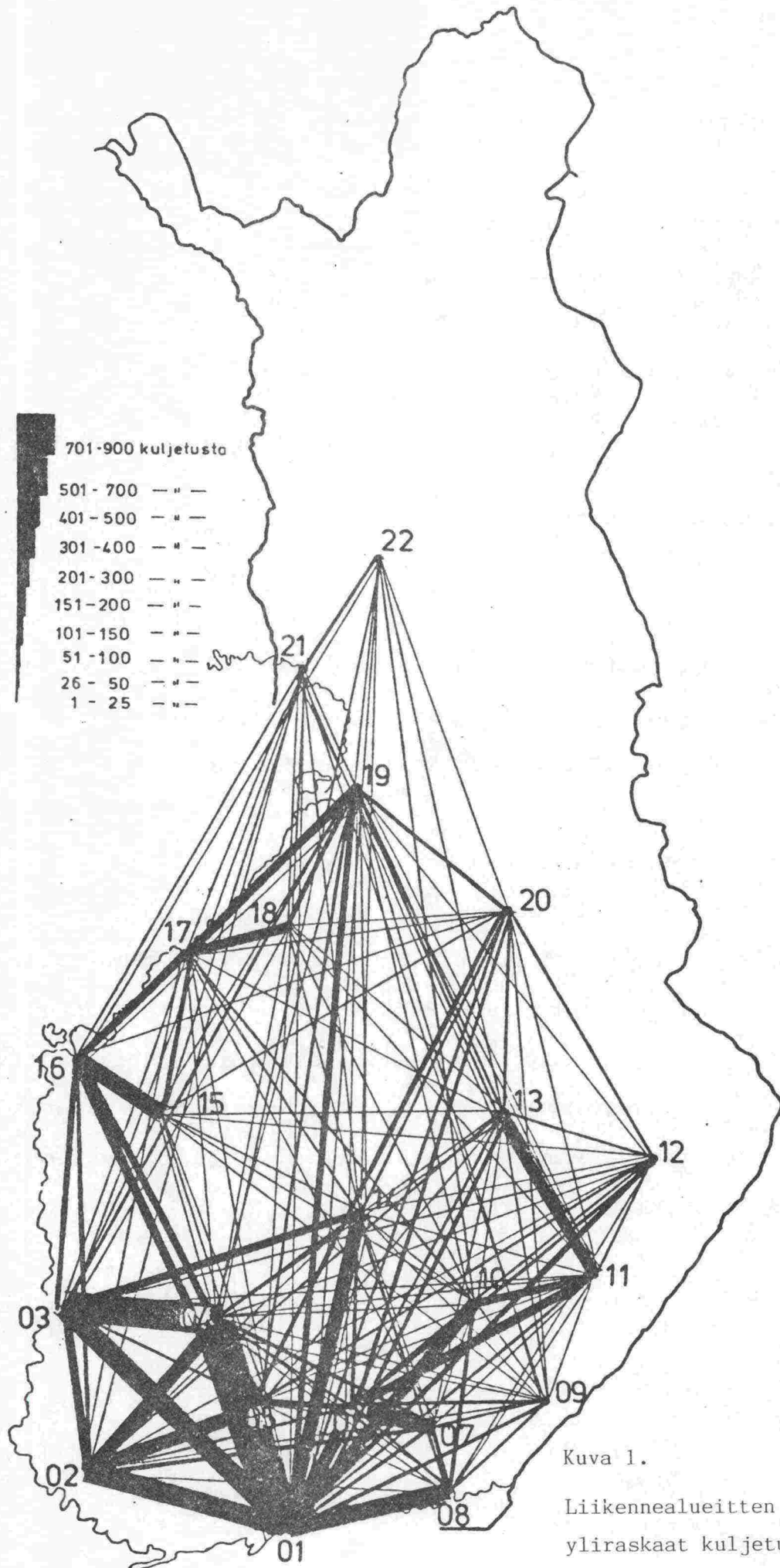
2.1 Liikennöinti

Tuoreimmat yliraskaita erikoiskuljetuksia koskevat tutkimustulokset ovat vuoden 1980 tilanteesta /32/. Kyseisenä vuonna myönnettiin yliraskaille erikoiskuljetuksille lupia yhteensä 2800 kpl, joista vajaa puolet TVH:ssa. TVH:n luvat oli yleensä myönnetty yhdelle tai useammalle määrätylle reitille. TVL:n piirikonttoreiden myöntämistä luvista 39 % oli yleislupia, jotka koskivat yleensä ao. piirin päätieverkkoa.

Yliraskaitten erikoiskuljetusten huomattavimmat päätepiestealueet olivat vuonna 1980 Uudenmaan, Tampereen ja Turun liikennealueet, joista yli 100 t kuljetuksissa Porin alue oli merkittävin. Eri liikennealueitten välisiä kuljetusvirtoja on havainnollistettu kuvassa 1.

Saman tutkimuksen mukaan yliraskaille erikoiskuljetuksille myönnettyjen lupien lukumäärät ovat ajan mittaan jatkuvasti lisääntyneet. Ajoneuvonostureitten osuus yliraskaissa kuljetuksissa on niin ikään jatkuvasti kasvanut. Vuonna 1980 ajoneuvonostureitten osuus oli 79 %. Muita merkittävimpiä tavaralajeja olivat maansiirtokoneet (9 %), koneenosat (7 %), murskausasemat (1,7 %), betonielementit (1,1 %) ja metallirakenteet (0,7 %).

Kaikkiaan vuoden 1980 luvilla suoritettujen kuljetusten kokonaismääräksi arvioitiin 56300 kpl.



Kuva 1.

Liikennealueitten väliset
ylijaskaat kuljetukset v.1980 /32/.

2.2 Tarkistuspunnitukset

TVH on vuodesta 1976 lähtien suorittanut noin kerran kuukaudessa ylliraskaiden kuljetusten tarkistuspunnituksia valitun punnituskohdeet ylliraskaille kuljetuksille myönnettyjen kuljetuslupien joukosta. Syyskuuhun -84 mennessä punnituksia oli tehty kaikkiaan 85 kpl. Kuormitustapaukset jakautuivat kohdassa 3.1 esitettyihin ja niistä johdettuihin luokkiin taulukon 1 mukaisesti.

Yhteenvedot punnitustuloksista

Kokonaispainojen osalta punnituksissa todetut painot olivat 74 % mitatuista tapauksista korkeintaan kuljetusluvan mukaiset. Lopuissa 26 % mittauksista kokonaispaino ylitettiin, vajaassa 5 % tapauksista jopa 20 % tai enemmän.

Kokonaispainotulosten jakautuma kaikkien punnituskertojen osalta on esitetty liitteessä 1 ja viiden yleisimmän kuormitustapauksen osalta erikseen liitteissä 1...3. Kokonaispainojen ylityksiä esiintyi suhteellisesti vähiten ajoneuvotyyppillä V(4), eivätkä ylitykset toisellakaan välivaunulla varustetulla ajoneuvotyyppillä V(3) ole olleet kovin suuria. Suhteellisesti suurimmat kokonaispainojen ylitykset ovat esiintyneet pienimmillä tyypeillä P(3) ja P(4).

Akselipainojen ylityksiä esiintyi punnitustilanteissa yli 90 % tapauksista. Huomattavia, 20 % tai enemmän, ylityksiä esiintyi 40 % mittauskerroista. Suurimmat yksittäisten akselipainojen ylitykset ovat olleet jopa yli 65 %.

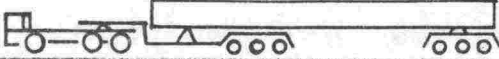
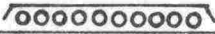
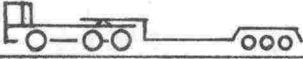
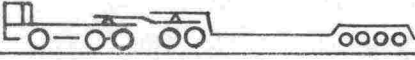
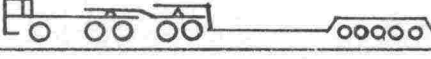
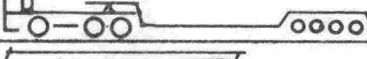
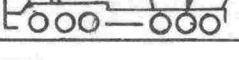
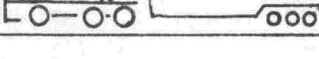
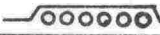
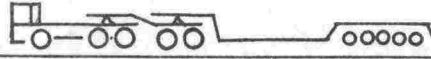



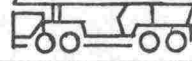
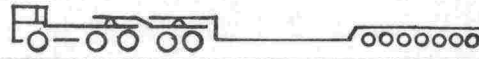
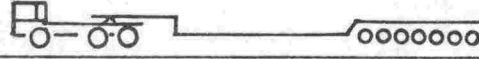

Akselipainomittausten tulosten jakaumat on esitetty liitteissä 4...6. Liitteissä oleviin kuormitustapausten periaatekaavioihin on myös merkitty akselit, joilla painon ylityksiä on useimmin esiintynyt. Koska nimenomaan akselipainojen mittaus on erittäin herkkä punnitusolosuhteille, on akselipainoylitykset merkitty vain sellaisissa tapauksissa, joissa vaakalaitteet on voitu upottaa maanpinnan tasoon. Akselipainojen ylityksiä aiheuttavat virheet oikeiden painopisteiden määrittämisessä, väärin arvioitu kuljetettavan kappaleen paino, tai mahdollinen välinpitämättömyys kuorman sijoittamisessa määritellyllä tavalla.

Punnitustulosten perusteella voidaan esittää seuraavia johdopäätöksiä:

- Kokonaispainojen ylityksen aiheuttaa tutkitun aineiston perusteella joko väärin arvioitu tai ilmoitettu kuljetettavan kappaleen paino.

- Akselipainojen ylityksille voidaan löytää useampia syitä:
 - väärin arvioitu kuljetettavan kappaleen paino
 - vaikeudet kuljetettavan kappaleen painopisteen määrittelyssä
 - tekniset vaikeudet kuorman sijoittamisessa ja tukemisessa painonjakautuman kannalta oikein
 - kaluston rakenteesta johtuva epätasainen akselipainojen jakautuminen - koskee etenkin puoliperävaunutyyppisiä vanhempia kuljetuslavetteja
- Vaikka osassa punnitustapauksista esiintyy punnitusmenetelmästä johtuvia suurehkojakin virheitä (vaakoja ei ole pystytty upottamaan), osoittavat tulokset, että luvanmukaisten painojen ylitykset ovat etenkin akselipainojen osalta yleisiä ja monessa tapauksessa varsin suuriakin.
- Koulutustoiminnan yhteydessä on todettu, että valmiudet laskea kuormitustapauksia kalustotyyppin valitsemiseksi ja kuorman oikean sijoituksen määrittämiseksi ovat käytännössä melko huonot. Tämä yhdessä kuorman sijoittamisessa ilmenevien käytännön vaikeuksien kanssa näkyy tarkistus-punnituksissa suurena akselipainojen ylitysten määränä.

Taulukko 1. Tarkistuspunnituksissa esiintyneet kuormitustapaukset.

| Kuormitustap. | kpl | Periaatekuva |
|---------------|-----|--|
| M | 19 |  |
| Y(10) | 5 |  |
| P(4) | 11 |  |
| V(3) | 20 |  |
| V(5) | 2 |  |
| P(5) | 3 |  |
| A(5) | 3 |  |
| P(3) | 6 |  |
| Y(6) | 1 |  |
| V(4) | 5 |  |
| Y(8) | 2 |  |
| P(6) | 3 |  |
| A(4) | 4 |  |
| A(3) | 1 |  |
| V(6) | 1 |  |
| P(7) | 1 |  |
| Y(12) | 1 |  |
| Yhteensä | 85 | |

3. KULJETUSKALUSTO

3.1 Nykyinen kalusto

Tyypit

Tieliikenteeseen hyväksytty ylliraskas ajoneuvokalusto, joka ylittää jonkin ajoneuvoasetuksen 33 pykälässä säädetyistä painoista, sisältää yksittäisiä ajoneuvoja hyvin monista ajoneuvoluokista. Tässä selvityksessä tarkastelu on rajattu yleisimpiin ja ylliraskaiden kuljetusten kannalta merkittävimpiin kalustotyyppeihin. Käyttötapansa perusteella nämä ovat tavallisesti joko ajoneuvonostureita tai raskaiden koneiden tms. kuormien kuljetuksiin tarkoitettuja ajoneuvoja. Kuormitustavan perusteella ajoneuvot voidaan luokitella useisiin kymmeneen ajoneuvotyyppeihin akselien lukumäärän ja sijainnin perusteella. Taulukossa 1 kuvatut ajoneuvotyypit perustuvat TVH:ssa käytössä oleviin kuormakaavioihin, joita käytetään mm. tehtäessä siltojen kantavuuslaskelmia ylliraskaille erikoiskuljetuksille.

Ajoneuvorekisteriin merkitty kalusto

Ylliraskaisiin kuljetuksiin käytettävän kaluston määrät selvitettiin ajoneuvorekisteristä tehtävällä tietokoneajolla. Kalustomääriä ei tällä tavalla tosin voitu saada eri kuormitustyyppeihin jaettuna. Lisäksi on otettava huomioon, että suurin osa kuljetuskalustosta kootaan yhdistämällä useampia ajoneuvorekisteriin merkittyjä kalustoyksiköitä.

Kalustomäärät selvitettiin 30.6.1984 tilanteesta seuraavia poimintakriteerejä käyttäen:

1. Ajoneuvon kokonaispaino yli 48 t
2. Akselipaino yli 10 t tai telipaino yli 16 t.

Poiminnan avulla saadut kalustotiedot on tulostettu ajoneuvolajeittain käyttäen samaa ryhmittelyä kuin vuoden 1981 tilanteesta tehdyssä vastaavassa tarkastelussa /-/. Tästä huolimatta kaikkien tietojen suora vertaileminen ei kuitenkaan ole mahdollista. Hankaluuksia aiheuttaa erikoisesti erikoisluvalla sallittujen 20 t ns. eurooppa-telien (teliväli 2055 mm) suuri määrä, joka tuo mukaan myös tavanomaisissa kuljetustehtävissä käytettäviä ajoneuvoja, lähinnä puoliperävaunuja.

Taulukko 2. Yliraskaiden ajoneuvojen määrät.

| Ajoneuvolaji | 1981 | | 1984 | | muutos | |
|-----------------|-------|-----|-------|-----|--------|-----|
| | kpl | % | kpl | % | kpl | % |
| Kuorma-autot | 135 | 10 | 230 | 8 | 95 | 70 |
| Erikoisautot | 424 | 31 | 539 | 19 | 115 | 27 |
| Moottorityökon. | 55 | 4 | 49 | 2 | -6 | -11 |
| Vars.perävaunut | 155 | 11 | 126 | 4 | -29 | -19 |
| Puoliperävaunut | 582 | 43 | 1.944 | 67 | 1.362 | 234 |
| Traktorit | 9 | 1 | 18 | 1 | 9 | 100 |
| Yhteensä | 1.360 | 100 | 2.145 | 100 | 1.546 | 114 |

Yleisimpiä ylliraskaita ajoneuvoja ovat edelleen puoliperävaunut ja erikoisautot (ajoneuvonosturit). Lukumääräisesti merkittävin muutos on tapahtunut puoliperävaunujen määrässä. Tähän lukumäärään sisältyy kuitenkin arviolta 1.000...1.300 kpl em. eurooppa-telillä varustettuja pääasiassa ulkomaanliikenteessä käytettävää perävaunuja, joita ei voida pitää varsinaisina raskaskuljetusajoneuvoina.

Ajoneuvot kokonaispainoluokittain

Yli 35 t kokonaispainoisten ajoneuvojen lukumäärä kasvanut 169 kpl:sta 301 kpl:seen. Yli 100 t kokonaispainoisia ajoneuvoyksiköitä ei 1981 ollut rekisteröitynä yhtään kappaletta. Vuonna 1984 näitä oli jo 14 kpl. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö jo vuonna 1981 olisi ollut olemassa yksittäisistä ajoneuvoista yhdistettyjä ajoneuvoyhdistelmiä, joiden kuljetuskapasiteetti on jopa 400 t. Erikoisautoilla yleisimmät painoluokat ovat alle 20 t ja 31-35 t, mutta siirtymää raskaampiin painoluokkiin on selvästi nähtävissä. Ajoneuvot kokonaispainoluokittain on esitetty liitteessä 7.

Ajoneuvot telipainoluokittain

Telipainojen perusteella suoritettavia tarkasteluja vaikeuttavat alle 20 t telien joukossa esiintyvät 2.055 mm akselivälillä varustetut ns. eurooppa-telit, koska näiden lukumäärä on lisääntynyt erikoislupien perusteella myös jo vuonna 1981 käytössä olleessa kalustossa. Myös 21-22, 26-30 ja

yli 40 t painoluokkien telien lukumäärä on selvästi noussut johtuen osaksi kolmiakselisten telien yleistymisestä. Ajoneuvot telipainoittain on esitetty liitteessä 8.

Ajoneuvot akselipainoluokittain

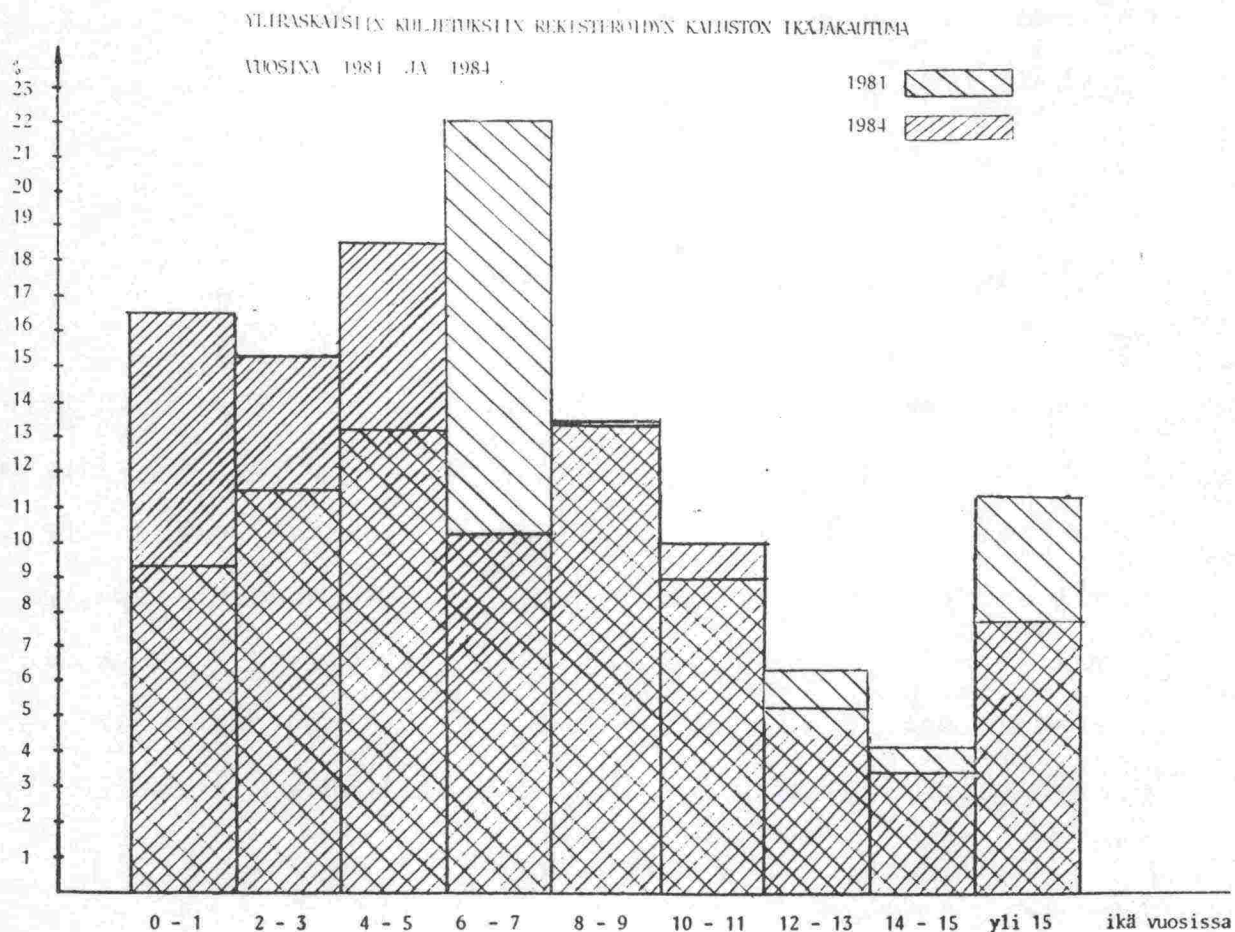
Ajoneuvojen lukumäärät akselipainoluokittain on esitetty liitteessä 9. Tilanne on vuoteen -81 verrattuna säilynyt samana eli raskaimman yli 20 t akselipainoluokan kaluston osuus on suurin. Niin ikään erikoisautot (ajoneuvonosturit) muodostavat edelleen tässä luokassa suurimman yksittäisen ryhmän (80 %).

Ajoneuvot oman painon mukaan ryhmiteltynä

Suurimmat muutokset tämän kriteerin perusteella ovat tapahtuneet erikoisautojen kohdalla, joissa on selvää siirtymää raskaampiin ajoneuvoihin. Muiden ajoneuvoluokkien osalta tällaista huomattavaa muutosta ei ole tapahtunut lukuunottamatta puoliperävaunujen määrän lisääntymistä, joka suureksi osaksi johtuu em. eurooppa-teleistä. Ajoneuvojen lukumäärät oman painon mukaan ryhmiteltynä on esitetty liitteessä 10.

Ajoneuvot ikäluokittain

Ajoneuvojen lukumäärät käyttöönottovuoden mukaan jaoteltuina on esitetty liitteessä 11. Kuljetuskaluston ikäjakaumaa vuosina -81 ja -84 on vertailtu myös kuvassa 2. Selvimmin havaittava muutos on 6-7 vuotta aikaisemmin käyttöönotettujen ajoneuvojen määrän pienempi osuus vuonna -84. Kokonaisuudessaan kalusto on selvästi uusiutunut, sillä 5 vuotta ja sitä myöhemmin käyttöönotettujen ajoneuvojen osuus on nous-
sut vuoden -81 34 %:sta vuonna -84 50 %:tiin.



Kuva 2. Kaluston ikäjakauma vuosina -81 ja -84.

3.2 Kalustoteknisiä kehitysnäkymiä

Yleistä

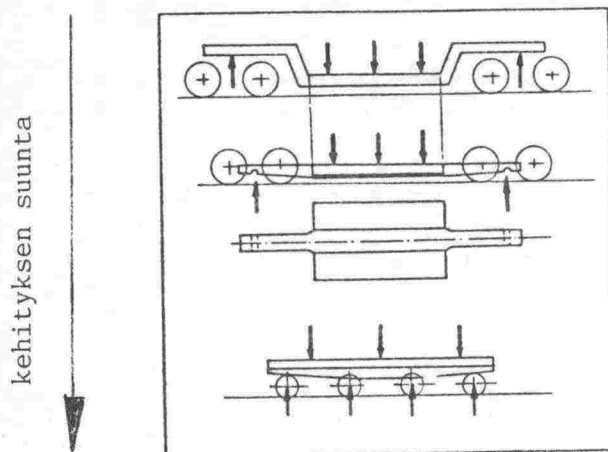
Erikoistunut raskaskuljetustyö on kehittynyt maassamme nykyiseen muotoonsa suunnilleen kahden viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana. Tätä aikaisemmin muodosti raskaan kuljetustarpeen lähes yksistään maanrakennuskoneiden kuljettaminen.

Suurten, raskaiden kappaleiden kuljetustarve on syntynyt ja kasvanut osittain sitä mukaa kun maahan on alettu saada raskaiden kappaleiden käsittelyyn soveltuvia nostureita. Ajoneuvonostureiden siirrot sinänsä muodostavat yleisimmän ylliraskaan kuljetustarpeen. Kasvanut nostokapasiteetti on kasvattanut myös kuljetettavien kappaleiden kokoa.

Ylliraskaisiin erikoiskuljetuksiin käytettävä kuljetuskalusto, ajoneuvonosturit mukaan lukien, on kehittynyt ja muoutunut vähitellen normaalissa tieliikenteessä käytettävästä ajoneuvokalustosta. Tämä kehitys on osittain nähtävissä erikoiskalustossa käytettävien normaalikomponenttien suuresta määrästä.

Raskaskuljetusperävaunut

Raskaiden kuormien kuljettamiseen tarkoitettujen kuljetuslavettien osalta on osittain tapahtunut rakennemuutos, jota kuva 3 havainnollistaa /10/. Rakennemuutos koskee lähinnä kaikkein raskaimpia kuljetustehtäviä.



Kuva 3. Raskaskuljetusperävaunujen rakenteen kehitys

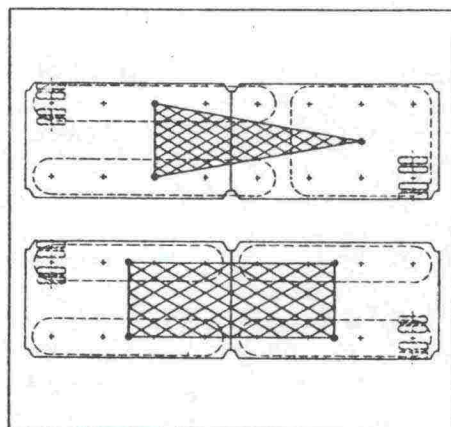
Yhä enemmän on siirrytty tasovaunu-tyyppisiin ratkaisuihin, joissa vaunun runkorakennetta on yksinkertaistettu ja kevennetty sijoittamalla pyörät myös kuormaa kantavan osan alle. Tämä ratkaisu edellyttää pyöräkoon pienentämistä ja useissa tapauksissa myös akseli- ja pyörälukumäärien lisäämistä. Sama kehitys voidaan nähdä sekä varsinaisten että puoliperävaunujen osalla.

Tyypillisenä kehityspiirteenä kuljetuslaveteissa voidaan niin ikään nähdä lisääntyvä hydrauliiikan käyttö nimenomaan akselistorakenteissa. Akselistoihin liittyvää hydrauliiikkaa hyödynnetään tällä hetkellä ainakin seuraavissa käyttötarkeituksissa:

- jousitus + pyöränkuormien taseaus
- kuorman stabilointi epätasaisella alustalla

- ohjaus
- kuormaus ja purkaminen
- ajovoimansiirto

Pyöränkuormien tasaamiseksi pyörästöt kytketään hydropneumaattisessa jousituksessa toisiinsa yleensä kolmena tai neljänä erillisenä piirinä, joiden keskinäistä tasapainoa säätelemällä kuorma stabiloidaan kuvan 4 havainnollistamalla tavalla kolmi- tai nelipistetuentana [14].

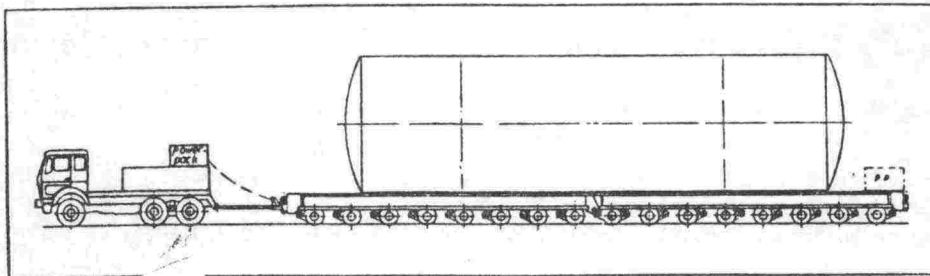


Kuva 4. Pyörästöjen kytkentäperiaate 3- ja 4-pistetuentennassa [14].

Hydraulisesti käännettävät ja elektroniikan avulla ohjattavat pyörästöt parantavat huomattavasti ylliraskaan kuljetuskaluston käsiteltävyyttä. Huippuunsa tämä tekniikka on kehittynyt itsekulkevissa tasovaunuissa, joita yhteen kytkettynäkin voidaan keskitetysti ohjata. Yksittäisiä pyörästöjä voidaan tällä tekniikalla ohjata ohjausvivuston vipusuhteista riippumatta ja niinpä yhteenkytketytkin ajoneuvot saadaan vaikka pyörimään paikallaan ympäri.

Kuljetuslavettien kuormaamisessa ja purkamisessa voidaan käyttää hyväksi hydropneumaattisen jousituksen pystysuoraa noin 50 cm:n liikettä. Lisäksi puoliperävaunuihin on kehitetty irroitettava keulaosa (joutsenkaula), joka hydraulii- liikan avulla voidaan kytkeä kuormattuun perävaunuun.

Myös erillisellä vetoyksiköllä varustetuissa ajoneuvoyhdistelmissä on määräysten mukaan vetoyksiköiden vetäville pyörille tulevan yhteispainon oltava vähintään 20 % yhdistelmän kokonaispainosta. Käytännössä tämä johtaa painokuorman käyttöön vetoautossa ja pakottaa erittäin raskaissa kuljetuksissa käyttämään useampaa vetoyksikköä. Rakentamalla osa kuormaa kantavan yksikön pyöristä vetäviksi voidaan painokuorman tarvetta vähentää. Kuvassa 5 on esitetty tämäntyyppinen ratkaisu, jossa vetoautoon tai varsinaiseen kuljetusyksikköön sijoitettu hydraulikoneikko käyttää kuljetusalustaan sijoitettuja hydraulimoottoreita. Tyhjänä ajettaessa voidaan lisävoimayksikkö kytkeä pois käytöstä ja liikkua pelkästään vetoauton avulla normaaleja tienopeuksia käyttäen, ellei ajoneuvon leveys rajoita ajonopeutta /14/.



Kuva 5. Lisävoimayksiköllä varustettu raskaskuljetusyhdistelmä /14/.

Yhteenveto kuljetuslavettien kehitysnäkymistä:

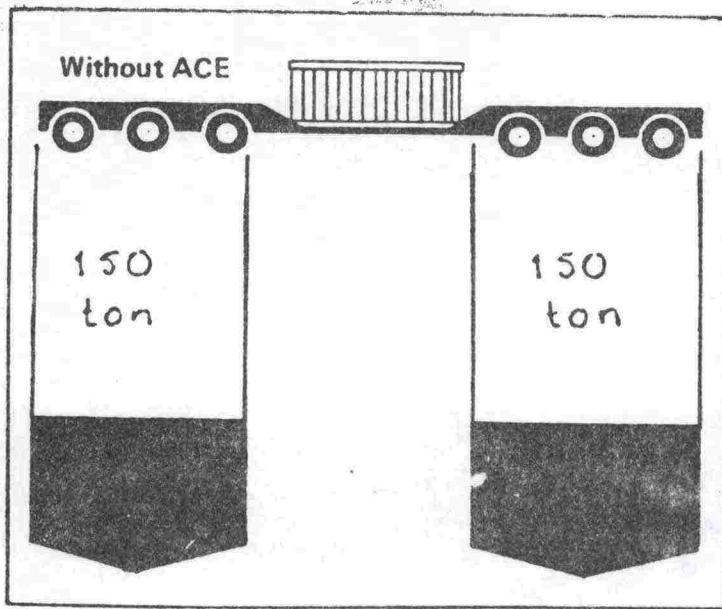
- Hydrauliiikan käyttö lisääntyy edelleen niin jousituksessa, ohjauksessa kuin voimansiirroksakin.

- Kalusto rakentuu yhä useammin komponenteista, joita yhdistelemällä saadaan eri tarkoituksiin soveltuvia kuljetusyksiköitä, jotka voivat olla joko varsinaisiaperävaunuja tai puoliperävaunuja.

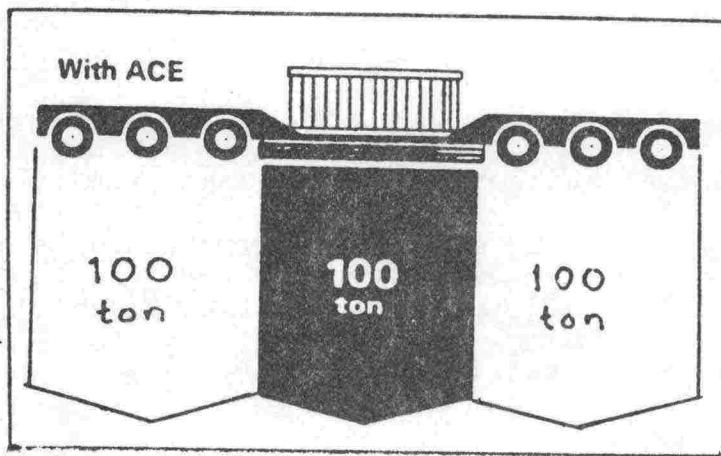
- Yleiskuljetuksiin tarkoitettujen tasovaunujen ohella tulee säilymään erityisesti muuntajakuljetuksiin tarkoitettu kuljetuskalusto, jonka komponentteina tosin voidaan käyttää myös tasovaunuja.

- Mahdollisimman tasaisen painonjakauman saamiseksi saat-
taa käyttöön tulla myös ilmatyynytekniikka, jota on
yliraskaissakin kuljetuksissa kokeiltu alla kuvassa 6
esitetyllä periaatteella /1/ ja /7/.

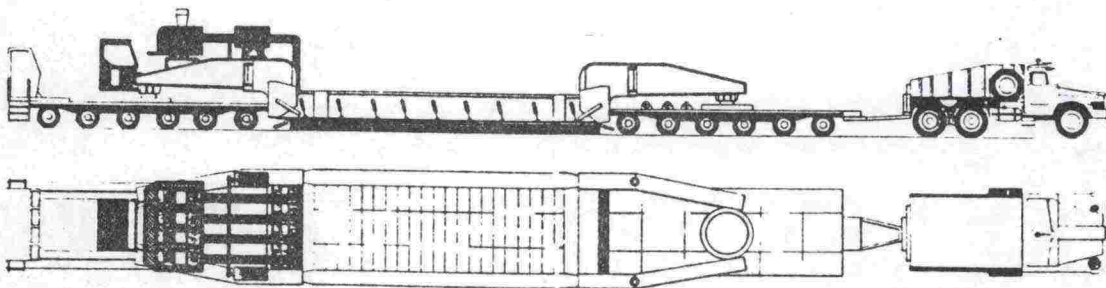
Kuva 6. Ilmatyynyn käyttö raskaskuljetusajoneuvossa.



Kuormitustilanne normaaliajoneuvossa

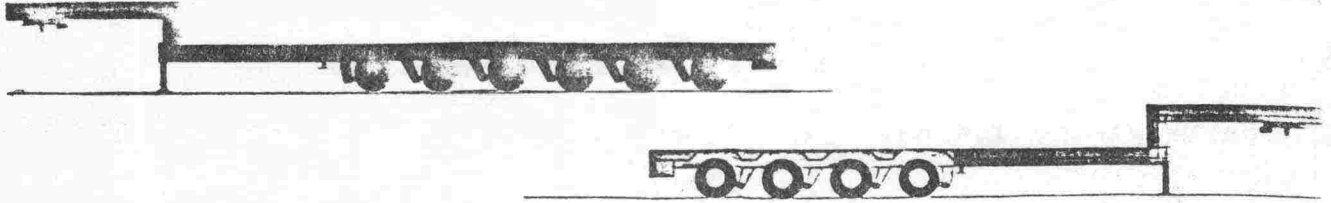


Ilmatyyny painonjakajana

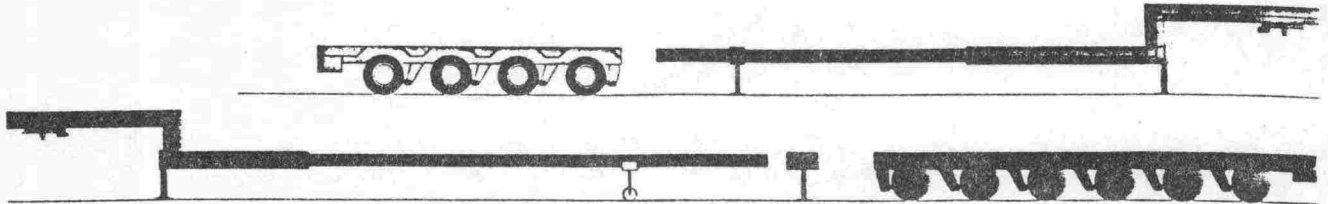


Käytännön sovellutus raskaskuljetusajoneuvossa.

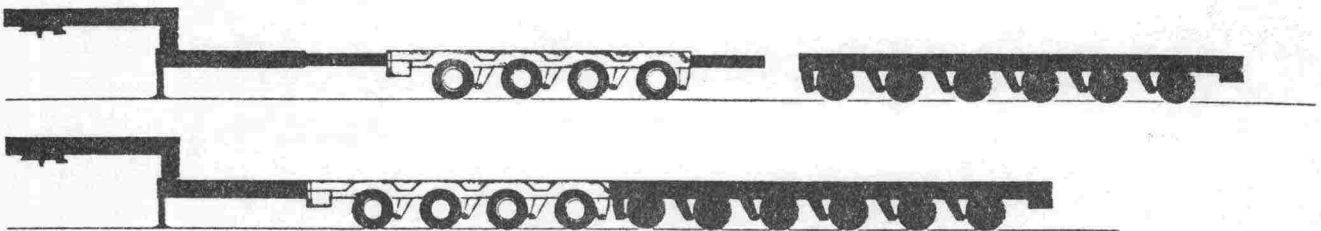
Kuva 7. Raskaskuljetusperävaunun muuntelu komponentteja vaihtamalla *III*.



Perusyksiköt valmiina yhdistelyyn.

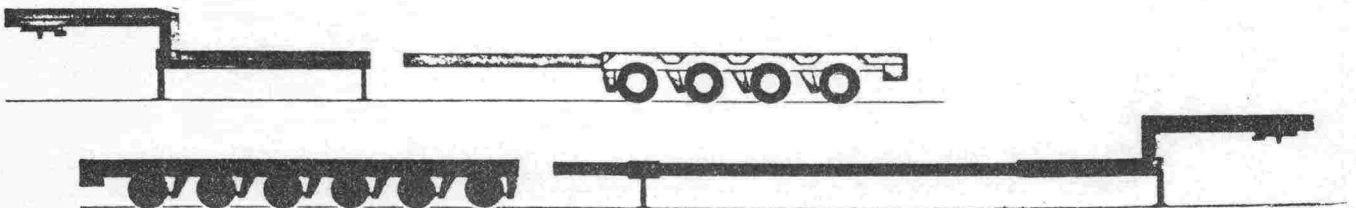


Joutsenkaulat ja pyörästöosat toisistaan irroitettuna.

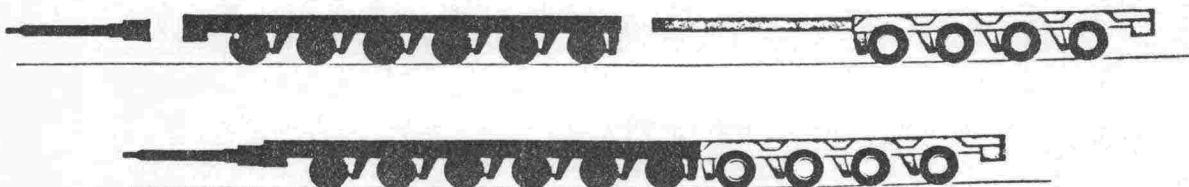


Molemmat pyörästöosat on työnnetty vastakkaisissa ajosuunnissa suuremman perusyksikön sisäputkeen.

PUOLIPERÄVAUNUYKSIKÖIDEN YHDISTÄMINEN TASOVAUNUKSI



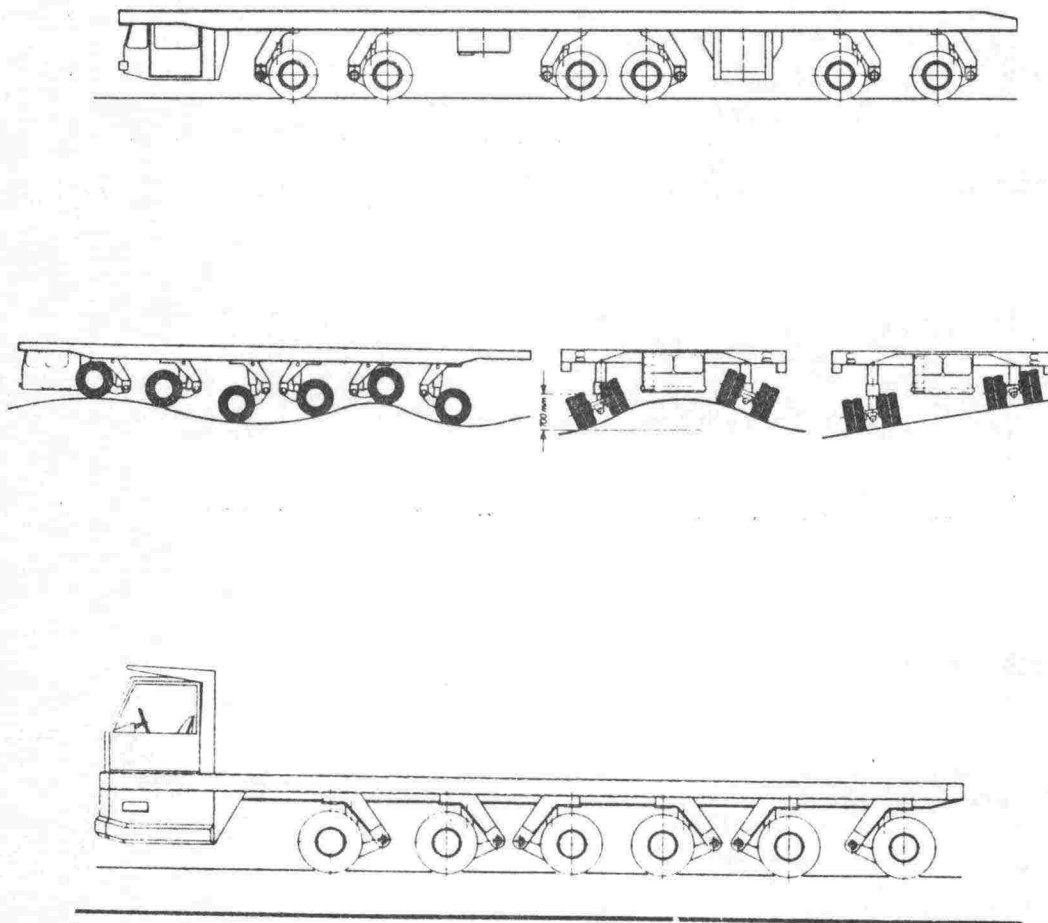
Joutsenkaulat ja pyörästöosat toisistaan irroitettuna.



Pyörästöosat yhdistettynä toisiinsa uivalla liitosputkella ja varustettuna vetoaisalla ja ohjausvivustolla.

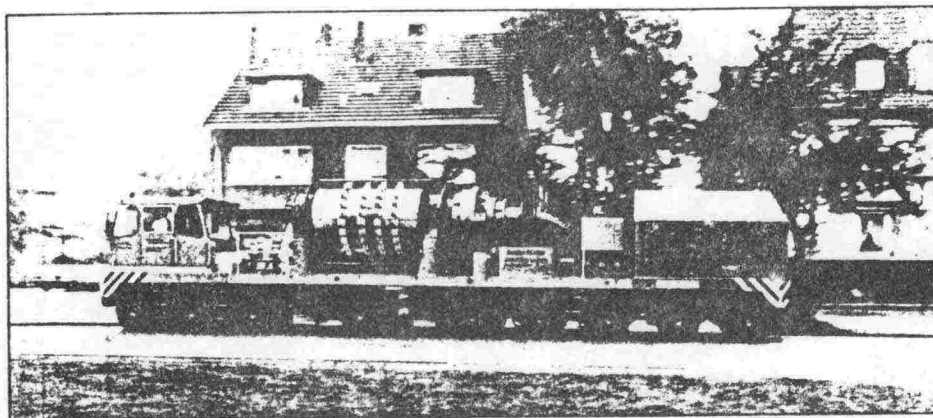
Itsekulkevat raskaskuljetusajoneuvot

Lähinnä suljetuilla alueilla tapahtuviin erikoiskuljetuksiin on kehitetty itsenäisesti, oman voimansiirtojärjestelmänsä avulla liikkuvia ajoneuvoja (kuva 8). Kytkemällä yhteen useampia tällaisia ajoneuvoja saadaan esimerkiksi suurten laivalohkojen tai avaruusaluusten kuljetuksiin soveltuvia kuljetusyksiköitä. Suurimmillaan tällaisten ajoneuvojen kuljetuskapasiteetti on jopa 4.000 t.



Kuva 8. Itsekulkevien raskaskuljetusajoneuvojen rakenne-esimerkkejä /38/ ja /15/.

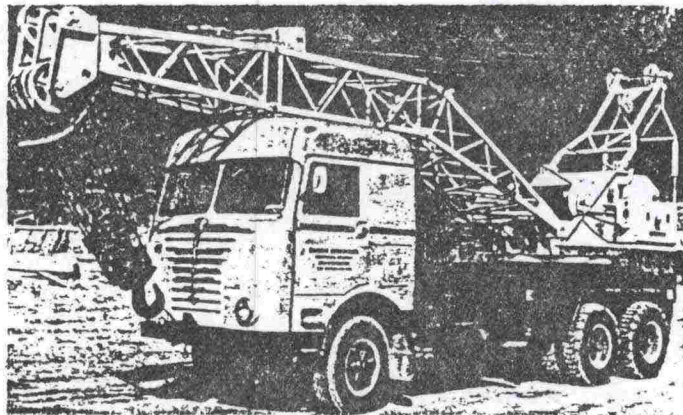
Itsekulkevat erikoisajoneuvot eivät toistaiseksi ole yleistyneet pitkämatkaisissa tiekuljetuksissa, sillä niiden rakenteellinen nopeus on ollut liian pieni tyhjänä tapahtuviin siirtoihin. Syksyllä -84 /3/ esitteli kuitenkin eräs saksalainen erikoiskuljetuskaluston valmistaja itsekulkevan raskaskuljetusajoneuvon, joka rakenteensa ja yli 60 km/h nopeutensa perusteella soveltuu myös moottoritieliikenteeseen (kuva 9).



Kuva 9. Normaaliin tieliikenteeseen soveltuva itsekulkeva raskaskuljetusajoneuvo /3/.

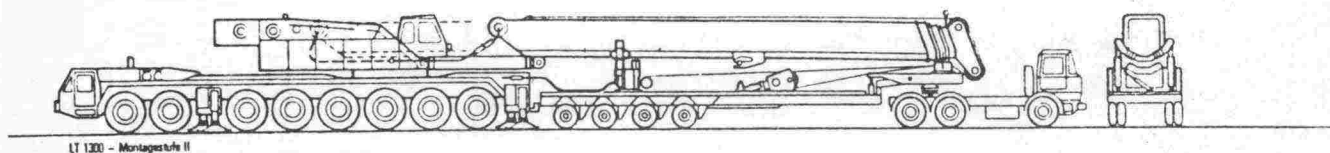
Ajoneuvonosturit

Ajoneuvonosturien kehityksen lähtökohtana voidaan pitää normaaleja kuorma-autoja, jotka on varustettu kiinteästi asennetulla nosturilla (kuva 10). Nostokykyvaatimusten kasvaessa näistä on vähitellen kehittynyt erikoisrakenteisia ajoneuvonostureita. Etenkin kevyissä ajoneuvonostureissa on käytetty, ja käytetään yhä edelleen paljon suoraan kuorma-autoista saatavia komponentteja kuten akselistoja ja ohjaamoja. Toisinaan myös ajoneuvonostureihin kehitettyjä rakenteita, esimerkiksi akselistoja, on sovitettu kuorma-autoihin.

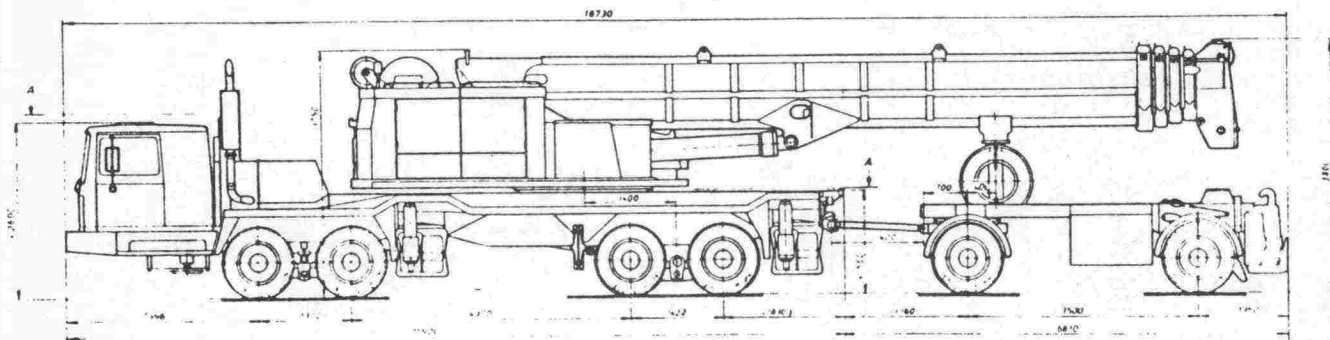


Kuva 10. Kuorma-auton alustalle rakennettu auto-nosturi /10/.

Ajoneuvonosturien koon jatkuva kasvu on pakottanut paitsi akselien lukumäärän lisäämiseen myös niiden rakenteiden kehittämiseen. Erikoisvaatimuksena ajoneuvonostureilla on tarve päästä rajoitetusti liikkumaan myös nostettavan taakan kanssa. Lisäksi muutamien nostureiden koko on jo saavuttanut rajan, jolloin niiden kuljettaminen kokonaisuutena ei enää ole mahdollista. Ratkaisuna voi olla nostopuomin kuljettaminen erikseen tai sen tukeminen kuljetusvaiheessa erilliseen perävaunuun, kuten toisessa tarkasteltavista nosturityypeistä on tehty (kuvat 11 ja 12).



Kuva 11. Ajoneuvonosturi, jonka nostopuomi kuljetetaan erikseen /17/.

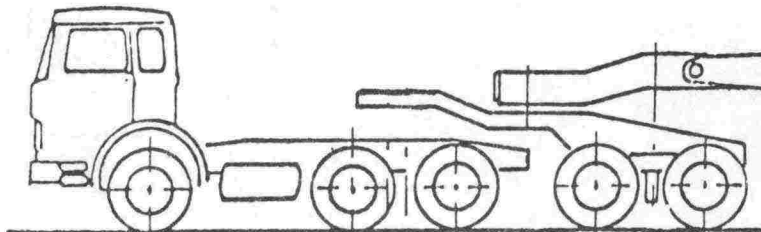


Kuva 12. Ajoneuvonosturi, jonka nostopuomi on kuljetusvaiheessa tuettu apuperävaunuun /18/.

Vetoautot

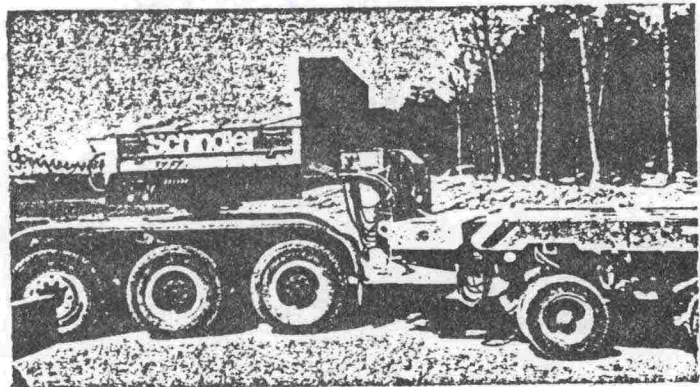
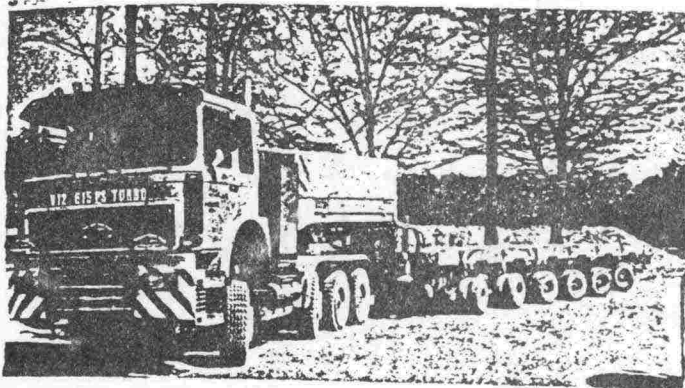
Yliraskaiden erikoiskuljetusten vetokalusto muodostuu pääasiassa raskaista kolmiakselisista kuorma-autoista, jotka ovat vetotavaltaan yleisimmin tyyppiä 6x4 tai 6x6 (Merkintävavassa ensimmäinen luku ilmoittaa pyöräyksiköiden kokonaisluvun ja toinen luku moniko niistä vetää). Autot ovat perusrakenteeltaan normaaleja sarjatuotantomalleja, mutta varustevaihtoehtojensa puolesta raskaisiin kuljetuksiin tarkoitettuja. Muun muassa Saksan Liittotasavallassa on lisäksi yrityksiä, jotka ovat erikoistuneet vakiokuorma-autojen varustelemiseen raskaskuljetuksiin ja jotka valmistavat myös omia erikoismallejaan joidenkin kuorma-autovalmistajien komponentteja käyttäen. Vetotavaltaan erikoisautot ovat yleensä 6X6 tyyppisiä, akselipainot 14 t + 2x18 t ja moottoritehot yli 450 kW. Kokonaispainot ovat noin 50 t (omapaino 20 t) , joten yhdellä vetoautolla voidaan kuljettaa jopa 250 t yhdistelmiä.

Etenkin puoliperävaunuja vedettäessä ongelmana on vetoauton telipainon ylittyminen. Tavanomaista autokalustoa käytettäessä tämä ongelma on ratkaistu käyttämällä teliakselistolla varustettua välivaunua (kuva 13).



Kuva 13. Välivaunu vetoautoon kytkettynä.

Edullisemmän akselipainojakautuman saamiseksi uusimmat erikoisautot ovat 4-akselisia, 3-akselisella telillä varustettuja ja vetotavaltaan tyyppiä 8x6 (etuakseli ja kaksi takimaista akselia vetävät) /30/. Vastaavia akselistorakenteita on 8x2 tyyppisinä tehty myös Suomessa mm. maa-aineskuljetuksiin tarkoitettuihin autoihin. Tämä akselistorakenne soveltuu erityisesti sellaisiin kuljetustehtäviin, joissa kuorman painopiste käytännön syistä tulee auton takaosaan.



Kuva 14. Kolmiakselinen teli erikoiskuljetusautossa /30/.

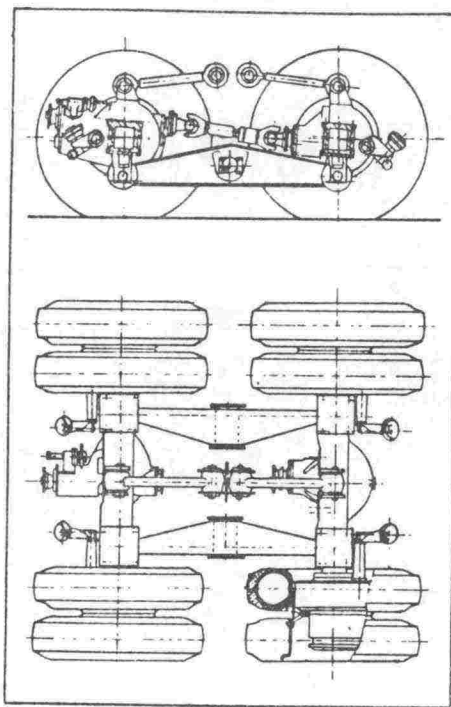
Akselistorakenteet

Yliraskaissa erikoiskuljetuksissa käytettävien kuorma-autojen akselistorakenteet ovat pääasiassa normaaleja, jäykillä akseleilla varustettuja lehtijousitettuja akselistoja. Yksittäiselle etuakselilla suurimmat valmistajien sallimat painot ovat automerkistä ja akselistotyypistä riippuen 7,0 ... 8,5 t rajoitetuilla (alle 30 km/h) nopeuksilla liikuttaessa. Taka-akselistona käytetään yleisimmin vetävää kaksiakselista teliakselistoa (6x4), jonka painosuhte on 50/50 . Etenkin kevyemmissä kuljetustehtävissä käytetään jonkin verran myös nostotelirakennetta, joissa painosuhte on noin 53/47. Vetävän telin painosuhte on auto merkistä riippumatta vakio. Nostotelirakenteissa, jotka ovat tyypillisiä pohjoismaissa painosuhteet vaihtelevat valmistajasta riippuen jonkin verran. Akseleiden välinen painon jako tapahtuu teliakseliston mekaanisten vipuvarsien avulla. Yliraskaissa erikoiskuljetuksissa sallitut telipainot vaihtelevat 16 t:sta yli 41 t:iin, yleisimmän painoluokan ollessa 26 ... 30 t (liite 8).

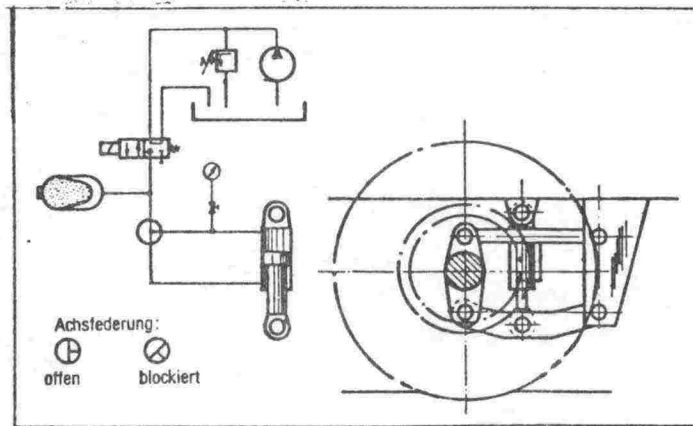
Ilmajousitus on melko yleinen mm. jakelukuljetuksissa, mutta ei raskaissa tehtävissä. Osittain tämä johtuu siitä, että ilmajousituksen hyvällä jousitusmukavuudella ei näissä tehtävissä ole käyttöä. Toisaalta myös ilmajousituksen mitoituksessa suurille akselipainoille tulee käytännön vaikeuksia lähinnä suuren tilantarpeen vuoksi. Hydropneumaattinen jousitus on tullut ajoneuvonostureihin, mutta sitä ei ainakaan toistaiseksi ole sovellettu kuorma-autoihin.

Kuorma-autojen akselistojen osalta uusinta kehitysvaihetta edustaa kuvassa 14 esitetty kolmiakselinen teli.

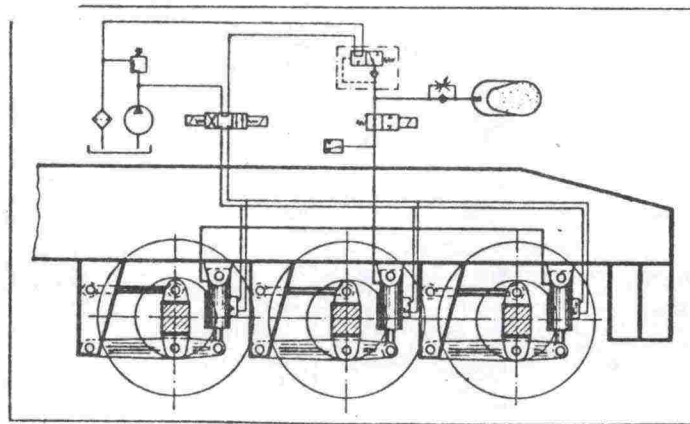
Ajoneuvonostureissa on taka-akselistoina käytetty jäykällä tasausvivuilla varustettuja jousittamattomia telejä (kuva 15). Jousittamattoman ajoneuvon rakenteellinen nopeus saa Suomessa olla ajoneuvoasetuksen 18 pykälän ensimmäisen momentin mukaan enintään 50 km/h. Koska Keski-Euroopassa on voimassa vastaavia määräyksiä, ja moottoriteillä lisäksi 60 km/h miniminopeus, rajoittaisi jousituksen puuttuminen liikaa nostureiden liikuttamista ja siksi valmistajien on ollut pakko kehittää myös jousitettuja akselistorakenteita. Riittävän nostovakavuuden ja mahdollisuuden liikkua myös taakan kanssa, mahdollistavat joustoliikkeen lukitsevat ratkaisut.



Kuva 15. Ajoneuvonosturin jousittamaton telirakenne /10/.

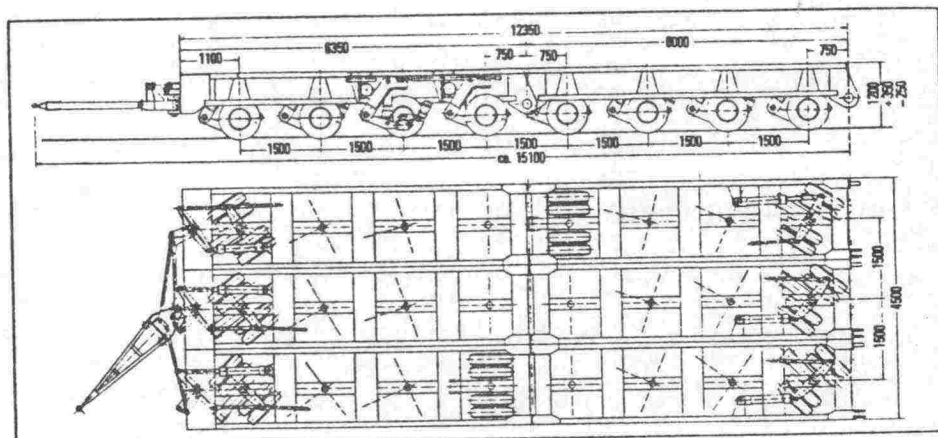


Kuva 16. Nykyaikainen, jousitusliikkeen lukitsevalla festblock-järjestelmällä varustettu akselisto ^{110/}.



Kuva 17. Yksittäisiä aksel ita voidaan rakennussarja-periaatteella liittää toisiinsa ja muodostaa näin useampiakselisia akselistoja ^{110/}.

Perävaunujen ja itsekulkevien raskaskuljetusajoneuvojen akselistot ovat nykyisin myös yhä useammin hydropneumaattisella jousituksella varustettuja. Ajoneuvonostureissa käytetään hydropneumaattistenkin jousitusjärjestelmien yhteydessä yleensä jäykkää akselia. Perävaunuissa ja erikoisajoneuvoissa akselisto muodostuu kuitenkin usein useista itsenäisesti ohjattavista pyörästöistä, koska tämä rakenne mahdollistaa tasaisemman painojakautuman ja paremman ohjattavuuden (kuva 18).



Kuva 18. Akselistot koostuvat useista itsenäisesti ohjattavista pyörästöistä ^{114/}.

Renkaat

Paripyöräasennus on raskaissa, maanteillä liikkuvissa ajoneuvoissa yleisin takarenkaiden asennustapa. Paripyörrien käyttöön on joudutaan siirtymään siinä vaiheessa, kun akselipaino ylittää normaalien yksittäisrenkaiden kantavuuden. Paripyörrien vaihtoehdoksi on kehitetty normaalia leveämpi ns. super-single rengas. Näiden renkaiden parhaat ominaisuudet (mm. alhainen vierinvastus) tulevat esiin nopeassa maantieajossa, josta johtuen niiden tyypillisiä käyttöalueita ovat tavaralinjaliikenne ja säiliöautokuljetukset.

Renkaiden rakenteessa on myös raskaassa kalustossa siirrytty ristikudosrenkaista vyörenkaisiin. Tämä rakennemuutos yhdessä muiden ominaisuuksien kehittymisen kanssa on aiheuttanut renkaiden suositeltujen käyttöpaineiden alenemisen. Käytännössä valmistajien suosituksia ei kuitenkaan tahdota noudattaa, johtuen käyttäjien mieliin iskostuneessa 800 kPa:n ("8 kilon") arvosta, johon edelleen uskotaan. Käyttöpaineiden aleneminen ei kuitenkaan ylliraskaissa kuljetuksissa ole ollut niin selvää kuin muissa kuljetustehtävissä, sillä renkaan kantavuus riippuu ilmatilavuuden ohella sen käyttöpaineesta. Tästä johtuen joudutaan edelleen käyttämään 800 kPa ja sitä isompiakin ilmanpaineita. Suositeltava käyttöpaine riippuu tietysti myös renkaan rakenteesta, joka jonkinverran vaihtelee eri valmistajilla. Kaiken kaikkiaan voidaan kuitenkin sanoa, että renkaiden ilmanpaineisiin ei vielääkään kiinnitetä riittävää huomiota, vaikka nimenomaan liian suurten rengaspaineiden käyttäminen on sekä ajotalouden että tierasitusten suhteen vahingollista.

4 TIESTÖN RASITTUMINEN

4.1 Käytettyjä arviointimenetelmiä

Erilaisten pyöräpainojen ja akselistojen vaikutusta tierakenteen kestävyys on tutkittu sekä tiekokein että teoreettisesti. Kokeista merkittävin ja tunnetuin on AASHOn tiekoe 1950-60 luvun vaihteessa. Tutkimuksissa on keskitytty tarkastelemaan tavanomaisia akselipainoja ja akselistoja. Yliras- kaiden kuljetusten vaikutuksia on tutkittu hyvin vähän.

Rasituksia tutkittaessa selvitetään yleensä ensin ns. standardikuorman vaikutukset tiessä - yksinkertaisimmillaan ne toistokerrat, jotka johtavat tarkasteltavan rakenteen rikkoutumiseen. Yksittäisen kuormituksen aiheuttama keskimääräinen vaurio saadaan jakolaskulla.

Tietyn kuorman vaikutus voidaan selvittää periaatteessa kahdella tapaa:

- ratkaisemalla suhde, joka osoittaa, kuinka monta tarkasteltavan kuorman toistoa tarvitaan aiheuttamaan sama kuormitus kuin standardikuorma (yleensä suhdetta kutsutaan vastaavuuskertoimeksi)
- laskemalla tai mittaamalla tarkasteltavan kuorman aiheuttamia teknisiä suureita (jännitys, muodonmuutos tai siirtymä), joita voidaan verrata standardikuormista aiheutuviin.

Ensin mainittu menetelmä on huomattavasti toista yleisempi yksinkertaisuutensa vuoksi (vertailuvaiheessa tarvitsee selvittää vain vallitseva kuorma). Rakennetta yksilöiviä parametrejä käytetään hyvin vähän, mikä saattaa johtaa suuriinkin virheisiin.

Jälkimmäisessä menetelmässä (analyttisessä eli mekanistisessa lähestymistavassa) voidaan vain eräitä yksinkertaisimpia tarkasteluja tehdä ilman ATK:ta.

Yleisimmin tunnettu kuormien vastaavuuskerroin lienee AASHO-tiekokeeseen perustuva ns. "neljännen potenssin sääntö". Sen mukaan taipuisilla päällysrakenteilla saadaan vastaavuuskerroin (LEF) yksittäisakselille seuraavalla kaavalla:

$$LEF = (L / 100)^4 \quad (1)$$

jossa tarkasteltavan akselin kuorma ilmaistaan kN.

Useissa mitoitusmenetelmissä (esim. SHELL, ASPHALT INSTITUT) tai tutkimuksissa (SHOOK-FINN) vastaavuuskertoimet ovat lähellä AASHON kertoimia (taulukko 3). Potenssia neljä on pidettävä usean eri tutkimuksen keskimääräisenä arvona. Maabetoni- ja betonirakenteilla potenssi on aivan eri kertaluokkaa.

Taulukko 3. Vastaavuuskerrointen lukuarvoja yksittäisakseleille /27, 29/.

| Akseli-paino, kN | AASHO | SHELL | ASPH. INST. | SHOOK-FINN. | VSN70-80* |
|------------------|-------|-------|-------------|-------------|-----------|
| 40 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,05 |
| 60 | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,28 | 0,28 |
| 80 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 100 | 2,44 | 2,40 | 3,44 | 3,53 | 2,67 |
| 120 | 5,06 | 4,98 | 11,80 | 12,48 | 5,95 |

* Neuvostoliittolaiset normit

Corps of Engineers -tierakenteen mitoitusmenetelmässä vastaavuuskerrointa laskettaessa käytetään kaavoja /35/:

$$\log N = \frac{t}{30,8 \sqrt{L \left(\frac{1}{\text{CBR}} - \frac{17,8}{p} \right)}} - 0,653 \quad (2)$$

$$LEF = N_s / N_L \quad (3)$$

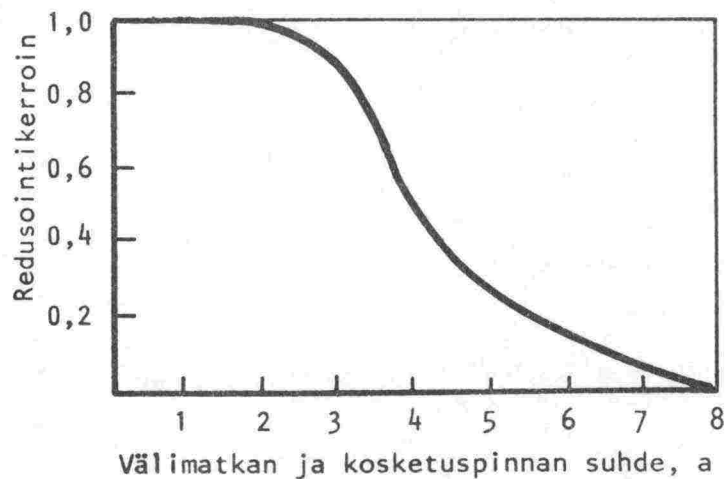
missä N = rakenteelle sallittu akselien lukumäärä

N_L = rakenteelle sallittu akselien L lkm

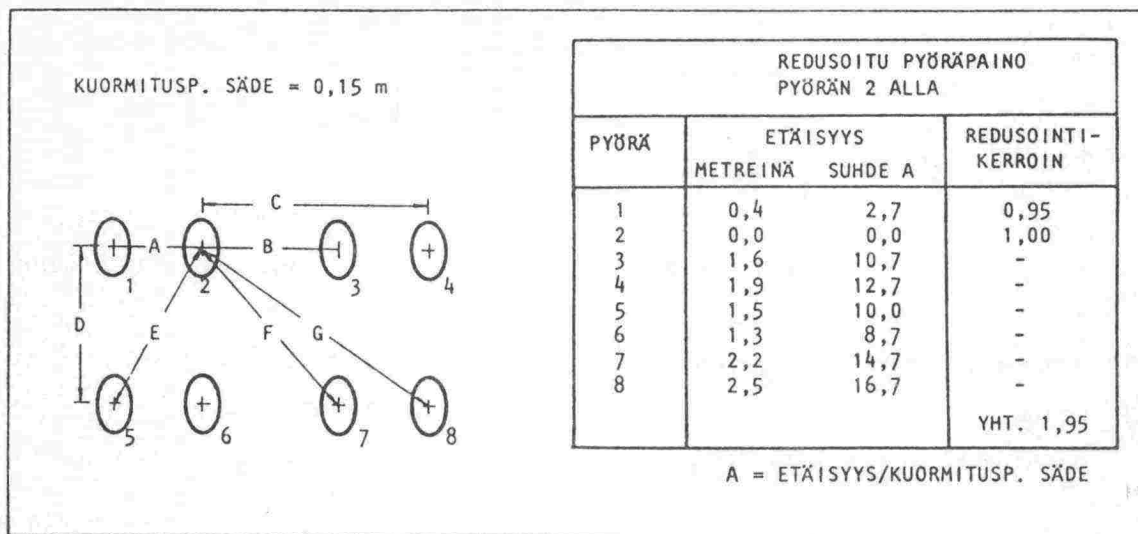
- N_s = rakenteelle sallittu standardiakseleiden lkm
 t = tierakenteen paksuus (mm)
 L = redusoitu pyöräpaino (kN)
 CBR = pohjamaan CBR-arvo
 p = rengaspaine (kPa).

Kaikkiin edellä mainittuihin menetelmiin sisältyy ns. redusoidun pyöräpainon (tai akselipainon) laskeminen. Redusoidulla pyöräpainolla tarkoitetaan sellaista yhdelle pyörälle tulevaa kuormaa, joka tierakenteeseen kohdistuvilta vaikutuksiltaan vastaa rengasryhmää, jolla on yhteisvaikutusta tarkasteltavaan pisteeseen. Ominaisuus, jonka mukaan vaikutuksia arvostellaan, vaihtelee. Määrittäyskriteerinä käytetään mm. jännityksiä, muodonmuutoksia tai taipumia.

Corps of Engineers - menetelmässä kriteerinä on taipuma. Muiden pyörien vaikutus tiettyyn pyörään saadaan kuvassa 19 esitetyn käyrän avulla. Redusoitu pyöräpaino on ko. pyörän kuorma summattuna lähipyörien lisäkuormilla (esimerkkilaskelma kuvassa 20).



Kuva 19. Nomogrammi redusoidun pyöräpainon määrittämiseksi (Corps of Engineers - menetelmässä) /35/.



Kuva 20. Esimerkkilaskelma Corps of Engineers - menetelmän mukaisesta redusoidun pyöräpainon laskemisesta.

Neuvostoliittolaisen suunnitteluohjeen mukaan redusoitu pyöräpaino lasketaan muodonmuutosten perusteella seuraavien kaavojen avulla /27/:

$$L_{ri} = L_i + \sum_j^{n-1} L_j G_j Q_j F_j \quad (4)$$

$$G_j = 0,49 e^{-0,14 (h/d_j)^2} + 0,51 e^{-0,64 (h/d_j)^2} \quad (5)$$

$$Q_j = 0,4 e^{-0,065 (1/D_j)^2} + 0,6 e^{-0,44 (1/D_j)^2} \quad (6)$$

$$F_j = (P_i / P_j)^{1/3} \quad (7)$$

joissa

L_{ri} = pyörän redusoitu pyöräpaino

$L_{i...n}$ = pyörän $i...n$ kuorma

G_j = kerroin, joka ilmaisee pyörien i ja j pituussuuntaisesta välimatkasta riippuvan vaikutuskomponentin tarkasteltavaan pyörään i

Q_j = kerroin, joka ilmaisee pyörien i ja j leveyssuuntaisesta välimatkasta riippuvan vaikutuskomponentin tarkasteltavaan pyörään i

F_j = kerroin, joka riippuu rengaspaineesta

h = pyörien i ja j pituussuuntainen välimatka

l = pyörien i ja j leveyssuuntainen välimatka

d_j = pyörän j kosketuspinnan halkaisija

p_j = pyörän j rengaspaine

Analyyttistä menetelmää käytettäessä jännitykset, muodonmuutokset tai siirtymät määritetään joko mittaamalla tai laske-
malla.

Tie- ja liikennelaboratorio on jo useana vuonna mitannut liikkeessä olevien kuorma-autojen aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia tien eri kerroksissa. Eräitä mittaamenetelmiä - esim. Benkelman palkkia tai Deflectographia - voidaan pitää tällaisten rasitusmittausten rajoittuneina sovellutuksina.

Päällysrakenteen käyttäytymistä kuormituksen alla voidaan jäljitellä fysikaalisten ja matemaattisten apuneuvojen avulla. Näihin perustuvia analyttisiä laskentamalleja on kehitetty useita. Malleissa käytettäville materiaaleille annetaan ideaaliset ominaisuudet. Yleisimmin taipuisan päällysrakenteen materiaalit oletetaan lineraarisesti kimmoisiksi. Päällysrakenne kuvataan pohjamaan päälle rakentuvina tasapaksuina, leveyssuunnassa äärettöminä ja homogeenisina kerroksina.

Kullekin kerrokselle käytetään omaa kimmokerrointa ja Poisson-lukua. Eräissä malleissa on mahdollista valita myös kerrosten välinen kitka. Todellisuudessa rakennemateriaalit - varsinkin sidotut - poikkeavat käyttäytymiseltään lineaarikimmoisesta. Niinpä kehittyneimmissä malleissa materiaaleja kuvataan viskokimmoisina ominaisuuksin.

Pyöräkuormaa edustaa yleensä pyöreä kosketuspinta, jonka alla on tasainen pintapaine (= rengaspaine). Joissakin malleissa kuormitusta voidaan täydentää vaakatason suuntaisella kuormalla kuvaamaan jarrutuksesta tai kiihdytyksestä syntyviä voimia. Jos kuormituspisteitä on enemmän kuin yksi, kuormitus lasketaan superpositioteorian avulla.

Menetelmää sovelletaan yleensä siten, että tarkasteltavalle kuormalle mitattuja tai laskettuja rasituksia verrataan standardikuormalle saatuihin arvoihin. Näidenkin vertailujen lähtökohtana on kuormituskertojen ja rasitusarvojen eksponentiaalinen riippuvuus, joka ilmaistaan joko väsymissuoralla tai yksinkertaisimmin kaavalla

$$N_{80} \sim r^{-x} \quad (8)$$

missä

N_{80} = standardiakselien (80 kN) sallitut kuormituskerrat

r = rasitusominaisuuden arvo (jännitys, muodonmuutos tai siirtymä)

x = kerroin.

Kertoimelle x on esitetty hiukan toisistaan poikkeavia arvoja (taulukko 29).

Taulukko 4. Kaavan $N_{80} \sim r^{-x}$ eksponentin x arvoja eri tutkimusten perusteella (h =päällysteen alapinnan vetojännitys, v =pohjamaan yläpinnan pystysuora muodonmuutos, d =päällysteen yläpinnan taipuma) /29/.

| Tutkimus tai tutkija | Eksponentti x | | |
|-----------------------|-----------------|---------|---------|
| | $r = h$ | $r = v$ | $r = d$ |
| AASHO (1962) | | | 3,3 |
| Deacon (1969) | 5,5 | | |
| Witczak (1972) | | 20,0 | |
| Lister (1972) | | | 3,0 |
| Jung and Phang (1974) | | | 6,0* |
| Finn ym. (1977) | 3,3 | | 4,9 |
| Carmichael (1977) | 5,1 | | |
| Claessen ym. (1977) | 6,0 | 4,0 | |
| Ullidtz (1977) | 5,6 | | |
| Brown ym. (1977) | 3,9 | 3,6 | |
| Christison (1978) | 3,0 | | 3,0 |

* Pohjamaanpinnan taipuma

Käytännön koetulosten ja analyttisten mallien avulla saatujen tulosten vertailua on tehty vähän. Suoritettujen tutkimusten mukaan tulokset vastaavat toisiaan, mutta hyvin ainoastaan kuormituspisteen alla

4.2 Yliraskaiden erikoiskuljetusten merkitys tiestölle

Raskaan liikenteen osuudesta teiden vaurioitumiseen ei olla yksimielisiä. Jo raskaan kalustonkin osalta esiintyy runsaasti toisistaan poikkeavia käsityksiä. Yliraskaiden erikoiskuljetusten merkitystä ei yleensä tarkastella

erillään muusta raskaasta liikenteestä vaan sitä pidetään tämän osana. Erikoiskuljetuksia ei esimerkiksi oteta huomioon tierakenteen suunnittelussa. Erikoiskuljetuksille asetetut rajoituksetkin määräytyvät taitorakenteiden (esim. siltojen) perusteella, eikä niihin yleensä vaikuta kerrosrakenteiden laatu.

Erään aiemman tarkastelun mukaan yliraskaitten kuljetusten osuus tierakenteen rasituksesta on vain 2-5 % valtatieluokan tiellä /32/. Sen sijaan normaaliliikenteen ylikuormat aiheuttaisivat yli puolet kokonaiskuormasta. Näiden tarkastelujen perusteella erikoiskuljetuksilla ei näyttäisi olevan ratkaisevaa merkitystä tierakenteen rasituksissa. Tosin tiekohtaiset tarkastelut alempiluokkaisille teille saattaisivat olla tarpeellisia yliraskaitten erikoiskuljetusten suoritusmahdollisuuksien arvioimiseksi pehmeikköjen ym. erityiskohteiden osalta.

Erikoiskuljetuksien taloudellinen merkitys on huomattava. Jo pelkästään metalliteollisuuden erikoiskuljetettujen tuotteiden arvo liikkunee nykyisin 15 mrd mk tienoilla.

4.3 Teoreettinen rasitustarkastelu

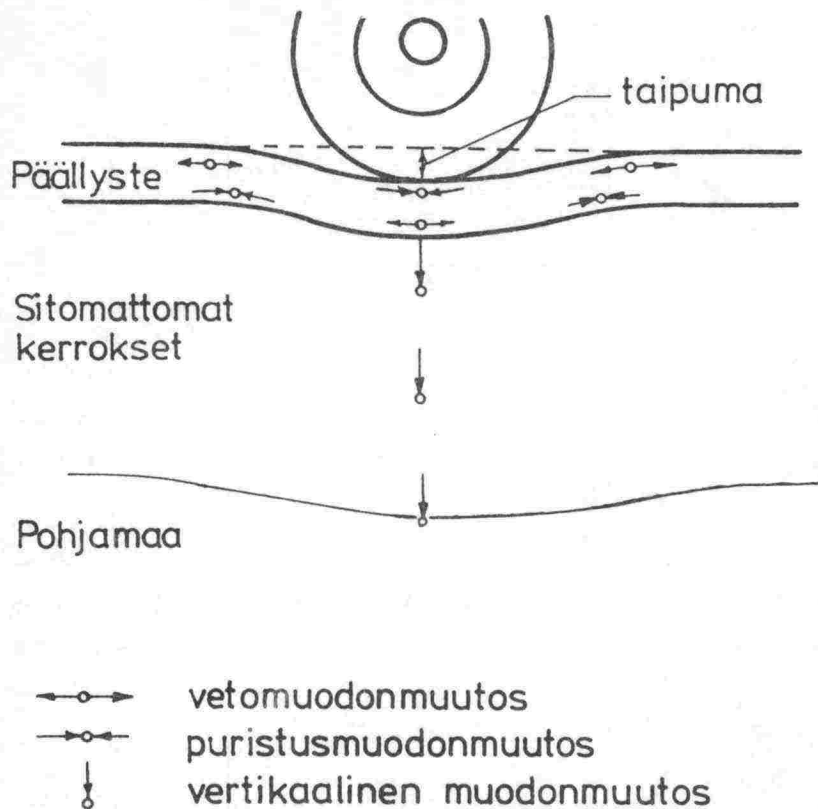
4.31 Tiehen kohdistuvat rasitukset

Tavanomainen tierakenne koostuu kerroksista, joiden kimmomoduuli pienenee syvyyden kasvaessa. Tarkoituksena on pienentää tien pintaan kohdistuvat jännitykset ja muodonmuutokset sellaisiksi, että tierakenne ja pohjamaa kestävät ne.

Tavanomaisessa tierakenteessa kriittillisimmiksi jännityksiksi (tai muodonmuutoksiksi) muodostuvat yleensä sidottujen kerrosten alareunan vetojännitys tai pohjamaan puristusjännitys.

Sidotun ja sitomattoman materiaalin kimmokertoimet poikkeavat suuresti toisistaan. Kuormitettaessa sidottu kerros taipuu ja sen alapintaan syntyy vetojännityksiä ja näitä vastaavia vetomuodonmuutoksia (kuva 21). Mitä enemmän kerrosten kimmokertoimet poikkeavat toisistaan, sitä suurempi on syntyvä vetojännitys. Koska tienrakennuksessa käytettyjen sidottujen materiaalien vetolujuus on suhteellisen pieni, on sitomattomien materiaalien ylimpien kerrosten kimmokertoimilla suuri merkitys päällysteiden kestävyys. Sitomaton kerros ei kestä juuri lainkaan vetoa, joten on välttämätöntä, että kimmokerroin putoaa riittävän pienin askelin lähelle pohjamaan kimmokerrointa.

Tierakenteen tarkoituksena on mm. jakaa pyöräkuorma niin laajalle, että pohjamaa kestää sille tulevan kuormituksen, joten pohjamaalle tuleva puristusjännitys on luonnollinen tierakennetta koskeva kriteeri /15/.



Kuva 21. Tiehen kohdistuvat rasitukset.

Sidottujen kerrosten (päällysteen) vaurioituminen ilmenee yleensä verkkohalkeamana, jonka esivaiheissa saattaa esiintyä yksittäisiä halkeamia. Vaurioituminen voi esiintyä myös tierakenteen deformaationa eli pyöräkuorman aiheuttamat muutokset ovat niin suuria, etteivät ne enää palaudu vaan jäävät pysyviksi. Teoreettisesti asia tulkitaan siten, että tierakenteen ollessa olosuhteisiin nähden heikon pyöräkuorma aiheuttaa suuria vetojännityksiä sidottuihin rakenteisiin. Tällaisia toistuvia suuria vetojännityksiä tien rakenne ei kestä, vaan vaurioituu. /15/

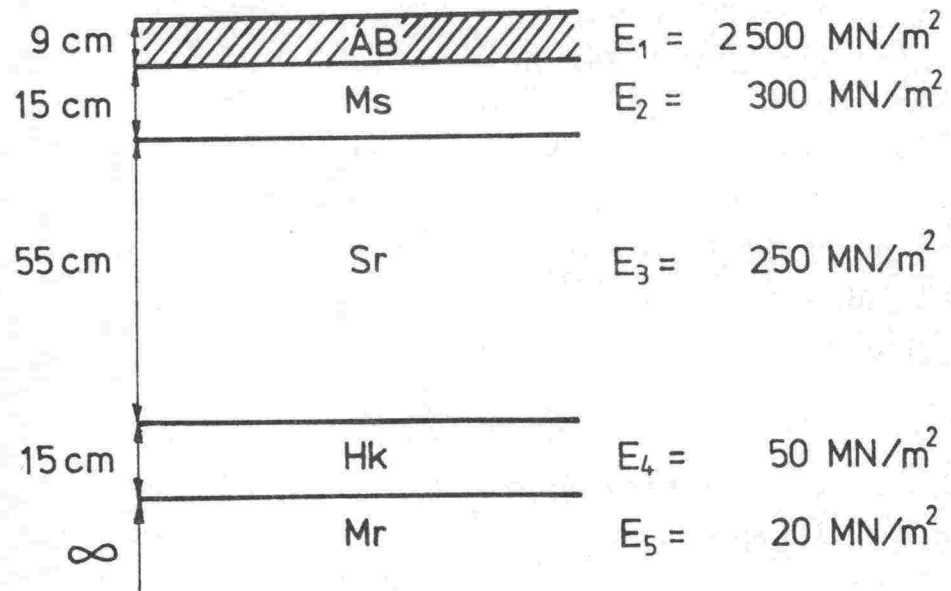
Pohjamaan väsyminen tarkoittaa sitä, että liikennekuormasta aiheutuu sallitua suurempia pysyviä muodonmuutoksia. Tämä ilmenee urautumisena tai lähinnä pohjamaan epähomogeenisuudesta johtuen tien epätasaisuutena. /15/

Edellä on käsitelty puristus- ja vetojännityksiä. Käytännössä on todettu mitoittamisen kannalta huomattavasti helpommaksi käsitellä näitä vastaavia suhteellisia muodonmuutoksia eli jännityksen ja kimmokertoimen suhteita /15/. Tässä työssä keskitytäänkin tarkastelemaan muodonmuutoksia.

4.32 Laskelmat

4.321 Tien rakenne

Laskelmissa käytettiin ainoastaan yhtä rakennetyyppiä (kuva 22). Tämän katsottiin edustavan sellaista tietä, jolla ylikorkeas erikoiskalusto pääasiassa liikkuu.



Kuva 22. Laskelmissa käytetty kerrosrakenne.

Laskelmissa käytetyt kimmokertoimet esitetään kuvassa 22. Jokaisen kerroksen Poisson-vakioksi valittiin 0,35. Kerrosten välillä oletettiin olevan täysi kitka.

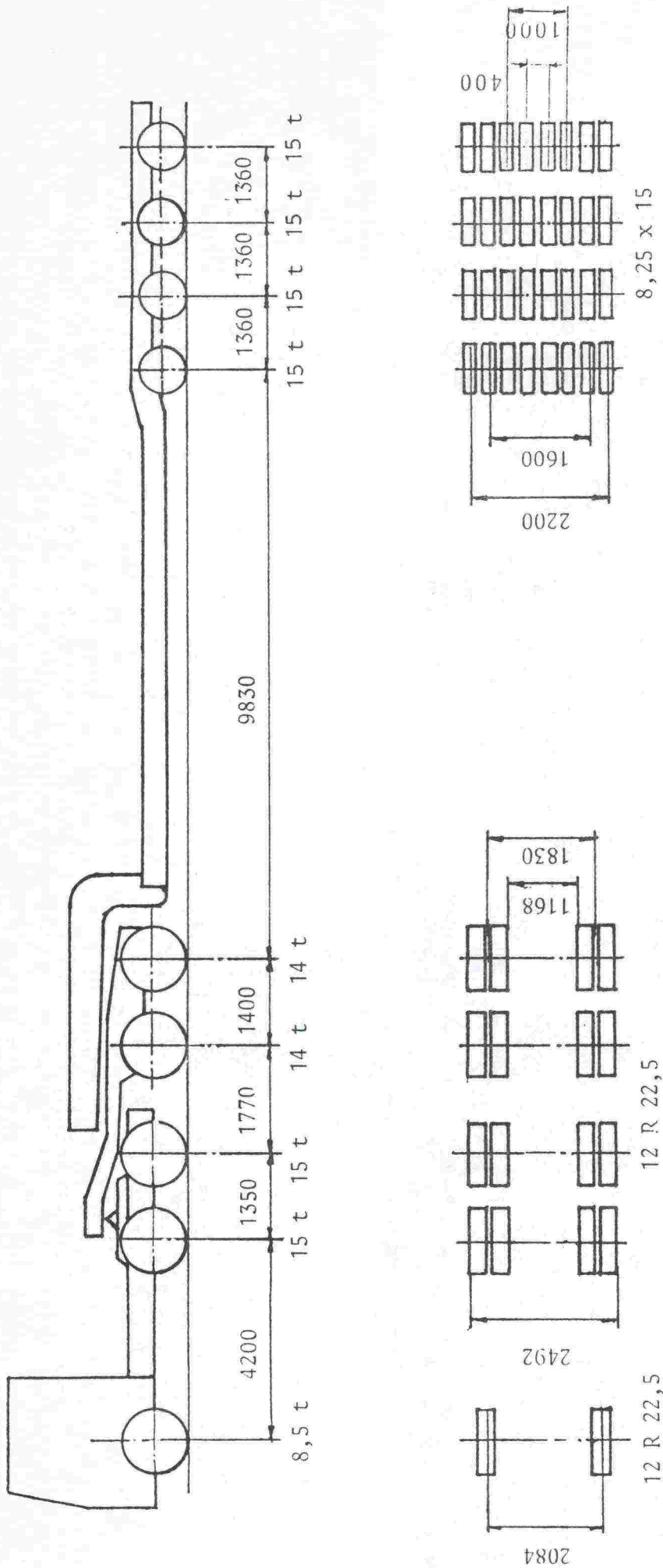
4.322 Ajoneuvotyypit

Selvitystyön siltoja koskevan osuuden jääminen tarkastelun ulkopuolelle vaikutti myös tierasitusten teoreettisissa tarkasteluissa käytettävien kuormitustapausten valintaan. Tutkittaviksi kuormitustapauksiksi valittiin yksi puoliperävävaunuyhdistelmä eri variaatioineen sekä kaksi ajoneuvonosturityyppiä. Tierasitusten kannalta näistä muodostui kuusi yksittäistä kuormitustapausta, jotka ovat seuraavat:

- 1) Kolmiakselinen kuorma-auto.
- 2) Kolmiakselinen kuorma-auto varustettuna kaksiakselisella välivaunulla (dolly-akselistolla).
- 3) Puoliperävävaunutyypinen neliakselinen erikoiskuljetusperävaunu normaalirengastuksella (4 rengasta/akseli).
- 4) Sama erikoiskuljetusperävaunu kaksinkertaisella rengastuksella (8 rengasta/akseli).
- 5) Nosturityyppi I - neliakselinen ajoneuvonosturi kaksiakselisella apuperävaunulla varustettuna (kuva 24).
- 6) Nosturityyppi II - kokoluokaltaan nosturityyppiä I vastaava viisiakselinen ajoneuvonosturi (kuva 25).

Ajoneuvotyypit valittiin edustamaan tyypillisimpiä erikoiskuljetusajoneuvoja. Akseli- ja kokonaispainot saatiin yleisimmin esiintyneistä kuormitustapauksista. Rengaspaineet ovat kaluston valmistajan suositusten mukaiset.

Laskelmissa käytetyn ajoneuvoyhdistelmän olennaiset mitat ja painot selviävät seuraavalla sivulla olevasta piirroksesta (kuva 23), jossa ajoneuvoyhdistelmä on kuvattu mahdollisimman täydellisenä eli kuormitustapauksista 2 ja 4 koottuna. Tarkasteltujen nosturityyppien osalta vastaavat mitat ja painot on niin ikään esitetty seuraavien sivujen kuvissa 24 ja 25.



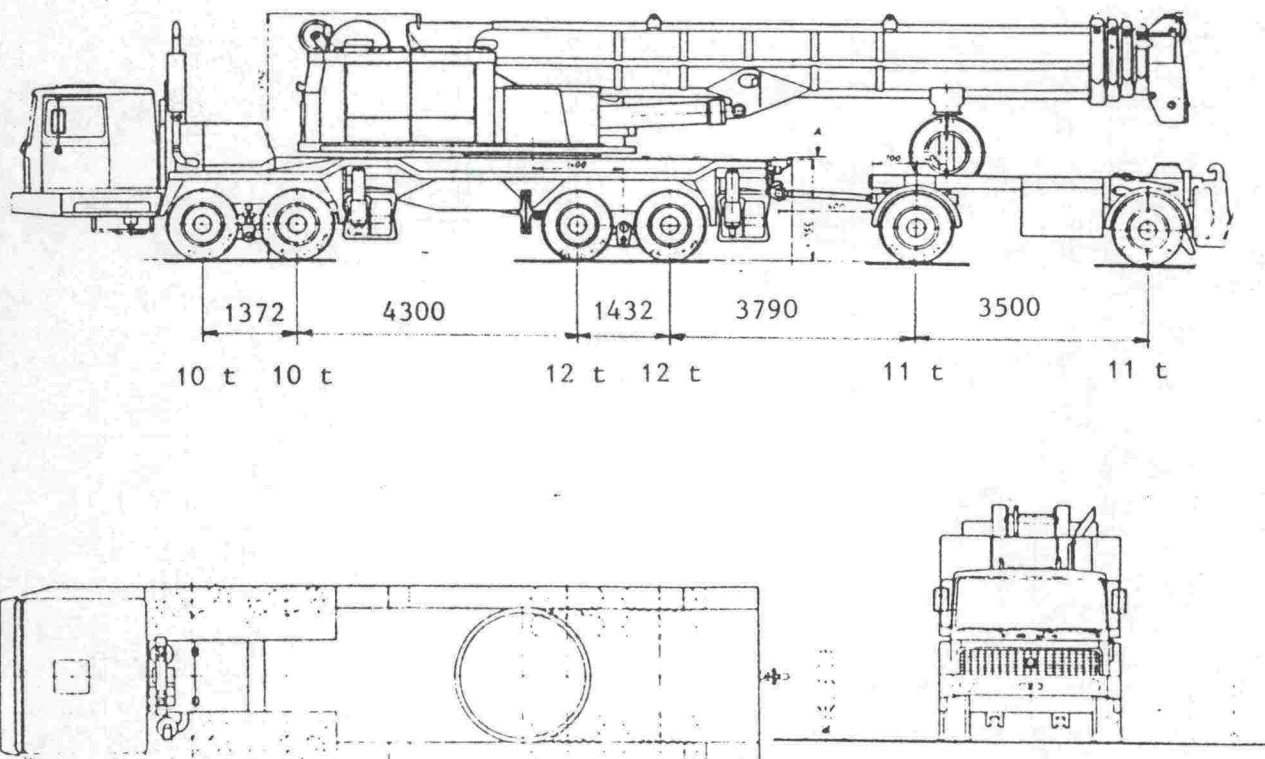
Kuva 23. Laskelmissa käytetyn puoliperävaunuyhdistelmän tyyppikuva.

NOSTURITYYPPI I

| | | | |
|-------------|----------------|--|---------|
| Raidevälit: | etuakseli | 2330 | mm |
| | taka-akseli | 1960 | mm |
| | perävaunu | 2032 | mm |
| Renkaat: | etuakseli | 16.5 - 22.5 | 800 kPa |
| | taka-akseli | 13.0 x 22.00 Pilote XL, | 630 kPa |
| | perävaunu | 16.5 - 22.5/20 PR Double X, | 800 kPa |
| Akselistot: | etuakselisto | yläpuolisilla reaktiotangoilla tuetut lehtijousitetut akselit | |
| | taka-akselisto | yläpuolisilla reaktiotangoilla tuetut jousittamattomat akselit | |
| | perävaunu | lehtijousitetut 11 t akselit | |

Kokonaispaino kuljetusvarustuksessa 66100 kg

| | |
|--------------|------------------|
| etuakselit | 10100 + 10100 kg |
| taka-akselit | 12200 + 12200 kg |
| perävaunu | 10750 + 10750 kg |



Kuva 24. Perävaunun ajoneuvonosturin tyyppikuva (nosturityyppi I).

NOSTURITYYPPI II

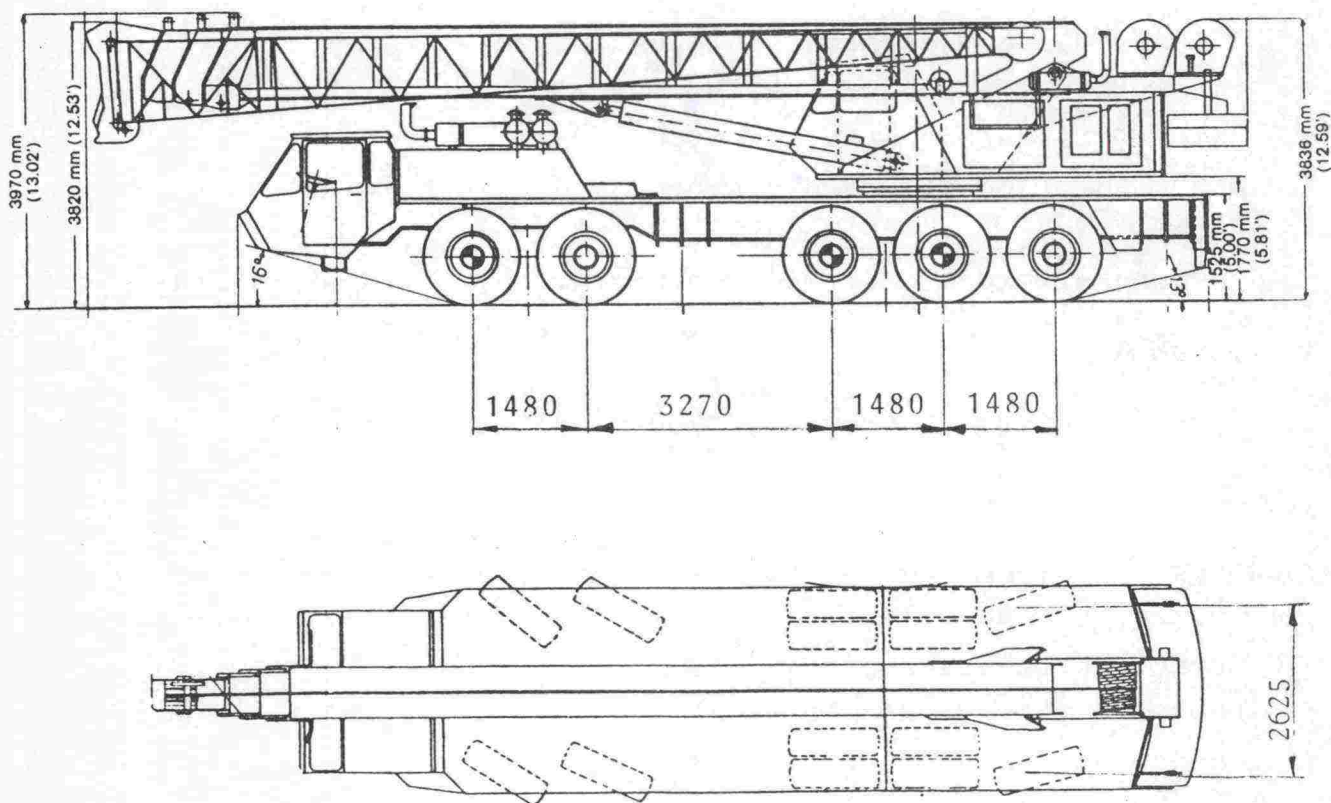
Raidevälit: etuakseli 2462 mm
 taka-akseli 1 2147 mm
 taka-akseli 2 2625 mm

Renkaat: 14.00 - R24 XVC⁺⁺⁺, 700 kPa (max 1000 kPa)

Akselistot: kaikki akselit jousitettuja

Kokonaispaino kuljetusvarustuksessa 66850 kg

etuakselit 11800 + 11800 kg
 taka-akselit 11950 + 11950 kg
 taka-akseli 12000 kg



Kuva 25. Tavallisen ajoneuvonosturin tyyppikuva (nosturityyppi II).

4.323 Tietokoneohjelma

Tie- ja liikennelaboratoriolla on käytettävissään kaksi erilaista monikerrosohjelmaa (BISAR ja CHEVRON), joilla voidaan laskea tien rakenteissa esiintyvät rasitukset. Laskelmissa käytettiin Shell Research Laboratoryn tekemää BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads) ohjelmaa /6/, joka on CHEVRONia monipuolisempi ja tietyissä tilanteissa tarkempi - toisaalta kyllä hankalampi ja kalliimpi käyttää.

Bisar-ohjelma pystyy käsittelemään rakenteita, joissa on yhdestä kymmeneen kerrosta. Kullekin kerrokselle voidaan antaa erikseen kimmokerroin, Poisson-vakio ja paksuus. Lisäksi kerrosten välinen liike voidaan määritellä täysin kitkatomasta täysin kitkaiseen. Tiehen kohdistuvat rasitukset voidaan antaa kymmenenä eri kuormana. Kuormitus voi vertikaalisuunnan lisäksi olla myös horisontaalisuuntaista (jarrutus- tai vetovoima).

Ohjelma perustuu seuraaviin oletuksiin:

- tie koostuu tasapaksuista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä rakennekerroksista
- pohjamaa on ääretön vaakasuunnassa ja alaspäin pystysuunnassa
- rakennekerrokset ovat isotrooppisia, käyttäytyvät kimmoisesti ja niiden jännitys - muodonmuutos suhde on lineaarinen
- kuormituspinta on ympyrä ja kuorma jakautuu sille tasaisesti

Ohjelma laskee missä tahansa rakenteen pisteessä

- kunkin kuorman aiheuttamat siirtymät, jännitykset ja muodonmuutokset erikseen
- kuormien yhteensä aiheuttamat siirtymät, jännitykset ja muodonmuutokset
- pääjännitysten ja näitä vastaavien muodonmuutosten maksimi- ja minimiarvot sekä niiden suunnat.

Kuvassa 26 on esimerkki tulostuksesta, kun kuormia on neljä.

POSITION NUMBER 7

LAYER NUMBER 2

COORDINATES

X 0. Y .3550E+00 Z .9000E-01

DISTANCE TO LOAD-AXIS(1)
.3550E+00

THETA
.1571E+01

DISPLACEMENTS

RADIAL .5908E-05 TANGENTIAL 0. VERTICAL .3344E-03

STRESSES

RADIAL -.2093E+05 TANGENTIAL -.5034E+04 VERTICAL -.7720E+04

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.1822E+05

TANG./VERT.
0.

STRAINS

RADIAL -.5488E-04 TANGENTIAL .1664E-04 VERTICAL .456E-05

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.8198E-04

TANG./VERT.
0.

DISTANCE TO LOAD-AXIS(2)
0.

THETA
0.

DISPLACEMENTS

RADIAL 0. TANGENTIAL 0. VERTICAL .4993E-03

STRESSES

RADIAL -.2589E+05 TANGENTIAL -.2589E+05 VERTICAL -.2972E+06

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
0.

TANG./VERT.
0.

STRAINS

RADIAL .2906E-03 TANGENTIAL .2906E-03 VERTICAL -.9302E-03

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
0.

TANG./VERT.
0.

DISTANCE TO LOAD-AXIS(3)
.1460E+01

THETA
-.1571E+01

DISPLACEMENTS

RADIAL -.6776E-05 TANGENTIAL 0. VERTICAL .2045E-03

STRESSES

RADIAL -.9719E+03 TANGENTIAL -.1754E+04 VERTICAL -.6165E+02

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.2228E+04

TANG./VERT.
0.

STRAINS

RADIAL -.1121E-05 TANGENTIAL -.4641E-05 VERTICAL .2975E-05

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.1002E-04

TANG./VERT.
0.

DISTANCE TO LOAD-AXIS(4)
.1815E+01

THETA
-.1571E+01

DISPLACEMENTS

RADIAL -.6964E-05 TANGENTIAL 0. VERTICAL .1802E-03

STRESSES

RADIAL -.4550E+03 TANGENTIAL -.1325E+04 VERTICAL -.4286E+02

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.1430E+04

TANG./VERT.
0.

STRAINS

RADIAL .7964E-07 TANGENTIAL -.3837E-05 VERTICAL .1934E-05

RAD./TANG.
0.

RAD./VERT.
-.6434E-05

TANG./VERT.
0.

| | XX | YY | ZZ | YZ | XZ | XY | UX | UY |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|----|----|----------|
| TOTAL STRESS | -.340E+05 | -.482E+05 | -.305E+06 | -.146E+05 | 0. | 0. | | |
| TOTAL STRAIN | .299E-03 | .235E-03 | -.921E-03 | -.655E-04 | 0. | 0. | | |
| TOTAL DISPLACEMENT | | | | | | | 0. | .196E-04 |

PRINCIPAL VALUES AND DIRECTIONS OF TOTAL STRESSES AND STRAINS

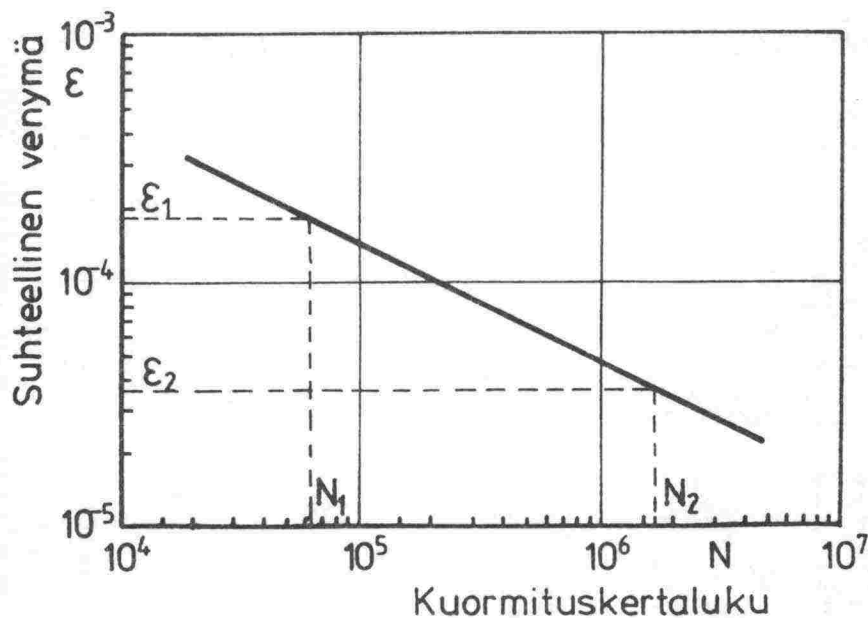
| | NORMAL STRESS | NORMAL STRAIN | SHEAR STRESS | SHEAR STRAIN | X COMPONENT | Y COMPONENT | Z COMPONENT |
|---------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| MAXIMUM | -.340E+05 | .299E-03 | | | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| MINIMAX | -.474E+05 | .238E-03 | | | 0.000 | .998 | -.056 |
| MINIMUM | -.306E+06 | -.924E-03 | | | 0.000 | .056 | .998 |
| MAXIMUM | | | .136E+06 | .612E-03 | .707 | -.040 | -.706 |
| MINIMAX | | | .129E+06 | .581E-03 | .707 | .040 | .706 |
| MINIMUM | | | .671E+04 | .302E-04 | 0.000 | .746 | .666 |
| | | | | | .707 | -.706 | .040 |
| | | | | | .707 | .706 | -.040 |

STRAIN ENERGY .1306E+03
STRAIN ENERGY OF DISTORTION .1056E+03

4.324 Tulosten tulkinta

Kunkin ajoneuvotyypin vaikutusta tierakenteeseen tarkastellaan tässä tutkimuksessa ns. väsymismallin avulla. Tällöin oletetaan tierakenteen kestoiän määräytyvän sen eri materiaalien väsymisominaisuuksien mukaan, ts. kuinka monta tietynsuuruista muodonmuutosta rakennemateriaali kestää murtumatta.

Teoreettisesti malli perustuu hypoteesiin, jonka mukaan kapale kestää määrätynsuuruista toistuvaa rasitusta vain tietyn rajallisen lukumäärän. Tätä ajattelutapaa on sovellettu tienrakennusmateriaalien tutkimukseen, jolloin periaate yleensä esitetään kuvan 27 muodossa. Siinä ilmaistaan ns. väsymissuoralla muodonmuutosta vastaava sallittujen standardiakselien kuormituskertamäärä.



Kuva 27. Periaatekuva väsymissuoran käytöstä.

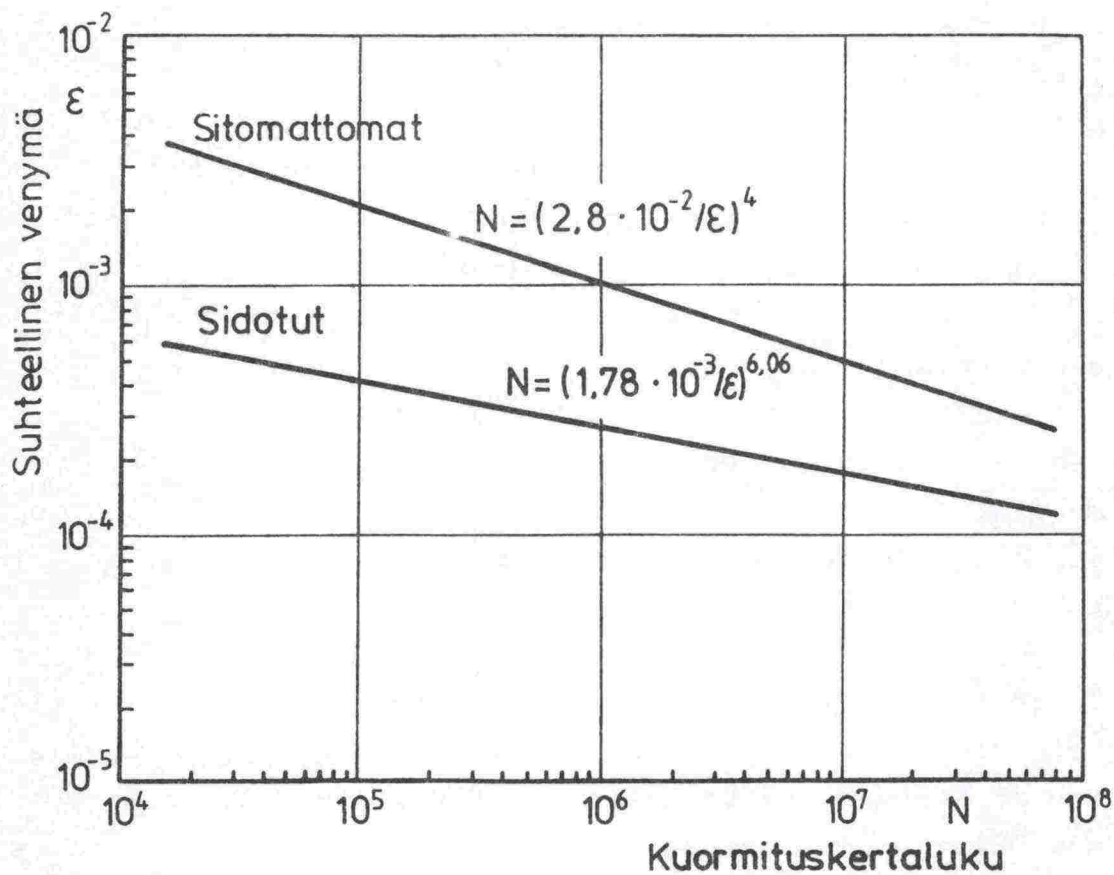
Kuvasta 27 selviää periaate, jonka avulla voidaan vertailla eriarvoiset muodonmuutokset aiheuttavia rasituksia. Muodonmuutoksen \mathcal{E}_1 aiheuttavaa rasitusta rakenne kestäisi N_1 kertaa. Vastaavasti muodonmuutosta \mathcal{E}_2 rakenne kestää N_2 kertaa. Muuttamalla näin muodonmuutosarvot tutuiksi kuormituskertalukumääriksi saadaan konkreettisesti vertailtavia arvoja.

Teoriaan olennaisesti vaikuttava asia on väsymissuoran paikka ja kulmakerroin. Tätä voidaan tutkia väsytykskokeilla aiheuttamalla kappaleeseen toistuva muodonmuutos esim. dynaamisella rasituslaitteella. Kokeen kestäessä joko muodonmuutoksen arvo tai kuormitusvoima pidetään vakiona. Kappaleen kestoiäksi otetaan koekappaleen murtumista vastaava tai esim. se kuormitusmäärä, jolloin koekappaleen kimmokerroin on pienentynyt puoleen. Väsytykskokeita tehdään yleensä kolmella eri vetomuodonmuutoksen tasolla. Kun saadut pisteet merkitään koordinaatistoon, jossa akseleina ovat logaritmit kuormituskerroista ja vetomuodonmuutoksista, ne asettuvat yleensä suoralle. Tätä suoraa pidetään kappaleen väsymissuorana vallinneissa olosuhteissa. Väsyminen ilmiönä on varsinkin asfalttipäällysteen kaltaisessa materiaalissa monimutkainen eikä väsytyksen teoriaa täysin tunneta. Eri tutkijat ovat päätyneet käyttämään eri muuttujia ja eri laskentamenetelmiä, jolloin on saatu toisistaan poikkeavia tuloksia esim. lämpötilan vaikutuksesta väsymiseen. /15/

Teoreettisesti jokaiselle materiaalityypille (myös eri lämpöisille päällystekerroksille) tarvittaisiin oma väsymissuoransa. Käytännössä on katsottu riittäväksi tarkistaa muodonmuutokset ainoastaan kriittisissä kerroksissa eli päällysteessä ja pohjamaassa. Tästä syystä väsymissuoria on määritetty vain näille kerroksille.

Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään Shellin kehittämää väsymissuoria (kuva 28), koska Shellin mitoitusmenetelmää pidetään yhtenä kehittyneimmistä. Toisaalta Shellin väsymissuorien havaittiin vastaavan hyvin - ainakin valitun rakenteen osalta - TVH:n rakenteen suunnittelunormien kuormituskertalukua.

Päällysteelle valittiin väsymissuora, joka edustaa käyrästös-
sä n. 20°C asfalttibetonia. 'Sitomattomat'-väsymissuoraa
käytettiin laskettaessa kuormituskertalukuja pohjamaalle sekä
sitomattomille kerroksille, mistä johtuu esim. kantavan ker-
roksen pienet kuormituskertaluvut. Niitä ei voi verrata pääl-
lysteen tai pohjamaan kuormituskertalukuihin. Luvut on tar-
koitettu ainoastaan ajoneuvotyyppejen keskinäiseen vertai-
luun.



Kuva 28. Shellin väsymissuorat päällysteelle ja sitomatto-
mille kerrosmateriaaleille.

Suorien antamaa kuormituskertalukua ei ole syytä pitää absoluuttisena, sillä suorat on laadittu yleismaailmallista mitoitusjärjestelmää varten. Valitulle rakenteelle saadaan TVL:n rakenteen suunnitteluohjeen /33/ mukaan kuormituskerran suuruusluokaksi $8,0 \cdot 10^5 - 2,0 \cdot 10^6$. Jos standardiakselille (100 kN) lasketaan muodonmuutos BISAR-ohjelmalla saadaan päällysteen väsymissuoralla kertaluvuksi $6,3 \cdot 10^5$. Vastaavuus on varsin hyvä. Tämän tutkimuksen kannalta absoluuttiset arvot eivät ole ratkaisevia, merkittävämpää on kuormituskertaluvun suhteellinen muutos eri muodonmuutosarvoille.

4.33 Tulokset

4.331 Standardiakseli

Tässä tutkimuksessa erilaisia akselistoja vertaillaan siten, että kullekin akselille lasketaan vertailuarvo suhteessa standardiakseliin seuraavasti:

$$LEF_i = \frac{N_{100}}{N_i} \quad (9)$$

jossa LEF_i on vertailuarvo akselille i (Load Equivalence Factor)

N_{100} on kuormituskertalukumäärä, jonka rakenne kestää standardiakseleita

N_i on kuormituskertalukumäärä, jonka rakenne kestää akseleita i

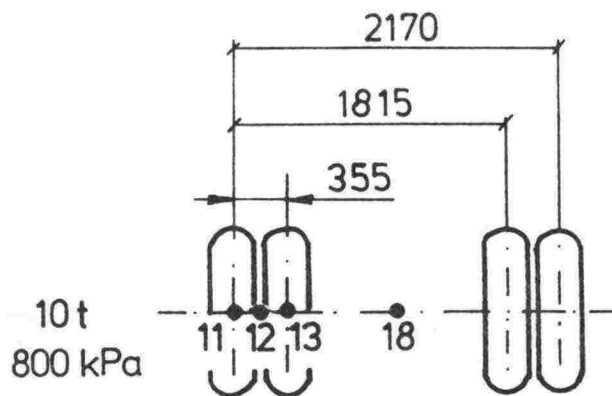
Koko akseliston vastaavuuskerroin saadaan kunkin akselin vertailuarvoilla seuraavasti:

$$VEF = \sum LEF_i \quad (10)$$

jossa VEF on akseliston vastaavuuskerroin (Vehicle Equivalence Factor)

LEF_i on vertailuarvo akselille i

Vertailussa käytettävän standardiakselin (100 kN) pyörästä on esitetty kuvassa 29. Laskentapisteet on merkitty numeroin 11...18. Vastaavat pisteet ovat myös taulukossa 5. Kriittisin piste (11) sijaitsee uloimpien renkaiden alla. Tässä pisteessä akselista aiheutuu päällysteen alareunaan 300 μ S vertikaalinen muodonmuutos. Kuvan 28 mukaan tämä vastaa 632570 kuormituskertaa. Siten standardiakselille maksimi kuormituskertalukumäärä (päällysteen N 100) on $6,33 \cdot 10^5$. Taulukon 5 perusteella pohjamaa rasittuu eniten paripyörien välin keskipisteessä. Muodonmuutosta vastaava sallittu kuormituskertamäärä (pohjamaan N 100) $2,22 \cdot 10^7$ on huomattavasti suurempi kuin päällysteen vastaava. Tämä johtuu ainakin osittain routamitoituksesta, joka edellyttää Suomen oloissa kantavuusmitoitusta paksumpaa kerrosrakennetta. Ilmeisesti arvojen tulisi kuitenkin olla lähempänä toisiaan. Väsymissuorathan vaikuttavat ratkaisevasti arvoihin ja todennäköisesti käytetyt väsymissuorat eivät täysin vastaa toisiaan. Tästä syystä päällysteen ja kerrosten sallittuja kuormituskertalukuja ei aivan täysin voi verrata keskenään.



Kuva 29. Standardiakselin tyyppikuva ja laskentapisteet (mit-takaava 1:50).

Taulukko 5. Standardiakselin (100 kN) aiheuttamat muodonmuutokset ja vastaavat sallitut kuormituskertaluvut

| Laskentapiste ja syvyys | ϵ pääll. | ϵ kerros | Kuormituskertaluku | |
|--|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| | μS | μS | pääll. | kerros |
| 11(1 0,09 / pä(2 0,09 / ka 0,94 / pm | 300 | | $6,33 \cdot 10^5$ | |
| | | 923 | | $8,47 \cdot 10^5$ |
| | | 384 | | $2,83 \cdot 10^7$ |
| 12 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm | 210 | | $4,58 \cdot 10^6$ | |
| | | 329 | | $5,25 \cdot 10^7$ |
| | | 408 | | $2,22 \cdot 10^7$ |
| 13 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm | 299 | | $6,45 \cdot 10^5$ | |
| | | 921 | | $8,54 \cdot 10^5$ |
| | | 403 | | $2,33 \cdot 10^7$ |
| 18 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm | 28 | | $4,55 \cdot 10^{10}$ | |
| | | 28 | | $1,00 \cdot 10^{12}$ |
| | | 294 | | $8,22 \cdot 10^7$ |

- 1) Laskentapisteiden numerointi sellainen, että toiminnallisesti samat pisteet saavat eri pyörästöjen alla saman numeron;
 - ensimmäinen numero ilmaisee laskentapisteen pituussuunnassa
 - toinen numero ilmaisee laskentapisteen poikkisuunnassa

- 2) Kerroslyhenne; pä = päällyste, ka = kantava, ja = jakava
er = eristys, pm = pohjamaa

Taulukko 6. Vetoauton aiheuttamat muodonmuutokset ja vastaavat sallitut standardiakselin kuormituskerrat.

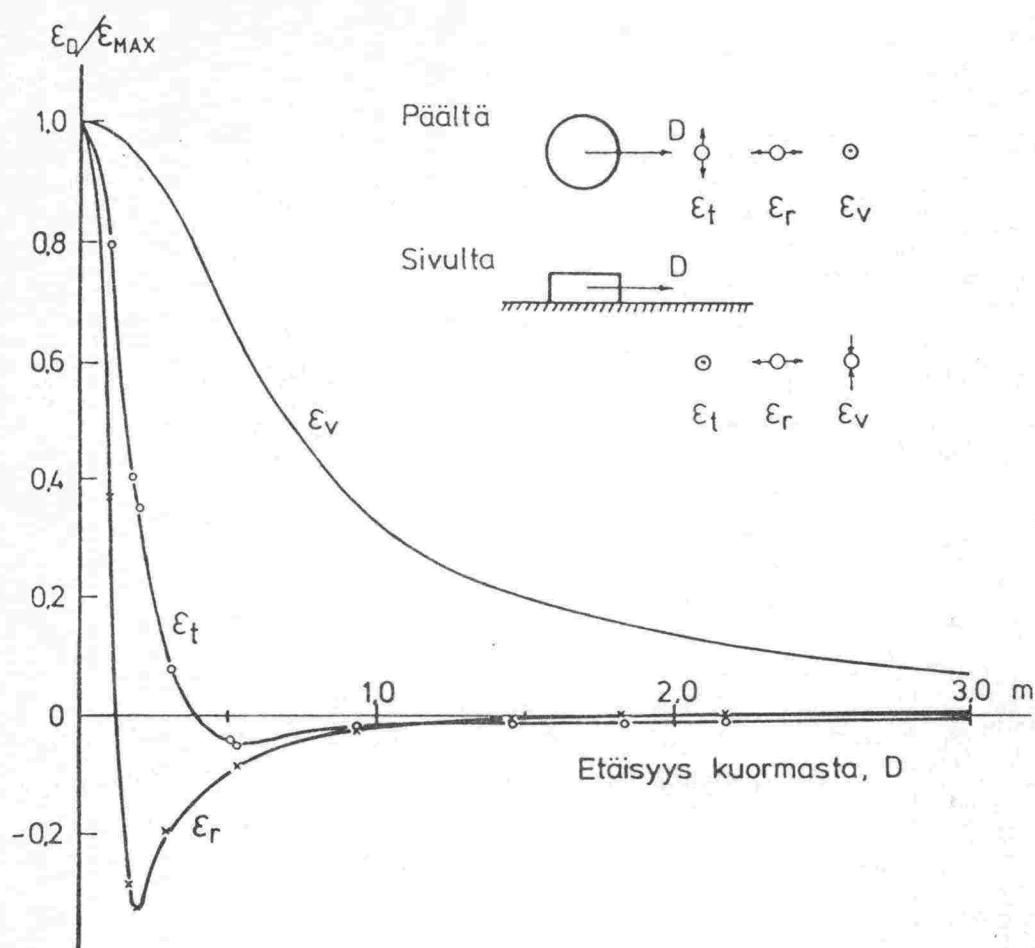
| Laskenta- piste ja syvyys | | ξ pääll. μS | ξ kerros μS | Kuormituskertaluku pääll. kerros | |
|------------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 11 | 0,09 / pä | 355 | | $2,44 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1150 | | $3,51 \cdot 10^5$ |
| | 0,11 / ka | | 1040 | | $5,25 \cdot 10^5$ |
| | 0,24 / ja | | 659 | | $3,26 \cdot 10^6$ |
| | 0,94 / pm | | 729 | | $2,18 \cdot 10^6$ |
| | 2,00 / pm | | 402 | | $2,35 \cdot 10^7$ |
| 13 | 0,09 / pä | 353 | | $2,52 \cdot 10^5$ | |
| | 0,94 / pm | | 771 | | $1,74 \cdot 10^6$ |
| | 2,00 / pm | | 434 | | $1,73 \cdot 10^7$ |
| 18 | 0,09 / pä | 61 | | $2,21 \cdot 10^9$ | |
| | 0,09 / ka | | 61 | | $4,44 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 613 | | $4,35 \cdot 10^6$ |
| | 2,00 / pm | | 457 | | $1,41 \cdot 10^7$ |
| 22 | 0,09 / pä | 84 | | $5,11 \cdot 10^8$ | |
| | 0,09 / ka | | 84 | | $1,23 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 700 | | $2,56 \cdot 10^6$ |
| | 2,00 / pm | | 454 | | $1,45 \cdot 10^7$ |
| 33 | 0,09 / pä | 354 | | $2,48 \cdot 10^5$ | |
| | 0,94 / pm | | 775 | | $1,70 \cdot 10^6$ |
| 91 | 0,09 / pä | 361 | | $2,22 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1230 | | $2,69 \cdot 10^5$ |
| | 0,11 / ka | | 1120 | | $3,91 \cdot 10^5$ |
| | 0,94 / pm | | 352 | | $4,05 \cdot 10^7$ |
| | 2,00 / pm | | 155 | | $4,05 \cdot 10^7$ |

Tuloksista voidaan hieman yllättäen todeta, että kriittisin piste on nyt etuakselin pyörien alla päällysteen alareunassa. Tosin ero muihin pyöriin on hyvin pieni. Myös muissa rakennekerroksissa etuakseli osoittautuu rasittavimmaksi. Ainoastaan pohjamaan osalta telin aiheuttama rasitus on suurempi kuin etuakselin pyörän. Voidaan siis todeta paripyörien ja telin jakavan kuorman päällysteen kannalta varsin hyvin. Pohjamaan rasituksia ne eivät pysty yhtä tehokkaasti tasoittamaan.

Kuorman ja laskentapisteen välisen etäisyyden merkitystä tutkittiin hieman tarkemmin. Käytetyn rakenteen ja kuormituksen osalta saatiin kuvan 31 mukaiset riippuvuudet. Päällysteen alareunassa vallitsevat vetomuodonmuutokset pienenevät varsin nopeasti siirryttäessä kuorman keskipisteestä. Säteen suuntainen muodonmuutos vaihtuu puristusmuodonmuutokseksi kuormituspinnan reunalla, tangentinsuuntainen noin 40 cm päässä. Pohjamaan yläreunan puristusmuodonmuutos sensijaan ainoastaan pienenee vieläpä melko hitaasti ollen 2,5 m etäisyydellä kuormasta noin 10 % maksimiarvostaan.

Kuvan perusteella voidaan tulkita edellä saatuja tuloksia. Esimerkiksi paripyörät kumoavat päällysteessä toistensa aiheuttamaa säteen suuntaista rasitusta aina, kun renkaiden välinen etäisyys on väliltä 0,12 - 2 m. Tangentin suuntainen rasitus alkaa kumoutua, kun renkaat ovat vähintään 40 cm etäisyydellä toisistaan (hyvin harvassa paripyörässä on näin suuri väli).

Pohjamaahan kaukanakin oleva kuorma aiheuttaa aina lisärasitusta. Jonkinlaisena käännepisteenä voitaisiin pitää 1,0...1,3 m, jota pienemmillä arvoilla vähäinenkin etäisyyden kasvattaminen vaikuttaa suhteellisen paljon. Siten 1,3 m lähempänä toisiaan olevat kuormituspisteet tulisi sijoittaa mahdollisimman kauaksi toisistaan. Luonollisesti tätä kauempanakin olevat kuormat kannattaa sijoittaa maksimietäisyydelle, mutta pieni etäisyyden muutos ei ole niin merkityksellinen kuin alle 1,3 m etäisyyksillä.

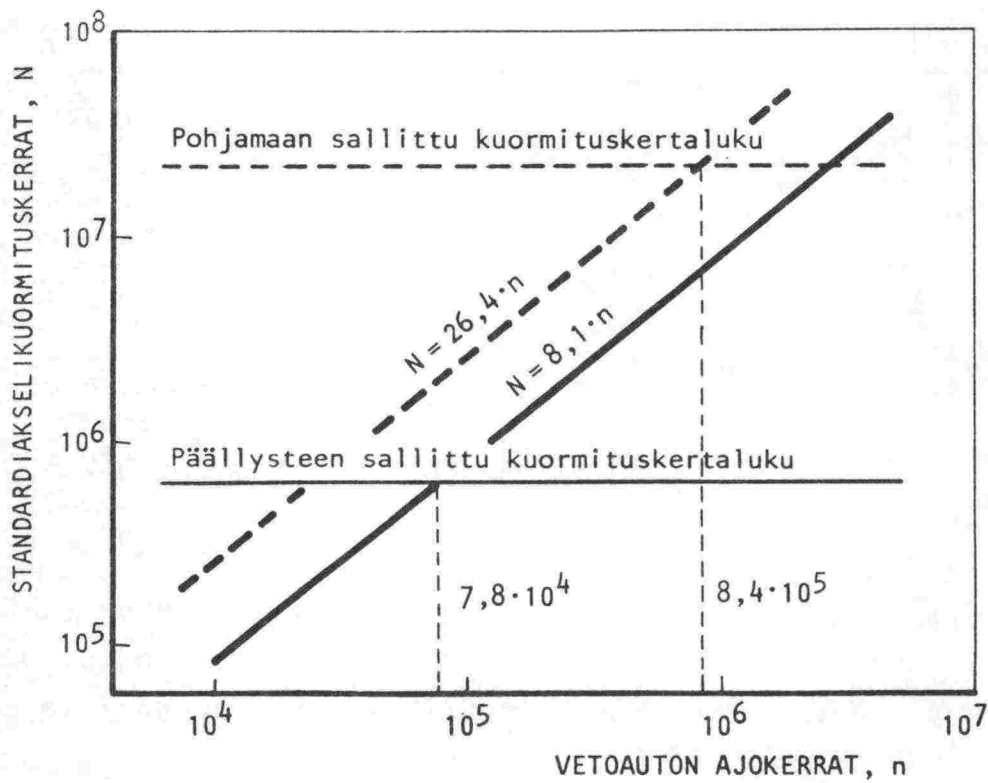


Kuva 31. Muodonmuutosarvojen suhde maksimiin etäisyyden funktiona (v = pohjamaan vertikaalinen, r = päällysteen radiaalinen, t = päällysteen tangentialinen)

Kaavoilla 9 ja 10 lasketut vetoauton akseliston vertailu- ja vastaavuusarvot on laskettu taulukkoon 7. Sen mukaan yksi vetoauton ajokerta vastaa päällystessä 8,1 standardiakselin ylitystä. Pohjamaassa yksi ajokerta merkitsee 26,4 standardiakselia. Koska pohjamaa kuitenkin kestää huomattavasti useamman standardiakselin ylityksen, muodostuvat kuvan 32 perusteella päällysteen rasitukset kriittisiksi. Tarkastelun mukaan tie kestää $7,8 \cdot 10^4$ vetoauton ajokertaa.

Taulukko 7. Vetoauton vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etuakseli | 2,9 | 0,6 | | |
| Etumm. telia | 2,6 | 13,0 | | |
| Takimm. telia | 2,6 | 12,8 | | |
| Akselisto | | | 8,1 | 26,4 |



Kuva 32.

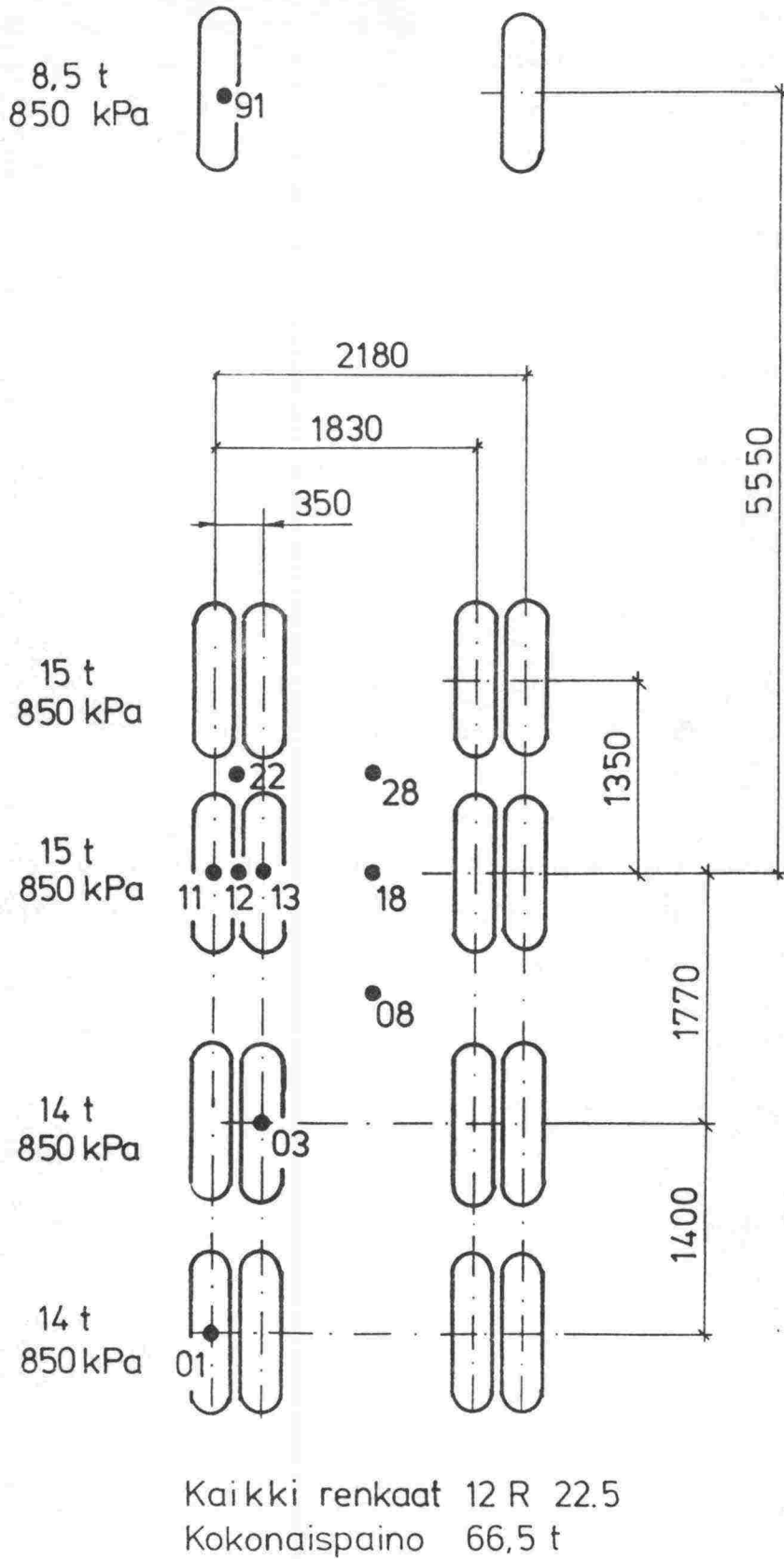
Vetoauton ajokertojen standardiakselikuormitus verrattuna sallittuihin kuormituskertalukuihin päällysteen ala- ja pohjamaan yläpinnassa.

4.333 Vetoauto ja välivaunu

Varsin usein lavetti liitetään vetoautoon rasitusta jakavan välivaunun avulla (kuva 33). Tällöin vetoauton ja välivaunun akselit sijoittuvat niin lähelle toisiaan, että ne rasittavat tietä yhtenäisesti. Asia varmistuu, kun tarkastellaan taulukossa 8 esitettyjä laskennan tuloksia. Edelleenkin kriittisin piste on etuakselin pyörän alla päällysteen alareunassa. Välivaunun akseleilla ei ole tässä pisteessä vaikutusta muodonmuutoksen arvoon. Välivaunun akseleiden kuormat eivät näytä vaikuttavan juuri lainkaan muihinkaan päällysteessä oleviin laskentapisteisiin. Sen sijaan vaikutus ilmenee heti siirryttäessä kantavaan kerrokseen. Päällysrakenteen yläosassa muodonmuutokset pienenevät sitä enemmän mitä lähemmäksi uusia kuormituspisteitä lisätään.

Päällysrakenteen alaosassa ja pohjamaassa vaikutus on päinvastainen. Syyt ilmiöön selvitettiin kohdassa 4.332.

Taulukon 8 arvoja käyttäen välivaunun akselien vertailuarvoiksi saadaan taulukossa 9 esitetyt. On syytä huomata, että laskentaa ei tehty pelkälle välivaunulle, vaan vetoauton ja välivaunun yhdistelmälle.



Kuva 33. Vetoauton ja välivaunun pyörästö laskentapisteineen (mittakaava 1:50).

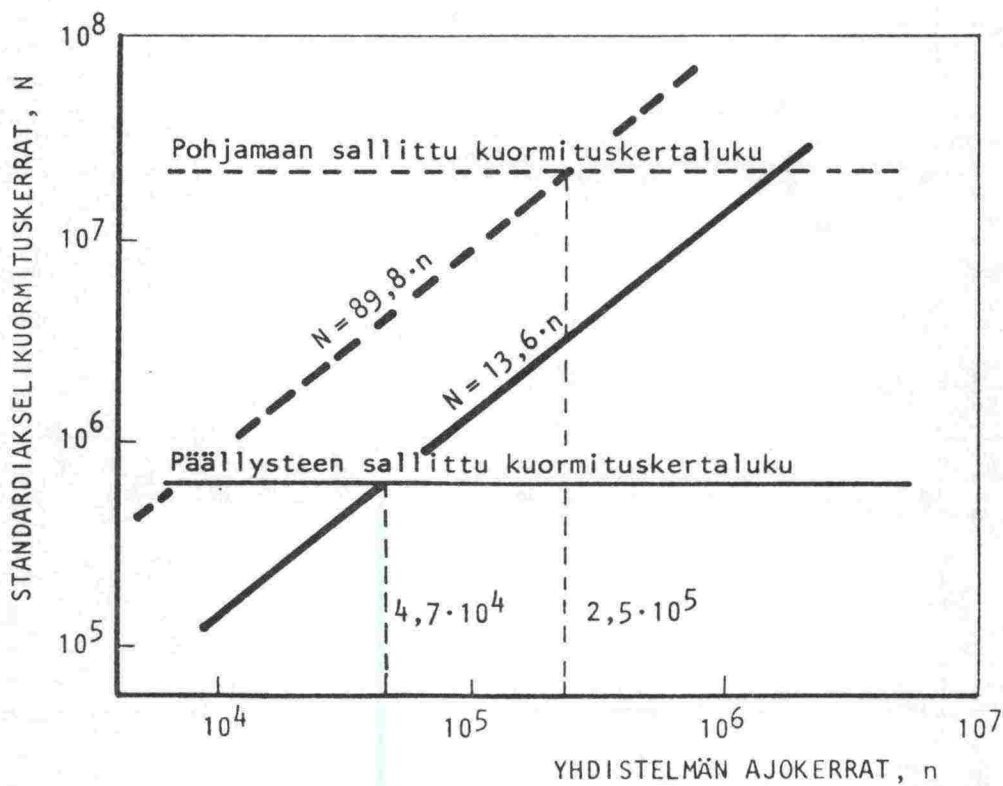
Taulukko 8. Vetoauton ja välivaunun yhteisesti aiheuttamat muodonmuutokset ja vastaavat sallitut kuormituskerrat.

| Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. | Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. | Kuormituskertaluku kerros |
|---|-------------------|----|------------------------------|---|-------------------|----|------------------------------|--|
| | µS | µS | | | µS | µS | | |
| 11 0,09 / pä 0,09 / ka 0,11 / ka 0,24 / ka 0,94 / pm 1,50 / pm 2,00 / pm 3,00 / pm | 358 | | 2,32·10 ⁵ | 22 0,09 / pä 0,94 / pm 1,50 / pm 2,00 / pm | 82 | | 5,73·10 ⁸ | 1,92·10 ⁶ 3,98·10 ⁶ 6,62·10 ⁶ |
| | 1144 | | | 28 0,09 / pä 0,94 / pm 1,50 / pm 2,00 / pm | 64 | | 1,79·10 ⁹ | 2,73·10 ⁶ 3,22·10 ⁶ 4,71·10 ⁶ |
| | 1030 | | | | | | | |
| | 647 | | | | | | | |
| | 820 | | | | | | | |
| 12 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 2,00 / pm | 298 | | 6,57·10 ⁵ | 91 0,09 / pä 0,94 / pm 2,00 / pm | 361 | | 2,22·10 ⁵ | 3,96·10 ⁷ 1,12·10 ⁹ |
| | 305 | | | | | | | |
| | 868 | | | | | | | |
| | 582 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 13 0,09 / pä 0,09 / ka 0,11 / ka 0,24 / ka 0,50 / ja 0,94 / pm 1,50 / pm 2,00 / pm | 354 | | 2,48·10 ⁵ | 01 0,09 / pä 0,94 / pm 2,00 / pm | 358 | | 2,33·10 ⁵ | 2,59·10 ⁶ 1,88·10 ⁷ |
| | 1140 | | | | | | | |
| | 1020 | | | | | | | |
| | 647 | | | | | | | |
| | 323 | | | | | | | |
| 18 0,09 / pä 0,94 / pm 1,50 / pm 2,00 / pm 3,00 / pm | 80 | | 6,44·10 ⁸ | 03 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 2,00 / pm | 353 | | 2,52·10 ⁵ | 3,68·10 ⁵ 9,12·10 ⁵ |
| | 737 | | | 08 0,09 / pä 0,94 / pm 2,00 / pm | 65 | | 1,67·10 ⁹ | 3,42·10 ⁶ 4,32·10 ⁶ |
| | 693 | | | | | | | |
| | 616 | | | | | | | |
| | 471 | | | | | | | |

Taulukko 9. Vetoauto-välivaunuyhdistelmän vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|-----------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Vetoauton etuakseli | 2,9 | 0,6 | | |
| etumm. telia | 2,6 | 21,0 | | |
| takimm. telia | 2,7 | 24,9 | | |
| akselisto | | | 8,2 | 46,5 |
| Välivaunun etummainen | 2,7 | 24,3 | | |
| takimmainen | 2,7 | 19,0 | | |
| akselisto | | | 5,4 | 43,3 |
| Koko akselisto | | | 13,6 | 89,8 |

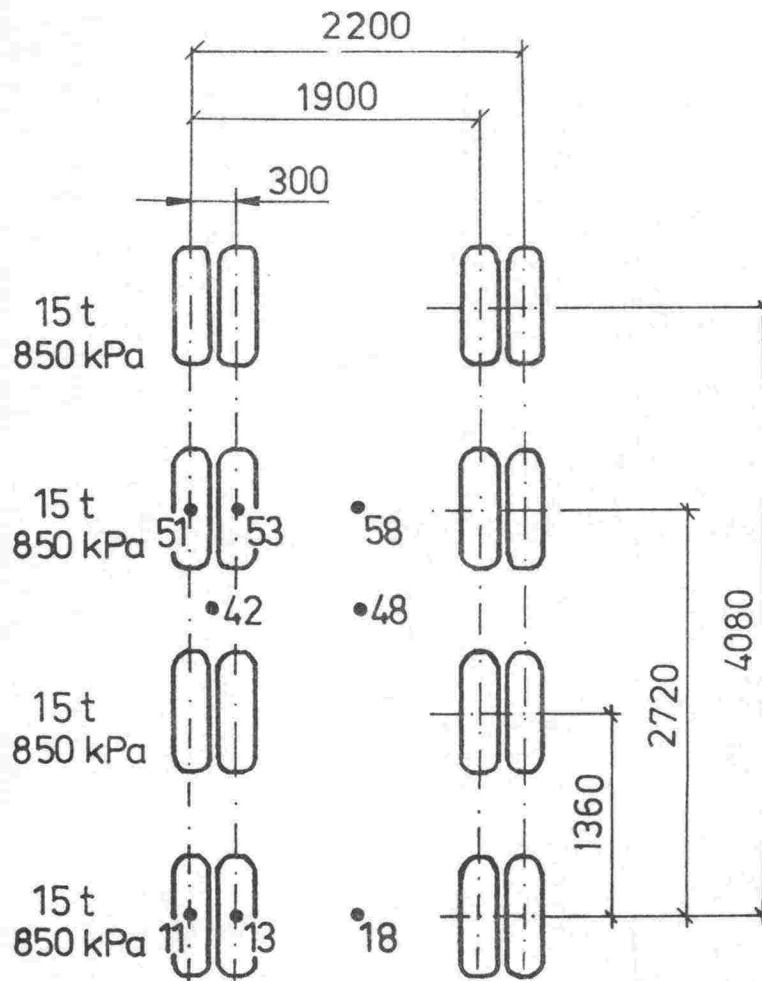
Kuvasta 34 päätellen kriittisin piste kestää $4,7 \cdot 10^4$ tarkasteltavan yhdistelmän ajokertaa.



Kuva 34. Vetoauton ja välivaunun aiheuttaman standardiakselikuormituksen vertailu sallittuihin kuormituskertalukuihin.

4.334 Neliakselinen lavetti (4 rengasta/akseli)

Tarkasteluissa käytetään kuvassa 35 esitettyä lavettirakennetta. Lavetin etummaisena ja vetoauton (tai välivaunun) tarkimmaisena akselin välinen etäisyys on yleensä noin 10 m. Tällöin lavetin pyörästöt käytännössä kuormittavat rakenteita itsenäisesti. Tässäkin oletetaan, etteivät ajoneuvon muut pyörät vaikuta lavetin alla oleviin laskentapisteisiin.



Kaikki renkaat 8.25×15

Kokonaispaino 60 t

Kuva 35. Neliakselisen, 16-renkaisen lavetin pyörästö ja laskentapisteet (mittakaava 1:50).

Taulukko 10. Lavetin aiheuttamat muodonmuutokset ja vastaavat standardiakselin sallitut kuormituskertamäärät.

| Laskenta- | | ϵ pääll. ϵ kerros | | Kuormituskertaluku | |
|-----------------|-----------|-------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| piste ja syvyys | | μs | μs | pääll. | kerros |
| 11 | 0,09 / pä | 383 | | $1,58 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1170 | | $3,28 \cdot 10^5$ |
| | 0,50 / ja | | 321 | | $5,79 \cdot 10^7$ |
| | 0,94 / pm | | 780 | | $1,66 \cdot 10^6$ |
| | 1,50 / pm | | 556 | | $6,43 \cdot 10^6$ |
| 13 | 0,09 / pä | 381 | | $1,63 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1170 | | $3,28 \cdot 10^5$ |
| | 0,94 / pm | | 817 | | $1,38 \cdot 10^6$ |
| 18 | 0,09 / pä | 67 | | $1,46 \cdot 10^9$ | |
| | 0,09 / ka | | 67 | | $3,05 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 635 | | $3,78 \cdot 10^6$ |
| | 1,50 / pm | | 600 | | $4,74 \cdot 10^6$ |
| 42 | 0,09 / pä | 67 | | $1,46 \cdot 10^9$ | |
| | 0,09 / ka | | 67 | | $3,05 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 725 | | $2,23 \cdot 10^6$ |
| 48 | 0,09 / pä | 63 | | $1,92 \cdot 10^9$ | |
| | 0,09 / ka | | 63 | | $3,90 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 701 | | $2,55 \cdot 10^6$ |
| 51 | 0,09 / pä | 373 | | $1,84 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1160 | | $3,39 \cdot 10^5$ |
| | 0,94 / pm | | 886 | | $9,97 \cdot 10^5$ |
| 53 | 0,09 / pä | 372 | | $1,87 \cdot 10^5$ | |
| | 0,09 / ka | | 1160 | | $3,39 \cdot 10^5$ |
| | 0,94 / pm | | 936 | | $8,00 \cdot 10^5$ |
| 58 | 0,09 / pä | 63 | | $1,92 \cdot 10^9$ | |
| | 0,09 / ka | | 63 | | $3,90 \cdot 10^{10}$ |
| | 0,94 / pm | | 713 | | $2,38 \cdot 10^6$ |

Päällysteen osalta pahimman rasituksen aiheuttavat etummaisen tai takimmaisen akselin uloimmat renkaat. Muodonmuutosarvo (383 μ s) on reilusti suurempi kuin vastaavassa pisteessä vetoautolla (355 μ s). Akselipainot ja rengaspaineet ovat molemmissa tapauksissa samat. Eroa on vain akseleiden ja siten renkaiden lukumäärässä. Teoreettisesti tulos on oikean suuntainen, sillä kuvan 31 mukaan yli 2 m etäisyydellä olevat kuormat aiheuttavat summautuvan rasituksen. Muodonmuutosarvojen ero on kuitenkin yllättävän suuri. Yleensä jopa samalla akselilla olevan pyörän vaikutus jätetään huomioon ottamatta rasitustarkasteluissa. BISAR-ohjelman laskentaperusteiden mukaan niin ei ole syytä tehdä.

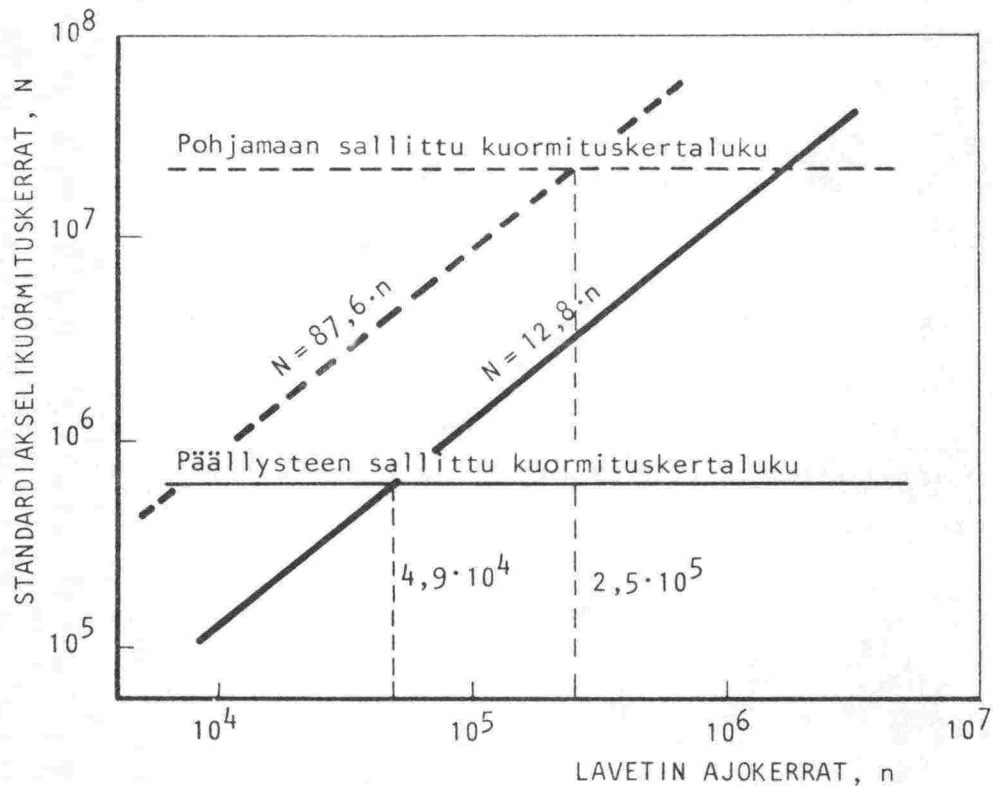
Pohjamaahan lavetti aiheuttaa noin 20 % suuremmat muodonmuutokset kuin vetoauton pyörästä. Kuormituskertalukuna ero merkitsee yli puolta pienempää arvoa. Päällysteessä sallitut kuormituskerrat ovat edelleenkin pohjamaan vastaavia pienemmät, mutta ero on nyt edellisiä tapauksia pienempi.

Taulukossa 11 esitetään lavetin akselien vertailu- ja vastaavuuskertoimet.

Taulukko 11. Neliakselisen (16-renkaisen) lavetin vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|--------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etummainen | 4,0 | 16,1 | | |
| Keskimmäinen | 3,4 | 27,7 | | |
| Keskimmäinen | 3,4 | 27,7 | | |
| Takimmainen | 4,0 | 16,1 | | |
| Akselisto | | | 12,8 | 87,6 |

Kuvasta 36 päätellen päällysteelle aiheutuu täsäkin tapauksessa vaarallisemmat rasitukset kuin pohjamaalle, vaikka yksi ajokerta merkitsee pohjamaalle lähes 7 kertaista standardiakselimäärää. Päällyste kestäisi laskelman mukaan $4,9 \cdot 10^4$ lavetin ylitystä.

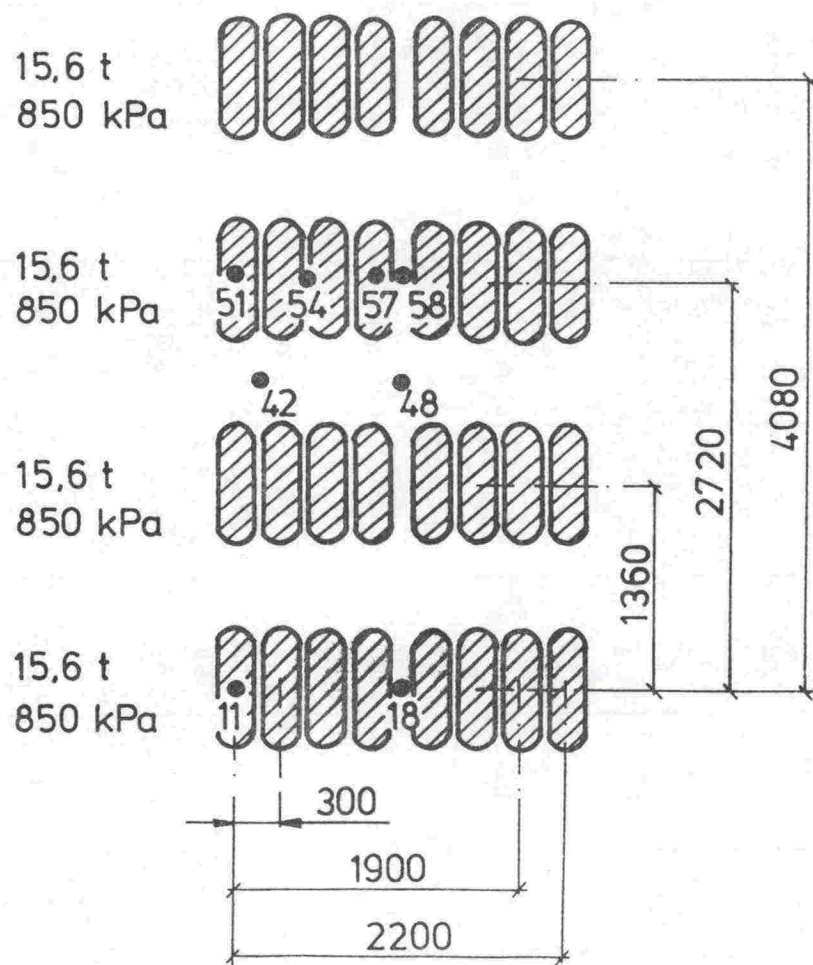


Kuva 36 Lavetin (16-renkaisen) ajokertojen standardiakselikuormitus verrattuna sallittuihin kuormituskertalukuihin.

4.335 Neliakselinen lavetti (8 rengasta/akseli)

Toinen tarkasteltava lavettirakenne on samaa tyyppiä kuin edelläoleva, mutta pyörien lukumäärä on kaksinkertainen. Lavettien keskinäisen vertailtavuuden säilyttämiseksi tämän lavettityypin akselipainoja on kasvatettu 0,6 t (lisäpyörien paino).

Kuvassa 37 esitetyn 32-renkaisen lavettipyörästäön päällysteseen kohdistamat maksimirasitukset (taulukko 12) ovat huomattavasti pienemmät kuin 16-renkaisen. Muodonmuutosarvojen suhteen ero on noin 40 %. Päällysteen (samoinkuin kantavan kerroksen) osalta arvot ovat jopa pienempiä kuin standardiakselilla. Lisäksi rasitus jakautuu melko tasaisesti koko pyörästäön alle, eikä suoranaista rasitushuippua ole havaittavissa.



Kaikki renkaat 8.25 x 15

Kokonaispaino 62,4 t

Kuva 37. 32-renkaisen lavetin pyörästäö ja laskentapisteet (mittakaava 1:50)

Taulukko 12. 32-renkaisen lavetin muodonmuutosarvot ja vastavat sallitut kuormituskertaluvut.

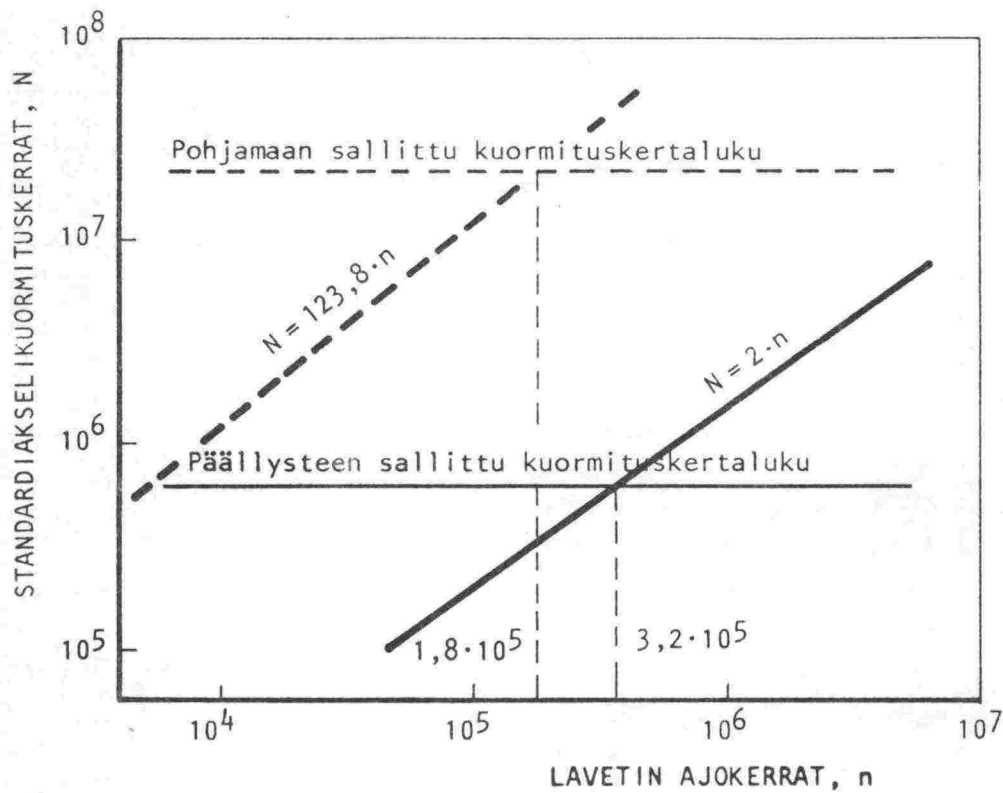
| Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. | kerros | Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. | kerros |
|------------------------------|-------------------|-----|------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|-----|------------------------------|----------------------|
| | µs | µs | | | | µs | µs | | |
| 11 | 0,09 / pä | 276 | 1,01·10 ⁶ | 1,45·10 ⁶ | 51 | 0,09 / pä | 260 | 1,41·10 ⁶ | 1,55·10 ⁶ |
| | 0,09 / ka | | | | | 0,09 / ka | | | |
| | 0,94 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 1,50 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 2,50 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| 18 | 0,09 / pä | 227 | 2,99·10 ⁶ | 2,31·10 ⁸ | 54 | 0,09 / pä | 231 | 1,01·10 ⁶ | 6,16·10 ⁷ |
| | 0,09 / ka | | | | | 0,09 / ka | | | |
| | 0,94 / pm | | | | | 0,24 / ja | | | |
| | 1,50 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 2,50 / pm | | | | | 2,50 / pm | | | |
| 42 | 0,09 / pä | 83 | 5,41·10 ⁸ | 6,72·10 ⁶ | 57 | 0,09 / pä | 258 | 1,47·10 ⁶ | 1,79·10 ⁶ |
| | 0,09 / ka | | | | | 0,09 / ka | | | |
| | 0,24 / ja | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 0,94 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 1,50 / pm | | | | | 2,50 / pm | | | |
| 48 | 0,09 / pä | 107 | 1,57·10 ⁸ | 4,69·10 ⁹ | 58 | 0,09 / pä | 244 | 2,01·10 ⁶ | 1,73·10 ⁸ |
| | 0,09 / ka | | | | | 0,09 / ka | | | |
| | 0,94 / pm | | | | | 0,09 / ka | | | |
| | 1,50 / pm | | | | | 0,94 / pm | | | |
| | 2,50 / pm | | | | | 1,50 | | | |
| | | | | | | 2,50 | | | 2,57·10 ⁶ |

Kriittisimmät pisteet löytyvät pohjamaasta, jonne 8-renkainen akseli aiheuttaa paikoin jopa 25 % suuremmat muodonmuutokset kuin 4-renkainen akseli. Pohjamaan maksimi-arvot esiintyvät 8-renkaisella akseleiden keskivaiheilla, kun ne 4-renkaisella ovat renkaiden alla eli akseleiden 'päissä'. Käytännössä 8-renkainen rasittaa pahiten tien sellaista kohtaa, jota muu liikenne ei rasita juuri lainkaan. Koska tarkasteltavan kaltaiset akselistot ovat harvinaisia, katsottiin kaistan keskelle sijoittuvat rasitukset tien kannalta merkitsemättömiksi ja akseleiden vertailuarvot laskettiin uloimpien renkaiden alta (taulukko 13).

Taulukko 13. Neliakselisen (32-renkaisen) lavetin vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|--------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etummainen | 0,6 | 22,8 | | |
| Keskimmäinen | 0,4 | 39,1 | | |
| Keskimmäinen | 0,4 | 39,1 | | |
| Takimmainen | 0,6 | 22,8 | | |
| Akselisto | | | 2,0 | 123,8 |

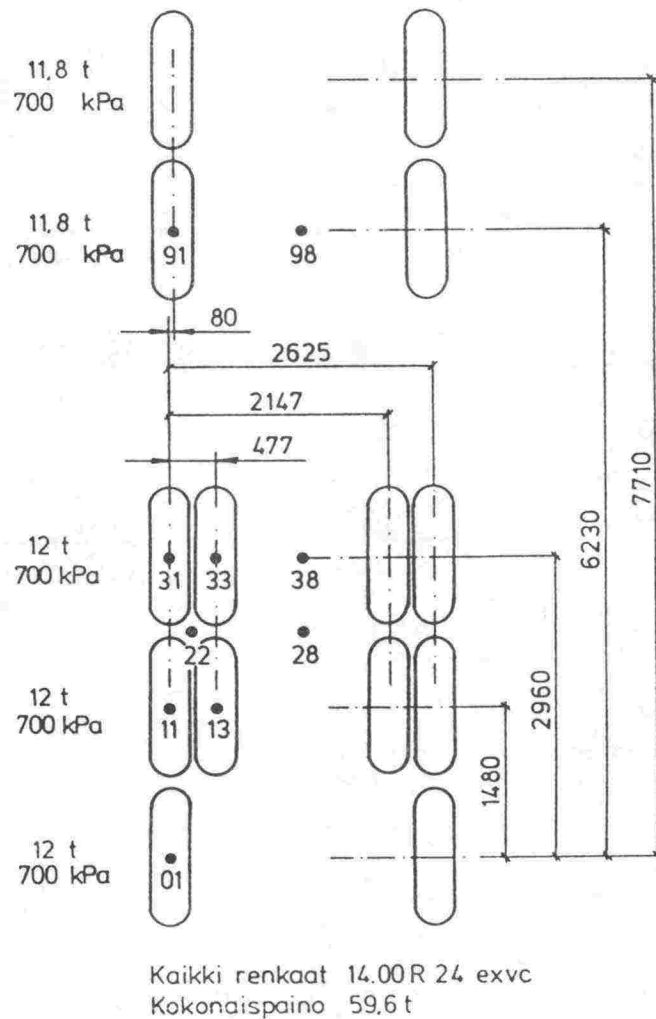
Kuvasta 38 voidaan havaita, että tällä lavettityypillä pohjamaasta tulee rakenteen kestävyys kannalta määräävä tekijä. Kuvan mukaan pohjamaa kestäisi $1,8 \cdot 10^5$ lavetin ylityskertaa.



Kuva 38. Lavetin (32-renkaisen) ajokertojen standardiakselikuormitus verrattuna sallittuihin kuormituskertalukuihin.

4.336 Ajoneuvonosturi I

Ajoneuvonostureista haluttiin selvittää niiden rasitusvaikutuksia suhteessa muihin ylliraskaisiin ajoneuvoihin sekä rakenteeltaan erilaisten ajoneuvonostureiden keskinäisiä rasitusvaikutuksia. Kuvassa 39 on esitetty keskiraskaan ajoneuvonosturin pyörästä. Laskennan tulokset on koottu taulukkoon 14.



Kuva 39. Ajoneuvonosturityypin I pyörästä (mittakaava 1:75).

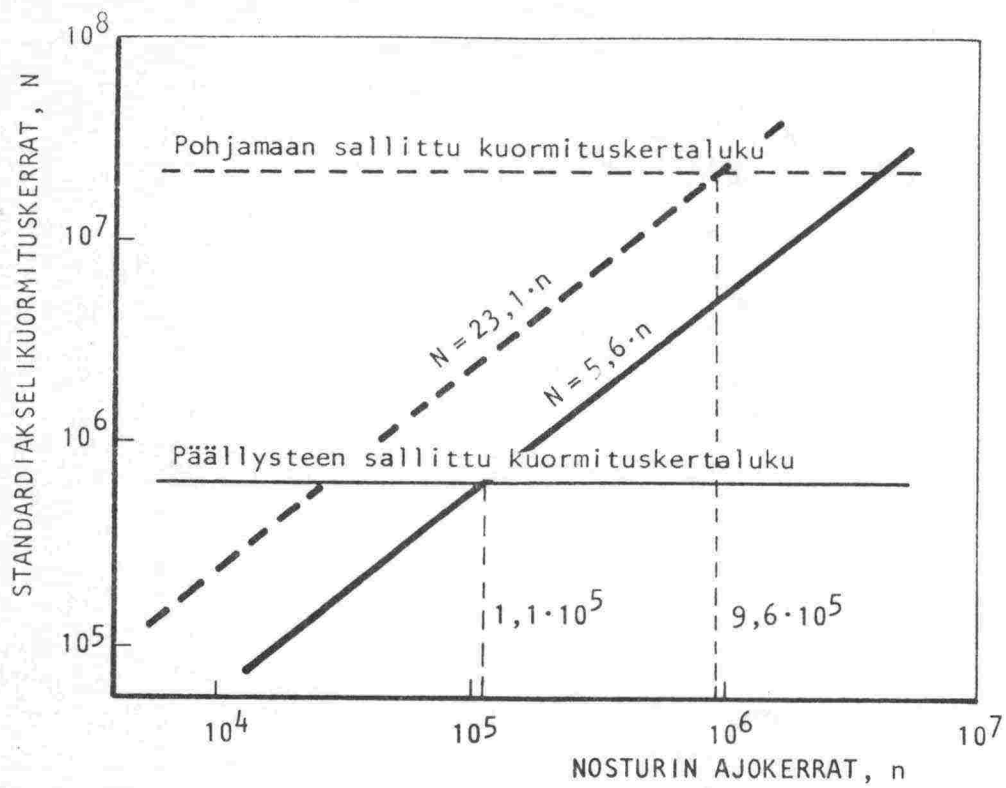
Taulukko 14. Ajoneuvonosturityypin I aiheuttamat muodonmuutokset ja niitä vastaavat standardiakselikuorituskerrat.

| Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. kerros | Laskenta- piste ja syvyys | E pääll. E kerros | | Kuormituskertaluku pääll. kerros |
|------------------------------|--|-----|--|------------------------------|---|-----|--|
| | µs | µs | | | µs | µs | |
| 11 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,24 / ja 0,94 / pm 1,50 / pm 2,50 / pm | 273 | 1,07·106 | 33 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 2,50 / pm | 283 | 8,78·105 |
| | | | | | | | 8,58·105 5,17·106 3,78·107 |
| 13 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,24 / ja 0,94 / pm 1,50 / pm 2,50 / pm | 268 | 1,19·106 | 38 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 2,50 / pm | 36 | 1,88 1010 |
| | | | | | | | 1,98 1011 1,99 107 4,82 107 |
| 22 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 2,50 / pm | 46 | 7 29·109 | 91 | 0,09 / pä 0,94 / pm 2,50 / pm | 321 | 4,32 105 |
| | | | | | | | 5,74 106 1,07 108 |
| 28 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,24 / ja 0,94 / pm 1,50 / pm 2,50 / pm | 39 | 1,39·1010 | 98 | 0,09 / pä 0,94 / pm 2,50 / pm | 30 | 3,6 1010 |
| | | | | | | | 6,57 107 7,49 107 |
| | | | | 01 | 0,09 / pä 0,09 / ka 0,94 / pm 1,50 / pm 2,50 / pm | 317 | 4,64 105 |
| | | | | | | | 2,60 105 5,07 106 2,86 107 1,03 108 |

Tämän ajoneuvonosturin tiehen kohdistamat rasituksen ovat muihin tarkasteltaviin ajoneuvotyyppeihin nähden varsin pienet. Erityisesti päällyste rasittuu varsin vähän. Kriittisimmänkin pisteen sallittu kuormituskertaluku on lähes sama kuin standardiakselilla. Tulos johtuu suurelta osin alhaisesta rangaspaineesta. Tästä syystä rasitukset pohjamaassa ovat standardiakselin vastaavia reilusti suuremmat. Taulukon 15 ja kuvan 40 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että päällysteelle tulevat rasitukset ovat selvästi vaarallisempia kuin pohjamaahan kohdistuvat. Ajokerroiksi muutettuna päällysteen sallittu kuormituskertaluku saavutetaan $1,1 \cdot 10^5$ ajokerralla.

Taulukko 15. Ajoneuvonosturityypin I pyörästön vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

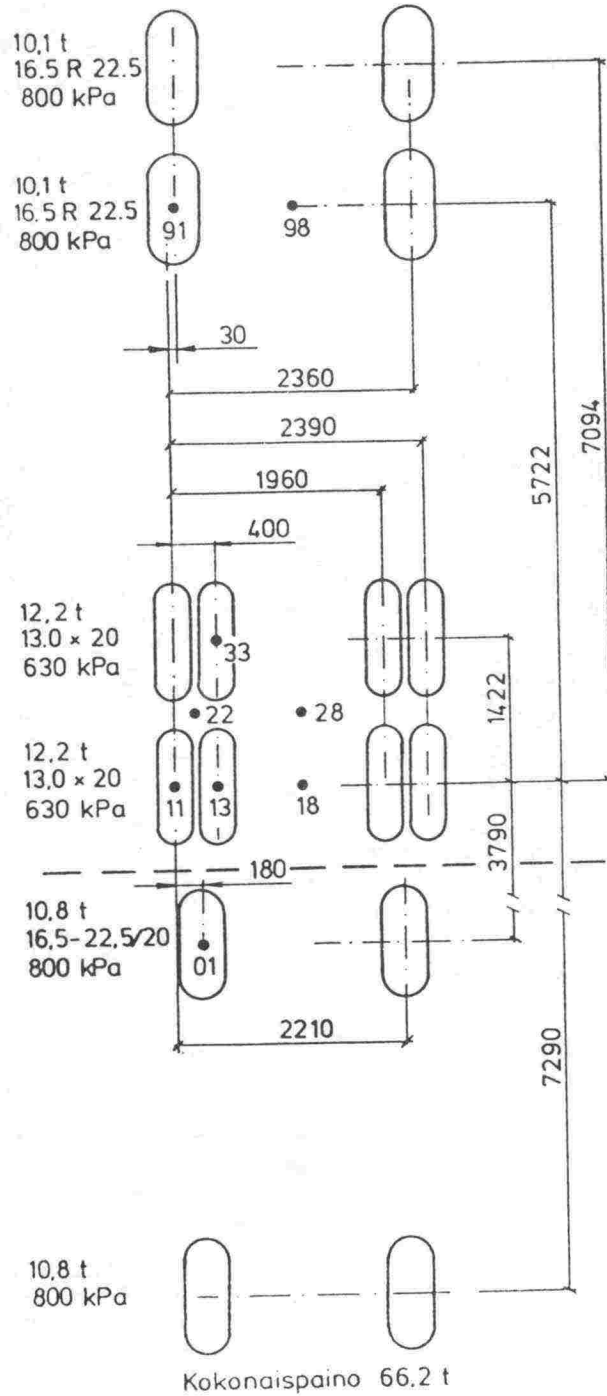
| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etuakseli | 1,4 | 3,5 | | |
| Etuakseli | 1,5 | 3,9 | | |
| Etumm. telia | 0,7 | 5,0 | | |
| Takimm. telia | 0,6 | 6,3 | | |
| Taka-akseli | 1,4 | 4,4 | | |
| Akselisto | | | 5,6 | 23,1 |



Kuva 40. Ajoneuvonosturityypin I ajokertojen standardiakselikuormitus verrattuna sallittuihin kuormituskertalukuihin.

4.337 Ajoneuvonosturi II

Toista ajoneuvonosturityyppiä tarkastelussa edusti kuvan 41 mukainen pyörästö. Nosturin puomi on tuettu erilliseen kaksiakseliseen perävaunuun.

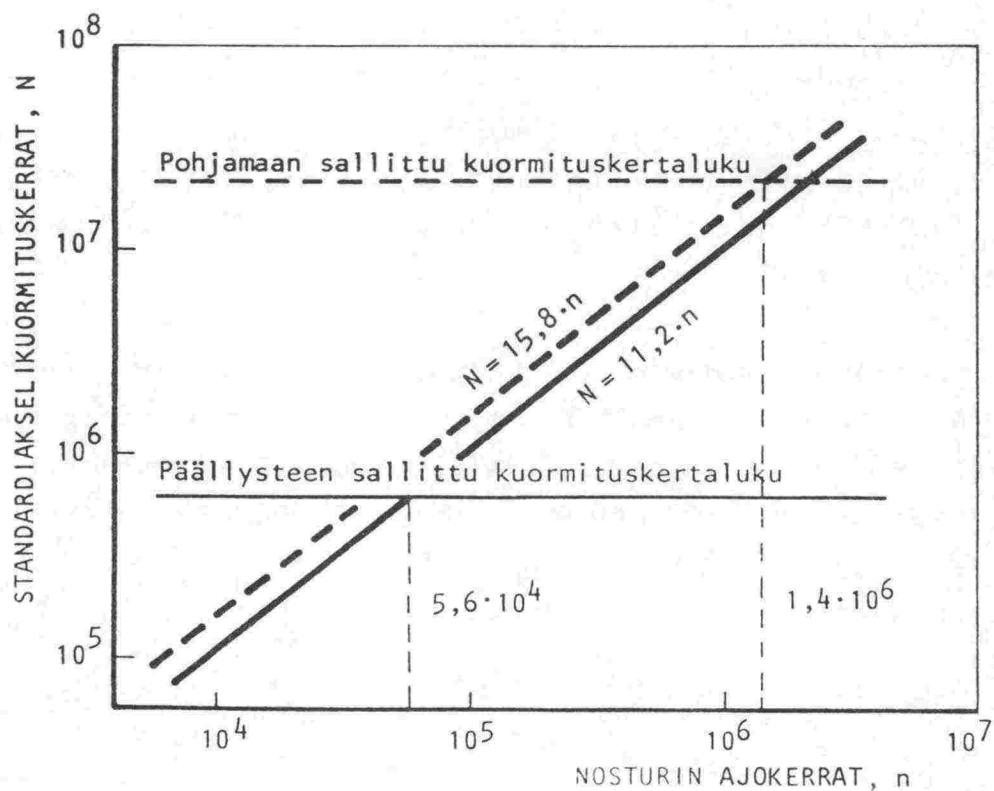


Kuva 41. Perävaunullisen ajoneuvonosturin pyörästö (mittakaava 1:75).

Taulukon 17 mukaan tämä ajoneuvonosturi aiheuttaa hiukan suuremmat rasitukset päällysteeseen kuin edellä käsitelty, mutta pohjamaahan pienemmät. Syy on jälleen rengaspaineissa ja kuormituspisteiden sijainnissa. Kuvan 42 mukaan päällysteen sallittu kuormituskertaluku saavutetaan $5,6 \cdot 10^4$ ajokerran jälkeen.

Taulukko 17. Perävaunullisen ajoneuvonosturin vertailuarvot ja vaaastaavuuskertoimet.

| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etuakseli 1 | 2,2 | 2,2 | | |
| Etuakseli 2 | 2,4 | 2,3 | | |
| Nosturin | | | | |
| taka-akseli 1 | 0,6 | 4,4 | | |
| taka-akseli 2 | 0,6 | 4,5 | | |
| Perävaunun | | | | |
| etuakseli | 2,8 | 1,3 | | |
| taka-akseli | 2,6 | 1,1 | | |
| Akselisto | | | 11,2 | 15,8 |



Kuva 42. Perävaunullisen ajoneuvonosturin ajokertojen standardiakselikuormitus verrattuna sallituihin kuormituskertalukuihin.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Seuraavassa tarkastelussa esitetään eräitä yleistyksiä, jotka pitävät täydellisesti paikkansa vain BISAR-ohjelman oletusten vallitessa ja tarkastelussa käytetyille tierakenteelle.

Käytetyllä laskentamenetelmällä saatiin standardiakselille hieman toisistaan poikkeavat sallitut kuormituskertaluvut päällysteessä ($6,33 \cdot 10^5$) ja pohjamaassa ($2,22 \cdot 10^7$). Kuten edellä todettiin ero johtuu pitkälti routamitoituksesta.

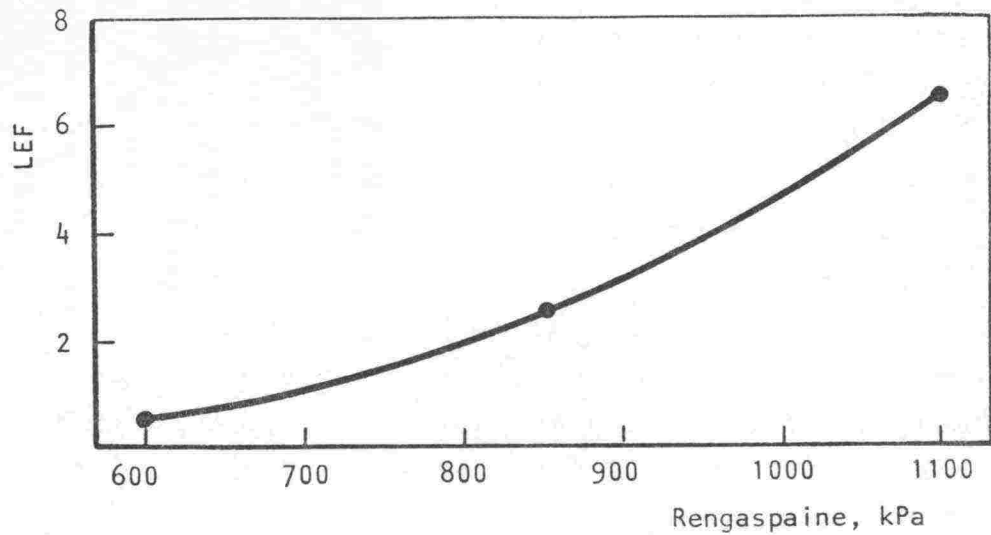
Laskentamenetelmästä johtuvat erot kompensoituvat ja ajoneuvoille saadut kriittiset ajokerrat päällysteessä ja pohjamaassa ovat vertailukelpoisia keskenään koska

- ajoneuvoille vastaavuuskertoimia laskettaessa ei pyörien pieniä sivusuuntaisia kulkupoikkeamia oteta huomioon (päällysteessä poikkeama merkitsee enemmän kuin pohjamaassa)
- ajoneuvojen kriittiset ajokerrat päällysteessä ja pohjamaassa ratkaistaan suhteessa kummankin sallittuihin kuormituskertalukuihin.

Yleisinä huomioina tuloksista voidaan todeta

- rengaspaineen merkittävä vaikutus päällysteen rasitukseen
- muusta akselistosta erillään oleva yksittäispyörin varustettu akseli aiheuttaa usein pahimmat rasitukset
- monipyöräisen ajoneuvon aiheuttamiin rasitukseen erityisesti pohjamaan mutta myös päällysteen yksittäisessä pisteessä vaikuttaa koko pyörästä yhteisesti (tarkasteluissa on syytä ottaa huomioon jopa 10 m etäisyydellä olevat pyörät).

Yliraskas erikoiskuljetuskalusto käyttää hyvin yleisesti 800...850 kPa rengaspaineita. Saatujen tulosten perusteella 850 kPa rengaspaineella (ja 3 t kuormalla) varustettu rengas rasittaa tietä yhtä paljon kuin 4,5 600 kPa rengasta (kuva 13). Nykyinen kehitys alhaisempiin rengaspaineisiin on siten tien kannalta erittäin myönteistä.



Kuva 43. Rengaspaineen vaikutus päällysteen alapinnassa laskettuun vastaavuuskertoimeen (laskettu vetoautovälivannuyhdistelmälle pisteessä 13, kuva 13).

Laskelmat korostivat yhden raskaan, muista erillään olevan renkaan (tai akselin) merkitystä. Tällaisen kuormituspisteen rasitus kohdistuu pahiten päällysteeseen. Kun myös korkea rengaspaine lisää rasituksia päällysteessä, yksittäispyörissä olisi edullista käyttää matalia rengaspaineita.

Jos akselilla on useita renkaita, ne kohdistavat rasitukset ennenmuuta pohjamaahan. Näin ollen esim. paripyörien rengaspaineilla ei ole yhtä suurta merkitystä kuin etuakselin pyörien paineella.

Jos yksittäisten renkaiden välinen etäisyys on 0,4 - 1,8 m, pienentävät renkaat toistensa rasituksia päällysteessä. Suomessa käytettävissä ylliraskaissa ajoneuvoissa paripyörien väli vaihtelee yleensä

- vetoautoissa 0,30 - 0,36
- perävaunuissa 0,40 - 0,50
- ajoneuvonostureissa 0,30 - 0,55

Jos välimatka on yli 1,8 m, päällysteessä säteen suuntainen vetojännitys on jälleen samansuuntainen kuin renkaan alla. Muutaman renkaan pyörästössä tällä ei ole merkitystä, sillä vetomuodonmuutokset ovat 2-3 m etäisyyksillä noin 0,4 - 0,6 % maksimimuodonmuutoksista. Jos pyörästössä on kymmenkunta rengasta, kannattaisi tätä seikkaa tarkastella. Esimerkiksi akseliväliden lyhentäminen tai raidevälin kaventaminen saattaisi olla perusteltua. Tämän tarkastelun perusteella kannattaisi 16-renkaisen lavetin akselit asentaa lähemmäksi toisiinsa, jolloin päällysteen rasitukset pienenisivät. Siltojen kannalta tällainen ei kuitenkaan ole mahdollista.

Pohjamaan osalta tilanne on pelkästään teoreettisesti ajatellen päinvastainen; mitä kauempana renkaat ovat toisistaan sitä parempi. Käytännössä tavallisilla rengasryhmillä (max 2 teliakselia/8 rengasta) päällysteen rasitukset muodostuvat kriittisiksi. Vasta kun renkaiden määrä kasvaa olennaisesti, on aiheellista kiinnittää huomiota pohjamaahan tuleviin rasituksiin. Esimerkiksi tarkastelussa mukana olleen 32-renkaisen lavetin pohjamaalle laskettua vastaavuuskerrointa saataisiin pienemmäksi kasvattamalla akseleiden välisiä etäisyyksiä.

Erilaisten pyörästöjen ja rengaspaineiden aiheuttamia toisistaan poikkeavia vaikutuksia tiehen voidaan käyttää tarkoitukSELLISESTI hyväksi. Jos tien ylimmät kerrokset ovat alimitoitettu, käytetään kalustoa, joka kohdistaa rasitukset alempiin kerroksiin. Myös sään aiheuttamat muutokset kerrosrakenteiden kantavuuksiin olisi mahdollista ottaa huomioon. Tällainen tilanne tulee kyseeseen esim. kesällä lämpimässä säässä, jolloin päällyste on altis deformatumaan. Päinvastainen tilanne, jolloin pohjamaa on heikosti kantava, esiintyy keväällä roudan sulamisen loppuvaiheessa.

Taulukkoon 18 on koottu laskennan ajoneuvokohtaiset tulokset. Taulukosta havaitaan mm, että

- kaikkein pahiten tietä rasittaa 16-pyöräinen lavetti
- pahiten päällystettä rasittaa 16-pyöräinen lavetti
- pahiten pohjamaata rasittaa 32-pyöräinen lavetti
- tarkastelluilla ajoneuvoilla päällyste on useimmiten kriittisin rakenteen osa.
- ajoneuvoyksiköistä muodostuu mm. yhdistelmä (vetoauto+välivaunu+lavetti I), joka kuormittaa päällystettä yhtä paljon kuin 26,4 standardiakselia ja pohjamaata yhtä paljon kuin 177,4 standardiakselia.

Taulukko 18. Laskelmissa käytettyjen 'ajoneuvojen' vastavuuskertoimet ja vastaavat kriittiset ylityskerrat.

| 'Ajoneuvo' | Päällyste | | Pohjamaa | |
|-----------------|-----------|----------------------|----------|----------------------|
| | VEF | kriittiset ajokerrat | VEF | kriittiset ajokerrat |
| Standardiakseli | 1,0 | $6,3 \cdot 10^5$ | 1,0 | $2,2 \cdot 10^7$ |
| Vetoauto | 8,1 | $7,8 \cdot 10^4$ | 26,4 | $8,4 \cdot 10^5$ |
| Välivaunu* | 5,4 | $1,2 \cdot 10^5$ | 43,3 | $5,1 \cdot 10^5$ |
| Lavetti I | 12,8 | $4,9 \cdot 10^4$ | 87,6 | $2,5 \cdot 10^5$ |
| Lavetti II | 2,0 | $3,2 \cdot 10^5$ | 123,8 | $1,8 \cdot 10^5$ |
| Nosturi I | 5,6 | $1,1 \cdot 10^5$ | 23,1 | $9,6 \cdot 10^5$ |
| Nosturi II | 11,2 | $5,6 \cdot 10^4$ | 15,8 | $1,4 \cdot 10^6$ |

* Vetoauto+välivaunuyhdistelmässä

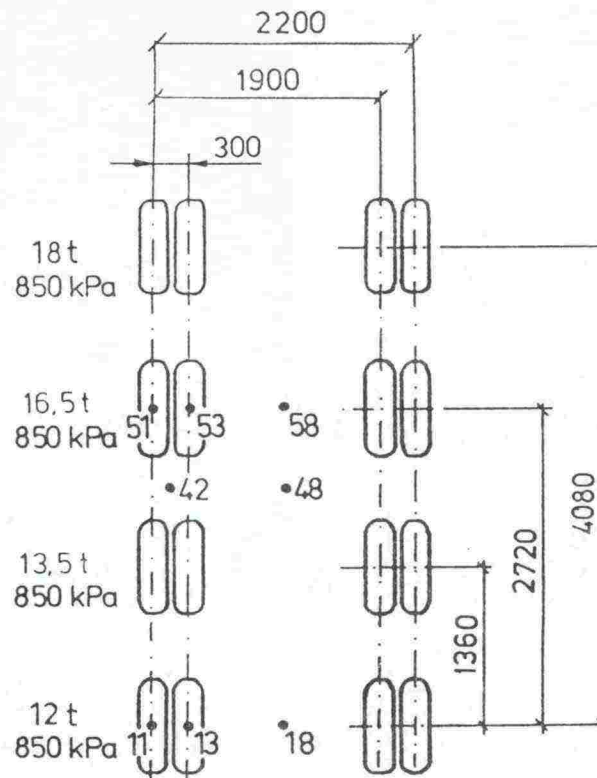
Vetoauton aiheuttamien rasitusten pienentämiseksi ei oikeastaan ole tehtävissä muuta kuin edellä mainitut rengaspaineiden tarkistukset. Samoin on laita lisättäessä autoon välivau- nu. Kasvattamalla välivauunun etäisyyttä telistä pienenisivät pohjamaalle tulevat rasitukset, mutta ainakaan tarkastellulla tierakenteella eivät pohjamaan rasitukset olleet määrääviä.

Perävaunujen rakenteen parannusehdotuksia esitettiin jo edellä. Perävaunujen vastaavuuskertoimet osoittivat hyvin kuinka päällysteelle vaaraton rakenne rasittaa selvästi enemmän pohjamaata ja päinvastoin. Ilmeisesti käytännön optimitilanne saavutettaisiin, jos molemmat vastaavuuskertoimet olisivat samaa suuruusluokkaa.

Ajoneuvonostureista tyyppi I osoittautui varsin 'päällysteystävälliseksi'. Kuten taulukosta 18 ilmenee käänteisyys pohjamaan rasitusten suhteen on tässäkin tapauksessa selvä. Tulokset osoittavat, että päällysteen rasituksia ei kannata pienentää, sillä vastaavasti pohjamaan rasitukset kasvaisivat entisestäänkin.

Nosturityyppi II rasittaa päällystettä ja pohjamaata melko tasaisesti. Rakenteilla, joilla päällysteen ja pohjamaan saallitut kuormituskerrat ovat lähellä toisiaan, nosturi kohdistaa aiheuttamansa rasitukset suhteellisen tasaisesti eri kerrokseen. Tarkasteltavaa tierakennetta ajatellen kannattaisi ehdottomasti pienentää päällysteen rasituksia esim. pienentämällä yksittäisakseleilla olevien pyörien rengaspaineita ja/tai kuormituksia.

Yleensä kuorma pyritään sijoittamaan siten, että kuormitus jakautuu sopivasti eri akseleiden kesken. Normaalisti sopivin tilanne on se, että kullekin akselille tulee sama kuorma. Seuraavassa tarkastelussa selvitetään, miten tällaisesta normaalista kuormitustilanteesta poikkeava kuormitus vaikuttaa vastaavuuskertoimeen. Tarkasteltavaksi valittiin kuvan 44 mukaisesti kuormitettu 16-pyöräinen lavetti. Sen kokonaispaino on sama kuin normaalitilanteessa, mutta osa takimmaisten akselien kuormasta on siirretty etuakseleille.



Kaikki renkaat 8.25 × 15
Kokonaispaino 60 t

Kuva 44. Epätasaisesti kuormitetun lavetin pyörästä kuormi-
neen (vrt. kuva 35).

Taulukoista 19 ja 20 nähdään, että vastaavuuskertoimet ovat kasvaneet niin päällysteen kuin pohjamaankin osalta. Päällysteessä kasvu on 13 % ja pohjamaassa noin 22 %. Muutos on suhteellisen pieni. On kuitenkin syytä huomata, että lavetti on erikoiskuljetusajoneuvon yksi yksikkö. Käytännön olosuhteissa todennäköisesti epätasainen kuormitus vallitsee myös muiden yksiköiden akselikuormissa ja siten nekin rasittavat tietä normaalitilannetta enemmän.

Taulukko 19. Epätasaisesti kuormitetun lavetin aiheuttamat muodonmuutokset ja vastaavat standardiakselin sallitut kuormituskertamäärät.

| Laskenta- piste ja syvyys | | ϵ pääll. μs | ϵ kerros μs | Kuormituskertaluku pääll. kerros | |
|------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 11 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 354 | 652 | $2,48 \cdot 10^5$ | $3,40 \cdot 10^6$ |
| 13 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 354 | 684 | $2,48 \cdot 10^5$ | $2,81 \cdot 10^6$ |
| 31 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 356 | 869 | $2,40 \cdot 10^5$ | $1,08 \cdot 10^6$ |
| 33 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 353 | 917 | $2,52 \cdot 10^5$ | $8,69 \cdot 10^5$ |
| 51 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 380 | 999 | $1,65 \cdot 10^5$ | $6,17 \cdot 10^5$ |
| 53 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 378 | 1050 | $1,71 \cdot 10^5$ | $5,06 \cdot 10^5$ |
| 71 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 405 | 906 | $1,15 \cdot 10^5$ | $9,12 \cdot 10^5$ |
| 73 | 0,09 / pä 0,94 / pm | 403 | 948 | $1,18 \cdot 10^5$ | $7,61 \cdot 10^5$ |

Taulukko 20. Epätasaisesti kuormitetun lavetin vertailuarvot ja vastaavuuskertoimet.

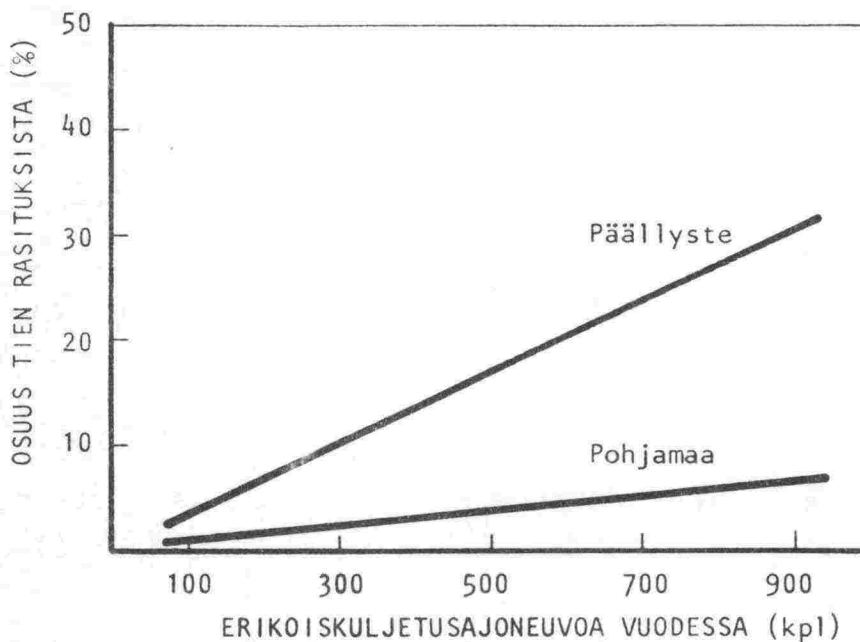
| Akseli | LEFpääll. | LEFpohjam. | VEFpääll. | VEFpohjam. |
|--------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Etummainen | 2,6 | 7,9 | | |
| Keskimmäinen | 2,6 | 25,5 | | |
| Keskimmäinen | 3,8 | 43,9 | | |
| Takimmainen | 5,5 | 29,1 | | |
| Akselisto | | | 14,5 | 106,4 |

Tutkimuksessa saatuja lukuarvoja ei voi suoraan verrata ulkomaisiin tutkimuksiin, koska niissä säännöllisesti käytetään 80 kN standardiakselia. Taulukossa 21 verrataan saatuja tuloksia lähteessä /32/ esitettyihin tuloksiin. Voidaan todeta vastaavuuskertoimien poikkeavan jonkinverran toisistaan. Eroja syntyy jo kuormitustilanteen asettamisessa. Tämän tutkimuksen kuormitukset valittiin täysin käytännön tilanteita vastaaviksi. Lisäksi tässä tutkimuksessa käytettyyn menetelmään sisältyvät muut lähtöarvot (esim. tierakenne) on yksilöitävissä hyvin tarkasti. Valittuihin arvoihin päädyttiin huolellisen harkinnan perusteella. Vertailu osoittaa, että aikaisempi kuva erikoiskuljetusten merkityksestä on hieman virheellinen. Koska virheen suunta näyttäisi menevän eri ajoneuvojen osalta ristin, ei erikoiskuljetusten kokonaisvaikutuksesta teiden rasitukseen voi tehdä vertailua lähteeseen /32/ nähden.

Taulukko 21. Tässä tarkastelussa satujen vastaavuuskertoimien vertailu muissa tutkimuksissa esitettyihin

| Ajoneuvotyyppi (kts. taul. 1) | Kokonaispaino (kN) | Päällyste | | Pohjamaa |
|----------------------------------|--------------------|------------|------|----------|
| | | Lähde /32/ | Tämä | Tämä |
| A (3) | 1265 | 12,1 | 15,5 | 193,5 |
| A (4) | 600 | 14,3 | 5,6 | 23,1 |
| A (6) | 660 | 10,0 | 11,2 | 15,8 |
| Keskim. | | 12,1 | 10,8 | 77,5 |

Kuvassa 45 on esitetty arvio erikoiskuljetusajoneuvojen osuudesta teiden rasitukseen tämän tutkimuksen perusteella. Tarkastelussa olleiden ajoneuvojen vastaavuuskerrointen edustavuutta ei käytettävissä olevien tietojen perustella voi arvioida. Tästä syystä kuvaa 45 on pidettävä vain suuntaa antavana.



Kuva 45. Arvio erikoiskuljetusten osuudesta tien rasitukseen, kun tien KVL on noin 1500. Yhden erikoiskuljetusajoneuvon vastaavuuskertoimena käytetään taulukon 21 keskimääräistä vastaavuuskerrointa (kuvassa ei ole otettu huomioon liikennemäärien kasvua).

Tätä tutkimusta on pidettävä eräänlaisena 'esitutkimuksena' raskaiden akselien vastaavuustarkasteluista. Tarkasteluissa rajoituttiin vain muutama ajoneuvotyyppiin ja ainoastaan yhteen näiden kuormitustapaukseen. Samoin tierakenteena käytettiin vain yhtä tyyppiä. Herkkyysanalyysillä tierakenteen suhteen olisi tarpeellista selvittää erilaisten rakenteiden vaikutukset rasitukseen.

Toisaalta olisi erittäin hyödyllistä tehdä erikoiskuljetuskalustolla käytännön rasitusmittauksia. Tie- ja liikennelaboratorio on jo muutaman vuoden ajan tehnyt tällaisia mittauksia normaalikalustolle. Ilmeisesti erikoiskaluston mukaanotto tuleviin mittauksiin olisi täysin mahdollista.

6 YHTEENVETO

Erikoiskuljetuskaluston kehitys on selvästi johtamassa kaluston erikoistumiseen. Normaaliin liikenteeseen käytettävien ajoneuvojen komponentit ja rakenneratkaisut ovat saaneet tehdä tilaa nimenomaan ylliraskaisiin erikoiskuljetuksiin suunnitelluille rakenteille. Tässä tutkimuksessa on esitetty muutamia selvästi havaittavia kehityssuuntia vetoautojen, perävaunujen, itsekulkevien raskaskuljetusajoneuvojen, ajoneuvonostureiden akselistorakenteiden ja renkaiden osalta. Kehitysnäkymiä on havainnollistettu kirjallisuuslähteistä lainatuilla kuvilla ja kaavioilla. Suomessa liikenteeseen rekisteröidyn ylliraskaan ajoneuvokaluston kehitystä on myös havainnollistettu vertaamalla ajoneuvorekisteriin merkityn kaluston määriä vuosina 1981 ja 1984.

Tutkimukseen sisältyy myös ylliraskaiden erikoiskuljetusten tarkistuspunnitusten analysointi. Tämä TVH:n suorittamiin punnitukseen perustuva osuus antaa selkeän kuvan käytännön olosuhteissa esiintyvistä todellisista kuormitustilanteista ja luvanmukaisten painojen ylitysten yleisyydestä.

Erikoiskuljetusten kuten muidenkin kuormitusten tiehen kohdistamia rasituksia voidaan tarkastella periaatteessa kahdella eri menetelmällä. Empiiriset menetelmät perustuvat kokemukseen ja yksinkertaisiin laskelmiin. Teoreettisilla eli analyttisillä malleilla lasketaan maan jännitysten ja muodonmuutosten arvoja kimmoteorian avulla.

Tässä tutkimuksessa käytettiin varsin luotettavaa analyttistä menetelmää, jossa tarkasteluperusteena käytetään muodonmuutoksia. Erilaisten kuljetuskalustojen päällysrakenteelle aiheuttamat muodonmuutokset laskettiin BISAR-monikerrosohjelmalla. Rakenteen kriittisille pisteille saatuja arvoja verrattiin standardiakselin aiheuttamiin muodonmuutoksiin, jolloin saatiin kullekin akselille ns. vertailuarvo. Näin määriteltä vertailuarvo ilmaisee standardiakselien lukumäärän, jota tarkasteltava akseli vastaa. Kunkin ajoneuvon vastavuuskerroin saatiin laskemalla ajoneuvon akseleiden vertailuarvot yhteen.

Vastaavuuskertoimet laskettiin erikseen päällysteelle ja pohjamaalle. Nämä saatiin keskenään vertailukelpoisiksi määrittämällä ajoneuvon kriittiset ajokerrat tarkasteltavassa kerroksessa eli se ajoneuvon ajokertojen lukumäärä, joka vastaa kerroksen sallittua kuormituskertalukua.

Tutkimuksessa käytetyllä tierakenteella kriittisin piste löytyi useimmiten päällysteestä. Tuloksista kävi kuitenkin ilmi, että kriittisen pisteen sijaintiin vaikuttaa selvästi kuormitustilanne (kaluston rakenne).

Laskennan perusteella ei tarkastellussa kalustossa ilmennyt tien kannalta pahoin virheellisiä rakennekonstruktioita. Eräiden rakennemuutosten avulla tiehen kohdistuvia rasituksia olisi mahdollisuus kuitenkin pienentää.

Tulokset osoittivat, että tierakenteiden kannalta erikoiskuljetuskaluston eräs ongelmallisin rakennekohta on yksittäisakseli. Näillä esiintyy suhteellisen suuria kuormia ja varsin korkeita rengaspaineita, jotka yhdessä aiheuttavat merkittäviä rasituksia päällysteelle.

Tuloksista havaittiin myös, että raskaan kaluston kaukanakin toisistaan olevat pyörät toimivat yhtenäisesti. Yhden pyörän vähäinen rasitusvaikutus laskentapisteeseen muodostuu merkitykselliseksi, kun tällaisia summautuvia rasitusvaikutuksia on useita. Erityisesti pohjamaahan kohdistuvia rasituksia tarkasteltaessa tämä tulisi ottaa huomioon.

Erilaiset kalustot kuormittavat tietä hieman toisistaan poiketen. Tätä ominaisuutta voitaisiin käyttää hyväksi valitsemalla käytettävälle tierakenteelle parhaiten soveltuva kuljetuskalusto. Menettely edellyttää, että kalustojen rasitusominaisuudet tunnetaan. Vaikka tutkimuksessa tarkasteltiin vain päällysrakennetta tietyissä olosuhteissa, voidaan tuloksista yleistää seuraavat päätelmät:

- teille, joilla alimmat kerrosrakenteet ovat heikkoja (esim.

huono pohjamaa) soveltuvat parhaiten nosturi-tyyppiset pyörästöt

- teille, joilla on heikko päällysrakenne (esim. ohut päällyste) soveltuvat parhaiten lavetti II-tyyppiset pyörästöt
- myös kun päällyste on lämmin, siirtyvät rasitukset enemmän pohjamaalle ja lavetti - II-tyyppiset rakenteet eivät ole suositeltavia. Myös päällysteessä voi tällöin tapahtua plastista deformaatiota, jota ei tässä tarkasteltu. Deformaation syntyyyn vaikuttaa ennenkaikkea yksittäinen pyörä
 - erityisesti pintapaino - eikä niinkään pyörästöt.

Tässä esitutkimuksessa rajoituttiin tarkastelemaan yhtä tierakennetta ja yhtä vallitsevaa olosuhdetta. Jatkotutkimuksessa voitaisiin tarkstella miten saadut tulokset muuttuisivat kevään (roudan sulamisen) ja kesän (vähemmän jäykkä päällyste) tilanteissa. Erikseen olisi ehkä syytä selvittää missä tapauksissa erikoiskuljetukset voivat aiheuttaa päällysteeseen plastisia deformaatioita.

Nämä teoreettiset laskelmat voitaisiin varmistaa tai ainakin kalibroida mittaamalla käytännön olosuhteissa muutaman tutkitun ajoneuvon tierakenteille aiheuttamat muodonmuutokset.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- 1 Bil nytt, Transport och Hantering n:o 1, 1979.
- 2 Brown S. F., Brunton J. M., Improvements to Pavement Subgrade Strain Criterion, Journal of Transportation Engineering Vol. 110 No. 6, American Society of Civil Engineers, 1984, s. 551-572.
- 3 Cepas A., Truck loadings on urban streets, Transportation the year 2000, Montreal September 1984, International Transport Congress, Montreal 1984, s. C35-C53.
- 4 Claesson A. J. M., ym., Asphalt Pavement Design, The Shell Method, Ann Arbor, Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol I, Michigan 1977, s. 39-74.
- 5 Currer E. W. H., Commercial traffic studies, TRRL report 628, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne 1974, 33 s.
- 6 De Jong D. L., ym., Computer Brogram Bisar, Shell Research B. V., Amsterdam 1973, 20 s.
- 7 Dodd R. F., Moving loads by air film. Charter. Mec. Eng. n:o 11, 1983.
- 8 Duncan M., Superloads on highway bridges in South Africa, Journal of the structural division ST 11, Vol. 103, American Society of Civil Engineers, 1977 s. 2165-2179.
- 9 Entwicklungen, Nutzfahrzeug n:o 11, 1984, s. 54.
- 10 Fay P., Strassenschonende Fahrwerke fuer Autokrane, Fördern und Heben n:o 8, 1975.

- 11 Goldhofer Fahrzeugwerk GmbH & Co, tuote-esite.
- 12 Hage R. J., Truck forecasts and pavement desing, TRR 889, Transportation Research Board, Washington 1982, s. 39-41.
- 13 Hoepke E., Fahrzeuge fuer Schwerlast - Transporte Teil 1: Tieflader, Plattformanhänger und Zugmaschinen. Fördern und Heben n:o 7/8, 1983.
- 14 Hubtransporter fuer webergrosse lasten. Fördern und Heben n:o 7/8, 1983.
- 15 Huhtala M., Palojärven - Olkkalan koetien päällysrakenteen teoreettiset laskelmat, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tiedonanto 49, Espoo 1979, 103 s.
- 16 Lechleitner K., Fahrzeugkrane - Stand & Entwicklung, Fördern und Heben n:o 7/8, 1983.
- 17 Lehtipuu E., Asfalttipäällystet, Rakentajan Kustannus Oy, Helsinki 1983, 412 s.
- 18 Leonard D. R., A traffic Loading and its use in the fatigue life assessment of highway bridges, TRRL report LR 252, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne 1972, 28 s.
- 19 Michael S., Trevor G., Elasto - Dynamic Analysis of Pavement Deflections, Journal of Transportation Engineering, VOL. 110 No. 6, American Society of Civil Engineers, 1984 s. 536-550.
- 20 Neles Oy Lokomo nosturitehdas, tuote-esitteet.

- 21 Parantainen J., Tien rakenteellinen mitoitus T 22, Teknillinen korkeakoulu, Espoo 1982, 153 s.
- 22 Paxson D. S., Glickert J. P., Value of overweighting to intercity truckers TRR 889, Transportation Research Board, Washington 1982, s. 33-37.
- 23 Pavements Design for Heavy Vehicles, Transportation Research Board TRR 949, Washington 1983, 65 s.
- 24 Pearson- Kirk, D., The effects truck operations have on road pavement performance in New South Wales, Australia. Highway Construction and Maintenance, The PTRC Summer Annual Meeting, Warwick 1979, s. 65-75.
- 25 Pertaining to transportation permits for the movement of overweight and oversize vehicles or loads, State of Colorado Department of Highways, 1984, 42 s.
- 26 Policy on the conveyance of abnormal loads, Technical recommendations for highways TRH 11, National Institute for Transport and Road Research, Pretoria 1981, 85 s.
- 27 Radovskij. B. S., Vlijanie nagruzok ot avtotransportnyx sredstv na dologovetsnost dorosnyx odesd (Ajoneuvojen painon vaikutus tien päällysrakenteen kestoikään), Avtomobil nye dorogi n:o 10, 1984, s. 6-8.
- 28 Rengasnormit, The Scandinavian tire and rim organization, Malmö, 1984.
- 29 Scala A. J., Potter D. W., A method to predict load equivalence factors for specialised vehicles, Research Report ARR No 144, Australian Road Research Board, 1981, 20 s.
- 30 Schwerzugmaschinen - Kraftpakete fuer Strasse und Gelände. Fördern und Heben n:o 7, 1984.

- 31 Shankland, A. C., Application of non - destructive testing techniques on concrete bridges, Highway Construction and Maintenance, The PTRC Summer Annual Meeting, Warwick 1979, s. 21-33.
- 32 Tie- ja vesirakennushallitus, Käyttöosasto, liikene-toimisto, Maa- ja vesi Oy. Erikoiskuljetukset- Selvi-tys ylliraskaista kuljetuksista yleisillä teillä v. 1980, TVH 741943, Helsinki 1982, 55 s.
- 33 Tie- ja vesirakennushallitus, Tiensuunnittelutoimisto, Tien rakenteen suunnittelu, Ohjeluonnos, Helsinki 1984, 84 s.
- 34 Tieliikennelait, Suomen Lakimiesliitto, Helsinki 1983, 276 s.
- 35 Transporting abnormally heavy loads on pavements, Highway Research Circular 156, Highway Research Board, Washington 1974, 17 s.
- 36 Uzan J., Wiseman G., Allowable Load on multiple-axle Trucks, TRR 725, Transportation Research Board, s. 33-37.
- 37 Walton M. ym., Truck Weight shifting methodology for predicting highway loads, Research Report 241-5, Center for Transportation Research, Austin 1983, 184 s.
- 38 Willy Scheuerle Fahrzeugfabrik GmbH & Co tuote-esit-teet.

LIITELUETTELO

Liitteet 1...6 ylliraskaiden kuljetusten tarkistuspunnitusten yhteenvedot

1. Kokonaispainot a) kaikki punnitustulokset
 b) kuormitustapaus M

2. Kokonaispainot a) kuormitustapaus V(3)
 b) kuormitustapaus P(4)

3. Kokonaispainot a) kuormitustapaus P(3)
 b) kuormitustapaus V(4)

4. Akselipainot a) kaikki punnitustulokset
 b) kuormitustapaus M

5. Akselipainot a) kuormitustapaus P(4)
 b) kuormitustapaus V(3)

6. Akselipainot a) kuormitustapaus P(3)
 b) kuormitustapaus V(4)

Liitteet 7...11 ajoneuvorekisteriin merkityn ylliraskaan erikoiskuljetuskaluston määrät.

7. Kalustomäärät kokonaispainoluokittain

8. Kalustomäärät telipainoluokittain

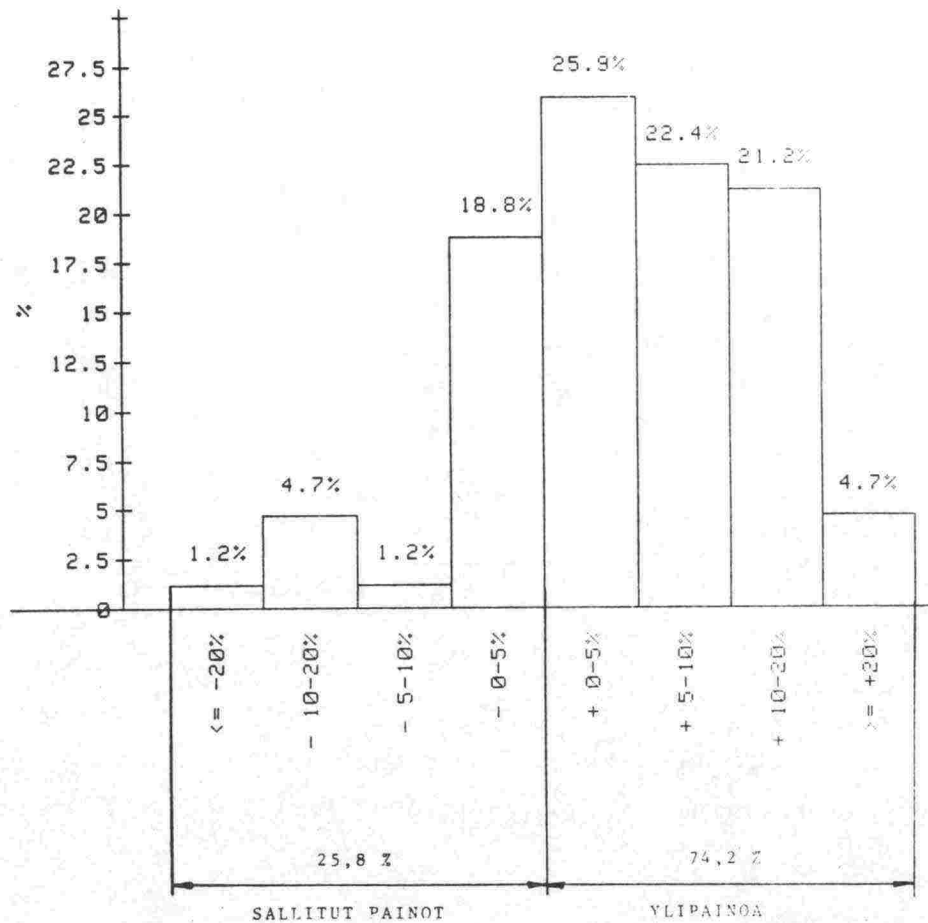
9. Kalustomäärät akselipainoluokittain

10. Kalustomäärät oman painon mukaan ryhmiteltynä

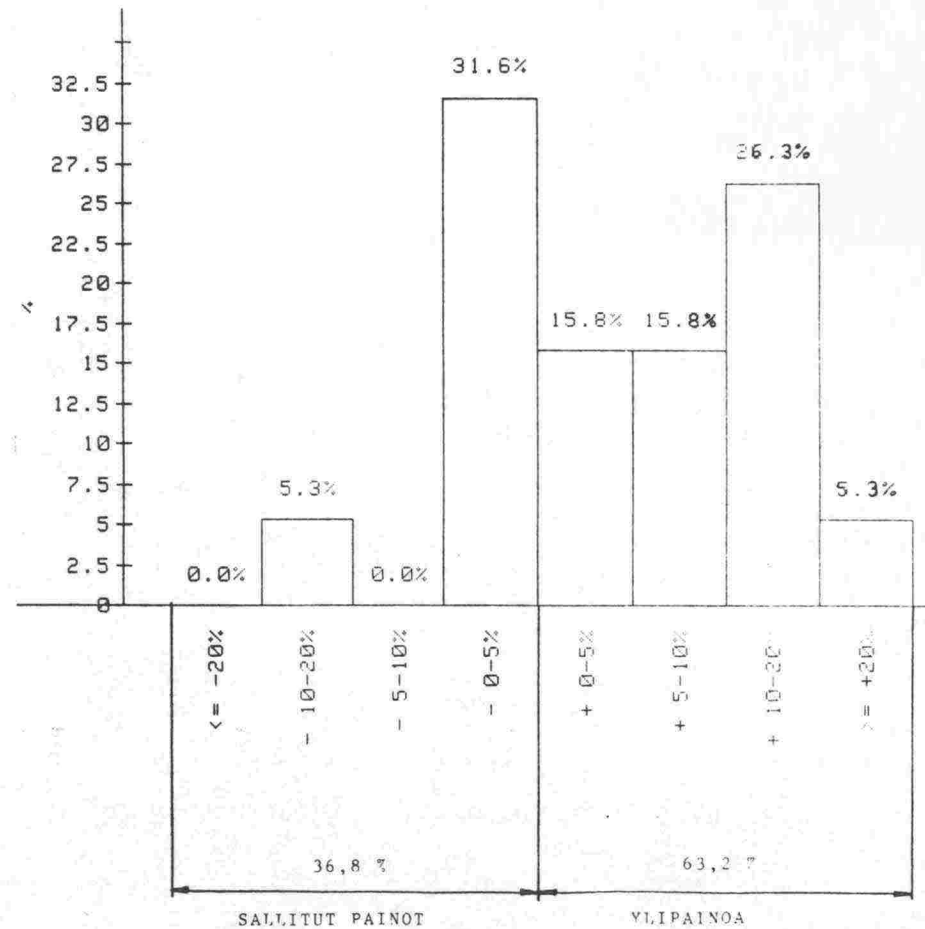
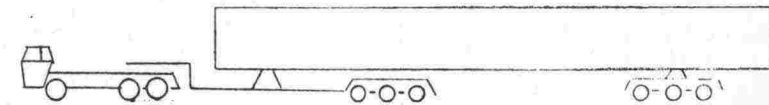
11. Kalustomäärät käyttöönottovuoden mukaan ryhmiteltynä

TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

a) Kokonaispainot, kaikki punnitukset
punnituskertoja 85 kpl

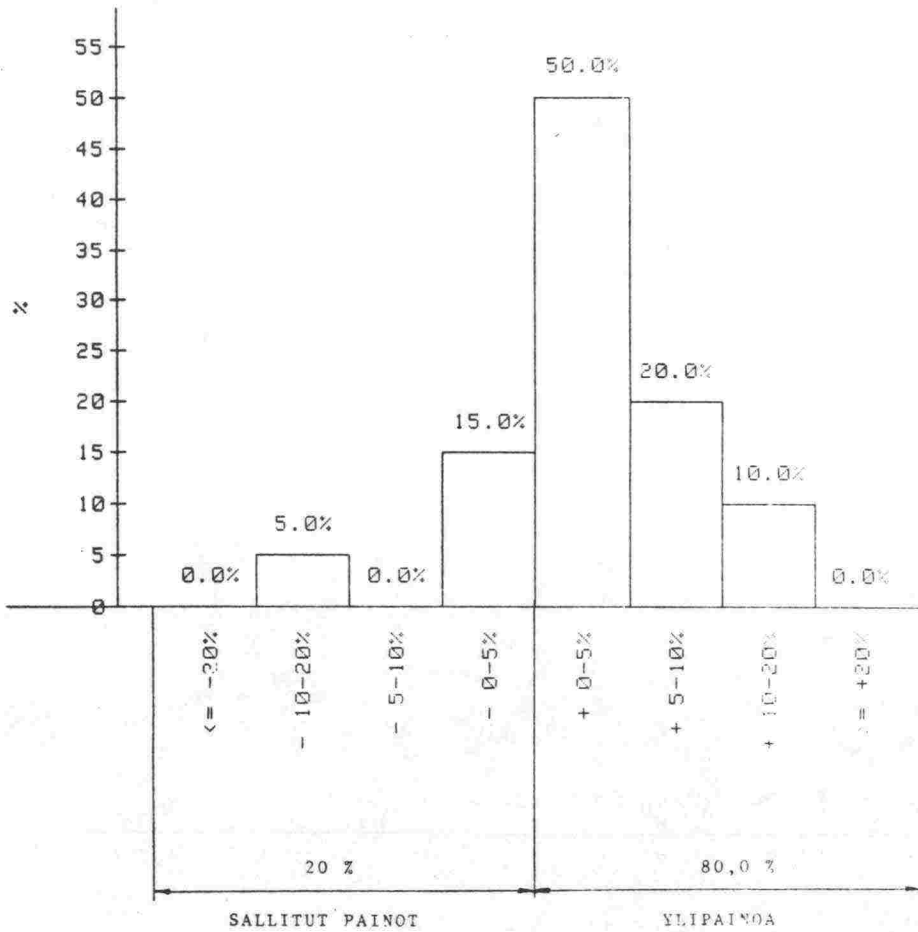
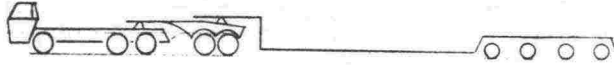


b) Kokonaispainot, kuormitustapaus M
punnituskertoja 19 kpl

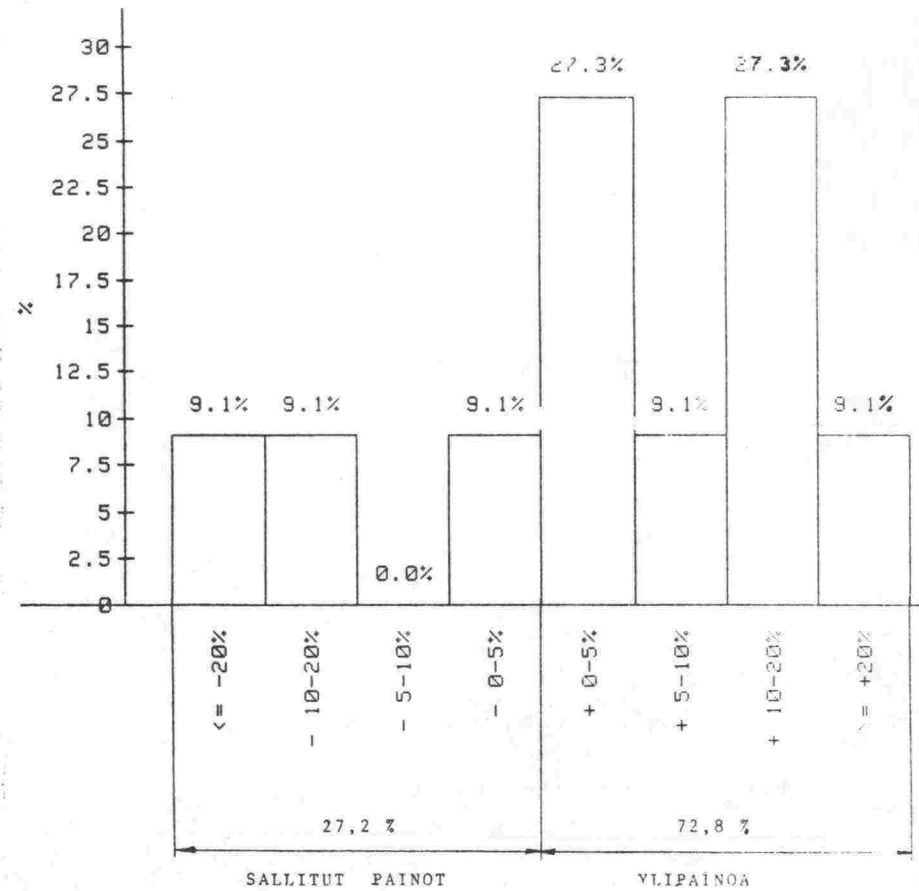
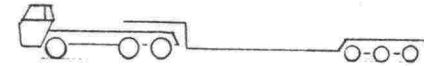


TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

a) Kokonaispainot, kuormitustapaus V(3)
punnituskertoja 20 kpl

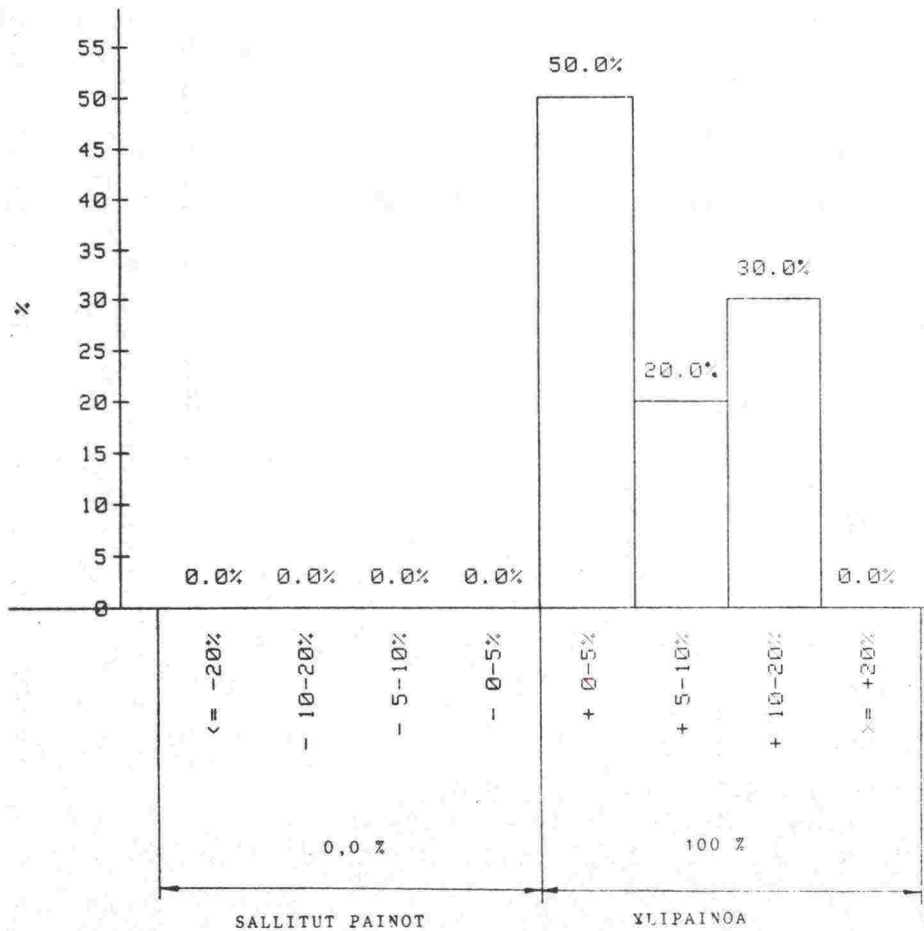
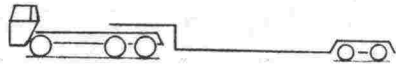


b) Kokonaispainot, kuormitustapaus P(4)
punnituskertoja 19 kpl

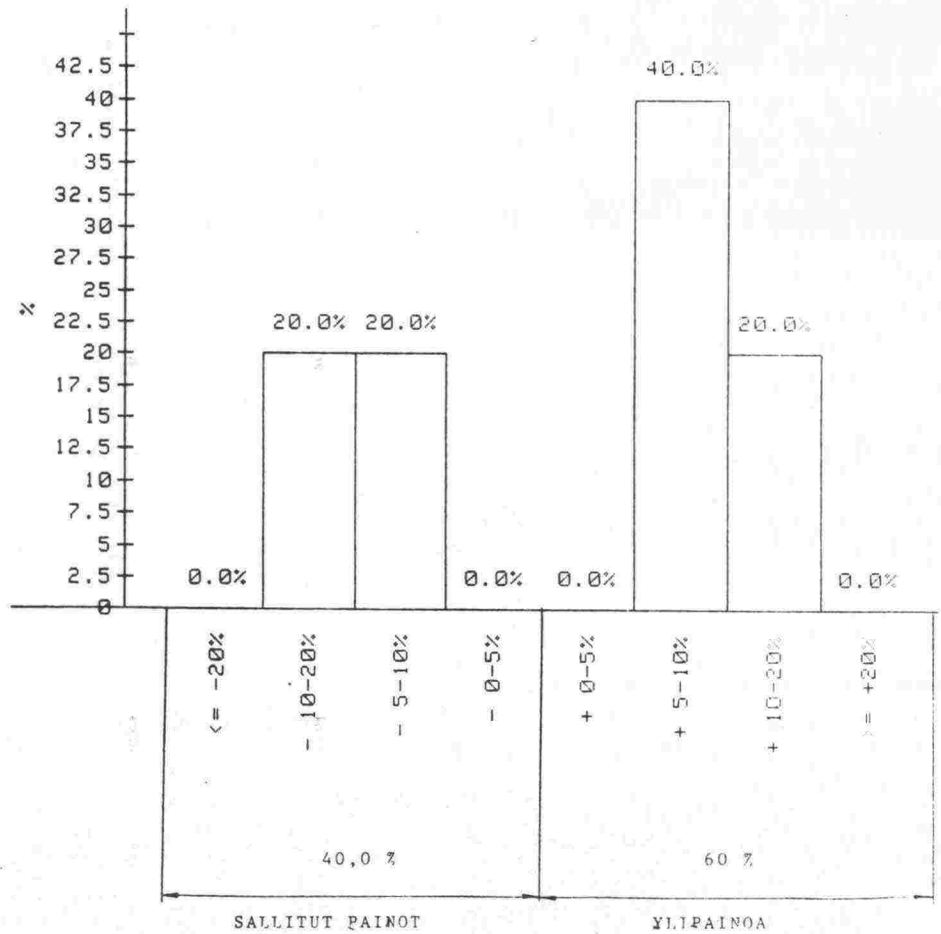


TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

a) Kokonaispainot, kuormitustapaus P(3)
punnituskertoja 6 kpl



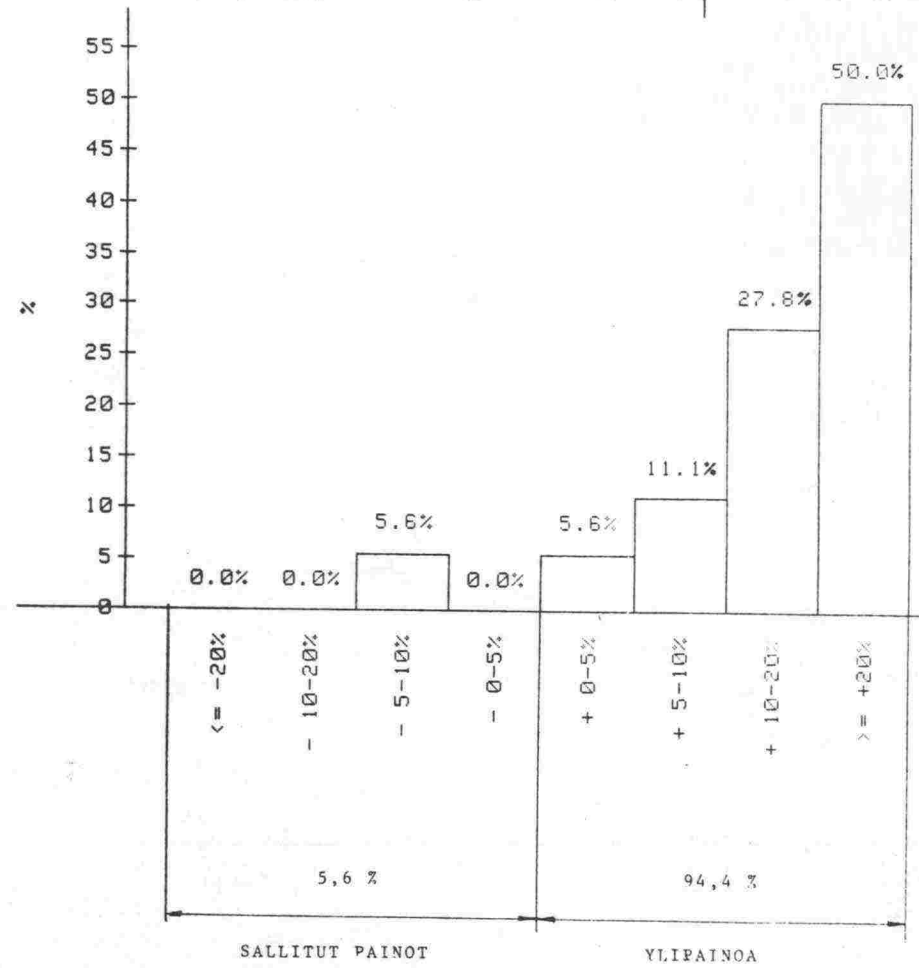
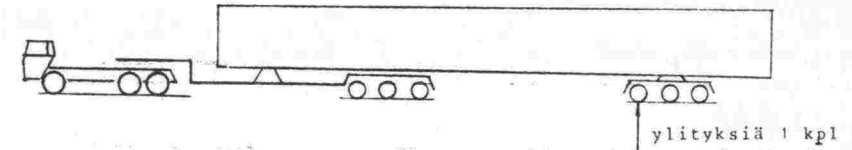
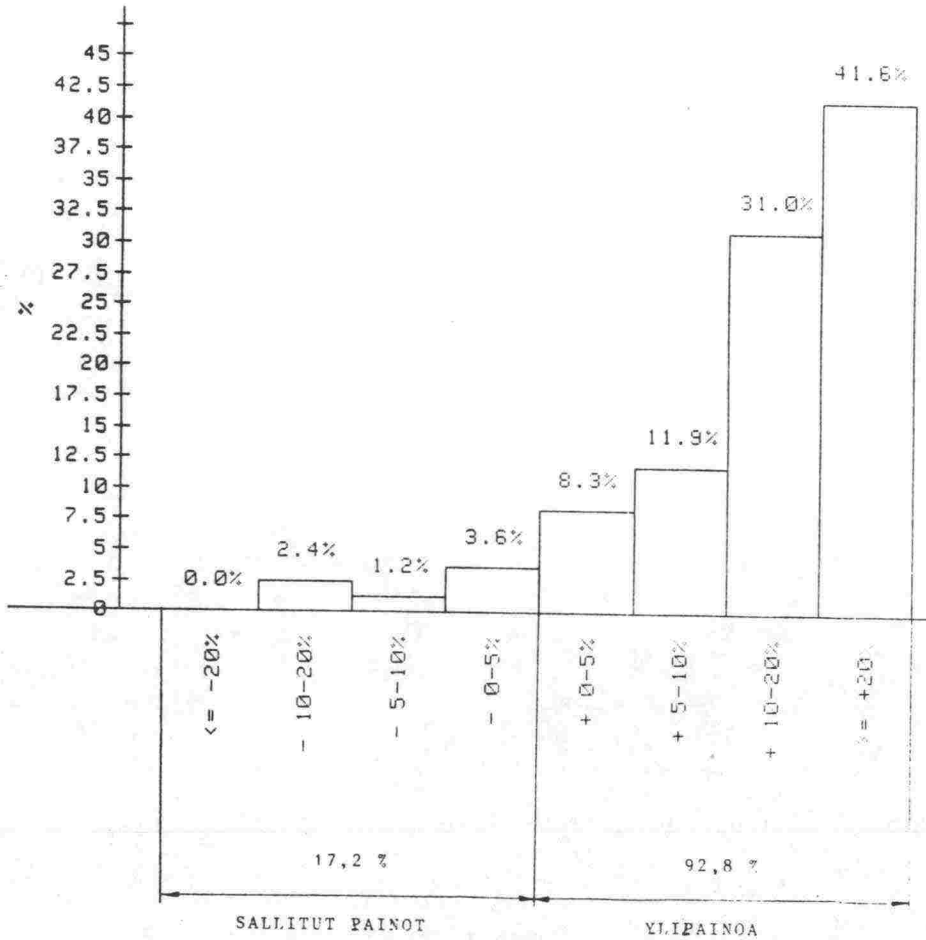
b) Kokonaispainot, kuormitustapaus V(4)
punnituskertoja 5 kpl



TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

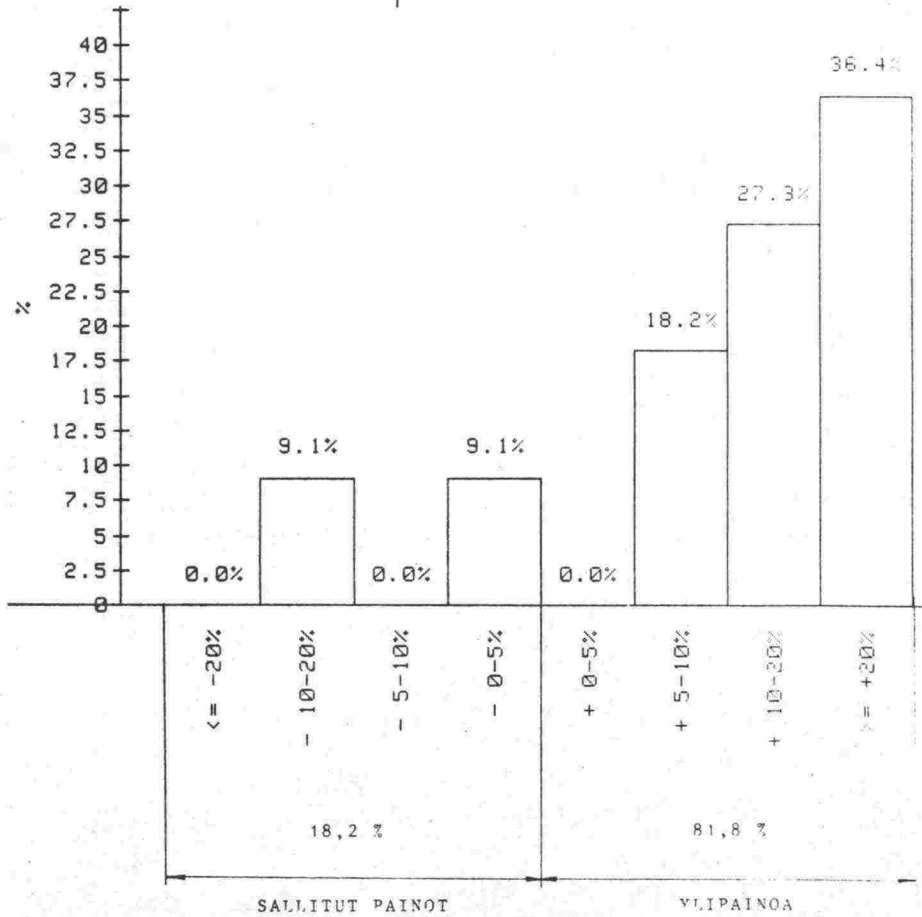
a) Akselipainot, kaikki punnitukset
punnituskertoja 85 kpl

b) Akselipainot, kuormitustapaus M
punnituskertoja 19 kpl

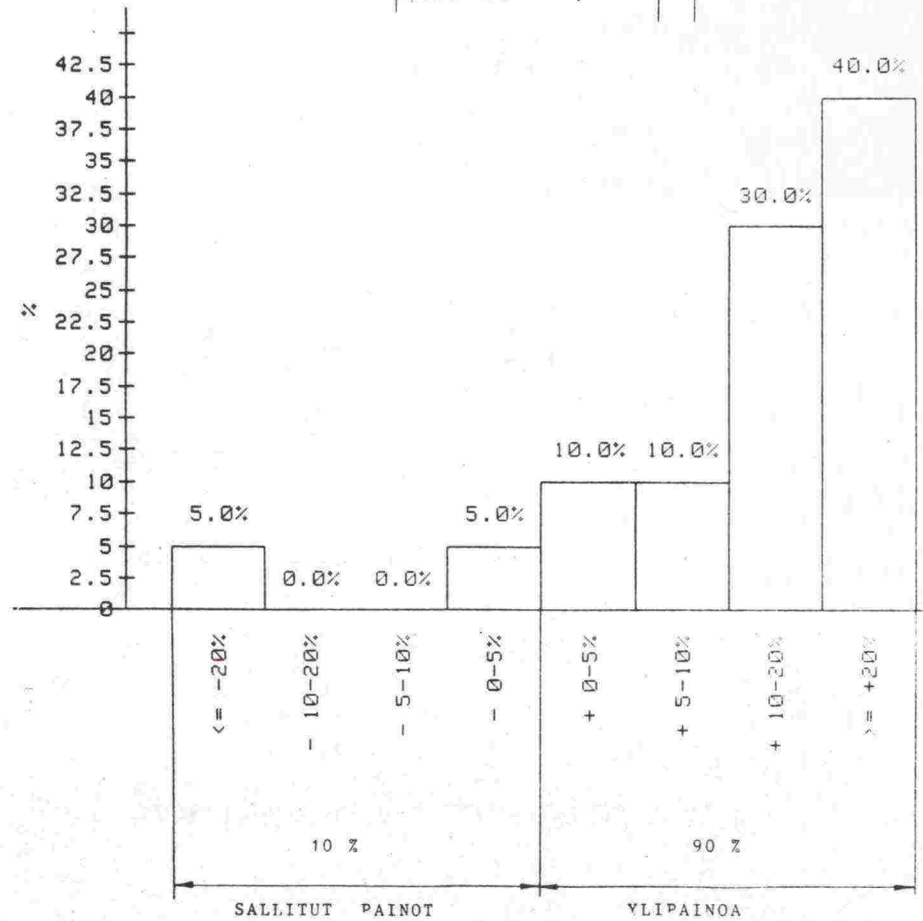


TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

a) Akselipainot, kuormitustapaus P(4)
punnituskertoja 11 kpl



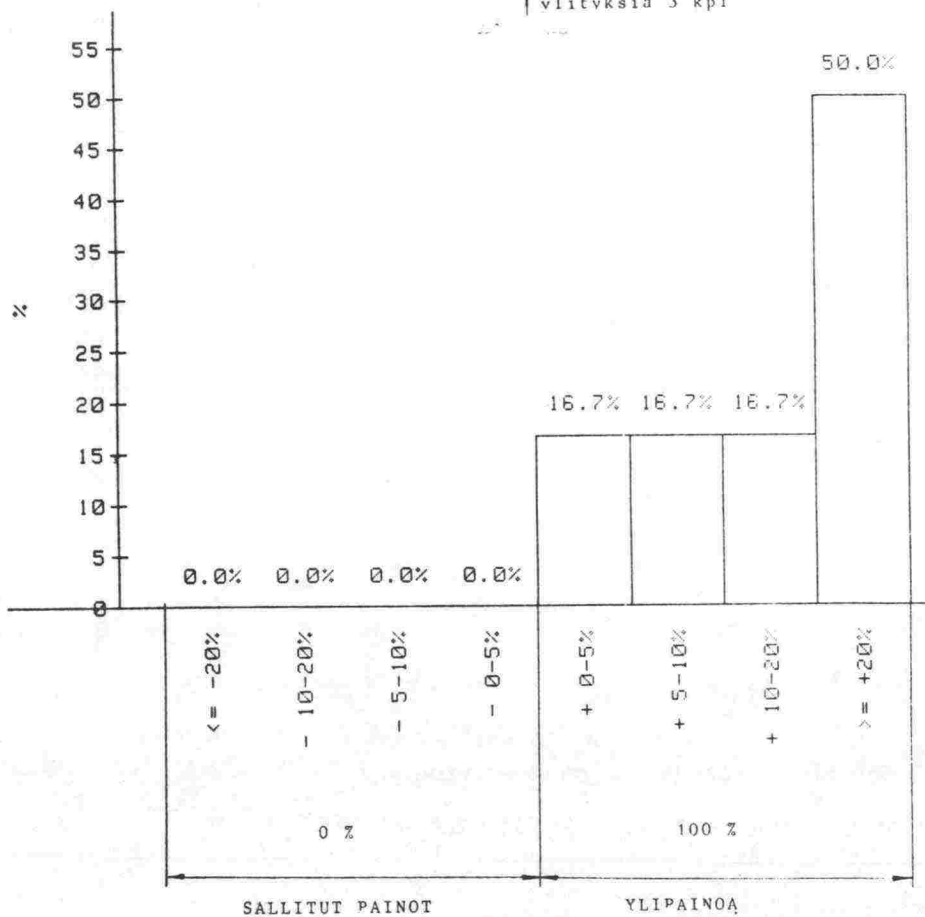
b) Akselipainot, kuormitustapaus V(3)
punnituskertoja 20 kpl



TARKISTUSPUNNITUSTEN YHTEENVEDOT

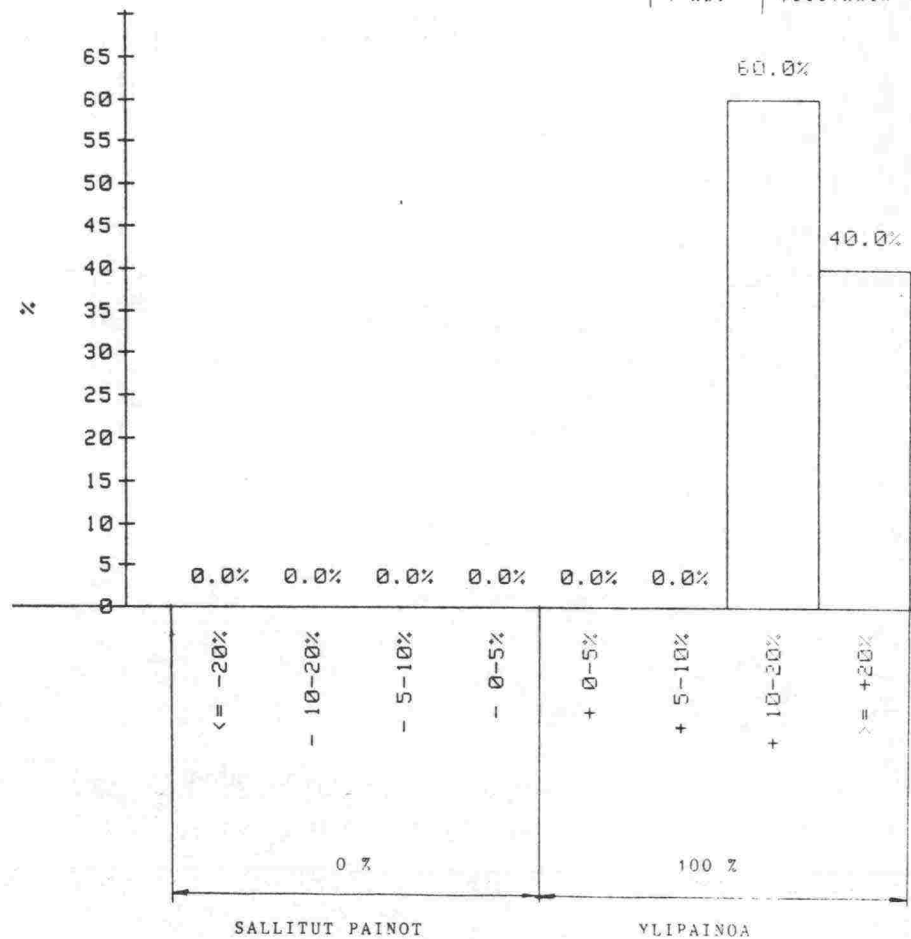
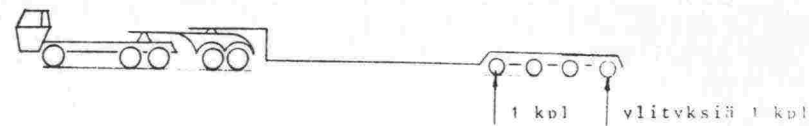
a) Akselipainot, kuormitustapaus P(3)

punnituskertoja 6 kpl



b) Akselipainot, kuormitustapaus V(4)

punnituskertoja 5 kpl



YLIRASKAIDEN AJONEUVOJEN MÄÄRÄT KOKONAISPAINON
MUKAAN RYHMITELTYNÄ

| KOKONAISPAINO TONNIA | AJONEUVOLAJI | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------|-----|-------------------|-----|------------------------|-----|----------------------|-----|-------------------------|------|-----------|-----|----------|------|
| | Kuorma- autot | | Erikois- autot | | Moottori- työkoneet | | Varsin. perävaun. | | Puoliperä- perävaun. | | Traktorit | | YHTEENSÄ | |
| | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 |
| KOK.PAINO PUUTTUU | - | - | 30 | 27 | 45 | 40 | - | - | 1 | - | 1 | 1 | 77 | 58 |
| ALLE 20 JA 20 | 10 | 17 | 13 | 20 | 3 | 3 | 91 | 68 | 386 | 1549 | 5 | 4 | 508 | 1661 |
| 21 - 22 | 41 | 52 | 6 | 9 | 1 | - | 11 | 2 | 23 | 70 | - | - | 82 | 133 |
| 23 - 24 | 6 | 6 | 27 | 48 | 3 | 3 | 6 | - | 28 | 52 | - | 5 | 70 | 114 |
| 25 - 26 | 13 | 26 | 46 | 41 | - | - | 12 | 15 | 12 | 38 | 1 | 5 | 84 | 125 |
| 27 - 28 | 17 | 31 | 56 | 69 | - | - | 4 | 3 | 25 | 47 | - | - | 102 | 150 |
| 29 - 30 | 16 | 24 | 28 | 20 | - | 1 | 4 | 1 | 7 | 25 | - | 1 | 55 | 72 |
| 31 - 35 | 26 | 50 | 117 | 148 | 1 | - | 12 | 11 | 57 | 73 | - | - | 213 | 282 |
| 36 - 40 | 2 | 17 | 46 | 61 | - | - | 3 | 7 | 10 | 28 | - | - | 61 | 113 |
| 41 - 42 | 4 | 6 | 3 | 14 | 1 | 1 | - | - | 19 | 29 | - | - | 27 | 50 |
| 43 - 44 | - | - | - | 29 | - | - | - | - | - | 4 | - | - | - | 33 |
| 45 - 48 | - | - | 33 | 13 | - | - | 3 | 3 | 4 | 10 | - | - | 40 | 26 |
| 49 - 50 | - | 1 | 2 | 9 | - | - | - | - | 1 | 3 | - | - | 3 | 13 |
| 51 - 60 | - | - | 9 | 13 | 1 | - | 1 | - | 7 | 11 | - | - | 18 | 24 |
| 61 - 70 | - | - | 7 | 11 | - | - | 5 | 4 | 2 | 2 | - | - | 14 | 17 |
| 71 - 80 | - | - | 1 | 3 | - | - | 1 | 1 | - | - | - | - | 2 | 4 |
| 81 - 90 | - | - | - | 1 | - | - | 1 | 1 | - | 1 | - | - | 1 | 3 |
| 91 - 100 | - | - | - | 2 | - | - | 1 | - | - | - | 2 | 2 | 3 | 4 |
| 100 JA YLI | - | - | - | 1 | - | 1 | - | 10 | - | 2 | - | - | - | 14 |
| YHTEENSÄ | 135 | 230 | 424 | 539 | 55 | 49 | 155 | 126 | 582 | 1944 | 9 | 18 | 1360 | 2906 |

YLIRASKAIDEN AJONEUVOJEN MÄÄRÄT TELIPAINON
MUKAAN RYHMITELTYINÄ

| TELIPAINO TONNIA | AJONEUVOLAJI | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------|-----|-------------------|-----|------------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|------|-----------|-----|----------|------|
| | Kuorma- autot | | Erikois- autot | | Moottori- työkoneet | | Varsin. perävaun. | | Puoliperä- vaunut | | Traktorit | | YHTEENSÄ | |
| | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 |
| EI TELIÄ | 13 | 25 | 210 | 219 | 52 | 45 | 35 | 28 | 59 | 50 | 9 | 14 | 378 | 381 |
| TELIPAINO PUUTTUU | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ALLE 16 TAI 16 | - | 26 | - | 12 | - | 1 | - | 2 | - | 2 | - | 3 | - | 46 |
| 17 - 18 | 31 | 11 | 38 | 31 | 2 | 2 | 11 | 2 | 9 | 17 | - | - | 91 | 63 |
| 19 - 20 | 25 | 48 | 47 | 72 | 1 | - | 92 | 67 | 332 | 1488 | - | - | 497 | 1675 |
| 21 - 22 | 10 | 12 | 40 | 113 | - | 1 | 4 | 8 | 26 | 81 | - | - | 80 | 215 |
| 23 - 25 | 26 | 35 | 70 | 68 | - | - | 1 | 4 | 30 | 77 | - | - | 127 | 184 |
| 26 - 30 | 18 | 49 | 12 | 16 | - | - | 7 | 8 | 67 | 149 | - | 1 | 104 | 223 |
| 31 - 35 | 4 | 11 | 6 | 6 | - | - | 3 | 3 | 53 | 71 | - | - | 66 | 91 |
| 36 - 40 | - | 1 | 1 | 2 | - | - | - | - | 1 | 1 | - | - | 2 | 4 |
| 41 ja YLI | 8 | 12 | - | - | - | - | 2 | 4 | 5 | 8 | - | - | 15 | 24 |
| YHTEENSÄ | 135 | 230 | 424 | 539 | 55 | 49 | 155 | 126 | 582 | 1944 | 9 | 18 | 1360 | 2906 |

YLIRASKAIDEN AJONEUVOJEN MÄÄRÄT AKSELIPAINON
MUKAAN RYHMITELTYINÄ

| RASKAIMMAN AKSELIN AKSELIPAINO TONNIA | AJONEUVOLAJI | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-----|-------------------|-----|------------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|-------|-----------|-----|----------|------|
| | Kuorma- autot | | Erikois- autot | | Moottori- työkoneet | | Varsin. peräv. | | Puoliperä- vaunut | | Traktorit | | YHTEENSÄ | |
| | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 |
| AJONEUVOSSA TELI | 122 | 205 | 214 | 320 | 3 | 4 | 120 | 98 | 523 | 1 894 | - | 4 | 982 | 2525 |
| AKSELIPAINO PUUTTUU | - | - | - | - | - | - | - | 4 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| ALLE 10 TAI 10 | - | 9 | - | 4 | - | 12 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 27 |
| 11 - 12 | - | - | 14 | 21 | 19 | 8 | 13 | 3 | 10 | 7 | - | - | 56 | 39 |
| 13 - 14 | 2 | 2 | 15 | 14 | 12 | 8 | 3 | 3 | 6 | 2 | 5 | 3 | 43 | 32 |
| 15 - 16 | 4 | 10 | 4 | 6 | 7 | 6 | 9 | 3 | 39 | 34 | - | 5 | 63 | 64 |
| 17 - 18 | - | 1 | 33 | 31 | 5 | 4 | - | 2 | - | 1 | 1 | 3 | 39 | 42 |
| 19 - 20 | - | - | 61 | 62 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | - | 67 | 69 |
| 21 JA YLI | 7 | 3 | 83 | 81 | 7 | 4 | 9 | 10 | 2 | 2 | 1 | 2 | 109 | 102 |
| YHTEENSÄ | 135 | 230 | 424 | 539 | 55 | 49 | 155 | 126 | 582 | 1944 | 9 | 18 | 1360 | 2906 |

YLIRASKAIDEN AJONEUVOJEN MÄÄRÄT OMAN PAINON
MUKAAN RYHMITELTYINÄ

| OMA PAINO TONNIA | AJONEUVOLAJI | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------|-----|-------------------|-----|------------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|------|-----------|-----|----------|------|
| | Kuorma- autot | | Erikois- autot | | Moottori- työkoneet | | Varsin. peräv. | | Puoliperä- vaunut | | Traktorit | | YHTEENSÄ | |
| | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 |
| OMA PAINO PUUTTUU | - | - | - | - | - | - | - | 3 | - | - | - | - | - | 3 |
| ALLE 10 TAI 10 | 95 | 191 | 2 | 3 | 2 | 2 | 140 | 107 | 555 | 1920 | 1 | 1 | 795 | 2224 |
| 11 - 12 | 32 | 30 | - | - | - | - | 6 | 2 | 16 | 14 | 3 | 12 | 57 | 58 |
| 13 - 14 | 6 | 6 | 1 | 1 | 2 | - | 2 | 1 | 6 | 3 | 2 | 3 | 19 | 14 |
| 15 - 16 | - | 1 | 2 | 5 | 6 | 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | - | 14 | 19 |
| 17 - 18 | - | 1 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | - | - | 2 | - | - | 6 | 13 |
| 19 - 20 | - | - | 9 | 8 | 5 | 4 | - | - | 1 | - | - | - | 16 | 12 |
| 21 - 25 | - | - | 55 | 100 | 14 | 12 | 2 | 3 | - | - | - | - | 71 | 115 |
| 26 - 30 | - | - | 125 | 97 | 11 | 11 | 1 | 3 | - | - | - | - | 137 | 111 |
| 31 - 35 | - | - | 115 | 155 | 5 | 2 | - | - | - | 2 | - | - | 120 | 159 |
| 36 - 40 | 1 | 1 | 53 | 66 | 3 | 3 | - | 1 | 1 | - | - | - | 58 | 71 |
| 41 - 42 | - | - | 3 | 11 | 2 | 2 | - | - | - | - | - | 2 | 5 | 15 |
| 43 - 48 | - | - | 36 | 47 | - | - | - | 2 | - | - | 2 | - | 38 | 49 |
| 49 - 50 | - | - | 2 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 7 |
| 51 - 60 | - | - | 12 | 16 | - | - | - | - | - | - | - | - | 12 | 16 |
| YLI 60 | - | - | 8 | 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | 10 | 20 |
| YHTEENSÄ | 135 | 230 | 424 | 539 | 55 | 49 | 155 | 126 | 582 | 1944 | 9 | 18 | 1360 | 2906 |

YLIRASKAIDEN AJONEUVOJEN MÄÄRÄT KÄYTTÖÖOTTO-
 VUODEN MUKAAN

| KÄYTTÖÖNOTTOVUOSI | AJONEUVOLAJI | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------|-----|-------------------|-----|------------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|------|----------|-----|----------|------|
| | Kuorma- autot | | Erikois- autot | | Moottori- työkoneet | | Varsin. perävaun. | | Puoliperä- vaunut | | Traktori | | YHTEENSÄ | |
| | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 | -81 | -84 |
| TIETO PUUTTUU | - | - | - | - | 2 | - | - | - | 7 | 6 | - | 1 | 9 | 7 |
| ENNEN 65 TAI 65 | 5 | 2 | 9 | 8 | 7 | 6 | 19 | 13 | 111 | 116 | - | - | 151 | 145 |
| 66 | 2 | 2 | 7 | 5 | - | - | 3 | 2 | 16 | 15 | - | - | 28 | 24 |
| 67 | 2 | 1 | 6 | 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 12 | 13 | - | - | 25 | 22 |
| 68 | 6 | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 25 | 22 | - | 1 | 40 | 31 |
| 69 | 1 | 1 | 11 | 9 | 1 | 1 | 6 | 7 | 22 | 19 | 2 | 1 | 43 | 38 |
| 70 | 3 | 2 | 21 | 18 | 5 | 5 | 5 | 5 | 25 | 33 | - | - | 59 | 63 |
| 71 | 4 | 5 | 20 | 14 | 4 | 1 | 2 | 2 | 32 | 42 | - | 1 | 62 | 65 |
| 72 | 6 | 8 | 30 | 29 | 5 | 5 | 9 | 9 | 25 | 36 | - | - | 75 | 87 |
| 73 | 16 | 15 | 45 | 45 | 3 | 2 | 11 | 10 | 30 | 49 | - | - | 105 | 121 |
| 74 | 13 | 10 | 76 | 76 | 2 | 2 | 13 | 11 | 30 | 64 | 3 | 4 | 137 | 167 |
| 75 | 13 | 17 | 80 | 82 | 6 | 7 | 20 | 11 | 43 | 83 | - | - | 162 | 200 |
| 76 | 12 | 21 | 26 | 28 | 6 | 6 | 10 | 5 | 52 | 123 | 1 | 1 | 107 | 184 |
| 77 | 7 | 9 | 8 | 14 | 2 | 1 | 17 | 9 | 37 | 105 | 1 | - | 72 | 138 |
| 78 | 14 | 18 | 18 | 23 | 1 | - | 9 | 8 | 45 | 105 | - | 1 | 87 | 155 |
| 79 | 8 | 12 | 19 | 24 | 3 | 2 | 8 | 6 | 30 | 173 | 2 | 3 | 70 | 220 |
| 80 | 20 | 27 | 39 | 38 | 4 | 3 | 13 | 9 | 35 | 242 | - | - | 111 | 319 |
| 81 | 3 | 25 | 5 | 39 | 1 | 1 | 3 | 3 | 5 | 119 | - | 4 | 17 | 181 |
| 82 | - | 14 | - | 32 | - | 2 | - | 2 | - | 199 | - | 1 | - | 250 |
| 83 | - | 23 | - | 37 | - | 1 | - | 6 | - | 305 | - | - | - | 372 |
| 84 | - | 14 | - | 11 | - | 1 | - | 6 | - | 75 | - | - | - | 107 |
| YHTEENSÄ | 135 | 230 | 424 | 539 | 55 | 49 | 155 | 126 | 582 | 1944 | 9 | 18 | 1360 | 2906 |

