

RATAHALLINTOKESKUS

RHK • Tekninen yksikkö

Ratahallintokeskuksen
julkaisuja

A
3/2001

RAIDETUTKIMUS

250 kN:n ja 300 kN:n AKSELIPAINOT

Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 3/2001

RAIDETUTKIMUS, 250 kN:n ja 300 kN:n AKSELIPAINOT

Helsinki 2001

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5140
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-048-8
ISSN 1455-2604

Raidetutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2001. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 3/2001. 90 s. ISBN 952-445-048-8, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: rata, raide, akselipaino, kisko, kiskohitsaus, kiskon kiinnitykset, vaihteet, ratapölkky

TIIVISTELMÄ

Tämä kiskoja, niiden hitsausta, kiskonkiinnityksiä, vaihteita ja ratapölkkyjä koskeva raidetutkimus on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Tutkimus on tehty pääosin Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa (TKK/TIE).

Tutkimus toteutettiin käymällä läpi alan kirjallisuutta, haastattelemalla lukuisia asiantuntijoita ja tekemällä joitain mittauksia. Myös betonisia ratapölkkyjä tutkittiin tekemällä melko suuri määrä teoreettisia laskelmia.

Pääratojen uusiin kiskotuksiin käytetään nykyisin 60 E 1 -kiskoa. Se täyttää kaikki vaatimukset ainakin 250 kN:n akselipainoon saakka. Myöskään 300 kN:n akselipaino ei aiheuttane vaikeuksia.

Termiittihitsit kestävät paremmin, jos kisko on pehmeä. Leimuhitsin osalta asia on päinvastoin. Koestettuja hitsausjatkoksia ei ollut riittävästi, jotta voitaisiin tehdä todella pitkälle meneviä päätelmiä. Sidekiskoajokokset ovat raiteen heikko kohta. Kiskonkiinnitykset ja vastaavat tarvikkeet eivät ole este akselipainojen korotukselle.

Vaihteiden kuluminen lisääntyy todennäköisesti merkittävästi, jos akselipainoja nostetaan. Yksityiskohtien osalta vaaditaan vielä lisätutkimuksia.

Suuremmat akselipainot edellyttävät ainakin havupuupölkyistä luopumista. Betonipölkkyt tulisi suunnitella uudelleen ja ilmeisesti myös uudella tavalla, jos halutaan päästä parhaaseen mahdolliseen tulokseen.

Railway Track Study, 250 kN and 300 kN axle loads. Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 2001. Publications of the Finnish Rail Administration A 3/2001. 90 pages. ISBN 952-445-048-8, ISSN 1455-2604.

Key words: track, axle load, rail, rail welding, rail fastenings, switch, sleeper

SUMMARY

This study concerning rails, their welding and fastenings as well as switches and sleepers forms part of the Finnish Rail Administration's (RHK) research work with the aim of introducing 250 kN and 300 kN axle loads. The study began in the summer of 1998. The study was mainly made at the Laboratory of Highway Engineering at the Helsinki University of Technology.

The study was carried out by reading the literature of this field, by interviewing great number of experts and by doing some measurements. Concrete sleepers were also investigated by doing a lot of theoretical calculations.

Nowadays only the 60 E 1 rail is used in Finland when a track is supplied with new rails. It meets all the requirements at least up to 250 kN axle load. Even 300 kN axle load may not cause difficulties.

Aluminothermic weldings last better, if the rail material is soft. Concerning the flash butt weldings the matter is on the contrary. A sufficient amount of tested welded joints were not available in order to make really far going conclusions. The joints made by the fish plate method are a weak point of the track. Rail fastenings and corresponding supplies do not cause any problems for the raising of axle loads.

The wear of switches probably increases significantly, if the axle loads are raised. Additional studies are needed concerning details.

Higher axle loads provide that sleepers made of coniferous trees are abandoned. Concrete sleepers should be redesigned and apparently by a new method in order to reach the best possible result.

ESIPUHE

Tämä raidetutkimus on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia. Raportti on koottu useasta julkaisemattomasta tutkimuksesta ja muusta materiaalista. Raportissa selvitetään akselipainojen noston vaikutusta kiskoihin, niiden hitsaukseen, kiskonkiinnityksiin sekä vaihteisiin ja ratapölkkyihin. Tutkimus on tehty pääosin Teknillisen korkeakoulun tie-laboratoriossa (TKK/TIE), josta tutkimusta ovat olleet tekemässä Joni Harju, Jari Mustonen, Jarkko Valtonen, Matti Levomäki ja Olli-Pekka Hartikainen. TKK:n rakenteiden mekaniikan laboratoriosta (RMT) mukana oli Jani Meriläinen. Työtä on RHK:ssa ohjannut ylitarkastaja Kari Ojanperä, joka on myös kirjoittanut osia raportista.

Helsingissä, maaliskuussa 2001

Ratahallintokeskus
Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SUMMARY	4
ESIPUHE	5
SISÄLLYSLUETTELO	6
1. JOHDANTO.....	8
2. NBS-MENETELMÄ	9
2.1 Yleistä	9
2.2 Tukikerroksen alustaluku.....	10
2.3 Kokonaisalustaluku	11
2.4 Pitkittäispölkypäälysrakenne.....	13
2.5 Pystysuuntaisten voimien laskeminen.....	14
2.6 Muodonmuutoksen, momentin ja jännityksen laskeminen.....	14
2.7 Huomioita menetelmästä	18
2.8 Dynaamiset kuormat.....	18
2.9 Alusrakenteiden kuormitus	21
3. RAITEEN RASITUKSET JA VASTUKSET.....	23
3.1 Yleistä	23
3.2 Kiskon kestävyys.....	24
3.3 Betoniratapölkyn kestävyys	25
3.4 Puuratapölkyn kestävyys	27
3.5 Sallitut raiteen rasitukset.....	29
3.6 Jatkosrakenteet	31
3.7 Raiteen rasituksen raja-arvot Ruotsissa	34
3.8 Raide sillalla.....	34
3.9 Raiteen vastukset	35
4. KISKOT, HITSAUKSET JA JATKOKSET	37
4.1 Kiskot.....	37
4.2 Hitsausmenetelmät.....	38
4.3 Hitsitutkimus	38
4.3.1 Tavoite	38
4.3.2 Koejärjestelyt.....	39
4.3.3 Termiittihitsaus	39
4.3.4 Leimuhitsaus.....	40
4.3.5 Kaarijatkoshitsaus	41
4.3.6 Hitsaussaumojen taivutustulokset.....	41
4.3.7 Taivutustulosten arviointia.....	49
4.3.8 Yhteenveto.....	54
4.4 Jatkokset.....	55
4.4.1 Sidekiskojatkos.....	55
4.4.2 Eristysjatkos	56
4.5 Kiskonkiinnitykset.....	57
4.6 Sivueristimet ja välilevyt	58

5.	VAIHTEET	59
5.1	Vaihdetutkimuksen taustaa	59
5.1.1	Tavoite	59
5.1.2	Vaihteiden nimitykset	59
5.1.3	Vaihdealueen mittaus	59
5.1.4	YV -vaihteet	60
5.1.5	KRV -vaihteet	61
5.2	Puupölkkyvaihteet	62
5.3	Betonipölkkyvaihteet	62
5.4	Vaihdetutkimus	63
5.4.1	Mittauskohteet	63
5.4.2	Rautaruukin mittaustulokset	64
5.4.3	Vainikkalan mittaustulokset	68
5.4.4	Mittaustulosten arviointia	76
5.4.5	Yhteenvedo	77
6.	PÖLKYT	78
6.1	Puupölkkyt	78
6.1.1	Yleistä	78
6.1.2	Pölkkyjen valmistus	78
6.1.3	Yleisimmät vauriot	79
6.2	Betonipölkkyt	79
6.2.1	Yleistä	79
6.2.2	Pölkkyjen valmistus	81
6.2.3	Yleisimmät vauriot	82
6.3	Betoniratapölkkytutkimus	82
7.	PÄÄTELMÄT	86
	LÄHDELUETTELO	89

1. JOHDANTO

Tämä kiskoja, kiskonkiinnityselimiä ja pölkkyjä koskeva tutkimus on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mahdollisen akselipainojen noston vaikutus kiskoihin, kiskonkiinnityselimiin, vaihteisiin ja pölkkyihin. Tutkimus toteutettiin siten, että Teknillisen korkeakoulun (TKK) tielaboratorion tutkijat suorittivat työmaa- ja tehdasvierailuja, haastattelivat asiantuntijoita sekä tutkivat alan kirjallisuutta ja aiemmin julkaistuja raportteja. Myös tämä raportti on laadittu ja viimeistelty samassa tielaboratoriossa. Betonisia ratapölkkyjä koskeva osa tehtiin pääosiltaan TKK:n rakenteiden mekaniikan laboratoriossa.

Tutkimusraportin alkuun on sijoitettu raiteen rasituksia koskeva teoriaosa, joka tehtiin RHK:ssa. Teoriaosassa keskitytään kuvaamaan Zimmermannin 1800-luvun lopulla kehittämää radan päällysrakenteen laskentatapaa, jossa jatkuvasti tuettu kisko on täysin elastisella alustalla. Ratarakenteessa normaalisti käytettävät poikittaissuuntaiset pölkkyt käännetään laskennallisesti yhdeksi pituussuuntaiseksi tukipalkiksi. Malliin on lisätty professori Eisenmannin (Münchenin teknillinen korkeakoulu) kehittämä liikkuvan kaluston dynaaminen vaikutus. Tämä menetelmä on Pohjoismaissa yleisesti käytössä ja sitä kutsutaan NBS-menetelmäksi.

2. NBS-MENETELMÄ

2.1 Yleistä

Tämä tarkastelu pohjautuu pääosin NBS (Nordisk Banteknisk Samarbete) -työryhmän "Banans vertikal belastning" esiraporttiin. Raportti perustuu Winklerin, Zimmermannin ja Eisenmannin teorioihin. Malli on tarkistettu prof. Riessbergerin NBIU-luentomateriaalin "Track – Part of the System 'Railway'" kanssa /21/. Tiedot on päivitetty Suomen oloja vastaaviksi. Alusrakenteen jännitystarkastelu ei kuulu NBS-menetelmään, vaan perustuu teoksen Geomekaniikka I (RIL 157) /4/ kohtiin 9.3 ja 9.4.

Laskentamalli koostuu kahdesta osasta:

- Zimmermann-menetelmä
- Eisenmannin dynaaminen lisä.

Zimmermannin menetelmä mahdollistaa kvasistaattisten voimien laskemisen, jotka syntyvät liikkuvasta kalustosta, kun kalusto seisoo raiteella tai liikkuu hiljaisella nopeudella. Nopeudesta riippuvan keskipakoisvoiman vaikutus pyöراويomien muutokseen sisältyy kvasistaattiseen kuormitukseen /2/.

Eisenmann täydensi Zimmermannin mallia dynaamisen kuormituksen laskemiseksi. Dynaaminen kuormitus syntyy liikkuvan kaluston kulusta radalla ja on riippuvainen nopeudesta sekä radan kunnosta. Malli pohjautuu tilastolliseen normaalijakaumaan /2/.

Kvasistaattiset ja dynaamiset kuormitukset määritetään ja lasketaan yhteen. Tämä kokonaiskuormitus antaa perustan kiskon painuman ja taivutusmomentin laskemiseen. Sen lisäksi voidaan laskea tukipistevoima, joka pölkyn tulee kestää. Tukipistevoiman vaikutuspiste on kiskosijalla (kiskonkiinnitys). Edelleen voidaan laskea tukikerroksen kuormitus /2/.

Zimmermannin menetelmän ja mallin teoreettiset lähtökohdat ovat seuraavat:

- Raiteen ajatellaan olevan päättymätön palkki, joka on asetettu homogeeniselle ja elastiselle alustalle.
- Päättymätön palkki on massaton.
- Päättymätön palkki on kiinteästi kiinnitetty elastiseen alustaan.

Malli on verrannollinen pistemäisen kuormituksen aiheuttamaan alustan muodonmuutokseen ja päättymättömän palkin painumaan, joka esiintyy elastisella alustalla.

Elastisen alustan muodonmuutoksesta seuraa Winklerin alustamallin mukaan, että paine on suhteessa muodonmuutokseen /2/.

$$(1) \quad P(x) = C \cdot y(x)$$

C on suhteellisuusvakio, joka kertoo alustan jouston
 $y(x)$ elastisen alustan painuma kohdassa x
 $p(x)$ elastisen alustan paine kohdassa x.

Palkin taipumaviiva voidaan ratkaista matemaattisesti yllä olevan vaikutuspisteen avulla. Palkin taipumaviiva noudattaa seuraavaa 4. asteen differentiaaliyhtälöä:

$$(2) \quad C \cdot b \cdot y(x) + E \cdot I_x \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = 0$$

C on suhteellisuusvakio, joka kertoo alustan jouston
 b kuvitteellisen pitkittäispölkkyräkenteen leveys
 y(x) elastisen alustan painuma kohdassa x
 E kiskoteräksen kimmomoduuli
 I_x kiskon hitausmomentti jalan suhteen

Siitä voidaan johtaa parametri L, jota nimitetään karakteristiseksi pituudeksi tai pitkittäispölkkyräkenteen perusluvuksi:

$$(3) \quad L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I_x}{C \cdot b}}$$

Raiteen karakteristinen pituus määrittää vapaasti tuetun palkin tukivälin, kun sitä kuormittaa keskeltä voima Q_{kvstaat}.

Karakteristisen pituuden avulla differentiaaliyhtälö (2) voidaan ratkaista.

Likiarvo päättymättömän palkin taipumaviivalle on

$$(4) \quad y(x) = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \cdot e^{\frac{|x|}{L}} \cdot \left(\cos\left(\frac{|x|}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{L}\right) \right)$$

Päättymättömän palkin taivutusmomentin likiarvo on

$$(5) \quad M(x) = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot e^{\frac{|x|}{L}} \cdot \left(\sin\left(\frac{|x|}{L}\right) - \cos\left(\frac{|x|}{L}\right) \right)$$

Likiarvot antavat kuormituksen kvasistaattisessa tilanteessa (Zimmermannin menetelmä).

Nämä likiarvot ovat työläitä ja siksi on kehitetty käytännöllisiä kaavoja, joissa vaikutuspiste on mukana /2/.

2.2 Tukikerroksen alustaluku

Tärkeä merkitys käytettävässä teoriassa on tukikerroksen alustaluvulla C_{tukik} [N/mm³], joka kertoo alusrakenteen ominaisuudet ja miten tukikerros käyttäytyy kuormituksen alla. Alustaluku vaihtelee tukikerroksen, alusrakenteen ja pohjamaan materiaalin mukaan, mutta myös vuodenajan mukaan.

Mittaukset ovat osoittaneet, että seuraavia alustaluvun C_{tukik} [N/mm^3] arvoja voidaan käyttää /4/.

$C = 0,04$	käytetty Suomessa soratukikerroksella
$C < 0,05$	pehmeä pohjamaa (turve yms.)
$0,05 < C < 0,15$	pohjamaa turpeesta kiinteään saveen
$0,10 < C < 0,12$	käytetty Suomessa sepelitukikerroksella
$0,15 < C < 0,30$	pohjamaa kiinteästä savesta soraan
$C > 0,3$	pohja kalliota tai muuta kiinteää ainetta

Kovempi tukikerros antaa suuremman alustaluvun. Vahvasti jäässä olevan tukikerroksen alustaluku voi olla jopa $C_{\text{tukik}} = 0,50 \text{ N}/\text{mm}^3$ /3/.

Alustaluku on erittäin tärkeä parametri, joka vaikuttaa raiteen kuormitukseen ratkaisevasti. Sen vuoksi on tärkeää käyttää oikeita arvoja päällysrakenteen kuormituksen laskennassa /3/.

Laskelmissa on Suomessa käytetty $C_{\text{tukik}} = 0,04 \text{ N}/\text{mm}^3$ soratukikerrokselle ja sepelitukikerrokselle nykyään $C_{\text{tukik}} = 0,1$ ja aikaisemmin $C_{\text{tukik}} = 0,12 \text{ N}/\text{mm}^3$ /3/.

Alustaluku määritellään seuraavasti:

$$(6) \quad C_{\text{tukik,raai}} = \frac{P}{y} \quad [\text{N}/\text{mm}^3]$$

p on pölkyn ja tukikerroksen välinen pintapaine [N/mm^2]
 y raiteen painuma [mm]

On huomattava, että tukikerroksen paine alkaa kokonaisuudessaan vaikuttaa vasta pölkyn pienen painuman jälkeen. Tämä perustuu sepelipartikkeleiden välissä pölkyn alla olevaan tyhjiin tilaan ja korostuu tukikerroksen ollessa löyhä /3/.

Alustaluku voidaan esittää myös seuraavasti:

$$(7) \quad C_{\text{tukik,raai}} = \frac{P}{y \cdot A} \quad [\text{N}/\text{mm}^3]$$

P on liikkuvasta kalustosta aiheutuva voima [N]
 A merkitsevä pinta-ala [mm^2]
 y painuma [mm]

Tästä seuraa kuormituksen suhteen lineaarinen joustokäyrä /3/.

2.3 Kokonaisalustaluku

Nykyaikaisissa päällysrakenteissa käytetään välilevyä kiskon ja pölkyn välissä pienentämässä iskujen vaikutusta pölkkyyn. Uusilla betoniratapölkkyillä käytetään noin 10 mm paksua kumivälilevyä. Vanhoissa betoniratapölkkyissä käytetään 4,5 ... 6 mm

paksuja välilevyjä. Pehmeällä kumisella välilevyllä on suurehko vaikutus kokonaisalustaluvun laskentaan.

Kumin ja muiden elastomeerien luontaisten ominaisuuksien takia niiden dynaaminen kimmoisuus on suurempi kuin staattinen. ERRI-raportin ("Study of characteristics of rail fastening systems" final recommendations for test methods, ERRI D 170/RP 5, March 1994) mukaan voidaan käyttää /23/

$$(8) \quad C_{\text{välil}_{dyn}} = 1,5 \cdot c_{\text{välil}_{staa}} \quad [\text{kN/mm}]$$

Tukikerroksen alustaluvun C_{tukik} vaikutuspisteessä päällysrakenteeseen voidaan tukikerroksen jousivakio laskea:

$$(9) \quad c_{\text{tukik}} = C_{\text{tukik}} \cdot \frac{A}{2} \quad [\text{kN/mm}]$$

A on pölkyn pohjan kuormitettu pinta-ala kaavan (13) mukaisesti [mm^2]

Päällysrakenteen kokonaisjousivakio c_{kok} voidaan laskea, kun elastinen välilevy vaikuttaa kimmoisuuteen. Kaksi elastista tasoa – välilevy ja tukikerros – voidaan ajatella sarjaan kytketyiksi.

Vaimentamattomien ja vapaiden värähtelyjen vaikutuksen alaisena kokonaisjoustokertoimen voidaan kirjallisuuden mukaan arvioida olevan:

$$(10) \quad \frac{1}{c_{\text{kok}}} = \frac{1}{c_{\text{tukik}}} + \frac{1}{c_{\text{välil}}} \quad [\text{mm/kN}]$$

Tämä yhtälö voidaan esittää myös muodossa:

$$(11) \quad c_{\text{kok}} = \frac{c_{\text{välil}} \cdot c_{\text{tukik}}}{c_{\text{välil}} + c_{\text{tukik}}} \quad [\text{kN/mm}]$$

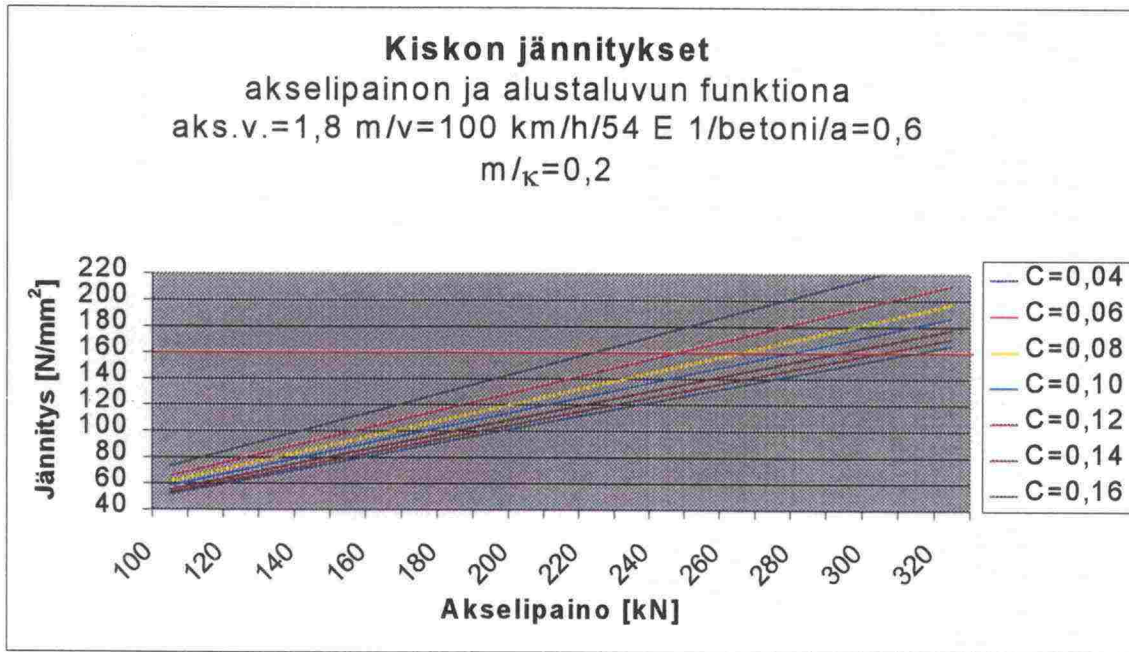
Tästä voidaan johtaa päällysrakenteen kokonaisalustaluku:

$$(12) \quad C_{\text{kok}} = 2 \cdot \frac{c_{\text{kok}}}{A} \quad [\text{N/mm}^3]$$

Välilevyn ominaisuudet saavat siten merkityksen. Erityisesti kovalla alustalla, kun $C_{\text{tukik}} > 0,30\text{--}0,40 \text{ N/mm}^3$, päällysrakenne on merkittävästi kimmoisampi, kun käytetään pehmeää välilevyä.

Suomessa nykyisin asennettavissa betoniratapölkkyissä BP 89, B 97 ja BP 99 käytettävillä välilevyillä on keskenään suunnilleen samanlaiset ominaisuudet. Laskelmissa on käytetty 10 mm kumivälilevyille $c_{\text{dyn}} = 150 \text{ kN/mm}$ ja ohuille välilevyille $c_{\text{dyn}} = 250 \text{ kN/mm}$. Korkkikumivälilevyille (4 mm) voidaan käyttää $c_{\text{dyn}} = 500 \text{ kN/mm}$.

Kuvassa 1 on esitetty päällysrakenteen kokonaisalustaluvun vaikutus kiskon jännityksiin 54 E 1 -kiskolla eri akselipainoilla.



Kuva 1. Kokonaisalustaluvun vaikutus kiskon jalan jännityksiin akselipainon funktiona.

2.4 Pitkittäispölkkypäällysrakenne

Ratapölkkyt on normaalisti asetettu poikittain kiskojonoihin nähden. Tällainen poikittäispölkkyrakenne voidaan muuttaa kuvitteelliseksi pitkittäispölkkyrakenteeksi. Tämä tarkoittaa, että pitkittäispölkkyrakenteella on sama tukikerrosta kuormittava pinta-ala kuin poikittäispölkkyrakenteella. Käytännössä ratapölkkyjen keskiosa oletetaan kuormittamattomaksi. Tämä vastaa tilannetta uudessa raiteessa /23/.

Kuormitettu pinta-ala lasketaan

$$(13) \quad A = (l - m) \cdot b_1 \quad [\text{mm}^2]$$

A on kuormitettu pinta-ala $[\text{mm}^2]$

l ratapölkyn pituus $[\text{mm}]$

m ratapölkyn keskiosan kuormittamaton pituus $[\text{mm}]$

b₁ ratapölkyn leveys $[\text{mm}]$

Kuvittelun pitkittäispölkyn leveys saadaan kaavalla

$$(14) \quad b = \frac{A}{2 \cdot a} \quad [\text{mm}]$$

b on kuvitteellisen pitkittäispölkyn leveys $[\text{mm}]$

a pölkkyväli $[\text{mm}]$

Suomessa pölkyn keskiosan kuormittamattomana pituutena m käytetään 600 mm /23/.

2.5 Pystysuuntaisten voimien laskeminen

Raiteen pystysuuntaiset voimat voidaan jakaa seuraavasti /7/8/17/23/

- Staattiset voimat, jotka johtuvat akselipainosta. Näitä voimia pidetään vakioina paikallaan olevalle liikkuvalla kalustolle. Staattista pyöräpainoa merkitään Q_0 [kN].
- Kvasistaattiset voimat, jotka ovat aina suurempia kuin staattiset voimat. Ne kasvavat normaalisti nopeuden kasvaessa, tyypillisesti keskipakovoiman vaikutuksesta kaarteissa. Muita kvasistaattisten voimien suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. tuuli ja vaunun epätasainen kuormaus. Kvasistaattista pyöräpainoa merkitään Q_{kvsta} [kN].
- Dynaamiset voimat, jotka johtuvat raidevirheistä ja liikkuvan kaluston jousituksesta, lovipyöristä jne. Nämä voimat ovat värähtely- ja impulssivoimia, jotka kasvavat voimakkaasti nopeuden kasvaessa. Dynaamista pyöräpainoa merkitään Q_{dyn} [kN].

Annetulla nimellisellä akselipainolla P [kN] saadaan pystysuuntaiseksi staattiseksi pyöräpainoksi, kun kuorman jakauma oletetaan tasaiseksi ja symmetriseksi:

$$(15) \quad Q_0 = \frac{P}{2} \quad [\text{kN}]$$

Kvasistaattinen lisä on keskipakovoiman, tuulen jne. vaikutusta. Lisä voi vaihdella suuruudeltaan Q_0 :n funktiona:

$$(16) \quad 0,10 \cdot Q_0 < \Delta Q < 0,30 \cdot Q_0$$

Yleisesti pätee, että kvasistaattinen lisä on suurempi pienisäteisissä kaarteissa. Kvasistaattinen pyöräpaine voidaan laskea:

$$(17) \quad Q_{kvsta} = (Q_0 + \Delta Q) \quad [\text{kN}]$$

2.6 Muodonmuutoksen, momentin ja jännityksen laskeminen

Kiskon painuma etäisyydellä x kuorman vaikutuspisteestä lasketaan kaavalla (ks. (4)):

$$(18) \quad y(x) = \frac{Q_{kvsta}}{2 \cdot b \cdot C_{kok} \cdot L} \cdot \eta \quad [\text{mm}]$$

$$(19) \quad \eta = \frac{\sin \xi + \cos \xi}{e^\xi} \quad [-]$$

Kiskojen taivutusmomentti etäisyydellä x kuorman vaikutuspisteestä lasketaan kaavalla (ks. (5)):

$$(20) \quad M(x) = Q_{kvstaat} \cdot \frac{L}{4} \cdot \mu \quad [\text{Nmm}]$$

$$(21) \quad \mu = \frac{-\sin \xi + \cos \xi}{e^{\xi}} \quad [-]$$

On huomattava, että

$$(22) \quad \xi = \frac{|x|}{L} \quad [-]$$

Kiskon jalan jännitys keskellä kiskon jalan alapintaa etäisyydellä x kuorman vaikutuspisteestä voidaan laskea:

$$(23) \quad \sigma(x)_{jalka} = \frac{M(x)}{W_{jalka}} \quad [\text{MPa}]$$

W_{jalka} on kiskon taivutusvastus jalan suhteen [mm^3]

Taulukko 1. Kiskoprofilien taivutus- ja hitausmomentit

Kiskoprofiili	W_{jalka} [cm^3]	W_{hamara} [cm^3]	I_x [cm^4]
K43	211	209	1469
54 E 1	312	279	2346
60 E 1	377	335	3055

Ratapölkyn tukikerrokseen kohdistama paine on tällöin

$$(24) \quad p(x) = C_{kok} \cdot y(x)$$

Tukipistevoima $R(x)$, jolle betoniratapölkkyt on mitoitettava, voidaan laskea:

$$(25) \quad R(x) = b \cdot a \cdot p(x) = b \cdot a \cdot C_{kok} \cdot y(x) \quad [\text{N}]$$

Tavallisesti kiinnostavin on suoraan yksittäiskuormituksen alla oleva piste. Näissä tapauksissa η ja μ ovat 1. Painumayhtälö muuttuu siten yksinkertaisemmaksi:

$$(26) \quad y_0 = \frac{Q_{kvstaat}}{2 \cdot b \cdot C_{kok} \cdot L} \quad [\text{mm}]$$

Kiskon taivutusmomentti yksittäiskuorman alla:

$$(27) \quad M_0 = Q_{kvstaat} \cdot \frac{L}{4}$$

Kiskon jännitys kiskon jalan keskellä:

$$(28) \quad \sigma_{jalka} = \frac{M_0}{W_{jalka}} \quad [\text{MPa}]$$

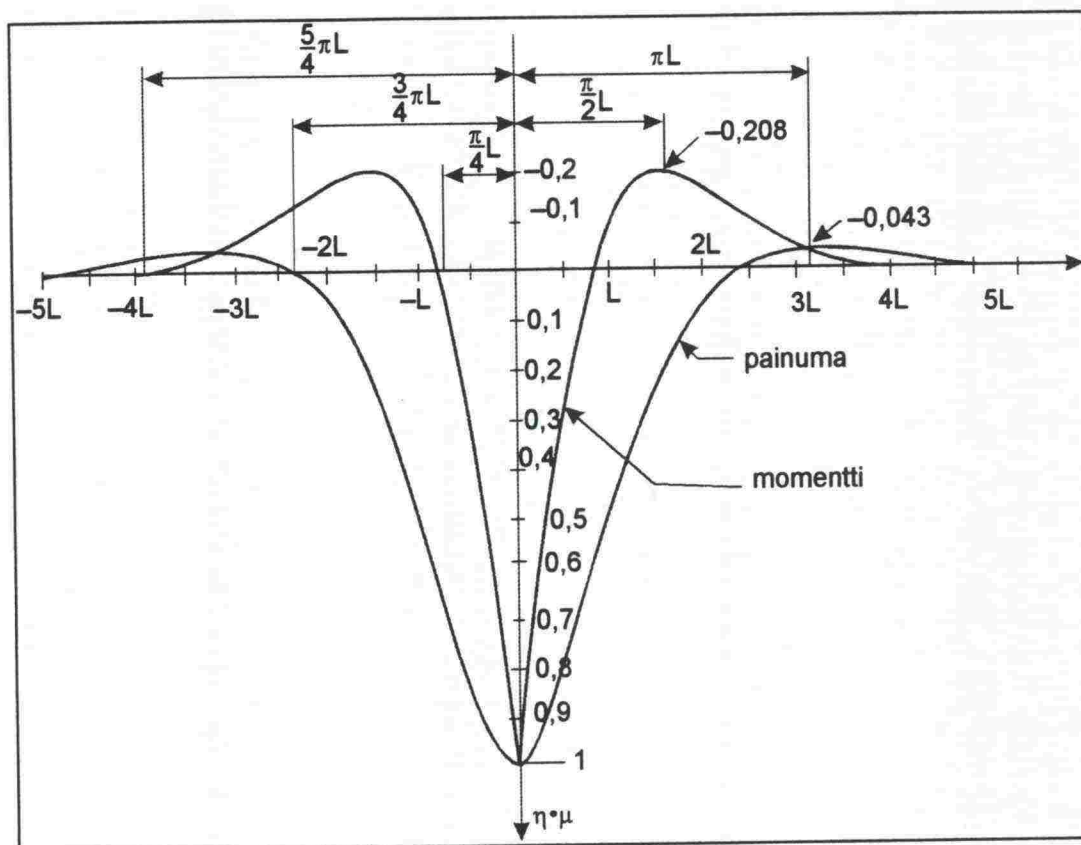
Pölkyn alapinnan tukikerrokseen kohdistama paine:

$$(29) \quad p_0 = C_{kok} \cdot y_0 \quad [\text{MPa}]$$

Pölkyn tukipistekuormaksi tulee:

$$(30) \quad R_0 = b \cdot a \cdot p_0 \quad [\text{N}]$$

Kun kiskon kantavuus on suuri, kuten esimerkiksi 60 E 1 -kiskoilla, karakteristisesta pituudesta tulee pehmeällä maaperällä pitkä. Taipumaviivan 0-kohta on etäisyydellä $\frac{3}{4}\pi \times L$ kuorman vaikutuspisteestä. Koska tämä etäisyys on useissa tapauksissa suurempi kuin telin akseliväli, viereisen akselin vaikutus on myös yleensä otettava huomioon. Taipumaviiva katsotaan päättyväksi ja kisko palaamaan alkuperäiseen asemaansa kohdassa $\frac{7}{4}\pi \times L / 21$. Taipumaviivasta on esitetty esimerkki kuvassa 2.



Kuva 2. Esimerkki momentin kulusta ja taipumaviivasta.

Kokonaiskuormitus kohdassa I lasketaan superpositioperiaatetta käyttämällä, ts. summaamalla eri kuormien vaikutukset. Tällöin yhtälöt ovat muotoa:

Kiskon painuma:

$$(31) \quad y_{I_{kvstaai}} = \frac{Q_{kvstaai_I}}{2 \cdot b \cdot C_{kok} \cdot L} + \frac{Q_{kvstaai_{II}}}{2 \cdot b \cdot C_{kok} \cdot L} \cdot \eta_{II} \quad [\text{mm}]$$

Kiskon taivutusmomentti:

$$(32) \quad M_{I_{kvstaai}} = Q_{kvstaai_I} \cdot \frac{L}{4} + Q_{kvstaai_{II}} \cdot \frac{L}{4} \cdot \mu_{II} \quad [\text{Nm}]$$

Kiskon jännitys kiskon jalan keskellä:

$$(33) \quad \sigma_I = \frac{M_{I_{kvstaai}}}{W_{jalca}} \quad [\text{MPa}]$$

Pölkyn alapinnan tukikerrokseen kohdistama paine:

$$(34) \quad p_I = C_{kok} \cdot y_I \quad [\text{MPa}]$$

Pölkyn tukipistekuormaksi tulee:

$$(35) \quad R_I = b \cdot a \cdot C_{\text{kok}} \cdot y_I \quad [\text{N}]$$

Aina on muistettava tarkistaa, onko taipumaviivan pituus kuormituspisteestä 0-pisteeseen ($3/4\pi \times L$) suurempi kuin telin akseliväli. Jos näin on, on kuormitus laskettava superpositioperiaatetta käyttäen summaamalla kuormitukset /23/.

2.7 Huomioita menetelmästä

Poikittaispölkkyrakenne muutetaan kuvitteelliseksi pitkittäispölkkyrakenteeksi. Malli käsittelee jatkuvaa palkkia kiinnitettynä elastiseen ja homogeeniseen alustaan. Tärkeä suhteellisuusvakio on päällysrakenteen kokonaisalustaluku C_{kok} . Se määritetään radan koekuormituksella.

Muita tekijöitä, joilla on vaikutusta saataviin tuloksiin:

- Pölkyn kuormitettu pinta-ala A , leveys b_1 ja pölkkyväli a .
- Kiskoprofiilin hitaus- ja taivutusmomentit sekä kimmomoduuli.

Tekijät C_{kok} ja I_x vaikuttavat muodonmuutokseen sekä kiskojen ja pölkkyjen kuormitukseen seuraavalla tavalla:

Alustaluku C_{kok}

Pieni arvo indikoi pehmeää alustaa. Se näkyy pitkänä taipumaviivana (karakteristisena pituutena) ja suurena kiskojen painumana. Kiskojen rasitukset ovat siten suuret. Pyöräkuorma sen sijaan jakautuu usealle pölkylle, joten pölkkyjen ja tukikerroksen kuormitus jää pieneksi.

Suuri arvo merkitsee kovaa alustaa. Tämä näkyy lyhyenä taipumaviivana ja sitä kautta pölkkyjen ja alusrakenteiden suurena kuormituksena. Kiskojen kuormitus on tällöin pieni.

Kiskojen hitausmomentti I_x

Kiskon suuri kantavuus näkyy pitkänä taipumaviivana toisin kuin kiskolla, jolla on pieni hitausmomentti. Tällä on merkitystä pölkkyjen ja tukikerroksen kuormituksen kannalta.

2.8 Dynaamiset kuormat

Edellä on jo mainittu, kuinka kiskon muodonmuutos (painuma), momentti ja jännitys voidaan laskea pystysuuntaisen kvasistaattisen pyöräkuorman Q_{kvstaat} vaikutuskohdassa. Siinä on oletettu että kuorma sijaitsee keskeisesti raiteella.

Dynaamisen tilan kuormitus- ja muodonmuutosmalli on kehitetty eri nopeuksilla, erilaisella liikkuvalla kalustolla ja eri raiteilla tehtyjen koeajojen perusteella. Malli ottaa

huomioon kosketuspisteen siirtymänopeuden (liikkuvan kaluston nopeus) sekä raide- ja pyörävirheet. Malli rakentuu periaatteelle, että kuormitustapaukset noudattavat tilastollista normaalijakaumaa. Normaalijakaumaa käytetään, jotta dynaamisessa kulku-tilanteessa syntyvät merkitsevät maksimi-arvot löydetään painumalle, momentille ja jännitykselle. Tilastolliseksi varmuudeksi otaksutaan 99,85 % eli vain 0,15 % kaikista kuormitustapauksista ylittää eri komponenteille annetut raja-arvot.

Dynaamiset kuormat määritetään iteroimalla.

1 Valitaan mitoitusnopeus

Tämä on riippuvainen radan geometriasta ja kunnosta sekä liikkuvan kaluston kulku-ominaisuuksista.

Lasketaan liikkuvan kaluston nopeusvaikutuskerroin (kaava (36a) tavarajunille ja (36b) henkilöjunille) valitun mitoitusnopeuden $V(\text{km/h})$ funktiona.

$$(36a) \quad v_{\text{tavara}} = 1 + \frac{V - 60}{180} \geq 1$$

$$(36b) \quad v_{\text{henkilö}} = 1 + \frac{V - 60}{380} \geq 1$$

Alle 60 km/h nopeuksilla käytetään $v_{\text{tavara}} = 1$ ja $v_{\text{henkilö}} = 1$. Tavarajunien nopeusvaikutuskerrointa (36a) käytetään vain nopeuksiin 140 km/h asti. Suuremmilla nopeuksilla myös tavarajunilla käytetään henkilöjunien nopeusvaikutuskerrointa (36b).

Perusteena tavaraja henkilöjunien jaolle ovat henkilöjunien huomattavasti paremmat kulkuominaisuudet. Vetureille käytetään samoja arvoja kuin junalle.

2 Valitaan raiteen laatuluokka

Luokitus voi perustua joko silmämääräiseen arvioon tai esim. kunnossapitoluokitukseen.

Laatuluokkaan vaikuttavat esimerkiksi raiteen nuolikorkeusvirheet ja kieroudet sekä kiskon aallonmuodostus. Tarkastelu tulisi tehdä raiteenmittaustuloksia käyttäen.

3 Lasketaan normaalijakauma

$$(37) \quad s = \kappa \cdot v$$

4 Valitaan tilastollinen varmuus

$t = 3$, mikä tarkoittaa tilastollista varmuutta 99,85 % (99,70+0,15).

$t = 2$, mikä tarkoittaa tilastollista varmuutta 97,50 % (95,00+2,50).

$t = 1$, mikä tarkoittaa tilastollista varmuutta 84,15 % (68,30+15,85).

Kerrointa $t = 3$ käytetään kiskoille, kiskonkiinnityksille ja pölkyille ja $t = 1$ tukikerrokselle ja alusrakenteille. UIC 518 -määrelehden mukaan pölkyillä tulisi käyttää $t = 2,2$.

5 Lasketaan "äärimmäisyyskerroin"

$$(38) \quad \delta = (1 + t \cdot s)$$

"Äärimmäisyyskerroimen" avulla voidaan laskea suurin päällysrakenteen kestävyuden kannalta merkitsevä tekijä valitun tilastollisen varmuuden avulla. Zimmermannin mukaan laskettu kvasistaattinen tila saadaan Eisenmannin mukaan lasketuksi dynaamiseksi tilaksi:

Pystysuuntainen dynaaminen pyöräkuorma

$$(39) \quad Q_{dyn} = Q_{kvstaat} \cdot \delta \quad [\text{kN}]$$

Q_{dyn} -arvona voidaan käyttää myös P_2 -arvoa, joka on esitetty kohdassa "Jatkosrakenteet".

Kiskon painuma:

$$(40) \quad y_{dyn} = y_{kvstaat} \cdot \delta \quad [\text{mm}]$$

Kiskon jalan jännitys:

$$(41) \quad \sigma_{dyn,jalka} = \sigma_{kvstaat,jalka} \cdot \delta \quad [\text{MPa}]$$

Sallittu kiskolle liikenteestä aiheutuva jännitys on 220-laadun teräksille, eli K30-, K43- ja vanhimmille 54 E 1 -kiskoille 160 MPa ja Imatra+, GOST-, 260- ja korkeampi-
lujuuksisille laaduille 180 MPa.

Liikenteestä aiheutuva jännitys voi tuntua pieneltä vetomurtolujuuteen (700...900 MPa) verrattuna, mutta siihen tulee lisätä lämpövoimista, kiihdytys- ja jarrutusvoimista sekä siltojen liikkeistä johtuvat jännitykset ja sidekiskoalueen rei'istä syntyvä lovivaikutus sekä hitsien varmuuskerroin. Kiskolla on myös sisäiset jäännösjännitykset, jotka on otettava huomioon laskelmissa.

Pölkyn alapinnan tukikerrokseen kohdistama paine:

$$(42) \quad p_{dyn} = p_{kvstaat} \cdot \delta = C_{kok} \cdot y_{kvstaat} \cdot \delta \quad [\text{MPa}]$$

Tukipistekuormaksi tulee:

$$(43) \quad R_{dyn} = R_{kvstaat} \cdot \delta = b \cdot a \cdot p_{kvstaat} \cdot \delta = b \cdot a \cdot C_{kok} \cdot y_{kvstaat} \cdot \delta \quad [\text{N}]$$

Taulukko 2. Yksi versio radan laatuokituksesta. Lähde: NBS-adhocgrupppe "Spårets vertikala belastning". $QN1_y$ on radan geometrian pystysuuntainen keskihajonta UIC 518 mukaan, $QN1_x$ on vaakasuuntainen. Keskihajonta tarkoittaa normaalissa kunnossapidossa korjattavan virheen suuruutta. Yleensä 50 % raiteesta tulisi olla parempaa kuin tämä arvo.

Rataosan nopeus	κ	$QN1_y$	$QN1_x$
$V \leq 80$	0,3	2,3	1,5
$80 < V \leq 120$	0,25	1,8	1,2
$120 < V \leq 160$	0,2	1,4	1,0
$160 < V \leq 200$	0,15	1,2	0,8
$200 < V \leq 300$	0,1	1,0	0,7

2.9 Alusrakenteiden kuormitus

Alusrakenteen kuormitus voidaan laskea Boussinesqin teorian mukaan olettaen, että kuormitus tapahtuu jäykän ympyrälaatan kautta. Laskenta tapahtuu sylinterikoordinaatistossa /4/.

$$(44) \quad \sigma_z = p_{dyn} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot h_e} \right)^2} \right)^3}$$

σ_z on alusrakenteen jännitys syvyydellä h_e [MPa].
 p_{dyn} tukikerrokseen vaikuttava paine kaavan (43) mukaan [MPa]
 b kuvitteellisen pitkittäispölkyn leveys [mm]
 h_e ekvivalenttinen kerrospaksuus kaavan (45) mukaan [mm]

Ekvivalenttinen kerrospaksuus h_e lasketaan Odemarkin esittämällä likimääräis-
menetelmällä. Siinä ylemmän rakennekerroksen paksuus korvataan materiaaliomai-
suuksista riippuvalla ekvivalentilla kerrospaksuudella h_e kaavan (45) mukaisesti.
Kaavan (45) käyttö edellyttää, että ylemmän kerroksen (tukikerros) kimmomoduuli E_1
ja alemman kerroksen muodonmuutosmoduulin E_2 suhde on vähintään $E_1 \geq \frac{E_2}{2}$

$$(45) \quad h_e = 0,9 \cdot h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)}{E_2 \cdot (1 - \nu_1^2)}}$$

h_1 on ylemmän kerroksen (tukikerros) paksuus pölkyn alla.
 E_1 ja E_2 ylemmän ja alemman kerroksen kimmomoduulit [MPa]
 ν_1 ja ν_2 ylemmän ja alemman kerroksen Poissonin luvut

Tyypillisiä kimmomoduulin E ja Poissonin luvun ν arvoja on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tyypillisiä kimmomoduulin ja Poissonin luvun arvoja maarakenteille..

Kerros, materiaali	E [MPa]	ν
Tukikerros, sepeli	200 – 300	0,3
Tukikerros, sora	150 – 250	0,3
Alusrakennekerrokset	80 – 150	0,3
Pohjamaa (savi, siltti)	25 – 50	0,5
Pohjamaa (karkearakeinen)	50 – 80	0,5

3. RAITEEN RASITUKSET JA VASTUKSET

3.1 Yleistä

Useissa lähteissä mainitaan kaavat eri muuttujien vaikutuksen laskemiseksi NBS-menetelmällä. Kaavat on esitetty taulukossa 4 ja esimerkkejä vaikutuksesta taulukossa 5.

Taulukko 4. Tärkeimpien muuttujien riippuvuussuhteet.

Muuttuja	jännitys κ_{σ}	painuma κ_y	tukikerroksen paine κ_p
Alustaluku C	$\sqrt[4]{\frac{C}{C_{ve}}}$	$\sqrt[4]{\left(\frac{C}{C_{ve}}\right)^3}$	$\sqrt[4]{\frac{C_{ve}}{C}}$
Pölkkyväli A	$\sqrt[4]{\frac{a_{ve}}{a}}$	$\sqrt[4]{\left(\frac{a_{ve}}{a}\right)^3}$	$\sqrt[4]{\left(\frac{a_{ve}}{a}\right)^3}$
Pölkyn pinta-ala F	$\sqrt[4]{\frac{F}{F_{ve}}}$	$\sqrt[4]{\left(\frac{F}{F_{ve}}\right)^3}$	$\sqrt[4]{\left(\frac{F}{F_{ve}}\right)^3}$
Kiskon koko I_x, W_{jalka}	$\sqrt[4]{\frac{I_{ve}}{I} \cdot \frac{W}{W_{ve}}}$	$\sqrt[4]{\frac{I}{I_{ve}}}$	$\sqrt[4]{\frac{I}{I_{ve}}}$
Radan kunto, laatuluku κ	$\kappa_{\sigma} = \frac{\sigma_{ve}}{\sigma}$	$\kappa_y = \frac{y_{ve}}{y}$	$\kappa_p = \frac{p_{ve}}{p}$

Taulukko 5. Esimerkkejä tärkeimpien muuttujien vaikutuksen suuruudesta (< 1 rasitus pienenee).

Muuttuja	jännitys κ_{σ}	painuma κ_y	tukikerroksen paine κ_p
Alustaluku C 0,04 -> 0,10	$\sqrt[4]{\frac{0,04}{0,10}} = 0,80$	$\sqrt[4]{\left(\frac{0,04}{0,10}\right)^3} = 0,50$	$\sqrt[4]{\frac{0,04}{0,10}} = 1,26$
Alustaluku C 0,10 -> 0,15	$\sqrt[4]{\frac{0,10}{0,15}} = 0,90$	$\sqrt[4]{\left(\frac{0,10}{0,15}\right)^3} = 0,74$	$\sqrt[4]{\frac{0,10}{0,15}} = 1,11$
Pölkkyväli a 650 -> 580	$\sqrt[4]{\frac{580}{650}} = 0,97$	$\sqrt[4]{\left(\frac{650}{580}\right)^3} = 0,92$	$\sqrt[4]{\left(\frac{650}{580}\right)^3} = 0,92$
Pölkyn kantava ala A 483 000 -> 554 500 (B 63 -> BP 99)	$\sqrt[4]{\frac{483000}{554500}} = 0,966$	$\sqrt[4]{\left(\frac{483000}{554500}\right)^3} = 0,90$	$\sqrt[4]{\left(\frac{500000}{560000}\right)^3} = 0,90$
Kiskon koko I_x, W_{jalka} 54E1->60E1	$\sqrt[4]{\frac{3055}{2346} \cdot \frac{312}{377}} = 0,88$	$\sqrt[4]{\frac{2346}{3055}} = 0,94$	$\sqrt[4]{\frac{2346}{3055}} = 0,94$
Kiskon koko I_x, W_{jalka} K43->54E1	$\sqrt[4]{\frac{2346}{1469} \cdot \frac{211}{312}} = 0,76$	$\sqrt[4]{\frac{1469}{2346}} = 0,89$	$\sqrt[4]{\frac{1469}{2346}} = 0,89$

Suurin merkitys (ei näy näissä kaavoissa) on raiteen laatuluvulla κ eli käytännössä raiteen kunnolla ja toleransseilla. Laatuluvun arvon muutoksen 0,2:sta 0,1:een vaikutus näkyy taulukossa 6 ja on noin 27 %.

Radan kunnan jälkeen suurin vaikutus raiteen rasitukseen on alustaluvulla, so. rata-penkereen ja tukikerroksen kantavuudella. Alustaluvun muutos 0,04:sta (sorarata) 0,10:een (kohtalaisessa kunnossa oleva sepelirata) pudottaa raiderakenteiden jännityksiä 20 % ja vähentää raiteen dynaamiset painumat puoleen. Vastaavasti tukikerroksen kuormitus kasvaa 26 %. Alustaluvun muutos 0,10:stä (kohtalaisessa kunnossa oleva sepelirata) 0,15:een (hyväpohjainen sepelirata) pienentää vastaavasti jännityksiä 10 %, dynaamisia painumia 26 % ja lisää tukikerroksen kuormitusta 11 %.

Pölkkyvälin muutos esim 650:stä 580:een mm:iin ei vaikuta suuresti. Jännitykset vähenevät noin 3 %, dynaamiset painumat 8 % ja tukikerroksen kuormitus 8 %.

Ratapölkyn pohjan pinta-alan muutoksella on yhtä pieni vaikutus kuin pölkkyvälin muutoksella. Vanhan B63-betoniratapölkyn ($A=483\ 000\ \text{mm}^2$) vaihto BP89- tai BP99-pölkkyyn ($A=554\ 500\ \text{mm}^2$) pienentää raiteen jännityksiä (ilman välilevyn vaikutusta) noin 3,5 %. Dynaamiset painumat ja tukikerroksen kuormitus vähenevät noin 10 %. EVA- ja kumivälilevyjen vaikutus näkyy alustaluvun C kautta siten, että todellisuudessa B63- ja BP99-pölkkyjen välinen ero on sellainen, että BP99-pölkkyllä on parhaimmillaan noin 14 % pienemmät jännitykset, 37 % pienemmät dynaamiset painumat ja 1,1 % suuremmat tukikerroksen kuormat. Pölkyn alapinnan pinta-ala ei voi käytännössä olla mitoittava tekijä.

Kiskon taivutusjännitysten ollessa mitoittava tekijä on 60 E 1 -kiskolla noin 12 % pienemmät jännitykset kuin 54 E 1 -kiskolla.

3.2 Kiskon kestävyys

Kiskon kulkupinnan vaurioitumisherkkyyden voidaan laskea kaavalla (46)

$$(46) \quad N = 0,039 \sqrt{12,8^{-4} \cdot \frac{R_m}{v} \cdot \sqrt{\frac{r}{Q}}}$$

R_m	on	kiskon vetomurtolujuus taulukon 6 mukaan
u		varmuuskerroin (sekaliikenteellä yleensä $u=1,2$, tavaraliikenteellä $u=1,0$, nopealla liikenteellä $u=1,5$).
r		pyörän säde [mm]
Q		pyöräpaino [kN]

Silloin, kun vaurioitumisherkkyyden N arvoksi saadaan $N \geq 2 \times 10^6$, voidaan kiskon katsoa kestävän kuormitusta rajattomasti.

Taulukko 6. Kiskolaatujen vetomurtolujuus.

Teräslaatu	Vetomurtolujuus R_m
220	700
260	900
320 Cr	1100
350 HT	1200

3.3 Betoniratapölkyn kestävyys

ERRI/ORE-raportissa D71 / RP 9 "Beanspruchung der Betonschwellen" /2/ esitetään, että betoniratapölkyn sallittu momenttikuormitus kiskosijan alla lasketaan kaavalla

$$(47) \quad M_{kiskosija} = \frac{3 \cdot P \cdot l_t}{16}, \quad [\text{kNm}, \text{m}, \text{kN}]$$

M on sallittu momentti [kNm]
 P sallittu kuormitus [kN]
 l_t tukiväli [m]

Kaavalla (47) voidaan myös laskea betoniratapölkyn sallittu tukipistevoima R_{dyn} , kun betoniratapölkyn teknisissä vaatimuksissa annettu sallittu momentti tunnetaan. Taulukossa 7 on esitetty arvoja Suomessa käytetyille betoniratapölkkytyypeille.

Sallitun taivutusmomentin avulla voidaan määrittellä ERRI/ORE-raportin D 71/RP 9 mukaan suurin sallittu pölkyn liikennekuormitus kaavan (48) avulla.

$$(48) \quad R_{max} = \frac{2 \cdot M_{kiskosija}}{\psi_1 \cdot \lambda}$$

$M_{kiskosija}$ on ratapölkyn sallittu momentti kiskosijan alla [kNm]
 ψ_1 sysäyslisa (= 1,6)
 λ (d-e)/2 eli pölkyn pään ja kiskon keskilinjan välisen etäisyyden (d) ja pölkkyyn kiskon alapuolella pölkyn neutraaliakselin tasossa vaikuttavan kuormituksenjakautuman pituuden (e) erotuksen puolikas.

Käytännössä BP89-, B97- ja BP99-pölkkyillä voima R_{max} on taulukon 7 mukainen $R_{sallittu}$.

Kenttätutkimuksia varten voidaan määrittää pölkyn sallittu venymä kaavalla (49)

$$(49) \quad \varepsilon = \frac{M \cdot h_{pp}}{E \cdot I} \cdot 10^8$$

ε on pölkyn venymä [$\mu\text{m}/\text{m}$]

M	taivutusmomentti [kNm]
E	ratapölkyn kimmomoduuli, joka voidaan käytännössä laskea betonin kimmomoduulina $E \approx 5000 \cdot \sqrt{K}$, [MPa], K = betonin 28 vuorokauden iän puristuslujuus [MPa].
I	ratapölkyn hitausmomentti [cm ⁴]
h_{pp}	ratapölkyn neutraaliakselin korkeus [mm]

Käytännössä K60-betonilla sallittu venymä on 200 µm/m.

Taulukko 7. Betoniratapölkkyjen sallittuja kuormituksia kaavan (48) mukaan.

	B63	BJ66	BV69	B75	BV75	B82	B86	BP89 BP99	B97
$M_{kiskosija}$ sallittu [kNm]	13	13	13	14	14	14	17	17	17
Sallittu voima $R_{sallittu}$ [kN]	115	115	115	124	124	124	151	151	151
Voimavaatimus P [kN]	133	133	133	133	133	133	160	160	160
Kisko	54 E 1	54 E 1	54 E 1	54 E 1	54 E 1	K43	54 E 1	54 E 1 60 E 1	54 E 1 60 E 1

Raportin ERRI/ORE D71/RP 9 mukaan suurin ratapölkyn keskikohtaan vaikuttava positiivinen momentti lasketaan kaavalla 50. Suurin negatiivinen ratapölkyn keskikohtaan vaikuttava momentti lasketaan kaavalla 51. Suurin momentti kiskon alla lasketaan kaavalla 52.

$$(50) \quad M_{\max} = R_{\max} \cdot \frac{1}{2 \cdot d - \chi \cdot \frac{E \cdot I_{keski}}{E \cdot I_{kiskosija}} (\cdot 1,95)}$$

$$(51) \quad M_{\max} = R_{\max} \cdot \frac{1}{2 \cdot d + \chi \cdot \frac{E \cdot I_{keski}}{E \cdot I_{kiskosija}} (\cdot 1,95)}$$

R_{\max}	on	pölkkyyn vaikuttava suurin kuorma [kN]
d		pölkyn pään ja kiskon keskilinjan välinen etäisyys [m]
E		ratapölkyn kimmomoduuli [MPa]
I_{keski}		ratapölkyn keskiosan hitausmomentti [cm ⁴]
$I_{kiskosija}$		ratapölkyn hitausmomentti kiskosijan kohdalla [cm ⁴]
λ		(d-e)/2 eli pölkyn pään ja kiskon keskilinjan välisen etäisyyden (d) ja pölkkyyn kiskon alapuolella pölkyn neutraaliakselin tasossa vaikuttavan kuormituksenjakautaman pituuden (e) erotuksen puolikas

χ vakio (= 1,35)

$$(52) \quad M_{\max} = R_{\max} \cdot 3,6 \cdot \frac{\lambda}{d^2}$$

3.4 Puuratapölkyn kestävyys

Puuratapölkyn kimmomoduulina voidaan käyttää 150 000 N/mm².

Puupölkyn mitoituksessa olennaisinta ei yleensä ole pölkyn taivutuslujuus, kuten betoniratapölkkyllä, vaan pölkyn yläpintaan kohdistuva pintapaine (puristusjännitys). Suomessa käytössä olevalle männylle sallituksi puristusjännitykseksi on annettu $p_{sall} = 2$ MPa. Ulkomailla vastaavia arvoja pehmeille puulajeille on välillä 1,7...2 MPa. Koville puulajeille sallittu puristusjännitys Suomessa on $p_{sall} = 3$ MPa.

Sallittu taivutusjännitys on $\sigma_{b_sall} = 10$ MPa pehmeille puulajeille ja $\sigma_{b_sall} = 11$ MPa koville puulajeille /2/.

Puuratapölkyn taivutusvastus lasketaan kaavalla (53) /29/. Kaavoissa (53) ja (54) oleva kerroin 0,9 ottaa huomioon ratapölkkyissä tyypillisesti olevat reunojen pyöristykset.

$$(53) \quad W_x \approx 0,9 \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Jäyhyysmomentti lasketaan kaavalla (54).

$$(54) \quad I_x \approx 0,9 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}$$

W_x on puuratapölkyn taivutusvastus [mm³]
 b puuratapölkyn leveys [mm]
 h puuratapölkyn paksuus [mm]
 I_x puuratapölkyn jäyhyysmomentti [mm⁴]

Puuratapölkkyjen laskennassa pölkkyyn kohdistuvaksi voimaksi oletettu voima R_{sall} lasketaan sallitun jännityksen ja aluslevyn pinta-alan tulona kaavan (55) mukaan. Aluslevyjen mittoja on esitetty taulukossa 8.

$$(55) \quad R_{sall} = \frac{P_{sall}}{A_{aluslevy}}$$

Arvolla $p_{sall} = 2$ MPa laskettuna saadaan AJR 54-aluslevylle $R_{sall} = 110$ kN ja AN 30 aluslevylle $R_{sall} = 90$ kN.

Taulukko 8. Aluslevyjen mittoja.

Aluslevy	Pituus [mm]	Leveys [mm]
AR43, AN 43	325	160
Sk1 12 / 60 E 1	365	160
AN60	350	160
AR 30, AN 30	300	150
AK 43	345	160
AJR 54, AK 54	360	160

Puuratapölkyn taivutusmomentti on laskettava sekä pölkyn keskiosalle että kiskosijalle. Suurempi momenttiarvo on mitoittava tekijä. Pölkyn keskiosan momentti M_{keski} lasketaan kaavalla (56). Kiskosijan taivutusmomentti $M_{kiskosija}$ lasketaan kaavalla (57).

$$(56) \quad M_{keski} = \frac{R}{4} \cdot (l_1 - 2 \cdot d)$$

$$(57) \quad M_{kiskosija} = \frac{R \cdot d^2}{l}$$

M_{keski} on puuratapölkyn keskiosan taivutusmomentti [Nm]
 R puuratapölkyn tukipistevoima [kN]
 l_1 kiskojen keskilinjoiden etäisyyden puolikas = Suomessa 800 mm
 d pölkyn pään ja kiskon keskilinjien välinen etäisyys [mm]
 $M_{kiskosija}$ puuratapölkyn kiskosijan taivutusmomentti [Nm]
 l puuratapölkyn pituus [mm]

Sallittu taivutusmomentti M_{sall} lasketaan kaavalla (58) /7/

$$(58) \quad M_{sall} = \sigma_{b,sall} \cdot W$$

Puuratapölkyn kiskosijan taivutusmomentti voidaan laskea myös kaavalla (59) /29/.

$$(59) \quad M_{kiskosija} = \frac{R}{8} \cdot (l - G - d)$$

R puuratapölkyn tukipistevoima [kN]
 l puuratapölkyn pituus [mm]
 G raideleveys [1600 mm]
 d aluslevyn pituus [mm]

3.5 Sallitut raiteen rasitukset

Taulukossa 9 on laskettu NBS-menetelmää käyttäen nykytilanteessa eri raiteille syntyvät rasitukset. Akselipainon $P_0=2Q_0 \leq 225$ kN raja-arvot ovat Jtt:sta.

Laskelmissa on otettu huomioon 20 %:n dynaaminen lisä (keskipakoisvoima kaarteessa, raidevirheet, kuormausepä tarkkuus jne.)

Puupölkyn pintapaine on saatu jakamalla pölkkyyn kohdistuva voima (laskettu kuten betoniratapölkkyissä) aluslevyn pinta-alalla.

Taulukosta 9 voi huomata, että 250 kN:n akselipaino nopeudella 60 km/h vastaa rasituksiltaan kutakuinkin 225 kN:n akselipainoa nopeudella 100 km/h. Nopeuden nosto 250 kN:n akselipainolla 60 km:sta/h korottaa rasituksia nykyisestä.

300 kN:n akselipaino merkitsee selkeästi nykyistä suurempia rasituksia, mutta ei näiden laskelmien mukaan tuota ongelmia 60 E 1-betoniratapölkkyraiteilla pienellä nopeudella. Hyvällä alustalla olevalla 54 E 1 -raiteella myös 300 kN:n käyttö onnistuu.

PrEN 13674-1 mukaisen 220-laadun (vetomurtolujuus vähintään 680 MPa) kiskojen osalta on sallittuna jännityksenä käytetty 160 MPa. Sallittuna jännityksenä 260-laadun (vetomurtolujuus väh. 880 MPa) osalta on käytetty 180 N/mm^2 . Nämä ovat Euroopassa yleisesti käytettyjä raja-arvoja. Käytännössä kaikkien K43- ja 54 E 1 -raiteiden sallitut jännitykset on mitoitettava 160 MPa:n mukaan, koska kiskotus on varsin sekalaista. 60 E 1 -kiskot ovat kaikki vähintään 260-laatua, joten niillä voidaan käyttää mitoitusperustana 180 MPa.

Tukikerroksen sallittuna kuormituksena on pidetty noin 0,3 MPa, vaikka VR Raidejaoston muistion nro 68 mukaan sallittu jännitys on 0,4 MPa /29/.

Radan laatukertoimen κ muuttuminen 0,2:sta 0,1:een pienentää kiskojen jännityksiä noin 27 %. Pölkkyjen kuormitus muuttuu noin 20 %. Tukikerroksen kuormitus muuttuu tuolloin näiden laskelmien mukaan lähes suoraan staattisen akselipainon funktiona (noin 10...11 %). κ :n arvolla 0,1 (kp-tasot 1 ja 1A) lasketut arvot ovat suluissa (taulukko 9).

Taulukossa 9 käytetyt merkinnät: κ = radan laatukerroin, C = alustaluku. Kiskon jännitykset on laskettu todennäköisyydellä 99,85 %. Puupölkyn pintapaineen arvot on laskettu todennäköisyydellä 97,5 %. Tukikerroksen jännitykset on laskettu todennäköisyydellä 84,15 %.

Taulukko 9. Eri raiderakenteiden eri komponenttien kuormituksia nyky- ja suunnitellussa tilanteessa.

Rakenne	nopeus/ akseli- paino km/h /kN	Kiskon jännitykset (160/180 N/mm ²)		Puupölkyn pintapaine (2,00 N/mm ²)		Betonipölkky (115/150 kN)		Tukikerros (0,3 N/mm ²)	
		C=0,1 N/mm ³	C=0,4 N/mm ³	C=0,1 N/mm ³	C=0,4 N/mm ³	C=0,1 N/mm ³	C=0,4 N/mm ³	C=0,1 N/mm ³	C=0,4 N/mm ³
K43, sepeli, puu κ=0,2 (0,1), Pölkkyväli a =670 mm Välilevy = Ei Aluslevy = AR 43 320×160 mm Pölkky 240×160×2700mm Tukikerroksen paksuus 450 mm	80/225	176 (141)	141 (113)	1,67 (1,42)	2,22 (1,89)	—	—	0,29 (0,26)	0,38 (0,35)
	100/180	146 (115)	117 (93)	1,38 (1,15)	1,83 (1,54)	—	—	0,23 (0,21)	0,31 (0,28)
	110/160	133 (104)	107 (84)	1,25 (1,03)	1,66 (1,38)	—	—	0,21 (0,19)	0,28 (0,25)
	35/250	178 (148)	143 (119)	1,73 (1,51)	2,31 (2,01)	—	—	0,31 (0,28)	0,41 (0,38)
54 E 1, sepeli, puu κ=0,2 (0,1), Pölkkyväli a =610 mm Välilevy = Ei Aluslevy = AJR 54 360×160 mm Pölkky 240×160×2700mm Tukikerroksen paksuus 450 mm	100/225	132 (104)	106 (84)	1,32 (1,10)	1,69 (1,42)	—	—	0,25 (0,23)	0,32 (0,29)
	120/200	121 (94)	98 (76)	1,20 (1,00)	1,55 (1,28)	—	—	0,23 (0,20)	0,29 (0,26)
	60/250	135 (110)	109 (89)	1,37 (1,18)	1,77 (1,52)	—	—	0,27 (0,25)	0,35 (0,32)
	80/250	141 (112)	114 (91)	1,42 (1,20)	1,83 (1,54)	—	—	0,27 (0,25)	0,35 (0,32)
	100/250	146 (115)	118 (93)	1,46 (1,22)	1,88 (1,57)	—	—	0,28 (0,25)	0,36 (0,32)
	60/300	162 (132)	131 (106)	1,65 (1,41)	2,12 (1,82)	—	—	0,32 (0,30)	0,42 (0,38)
54 E 1, sepeli, betoni B86, BP89, B97, BP99 κ=0,2 (0,1), Pölkkyväli a =610 mm Välilevy = kumi 10 mm, c _{dyn} =135 kN/mm Aluslevy = Ei Pölkky 280×220×2600mm (R _{sall} =150 kN) Tukikerroksen paksuus 550 mm	100/225	133 (105)	114 (90)	—	—	75 (63)	89 (74)	0,22 (0,20)	0,27 (0,24)
	120/200	123 (95)	105 (82)	—	—	69 (57)	82 (67)	0,20 (0,18)	0,24 (0,22)
	60/250	136 (111)	117 (95)	—	—	78 (67)	93 (80)	0,24 (0,22)	0,29 (0,26)
	80/250	142 (114)	121 (97)	—	—	81 (68)	96 (81)	0,24 (0,22)	0,29 (0,26)
	100/250	148 (116)	126 (100)	—	—	83 (70)	99 (83)	0,25 (0,22)	0,30 (0,27)
	60/300	164 (133)	140 (114)	—	—	94 (81)	112 (96)	0,29 (0,26)	0,34 (0,31)
	80/300	170 (136)	146 (117)	—	—	97 (82)	115 (98)	0,29 (0,27)	0,35 (0,32)
	100/300	177 (140)	152 (120)	—	—	100 (84)	119 (99)	0,30 (0,27)	0,35 (0,32)

54 E 1, sepeli, betoni B63, B75 BJ66, BV69, BV75 $\kappa=0,2$ (0,1), Pölkkyväli $a=610$ mm Välilevy = kumi 6 mm, $c_{dyn}=300$ kN/mm Aluslevy = Ei Pölkky $280 \times 210 \times 2500$ mm ($R_{sall}=115$ kN) Tukikerroksen paksuus 550 mm	100/225	132 (104)	109 (86)	—	—	76 (63)	94 (79)	0,24 (0,21)	0,30 (0,27)
	120/200	122 (95)	101 (78)	—	—	69 (57)	86 (71)	0,22 (0,19)	0,28 (0,24)
	60/250	135 (110)	112 (91)	—	—	79 (68)	98 (84)	0,25 (0,23)	0,32 (0,29)
	80/250	141 (113)	117 (93)	—	—	82 (69)	101 (86)	0,26 (0,24)	0,32 (0,29)
	100/250	146 (115)	121 (96)	—	—	84 (70)	105 (87)	0,26 (0,24)	0,33 (0,30)
	60/300	162 (132)	134 (109)	—	—	95 (81)	118 (101)	0,31 (0,28)	0,38 (0,35)
	80/300	169 (135)	140 (112)	—	—	98 (83)	122 (103)	0,31 (0,28)	0,39 (0,35)
	100/300	176 (138)	146 (115)	—	—	101 (84)	126 (105)	0,32 (0,29)	0,39 0,36
60 E 1, sepeli, betoni BP89, B97, BP99 $\kappa=0,2$ (0,1), Pölkkyväli $a=610$ mm Välilevy = kumi 10 mm, $c_{dyn}=135$ kN/mm Aluslevy = Ei Pölkky $280 \times 220 \times 2600$ mm ($R_{sall}=150$ kN) Tukikerroksen paksuus 550 mm	100/225	115 (91)	98 (77)	—	—	72 (61)	85 (71)	0,22 (0,19)	0,25 (0,23)
	120/200	106 (83)	91 (70)	—	—	66 (55)	77 (64)	0,20 (0,17)	0,23 (0,20)
	60/250	118 (96)	101 (82)	—	—	76 (65)	88 (76)	0,23 (0,21)	0,27 (0,25)
	80/250	123 (98)	105 (84)	—	—	78 (66)	91 (77)	0,24 (0,21)	0,28 (0,25)
	100/250	128 (101)	109 (86)	—	—	80 (67)	94 (78)	0,24 (0,22)	0,28 (0,25)
	60/300	142 (115)	121 (98)	—	—	91 (78)	106 (91)	0,28 (0,25)	0,32 (0,30)
	80/300	148 (118)	126 (101)	—	—	94 (79)	109 (93)	0,28 (0,26)	0,33 (0,30)
	100/300	154 (121)	131 (103)	—	—	97 (81)	113 (94)	0,29 (0,26)	0,34 (0,30)

3.6 Jatkosrakenteet

Jatkosrakenteissa vaikuttava voima voi olla noin kaksinkertainen muualla raiteessa vaikuttavaan voimaan nähden. Voidaan olettaa, että jatkosrakenteissa jatkokseen vaikuttaa pyöräkuormasta aiheutuva momentti M_1 kaavan (60) mukaisesti.

$$(60) \quad M_1 \approx \frac{M_{dyn} \cdot l_{jatkos}}{2 \cdot a}$$

M_1 on kiskonjatkoksen taivutusmomentti [kNm]
 M kiskon dynaaminen taivutusmomentti kaavan (61) mukaan [kNm].
 l_{jatkos} kiskon pään etäisyys jatkospölkyn keskikohdalta [mm]
 a normaalipölkkyväli, jolla σ_{dyn_jalka} (kaava (61)) on laskettu [mm]

Kiskon dynaaminen taivutusmomentti saadaan dynaamisen jännityksen ja taivutusvastuksen tulosta kaavalla (61)

$$(61) \quad M_{dyn} = \sigma_{dyn, jalka} \cdot W_{jalka}$$

Vaakasuuntainen kitka kiskon ja sidekiskon välillä saa aikaan pienen lisän verrattuna sidekiskon taivutusmomenttiin. Rajoittavan kitkakertoimen lasketaan olevan 0,03. Kitkavoiman aiheuttama momentti M_2 lasketaan kaavalla (62).

$$(62) \quad M_2 = \mu \cdot \frac{M_{dyn}}{2 \cdot l_{jatkos}} \cdot h$$

M_2 on jatkoksesta vaikuttava kitkavoiman momentti [kNm]
 μ kitkakerroin (= 0,03)
 h sidekiskon korkeus [mm]
 l_{jatkos} kiskon pään etäisyys jatkospölkyn keskikohdalta [mm]

Sidekiskon jännitys voidaan laskea kaavan (63) mukaan. Sallittu jännitys on 54 E 1 – sidekiskolle noin 180 MPa (tarkkaa arvoa ei ole löytynyt). Materiaalin myötöraja on noin 300 MPa, johon on lisätty varmuuskerroin 1,67. Sidekiskojen ominaisuuksia on esitetty taulukossa 10. Sidekiskojen vetomurtolujuus on yleensä 500...600 MPa.

Taulukko 10. Sidekiskojen ominaisuuksia.

Sidekisko	W [cm ³]	I _{x-x} [cm ⁴]	A [mm ²]	G [kg/m]	h [mm]	l _{jatkos} [mm]
60 E 1	71,225	430,2	3735	29,32	120,95	305
54 E 1	48,4	260,74	2920	22,94	106,5	170

$$(63) \quad \sigma = \frac{M_{jatkos}}{W_{sidekisko}} = \frac{M_1 + M_2}{W_{sidekisko}}$$

σ on sidekiskon jännitys [MPa].

Kaavoilla (60)...(63) laskettuna 54 E 1 -kiskolla nopeudella 60 km/h sidekiskojatkoksen suurin akselipaino normaalilla jatkosratapölkkyvälillä ja suurin pölkkyväli eri akselipainoilla on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Sidekiskojen sallitut kuormitukset nopeudella 60 km/h laskettuina kaavalla (63).

Sidekisko	a = 340 mm	a = 400 mm	Q ₀ = 200 kN	Q ₀ = 225 kN	Q ₀ = 250 kN	Q ₀ = 300 kN
54 E 1 C _{kok} =0,04 N/mm ³	Q ₀ =300 kN	Q ₀ =255 kN	a=523 mm	a=463 mm	a=415 mm	a=342 mm
54 E 1 C _{kok} =0,1 N/mm ³	Q ₀ =360 kN	Q ₀ =305 kN	a=625 mm	a=554 mm	a=496 mm	a=411 mm

Jatkosraon vaikutus raiteen rasiin

Jatkosraosta ja pyörän epätasaisuuksista raiteen rakenteeseen vaikuttavaa voimaa kutsutaan P₂-voimaksi. Se on keskitaajuinen (~ 20...100 Hz) voima, joka vaikuttaa koko raiderakenteeseen. Suurempitaajuuksista ja suurempaa P₁-voimaa käsitellään tässä vain kaavana, koska se vaikuttaa ainoastaan kiskon pintaan.

P₁-voima lasketaan kaavalla (64)

$$(64) \quad P_1 = Q_0 + 2 \cdot \alpha \cdot v \sqrt{\frac{k_h \cdot m_t}{1 + \frac{m_t}{m_u}}}$$

Q₀ on staattinen pyöräpaino [kN]
 2α pyörän liikeradan kokonaiskulma jatkoksessa [rad]
 v nopeus [m/s]
 k_h hertsinen kosketusjäykkyys [noin 2×10⁹ N/m]
 m_u pyörän jousittamaton massa [kg/pyöräkerta/2]
 m_t raiteen vaikuttava massa [kg]

P₂-voima lasketaan kaavalla (65)

$$(65) \quad P_2 = Q_0 + 2 \cdot \alpha \cdot v \cdot \sqrt{k_t \cdot m_u} \cdot (I_{raide}) \quad [\text{kN}]$$

I_{raide} voidaan haluttaessa jättää pois.

k_t on tehollinen raiteen jäykkyys kaavan (66) mukaan

$$(66) \quad k_t = C_{kok} \cdot \frac{A}{2} \quad [\text{N/m}]$$

I_{raide} lasketaan kaavalla (67)

$$(67) \quad I_{raide} = \sqrt{\frac{m_u}{m_u + m_t}} \cdot \left(1 - \frac{c_t \cdot \pi}{\sqrt[4]{k_t \cdot (m_u + m_t)}} \right)$$

c_t on tehollinen raiteen vaimennus [Ns/m]

3.7 Raiteen rasituksen raja-arvot Ruotsissa

Ruotsissa Banverket on määritellyt eri raidetyypeillä käytettävät 250 kN:n akselipainon nopeudet taulukon 12 mukaisiksi. Nämä eivät perustu tarkkoihin tutkimuksiin, vaan ne on laskettu teoreettisesti. Raiteen todellista kuntoa ei myöskään ole tarkasti otettu huomioon. /5/

Taulukko 12. Ruotsissa käytettävät nopeudet 250 kN:n akselipainolla eri päällysrakennetyypeillä.

Nopeus [km/h]	Kisko	Ratapölkkyt	Pölkkyväli [mm]	Jatkokset
100	60 E 1	Betoni	600	Jk-raide
80	BV 50	Betoni	650	Jk-raide
70	BV 50	Puu, Heyback	650	Jk-raide
40	SJ 43	Puu, naula	750	Lk-raide

3.8 Raide sillalla

Eri kuormakaavioiden vaikutus on esitetty RHK:n julkaisussa A3/2000 ”Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot” /12/.

Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO) sallii osassa 2 liikkuvalla kalustolle ainoastaan 75 kN/m kuormituksen siltarakenteisiin, kun muualla on sallittu 80 kN/m. Tämä mitoittaa koko liikkuvan kaluston /20/.

RSO:n mukaan siltojen mitoituksessa käytettävä sysäyslisä on riippumaton akselipainosta ja junan nopeudesta. Se on mitoitettu kiskon kulkupinnan ja sillan kannen välisen etäisyyden ja sillan pituuden mukaan /20/.

Siltaan vaikuttavan pitkittäiskuorman lasketaan olevan 15...28 % junakuormasta. Jatkuvakiskoraiteella pitkittäiskuorman prosenttiluku alkaa kasvaa, kun sillan kannen pituus on noin 77 m. Kun sillan kannen pituus ylittää 1166 m, saavutetaan yli 27 %:n taso. Lyhytkiskoraiteella, tai kun sillalla on yksi kiskonliikuntalaite, vastaavat rajat ovat 31 m ja 576 m. Kun sillan molemmissa päissä on kiskonliikuntalaite, pitkittäiskuormien vaikutus on aina 28 % junakuormasta. Pystykuorman ollessa 75 kN/m pitkittäiskuorma on siitä 28 % eli 21 kN/m /20/.

UIC määrelehti 774-3 R ”Track/bridge interaction – Recommendations for calculations” ottaa kohdassa B 1.3.2 jarrutusvoiman lähtökohdaksi arvon 20 kN/m /27/.

Nämä ovat sopusuhdassa muun raiteen pitkittäiskuormien rajoitusten kanssa, eivätkä tuota ylimääräisiä ongelmia /27/.

Junan suistumiskuorma on uusilla silloilla mitoitettu siten, että yksi 125 kN:n painoinen pyörä voi sijaita sillalla missä kohtaa hyvänsä. Akselipainoiltaan 250 kN:n vaunun suistumisen ei pitäisi vahingoittaa sillan kansirakenteita /27/.

3.9 Raiteen vastukset

Akselipainojen korottaminen vaikuttaa raiteelta vaadittavaan vastukseen (tukivoima), joka on riippuvainen nopeudesta..

Raiteen pituussuuntainen vastus tulee merkitseväksi lähinnä junaa jarrutettaessa ($F_{\text{jarru}} = ma$, maksimiarvo on $F_{\text{jarru}} = \mu mg$). Tämä on riippumaton junan kulkuominaisuuksista. Raiteen pituussuuntaisen vastuksen maksimiarvoa rajoittaa joko kiskonkiinnityksen läpivetovastus tai tukikerroksen raiteelle aiheuttama vastus. Uuden kiskonkiinnityksen vähimmäisvastus raidemetriä kohden on kuormittamattomassa raiteessa kaavan (68) mukaan 23 kN/m /25/.

$$(68) \quad W_r = \frac{2 \cdot W_d}{a} \quad [\text{kN/m}]$$

W_r on kiskonkiinnitysten aiheuttama pitkittäisvastus raidemetriä kohden
 W_d yhden kiskosijan kiskonkiinnitysten läpivetovastus
 a pölkkyväli

Standardiehdotuksen prEN 13481 mukaan jatkuvakiskoraiteilla käytettävillä kiskonkiinnityksillä läpivetovastuksen minimiarvo on $W_d=7$ kN. Raskaiden (ja nopeiden) junien radoille on ehdotettu uutta arvoa $W_d=9$ kN (CEN/TC 256/WG 16/TG 6). Lyhytkiskoraiteilla käytettävillä kiskonkiinnityksillä läpivetovastus on lähes 0. Vanhoilla ja kuluneilla kiinnityksillä läpivetovastus on yleensä merkittävästi uusia huonompi, käytännössä ehkä $W_d=5$ kN. Tilannetta voidaan korjata käyttämällä kiskoankkureita. Käytännössä uusilla kiskonkiinnityksillä saavutetaan Suomessa vähintään arvo $W_d=10$ kN /25/.

Kiskon ja pyörän välinen kitkakerroin vaihtelee välillä 0,1 ... 0,5. Käytännössä jarrut pyritään mitoittamaan ainakin vetureiden osalta siten, että hidastuvuus on 0,6... 0,8 m/s².

Jarrutuksesta aiheutuvaksi suurimmaksi voimaksi voidaan käytännössä olettaa kaavan (69) mukaisesti.

$$(69) \quad F_{\text{jarru}} = 0,25 \cdot m \cdot g = m \cdot a \Rightarrow a = 2,5$$

F_{jarru} on jarrutuksesta aiheutuva voima [kN]
 m junan tai vaunun massa [t]
 g maan vetovoiman kiihtyvyys [~ 10 m/s²]
 a hidastuvuus [m/s²].

Kaavaa (69) voidaan soveltaa myös metripainon funktiona. Sallittu metripaino on nykyisin 80 kN/m, jolloin suurimmaksi jarruvoimaksi saadaan $F_{\text{jarru}} = 20$ kN/m.

Kuormittamattoman raiteen ja tukikerroksen välinen kitkavoima on raiteen pituus-suunnassa noin 10...15 kN/m (ERRI D 202) /28/. Kuormitetun raiteen osalta kitkavoima on lähes tuntematon, koska sen mittaaminen on äärimmäisen vaikeaa. Arviot liikkuvat suuruusluokassa $2 \times$ staattinen (ERRI D 202). UIC-määrelehdessä 774-3 "Track/bridge interaction - Recommendations for calculations" annetaan ohjeelliset arvot pitkittäis-vastukselle plastisella alueella taulukon 13 mukaisesti /27/.

Taulukko 13. Raiteen pituussuuntaisia vastuksia UIC 774-3 mukaan.

Tilanne	Vastus [kN/m]
Ratapölkky / tukikerros, huono kunnossapito, kuormittamaton raide	12
Ratapölkky / tukikerros, hyvä kunnossapito, kuormittamaton raide	20
Ratapölkky / tukikerros, kuormitettu raide NS / DBAG	40 / 60
Ratapölkky / silta, kuormittamaton raide, liukumattomat kiinnitykset	40
Ratapölkky / silta, kuormitettu raide, liukumattomat kiinnitykset	60

Käytännössä ei tule sallia suurempaa jarruvoimaa kuin 20 kN/m, vaikka vaunun metri-painoa nostettaisiinkin. Nykyisellään jarruvoimat liikkunevat arvoissa 70...90 kN, mikä jaettuna lyhimpien vaunujen pituudella 12 m antaa 5,8...7,5 kN/m. Arvio perustuu Jtt:n jarrupainotaulukoiden avulla tehtyihin laskelmiin.

Käytännössä esiintyvän jarruvoiman vaikutus raiteen neutraalilämpötilaan on tasaisella radalla noin -4 °C. Jarruvoiman ollessa jostain syystä erityisen suuri vaikutus voi olla jopa -10 °C. Käytännössä tällä on merkitystä vain huonon vastuksen omaavilla raiteilla kuten työmailla ja tilapäisillä raiteilla.

4. KISKOT, HITSAUKSET JA JATKOKSET

4.1 Kiskot

Kiskojen on otettava vastaan erilaiset kalustosta ja lämpövoimista aiheutuvat rasitukset ja siirrettävä ne edelleen ratapölkkyjen kautta tukikerrokseen. Tämä asettaa sekä kiskojen muodolle että materiaalille tiettyjä vaatimuksia /18/.

Akselipainojen nosto edellyttää tukevaa kiskoa, joita Suomessa käytettävistä kiskotyypeistä edustavat 60 E 1 (UIC 60) ja 54 E 1 (UIC 54). Kiskoilla täytyy olla riittävän suuri taivutusvastus ja hitausmomentti (jäykkyys). Näiden suuruuteen vaikuttaa olennaisesti kiskon muoto. Maailmassa yleisimmin käytetty kiskomuoto on ns. Vignole-kiskoprofiili. Sitä käytetään myös Suomessa /18/19/24/.

Kun Ratahallintokeskus nykyisin ostaa uusia kiskoja, ne ovat tyyppiä 60 E 1. Sen sijaan 54 E 1 -kiskot ovat joko kiskohitsaamalla peruskorjattuja kiskoja tai perusparannushankkeilta suoraan kiskonvaihtokohteeseen toimitettavia kiskoja /18/19/24/.

Kiskomateriaalin tärkeitä laatuominaisuuksia ovat homogeenisuus, puhtaus, vetolujuus, kestävyys, kulutuskestävyys, korroosiokestävyys ja hitsattavuus. Suomessa kiskojen teräslaadut vaihtelevat. Yleisimmät kiskot päärataverkolla ovat AM, Imatra, Imatra+ tai 260-laadun terästä. Viimeiseksi eli vuonna 1975 käyttöön otettu teräslaatu on 260, joka venäläisen AM-laadun kanssa on osoittautunut Suomen oloihin hyväksi valinnaksi /18/19/24/.

60 E 1/260 -kisko on kestänyt hyvin myös Ruotsin malmiradalla. Ultraäänitutkimuksilla löydettävien kiskovikojen määrä on olennaisesti pienempi 260-laadun kisko-osuuksilla kuin 260 Mn ja 320 Cr -teräslaaduilla. Havainnot poikittaishalkeamien ja hitsisaumavikojen määristä ovat samansuuntaiset /1/19/.

Asiantuntijat ovat yksimielisiä siitä, että akselipainojen nosto aina 300 kN:iin ei tule merkittävästi lisäämään 60 E 1 -kiskojen kunnossapitotarvetta. Muilla kiskotyypeillä pintavikojen määrän ennustetaan kasvavan huomattavasti, kun taas 60 E 1 -kiskon pintaviat lisääntyvät lähinnä kaarteissa, junien kiihdytyspaikoissa sekä vaihteissa. On huomattava, että jo nykyisilläkin akselipainoilla kaarreosuudet vaativat huomattavasti suurempaa kunnossapitoa kuin suorat rataosuudet. Suorilla rataosuuksilla vikatiheys ei todennäköisesti kasva, jos tukikerros on asianmukaisessa kunnossa ja nopeuksia rajoitetaan. Lisäksi kiskonhionnalla voidaan jonkin verran pidentää kiskon elinikää ja samalla parantaa matkustusmukavuutta henkilöjunissa. Myös alusrakenteen rasitukset ovat pienempiä, jos kiskon kulkupinta on sileä /13/15/17/19/22/.

60 E 1 -kisko täyttää siis kaikki vaatimukset ainakin 250 kN:n akselipainoon saakka. Myöskään 300 kN:n akselipaino ei tältä osin aiheuttane vaikeuksia radanpidolle /13/15/17/19/22/24/.

4.2 Hitsausmenetelmät

Jatkoshitsauksessa yleisesti käytetyt menetelmät ovat:

- leimujatkoshitsaus
- termiittijatkoshitsaus
- kaarijatkoshitsaus

Leimujatkoshitsausta käytetään Suomessa kiskohitsaamossa Kaipiaisissa, termiittijatkoshitsausta pääasiassa raiteissa olevien ratakiskojen jatkoshitsaukseen. Myös kaarijatkoshitsausta käytetään jo raiteeseen asennettujen kiskojen jatkoshitsaukseen /14/18/.

Vuonna 1999 Suomessa korjattiin 15 termiittihitsisauman murtumaa ja 6 leimuhitsisaumaa. Määrä on pieni, kun tiedetään, että jatkuvakiskoraiteilla yhdellä ratakilometrillä on esim. noin 80 leimuhitsisaumaa (sauma joka 25. kiskometri) ja vähintään 14 termiittisaumaa (sauma joka 150. kiskometri) /14/18/.

Kun kiskotus vaihdetaan radan perusparannuksen yhteydessä 54 E 1 -kiskoista 60 E 1 -kiskoihin, kiskot on kuormattu ja viety oikaistaviksi Kaipiaisten kiskohitsaamolle. Kiskohitsaamalla vanhat hitsisaumat on saatu pois ja kierrätyskiskot leimuhitsattu 150 m:n kiskoiksi. Tämän jälkeen ne on kuljetettu ja asennettu K43 -kiskojen tilalle alempi-luokkaisille rataosuuksille ja ratapihoille. Viime vuosina on otettu käyttöön myös suorat toimitukset perusparannuskohteesta kiskonvaihtokohteeseen. Kiskohitsaamossa saatujen käytännön kokemusten mukaan oikaisematon kisko saattaa pettää ennakoimattomasti. Riskin suuruutta arvioitiin taivutuskokeilla, joissa verrattiin uusien leimusaumojen taivutuslujuutta käytettyjen kiskojen leimu- tai termiittisaumoihin. Todennäköistä on, että erityisesti akselipainojen noustessa hitsivikaatiheys kasvaa merkittävästi /14/18/.

Hitsaussaumojen tekeminen on erikoisammattitaitoa vaativa radanrakennuksen työvaihe. Ammattitaito on Suomessa korkealla tasolla niin leimu- kuin termiittihitsauksessakin. Nykyiset ultraäänitutkimusmenetelmät paljastavat kiskossa olevia sisäisiä sekä ulkoisia vikoja kuten esim. halkeamia ja murtumia /14/18/.

4.3 Hitsitutkimus

4.3.1 Tavoite

Osatutkimuksen tavoitteena oli selvittää yksityiskohtaisemmin vanhojen leimu-, termiitti-, ja kaarijatkoshitsien nykytila. Tutkimus toteutettiin siten, että Oy VR-Rata Ab:n Kaipiaisten kiskohitsaamalla tehtiin kiskohitsaamon henkilökunnan avustuksella hitsaussaumojen taivutuskokeita sekä tutkittiin alan kirjallisuutta ja aiemmin julkaistuja raportteja. Tutkimuksen yhteydessä murrettiin 82 jatkoshitsiä, joista 65 oli Kaipiaisten kiskohitsaamon keräämiä ja 17 Uudenkaupungin radalle menossa olleita hitsejä. Viimeksi mainittujen alkuperäinen sijainti oli ollut joko Kouvolan ja Inkeröisten välillä tai Joutsenossa.

4.3.2 Koejärjestelyt

Koenäytteet hankittiin siten, että Oy VR-Rata Ab:n Kaipiaisten kiskohitsaamo keräsi 65 kpl 1,2 m mittaisia 54 E 1 -kiskoja, joissa oli puolivälissä hitsausauma. Lisäksi RHK hankki tutkimukseen Kouvola – Inkeroinen -rataosuudelta ja Joutsenosta tulleita näytteitä.

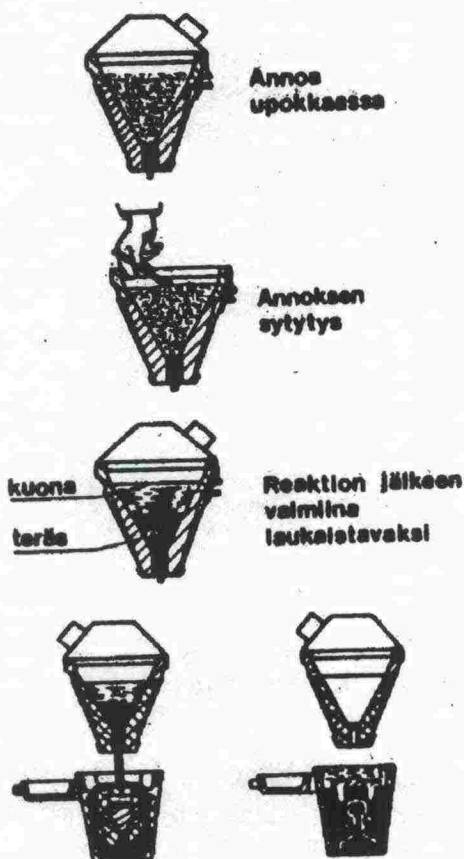
Kaikki näytteet koestettiin Kaipiaisissa 1000 mm:n jänteellä kiskon selästä puristamalla ”Geismar hydraulic rail weld breaking press model PEE 300” -koetaivutuspuristimella. Laitteella määritettiin se kuorma, jolla kisko tai hitsausauma murtui poikki. Kaikki näytteet kuvattiin digitaalikameralla koestuksen jälkeen /14/18/.

4.3.3 Termiittihitsaus

Termiittihitsausta käytetään raiteessa valamalla tapahtuvaan jatkohitsaukseen. Termiittiseos koostuu raudan oksidista ja alumiinista. Yksityiskohdiltaan toisistaan hieman eroavia menetelmiä ovat mm:

- SmW, termiittipikahitsaus rivan kera
- SoW, termiittipikahitsaus ilman ripaa
- SmW-F, termiittipikahitsaus matalan rivan kera
- SkV, termiittipikahitsaus lyhyellä esilämmityksellä
- SoV, termiittipikahitsaus ilman esilämmitystä
- SoWoS, termiittipikahitsaus ilman ripaa ja varren sisäänvalukanavia

Rivalla tarkoitetaan valettaessa kiskon jalkaan ja uumaan tulevaa ylimääräistä massaa. Suomessa käytetään SoWoS – termiittipikahitsausmenetelmää (kuva 3) /14/18/.



Kuva 3. Termiittihitsaus SoWoS- menetelmällä.

Termiittiseos sytytetään erikoissytyttimellä, jonka lämpötila on yli 1300 °C. Seoksessa tapahtuu kemiallinen reaktio, jonka tuloksena saadaan sulaa rautaa. Reaktio on eksotermiäinen eli lämpöä tuottava.

Hitsauksen kulku:

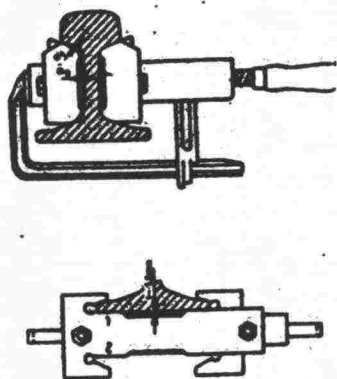
Muotit asetetaan hitsiraon ympärille. Päälle asetetaan esilämmitys-laite ja termiitti-upokas. Kiskon päitä esilämmitetään ja termiittiseos sytytetään. Reaktion jälkeen sulaa termiittiteräs on kerääntynyt upokkaan alaosaan ja kevyempi alumiini-oksidi-kuona sen pinnalle upokkaan yläosaan. Teräs valutetaan muottiin, jossa se jähmettyy. Muotit poistetaan ja lopuksi jatkos hiotaan kiskoprofiilin muotoon. SoWoS-menetelmässä esilämmitys kestää 8...9 min /14/18/.

4.3.4 Leimuhitsaus

Leimuhitsaus on sähkövastushitsausmenetelmä, jossa hitsattavat kiskot kiinnitetään lujasti hitsauskoneeseen. Esilämmitysvaiheessa kiskojen päiden annetaan kevyesti koskettaa toisiaan. Tällöin kosketuspisteessä vaikuttaa hetken ajan suuri sähkövirta ja kosketuspisteet kuumenevat. Kiskoja liikutetaan edestakaisin, kunnes niiden päät ovat kokonaisuudessaan sulamislämpötilassa. Tämän jälkeen kiskojen päät puristetaan yhteen. Saumasta pursunut aines poistetaan ja pinta hiotaan /14/.

4.3.5 Kaarijatkoshitsaus

Kaarijatkoshitsaus on puikkohitsauksena suoritettava sähkövastushitsausmenetelmä, jossa valokaari palaa hitsausvirtapiirissä olevan työkappaleen ja elektrodina toimivan hitsauspuikon välillä. Hitsin muodostumiseen tarvittava lisäaine saadaan hitsauspuikosta ja hitsi muodostuu kuparisia muotteja vasten. (kuva 4) /14/.



Kuva 4. Kaarijatkoshitsauksessa käytettävät varsimuotti ja juurituki.

Hitsaus aloitetaan kiskon jalasta ja edetään ylöspäin. Viimeisenä hitsataan kiskon kulkupinta ja kulkureuna. Jälkilämmityksen ja muottien poiston jälkeen hitsi hiotaan kuumana ja jäähtymisen jälkeen suoritetaan viimeistelyhionta. Kaarihitsaus on nopeampi kuin termiittihitsaus. Kaarihitsauksessa ei raidetta myöskään tarvitse sulkea liikenteeltä koko työvaiheen ajaksi kuten termiittihitsauksessa /14/.

4.3.6 Hitsaussaumojen taivutustulokset

Seuraavissa taulukoissa ja kaavioissa on esitetty hitsaussaumojen koestustulokset. Tulokset on eritelty siten, että taulukko 15 näyttää termiittihitsien ja taulukko 16 leimuhitsien taivutustulokset Kaipiaisten kiskohitsaamon keräämistä kiskoista. Taulukossa 17 on esitetty kaarijatkoshitsien taivutustulokset. Taulukot 18 ja 19 esittävät Kouvola – Inkeroinen -rataosuudelta ja Joutsenosta hankittujen kiskojen taivutustulokset.

Kuvat 5...14 esittävät termiitti-, kaarijatkos- ja leimuhitsien taivutustulokset ryhmiin luokiteltuina sekä Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimista että Kouvola – Inkeroinen -rataosuudelta ja Joutsenosta hankituista kiskoista.

Tulosten analysoimista varten taulukossa 14 on esitetty uusilta hitseiltä vaadittavat taivutusvoiman että taipuman minimiarvot. Kuviin 5, 7, 9, 11 ja 13 on myös piirretty vaadittuja minimiarvoja kuvaava laatikko.

Taulukko 14. 54 E 1 -kiskon uusien hitsien minimiarvot taivutusvoimalle ja taipumalle.

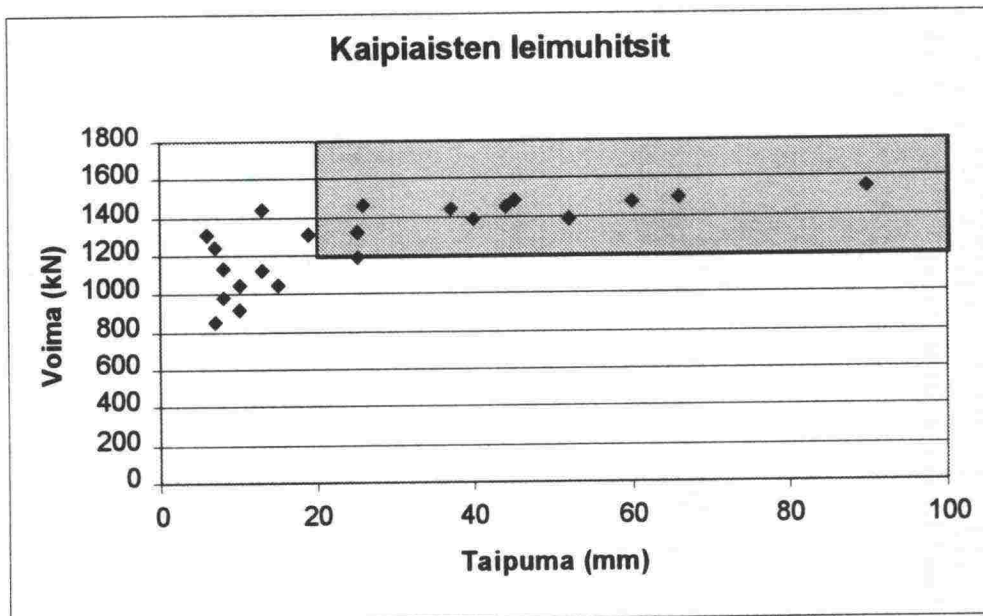
	Termiittihitsi	Kaarijatkoshitsi	Leimuhitsi
Voima (kN)	1000	1000	1200
Taipuma (mm)	15	15	20

Taulukko 15. Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien termiitihitsien tulokset.

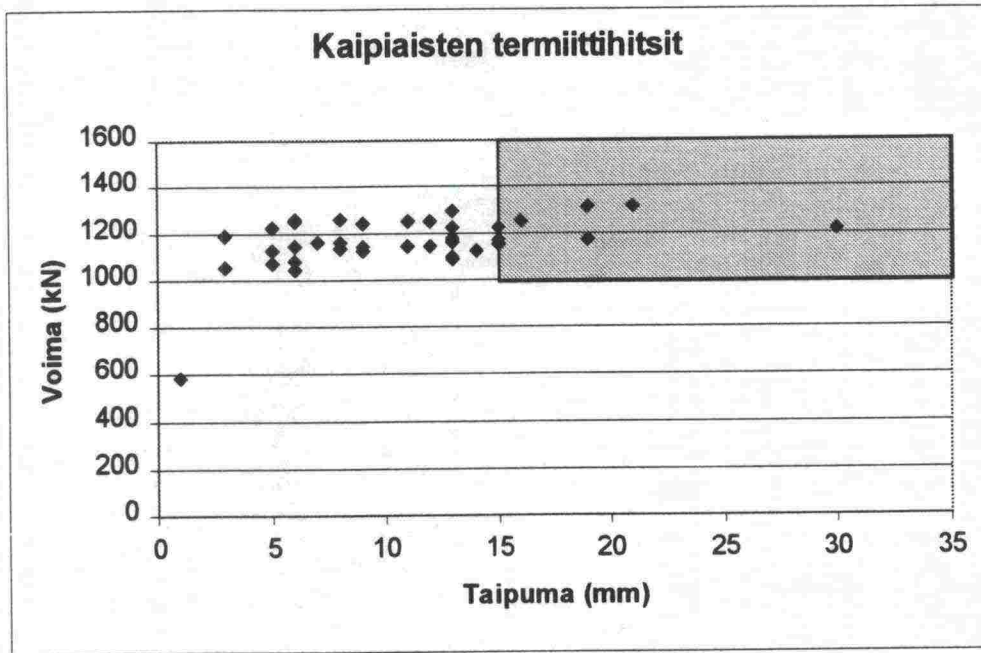
Kiskolaatu	Valssausvuosi	Hitsityyppi	Murtovoima [kN]	Murtotaipuma [mm]
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1260	8
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1140	9
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1250	12
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1170	15
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1150	15
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1160	13
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1120	14
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1100	13
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1120	9
Am/Am	1964/1964	Termiitti	1220	13
Am/Do+	1964/1990	Termiitti	1310	19
Am/Imr+	1964/1968	Termiitti	1140	6
Am/Imr+	1964/1984	Termiitti	1250	6
Br S/Imr+	1992/1973	Termiitti	1220	15
Ilva+/Ilva+	1994/1994	Termiitti	1180	13
Imr/Imr	1973/1973	Termiitti	1160	7
Imr/Imr	1959/1959	Termiitti	1210	30
Imr/Imr	1959/1959	Termiitti	1170	19
Imr/Imr	1959/1959	Termiitti	1090	13
Imr/Imr+	1969/1987	Termiitti	1160	8
Imr+/Am	1973/1964	Termiitti	1290	13
Imr+/Am	1973/1963	Termiitti	1220	5
Imr+/Ilva+	1983/1992	Termiitti	1250	16
Imr+/Imr+	1973/1966	Termiitti	1130	8
Imr+/Imr+	1969/1969	Termiitti	1310	21
Imr+/Imr+	1969/1969	Termiitti	1050	3
Imr+/Imr+	1973/1984	Termiitti	1040	6
Imr+/Imr+	1974/1987	Termiitti	1190	3
Imr+/Imr+	1974/1971	Termiitti	1120	5
Imr+/Imr+	1980/1973	Termiitti	1070	5
Imr+/Imr+	1973/1983	Termiitti	580	1
Imr+/Imr+	1978/1973	Termiitti	1140	11
Imr+/Imr+	1968-1968	Termiitti	1250	11
Imr+/Imr+	1978/1987	Termiitti	1170	13
Imr+/Ts+	1987/1997	Termiitti	1080	6
Imr+/Tz	1973/1996	Termiitti	1240	9
Imr+/Vil+	1973/1975	Termiitti	1140	12
Vil+/Vil+	1975/1975	Termiitti	1260	6

Taulukko 16. Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien leimuhitsien tulokset.

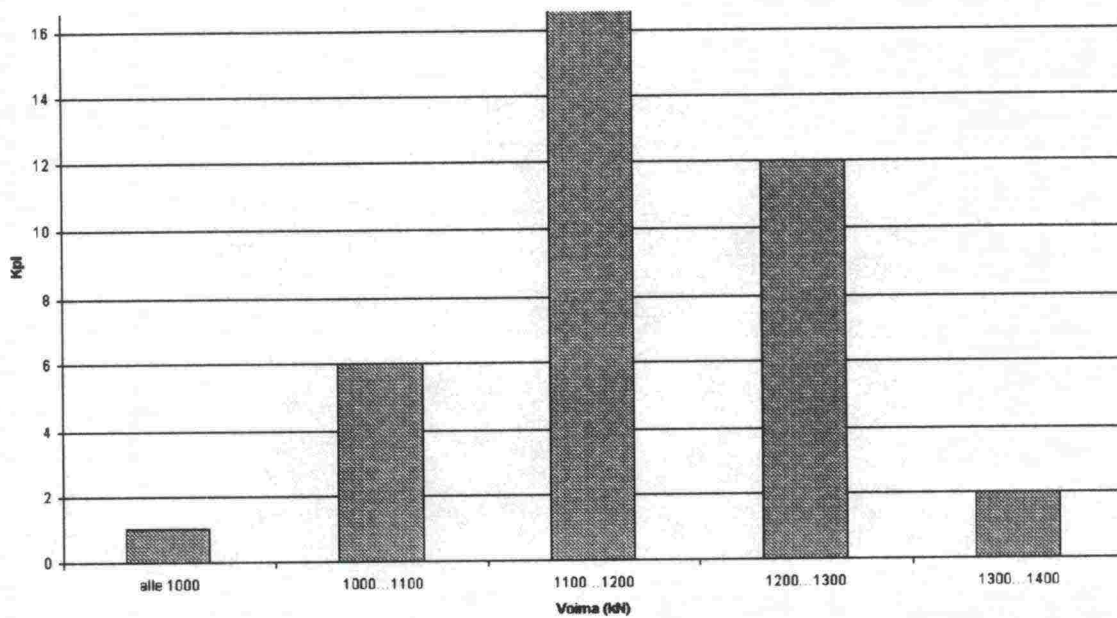
Kiskolaatu	Valssausvuosi	Hitsityyppi	Murtovoima [kN]	Murtotaipuma [mm]
Am/Am	1961/1964	Leimu	1460	26
Am/Am	1962/1961	Leimu	1480	45
Am/Am	1963/1961	Leimu	1390	40
Am/Am	1962/1963	Leimu	1130	8
Am/Am	1962/1964	Leimu	850	7
Am/Am	1961/1964	Leimu	1240	7
Am/Am	1963/1964	Leimu	1310	19
Am/Am	1964/1964	Leimu	1050	10
Am/Am	1964/1964	Leimu	1120	13
Am/Am	1963/1964	Leimu	1310	6
Am/Am	1964/1964	Leimu	1320	25
Br s/Br s	1992/1992	Leimu	1440	13
lmr/lmr	1966/1966	Leimu	1390	52
lmr/lmr	1960/1960	Leimu	920	10
lmr/lmr	1960/1960	Leimu	1190	25
lmr/lmr	1959/1959	Leimu	1050	15
lmr+/lmr+	1973/1973	Leimu	1470	60
lmr+/lmr+	1969/1969	Leimu	1450	44
lmr+/lmr+	1974/1974	Leimu	1500	66
lmr+/lmr+	1968/1968	Leimu	980	8
lmr+/lmr+	1987/1987	Leimu	1550	90
Vil+/Vil+	1975/1975	Leimu	1440	37



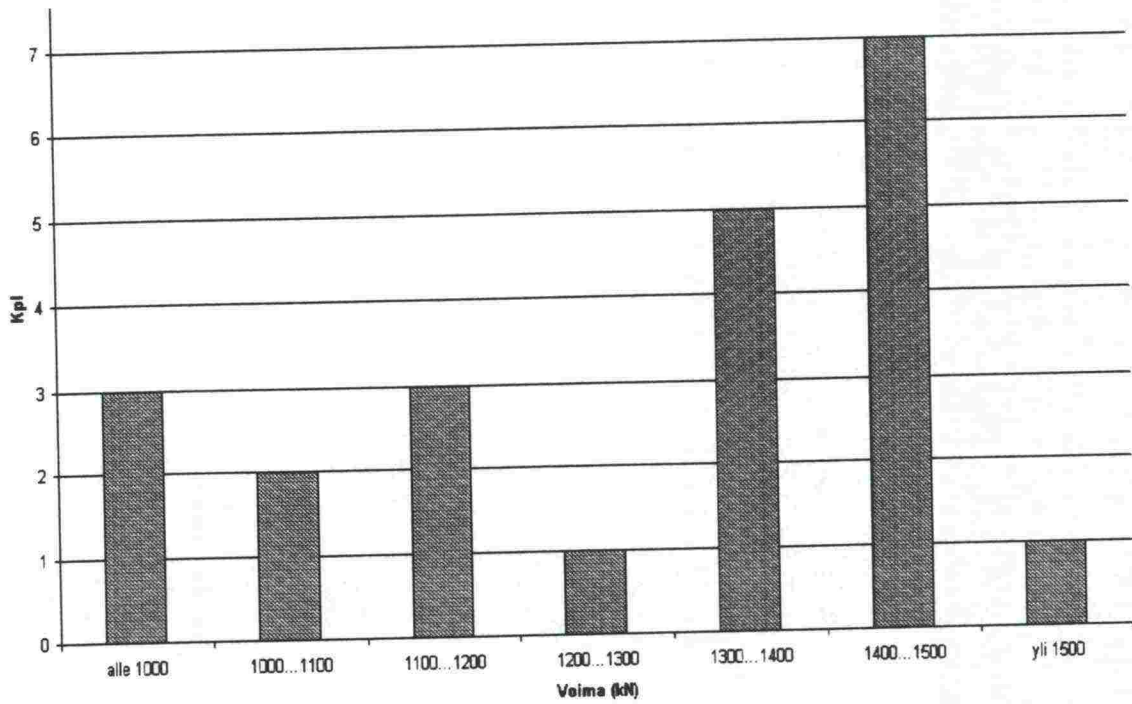
Kuva 7. Leimuhitsit luokiteltuina murtotaipumien ja -voimien mukaan. Uusien hitsien vaatimusalue on esitetty harmaalla.



Kuva 5. Termiittihitsit luokiteltuina murtotaipumien ja -voimien mukaan. Uusien hitsien vaatimusalue on esitetty harmaalla.



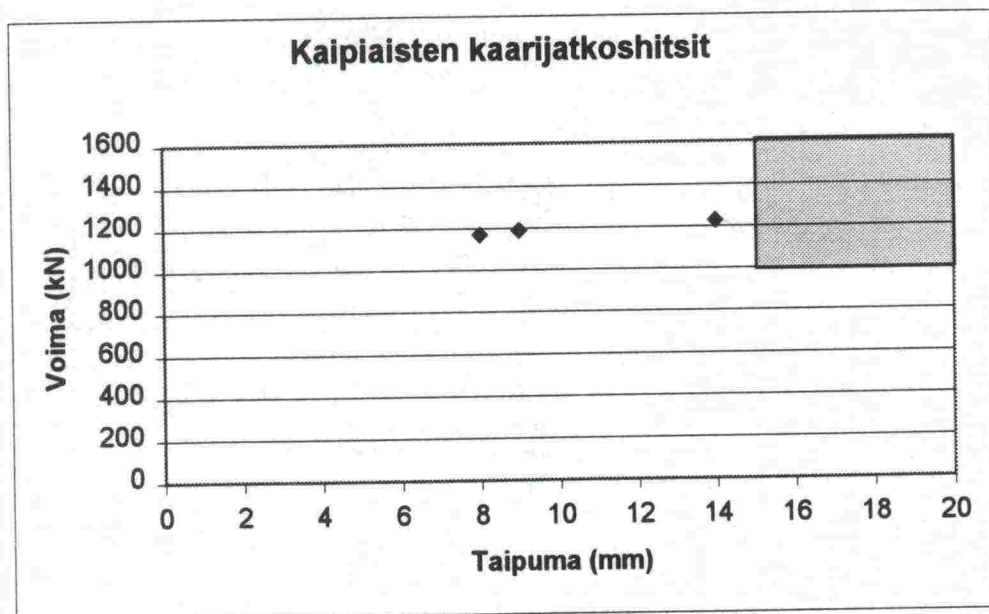
Kuva 6. Termiittihitsit luokiteltuina murtovoimien mukaan.



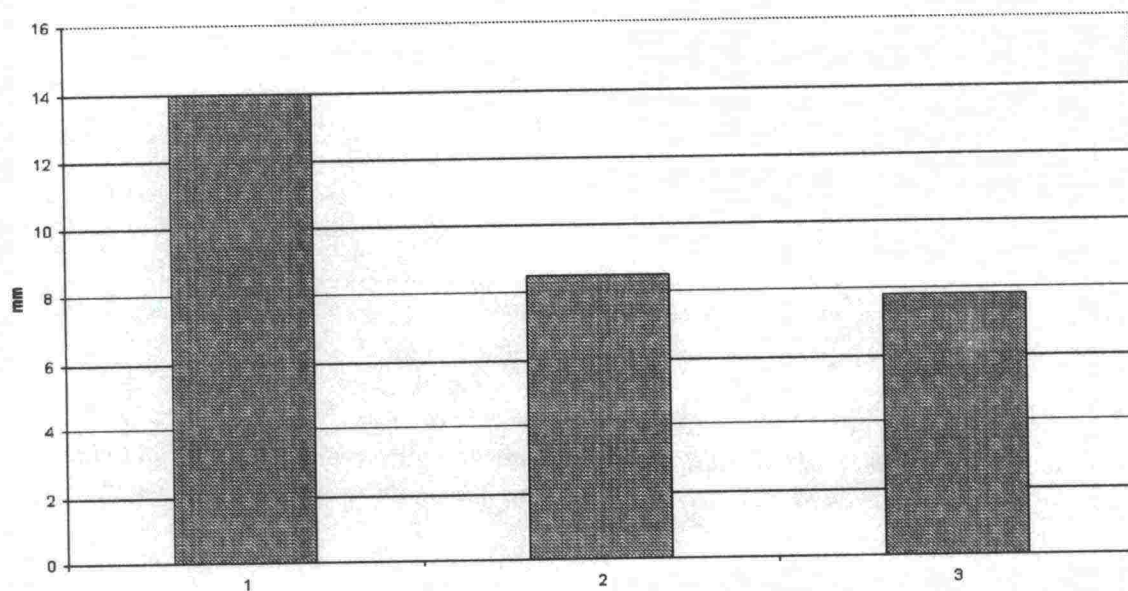
Kuva 8. Leimuhitsit luokiteltuina murtovoiman mukaan.

Taulukko 17. Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien kaarijatkoshitsien tulokset.

Kiskolaatu	Valssausvuosi	Hitsityyppi	Murtovoima [kN]	Murtotaipuma [mm]
Imr+/Imr+	1986/1986	Kaarijatkos	1230	14
Imr+/Imr+	1986/1986	Kaarijatkos	1190	9
Imr/Imr+	1986/1986	Kaarijatkos	1170	8



Kuva 9. Kaarijatkoshitsit luokiteltuina murtotaipumien ja -voimien mukaan. Uusien hitsien vaatimusalue on esitetty harmaalla.



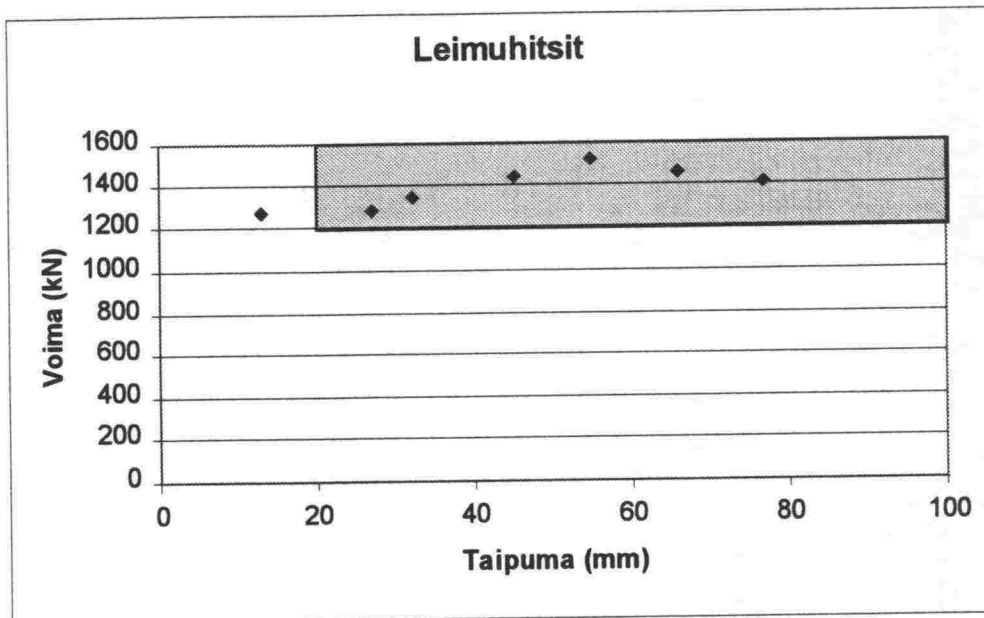
Kuva 10. Kaarijatkoshitsien murtotaipumat.

Taulukko 18. Kouvola–Inkeroinen -rataosuudelta ja Joutsenosta hankittujen leimuhitsien tulokset.

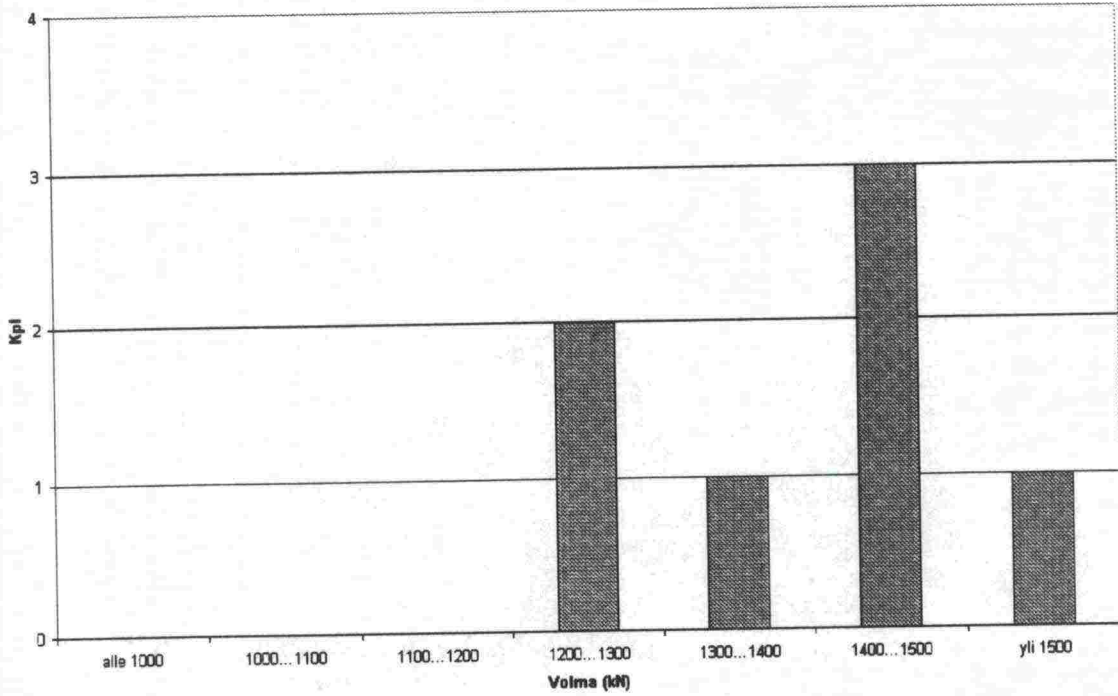
Kiskon alkuperä	Kiskolaatu	Valssausvuosi	Hitsityyppi	Murtovoima [kN]	Murtotaipuma [mm]
Inkeroinen	Imr/??	??	Leimu*	1450	66
Inkeroinen	??	??	Leimu	1410	77
Inkeroinen	??	??	Leimu*	1440	45
Inkeroinen	Am/??	1964	Leimu	1520	55
Inkeroinen	Am/Am	1961/1961	Leimu**	1340	32
Inkeroinen	Imr/Imr	1972/1969	Leimu	1280	27
Joutseno	Am/??	??	Leimu**	1270	13

* = Yksi sidekiskoreikä kiskossa

** = Kaksi sidekiskoreikää kiskossa



Kuva 11. Kouvola – Inkeroinen väliltä sekä Joutsenosta hankitut leimuhitsit luokiteltuina murtotaipumien ja -voimien mukaan. Uusien hitsien vaatimusalue on esitetty harmaalla.

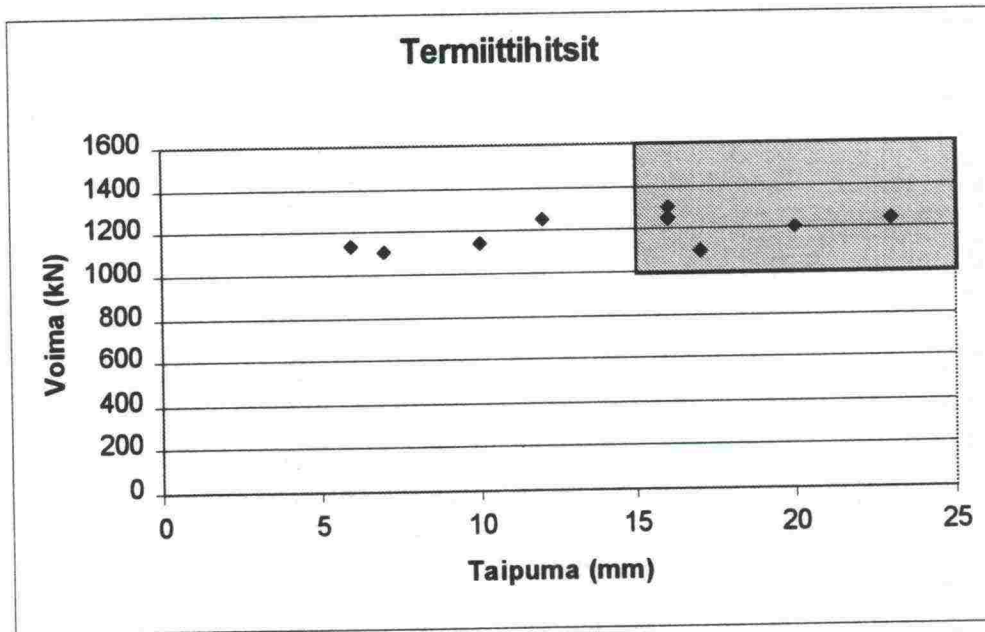


Kuva 12. Kouvola – Inkeroinen väliltä sekä Joutsenosta hankittujen leimuhitsien luokittelu murtovoimien suhteen.

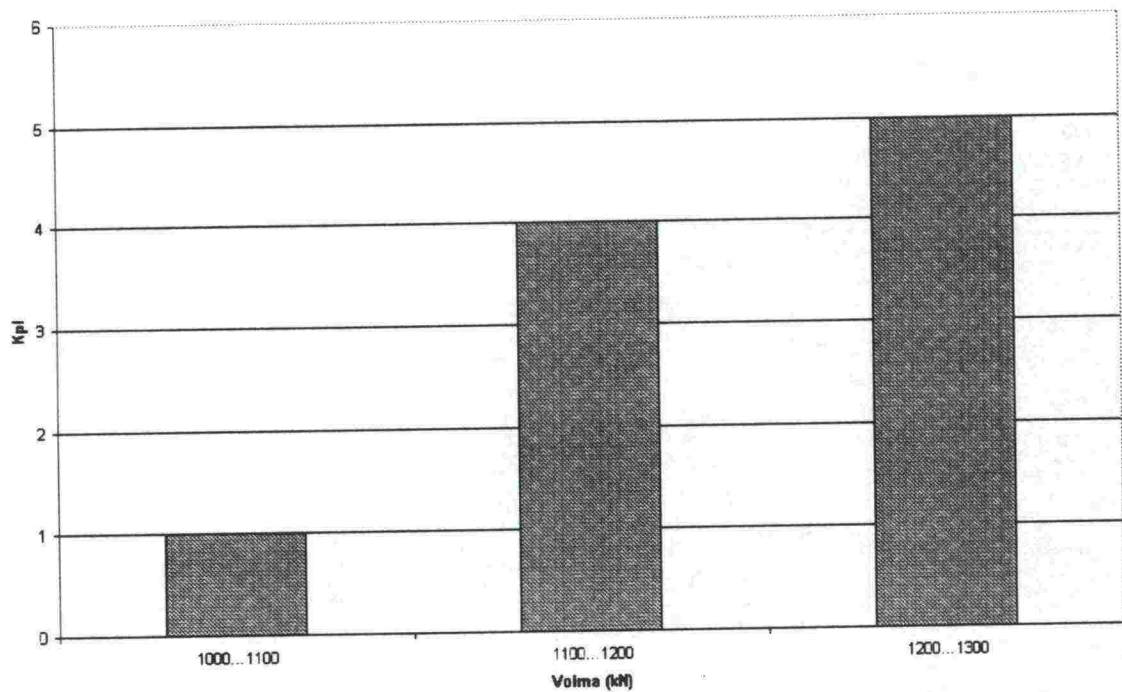
Taulukko 19. Kouvola – Inkeroinen väliltä hankitut termiitihitsien tulokset.

Kiskon alkuperä	Kiskolaatu	Valssausvuosi	Hitsityyppi	Murtovoima [kN]	Murtotaipuma [mm]
Inkeroinen	Am/Imr	??	Termiitti	1140	10
Inkeroinen	Am/?	1961/?	Termiitti**	1200	20
Inkeroinen	Imr/Imr	??	Termiitti	1250	12
Inkeroinen	Am/?	1964/?	Termiitti	1100	17
Inkeroinen	??	??	Termiitti**	1240	23
Joutseno	Am/Imr	1964/?	Termiitti	1110	7
Joutseno	?/Imr	?/1969	Termiitti	1250	16
Joutseno	??	??	Termiitti	1300	16
Joutseno	Imr/Am	1960/1964	Termiitti	1130	6
Joutseno	Am/?	1961/?	Termiitti	1240	16

** = Kaksi sidekiskoreikää kiskossa



Kuva 13. Kouvola – Inkeroinen väliltä sekä Joutsenosta hankitut termitihitsit luokiteltuina murtotaipumien ja -voimien mukaan. Uusien hitsien vaatimusalue on esitetty harmaalla.



Kuva 14. Termitihitsien murtovoimat luokiteltuina (Kouvola – Inkeroinen ja Joutseno).

4.3.7 Taivutustulosten arviointia

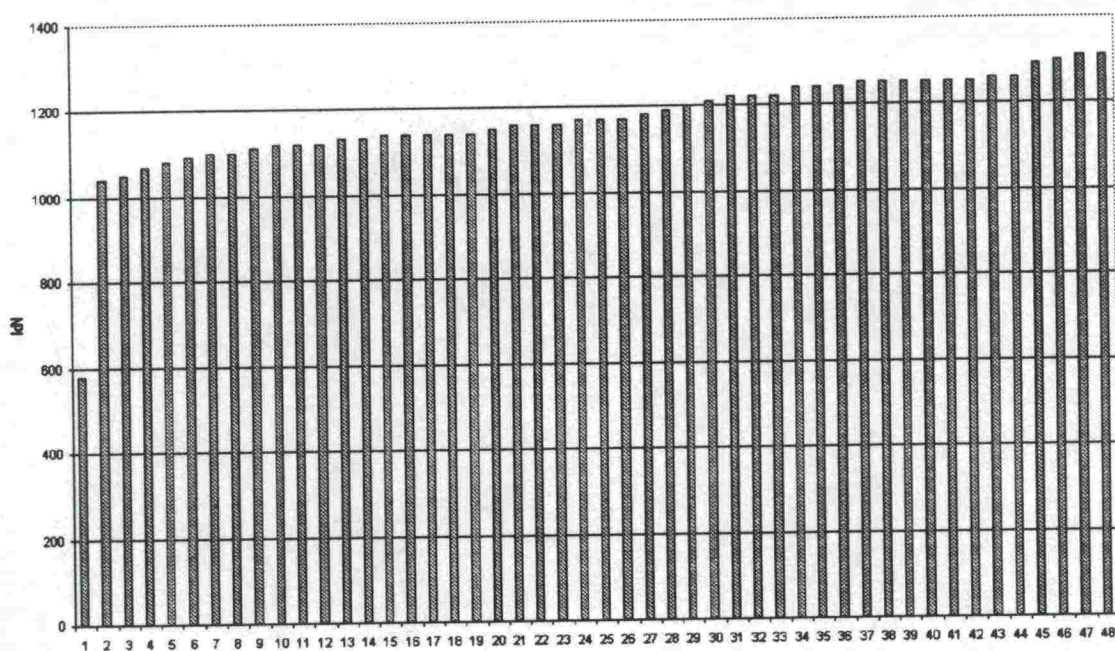
Kaipiaisten kiskohitsaamon keräämien ja Kouvola – Inkeroinen -rataosuudelta sekä Joutsenosta peräisin olleiden kiskojen hitsausseamojen taivutuskokeista voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

Yleisesti ottaen hitsausseamojen taivutuskokeet onnistuivat niin Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien kuin Kouvola – Inkeroinen -väliltä ja Joutsenosta hankittujen kiskojen osalta vähintäänkin ennakko-odotuksia vastaavasti. Koestukset vahvistivat arvelut siitä, että leimuhitsit kestävät kuormitusta enemmän ja taipuvat ennen murtumista enemmän kuin termiittihitsit. Sekä termiitti- että leimuhitseistä muutama poikkesi kuitenkin selvästi keskiarvoista.

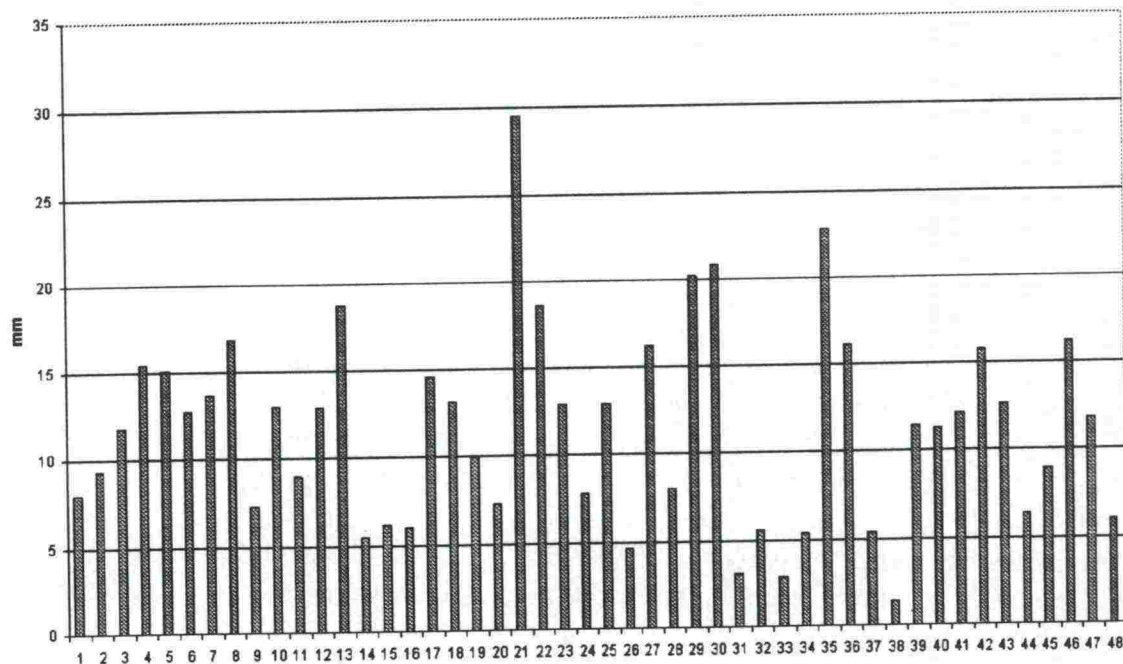
Taivutuskokeissa hitsit koestettiin kiskon selästä painaen. Saadut tulokset olisivat voineet olla toisenlaisia, jos kiskoa olisi puristettu jalan alta. Siten olisi saatu aikaan kiskon selän alueelle veto ja oletettavasti kaikki kiskon selän alueella olevat viat, kuten pintaviat ja hiushalkeamat, olisivat näkyneet tuloksissa selvemmin. Taivutuskokeiden tuloksista voidaan päätellä, että Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien leimuhitsausseamojen kestävyys kannalta hitsin ikä ei ole määräävä.

Junaliikenteen kuormituksen vaikutusta hitseihin ei voida tämän kokeen perusteella sanoa, koska junaliikenteen bruttotonnimäärät ovat tiedossa vain Kouvola – Inkeroinen -rataosuudelta (240 Mbrt) sekä Joutsenosta (250 Mbrt) hankituista näytteistä. Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien kiskojen liikennemäärät eivät ole tiedossa, joten vertailu liikenteen vaikutuksista eri hitsityyppien kestävyteen on mahdotonta.

Kaikkien termiittihitsien murtoon asti tehdyissä taivutuskokeissa tarvittu voima oli hyvin samansuuruinen yhtä poikkeusta lukuun ottamatta (kuva 15). Termiittihitsien taivutusvoiman keskiarvoksi tuli 1170 kN, joka ylittää selvästi uudelta termiittihitsiltä vaaditun minimiarvon 1000 kN. Taipumien keskiarvoksi saatiin 12 mm (kuva 16), mikä ei täytä uusille hitseille asetettua vaatimusta.

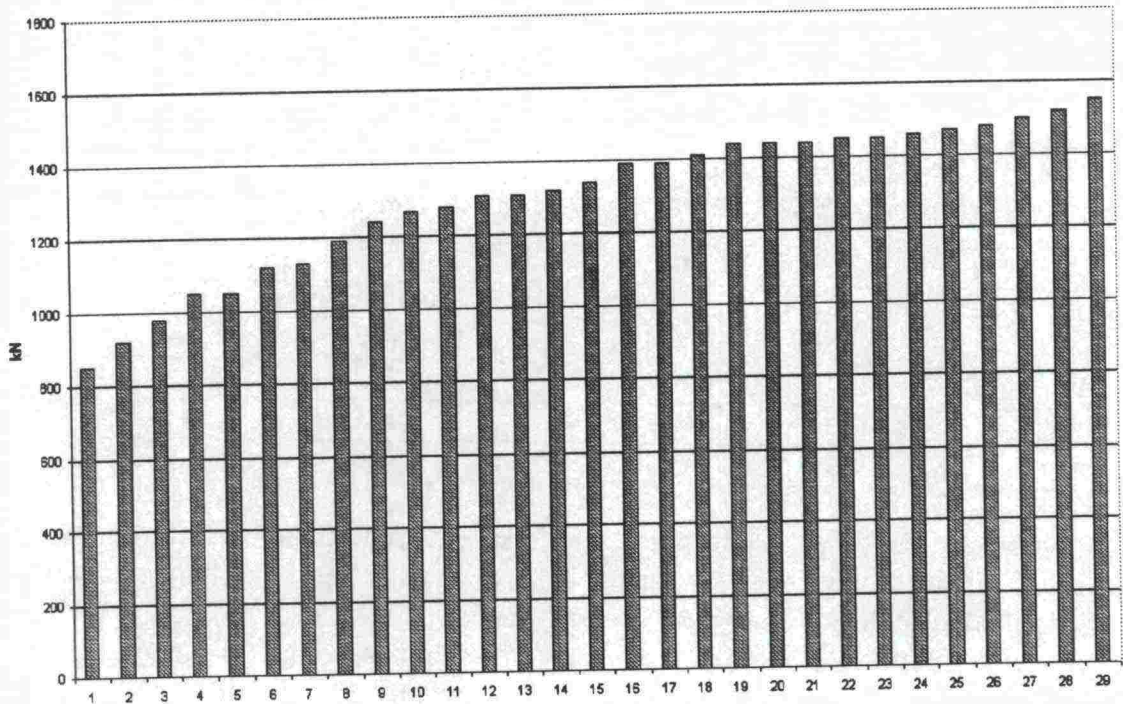


Kuva 15. Kaikkien termiittihitsien murtovoimat.

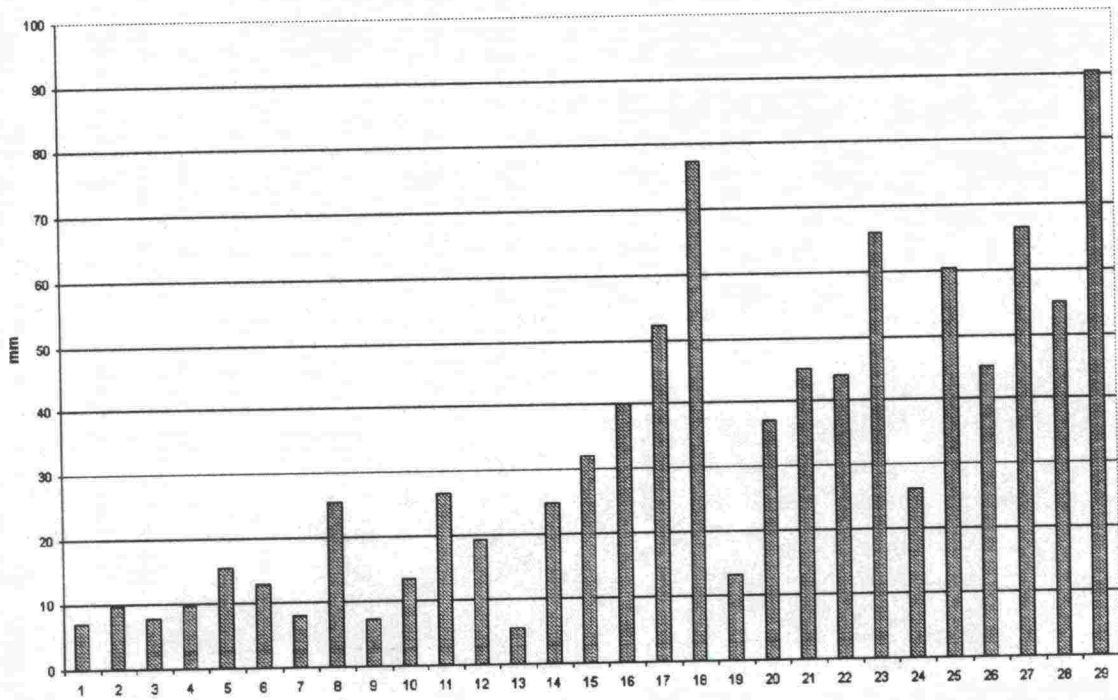


Kuva 16. Kaikkien termiittihitsien murtotaipumat (järjestys sama kuin kuvassa 15).

Leimuhitsien murtoon asti tehdyssä taivutuskokeessa tarvittu voima vaihteli enemmän kuin edellä (kuva 17). Kaipiaisten hankkimien leimuhitsien taivutusvoimien vaihteluväli oli 850...1550 kN ja taipumien vaihteluväli oli 6...90 mm ja Kouvola – Inkeroinen -väliltä sekä Joutsenosta hankittujen leimuhitsien taivutusvoimien vaihteluväli oli 1270...1520 kN ja taipumien 13...77 mm (kuva 18). Leimuhitsien keskiarvot ovat uusilta hitseiltä vaadittaviin minimiarvoihin verrattuina hyväksyttäviä. Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimien leimuhitsien tulosten keskiarvot olivat: taivutusvoima 1280 kN ja taipuma 30 mm ja Kouvola–Inkeroinen -rataosalta sekä Joutsenosta hankittujen leimuhitsien taivutusvoima oli keskimäärin 1390 kN ja taipuma 45 mm, jotka ylittävät uuden hitsin minimiarvot selvästi.



Kuva 17. Kaikkien leimuhitsien murtovoimat.



Kuva 18. Kaikkien leimuhitsien murtotaipumat (hitsien järjestys sama kuin kuvassa 17).

Tulosten keskiarvot poikkeavat toisistaan kisko- ja hitsaustyyppin mukaan lajiteltuina (taulukko 20). Hitsaustapa vaikuttaa kiskotyypin Am taivutusvoimaan ja taipumaan kaikkein vähiten, kun taas Imr+ termiittihitsin keskimääräiset taivutusvoima ja taipuma verrattuina Imr+:n leimuhitsien vastaaviin lukemiin poikkeavat hyvinkin paljon toisistaan. Taipumien suuret erot voivat olla sidoksissa suoraan kiskon kovuuteen,

kiskon kemialliseen koostumukseen ja hitsauksen tarttuvuuteen. Tuloksien mukaan leimuhitsin kestävyys paranee kovemmilla kiskolaaduilla, mikä todennäköisesti johtuu siitä, että hitsissä ei käytetä mitään lisäaineita, kun taas termiitti- ja kaarijatkoshitseissä käytetään.

Taulukko 20. Keskiarvot eri kisko- ja hitsityyppien taivutusvoimille ja taipumille.

Kiskotyyppi	Termiitti		Leimu	
	Taivutusvoima (kN)	Taipuma (mm)	Taivutusvoima (kN)	Taipuma (mm)
Am	1170	13	1240	19
Imr	1190	16	1210	33
Imr+	1090	8	1400	56

Termiittihitsauksen suorituksen onnistumisesta ja suorituksen aikana vaikuttavan sään vaikutuksesta hitsin kestävyteen on tämän kokeen perusteella vaikea sanoa mitään. Ilmeistä kuitenkin on, että hitsi ei saavuta parasta mahdollista kestävyyttä, jos termiittihitsin esilämmitystä ei sään takia saada varmasti oikeaan lämpötilaan tai reaktio ei onnistu täydellisesti, tai jos kiskonpäihin jää epäpuhtauksia. Tarkasti ei kuitenkaan tiedetä, miten sää (esim. ilmankosteus ja lämpötila) vaikuttavat hitsausauman onnistumiseen. Vaikka leimuhitseissä sään vaikutus on pieni, kiskojen päiden puhtaus vaikuttaa niissäkin kestävyteen. Jos se ei ole täydellistä, hitsiin saattaa jäädä huokosia ja hitsin kestävyys heikkenee.

Kaipiaisten kiskohitsaamon hankkimista kiskoista ei käynyt ilmi muuta kuin kiskon valssausvuosi ja hitsaustapa, eikä kiskojen alkuperä ollut tiedossa. Näin ollen oli mahdotonta jäljittää hitsauspöytäkirjoja, joista hitsauksenaikainen sää olisi selvinnyt.

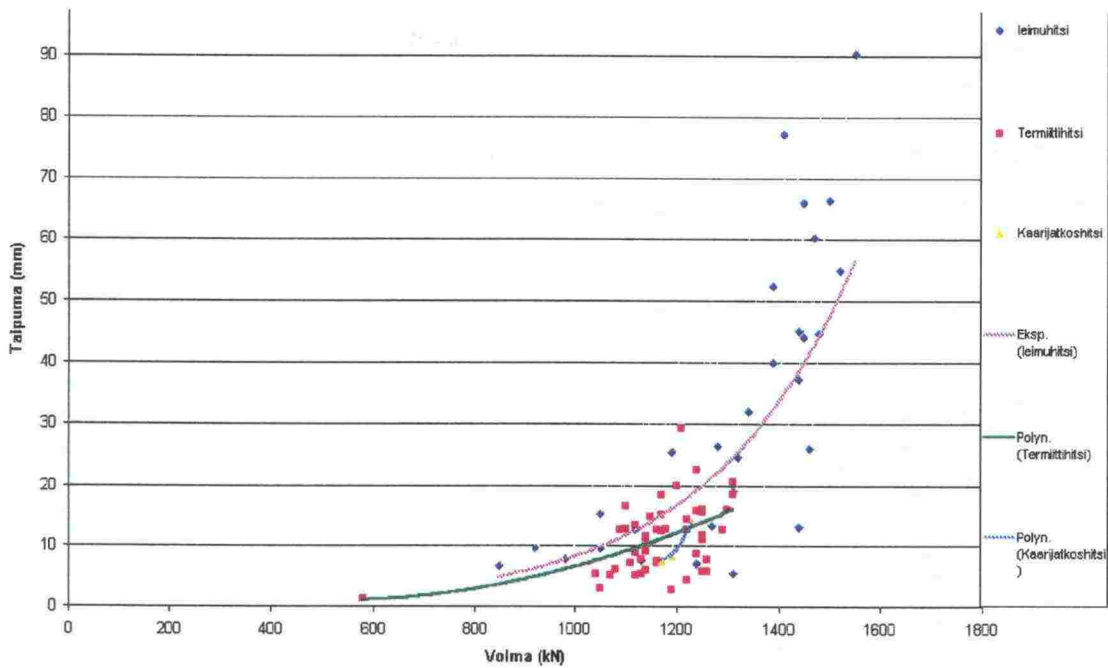
Kaarijatkoshitsejä oli näyte-erässä niin pieni määrä, ettei niiden perusteella voida päätellä kestävydestä mitään varmaa. Kaikki kolme kokeessa ollutta hitsiä kuitenkin täyttivät uudelta hitsiltä vaadittavat taivutusvoimavaatimukset. Taipuman vaatimuksia ei saavutettu.

Kun kaikkia saatuja tuloksia verrataan uusien hitsien vaatimuksiin, voidaan todeta, että prosentuaalisesti termiittihitseissä oli vähiten vaatimusten alituksia (taulukko 21). Termiittihitsien voidaan siis ajatella kestävän pisimpään. Kaarijatkoshitsien tulokset eivät tässä tapauksessa kerro koko totuutta, koska koenäytteitä oli vain kolme. Leimuhitsien tuloksista voidaan sanoa, että niillä on suurin hajonta.

Taulukko 21. Uusien hitsien minimivaatimusten alle jääneet tulokset.

	Termiitti	Kaarijatkos	Leimu	
Voima (kN)	2,1	0,0	27,6	%
Taipuma (mm)	29,2	100,0	41,4	%

Kun kaikki tulokset asetetaan samaan kuvaan (kuva 19), voidaan todeta, että termiitti- ja kaarijatkoshitseistä saadut tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Leimuhitsien taivutusvoimat ovat keskenään hyvin samanlaisia, mutta taipumat vaihtelevat laajasti.



Kuva 19. Kaikki hitsien taipumat samassa kuvassa esitettyinä.

4.3.8 Yhteenveto

Hitsaussaumoista ei voida tämän tutkimuksen perusteella tehdä kovin pitkälle meneviä päätelmiä, sillä kaikki kolme hitsaustapaa ovat jokseenkin luotettavia nykyisillä kuormituksilla.

Hitsitutkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta kuitenkin todeta seuraavaa:

- Tutkimustuloksien perusteella voidaan uskoa, että nykyiset hitsaussaumot tulisivat kestävämmän ainakin 250 kN:n akselipainot.
- Erityyppisten hitsaussaumojen kestävyys kannalta ehkä määrävintä on hitsaus-suorituksen onnistuminen. Tuloksista on kuitenkin pääteltävissä, että hitsin iällä ei ole erityisen suurta merkitystä kestävyys. Junaliikenteestä aiheutuvan kuormituksen vaikutusta hitsaussaumoihin ei pystytä tämän kokeen perusteella selvittämään.
- Termiittihitsit kestävä paremmin pehmeämmillä kuin kovemmilla kiskolaaduilla.
- Leimuhitsien kestävyys on parempi kovemmilla kiskolaaduilla.
- On oletettavaa, että raskaammilla akselipainoilla hitsaussaumojen nykyisin varsin pieni vikatiheys tulisi jonkin verran kasvamaan, koska pienimmätkin vauriot näkyisivät herkemmin raskaammalla kuormituksella.
- Sidekisko jatkosreillä ei ole merkitystä hitsaussauman kestävyys.
- Hitsaussaumassa mahdollisesti olevat huokokset vaikuttavat hitsin kestävyys enemmän kiskonjalan alueella kuin kiskon selän alueella.
- Hitsaussaumoista tulisi tehdä lisätutkimuksia niin, että puristus tapahtuisi kiskon alta. Tällöin veto tulisi kiskon kulkupinnalle ja pintaviat näkyisivät paremmin ja on oletettavaa, että nyt saadut tulokset muuttuisivat.

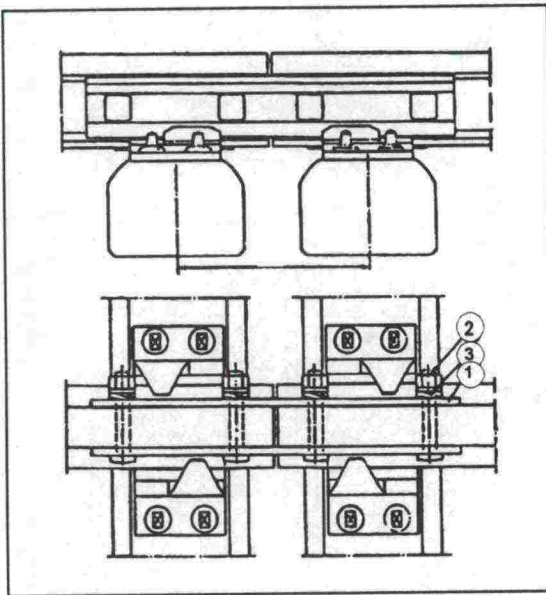
- Uusille hitsaussaumoille tulisi järjestää pitempiaikainen seuranta mieluiten alueella, jossa olisi tai jonne voitaisiin helposti tuoda raskaita kuormituksia.
- Hitsauksia pitäisi tehdä huonon sään aikana, jotta voitaisiin selvittää, mikä on hitsauksen aikaisen sään vaikutus hitsin taivutusvoimaan ja taipumaan.

4.4 Jatkokset

4.4.1 Sidekiskoajatkos

Jatkossovituksen tarkoitus on tehdä mahdolliseksi pitkä- ja lyhytkiskoraiteissa lämpötilan muutoksista aiheutuvat kiskon pituuden muutokset määrättyissä rajoissa. Jatkossovitus yhdistää kiskojen päät, pitää ne kohdakkain ja estää kulmien muodostumisen kiskojonoon vaaka- ja pystytasossa. Kiskon jatkoksiin eli niiden epäjatkuvuuskohtiin kohdistuu kova rasitus ja näissä kohdissa vaaditaan runsaasti kunnossapitotöitä /14/18/19/.

Suomessa käytetään yleensä riippuvia sidekiskojatkoksia. Tällainen jatkos on kahden pölkyn välissä niin, että sidekisko ulottuu molempien pölkkyjen yli (kuva 20). Toinen jatkostyyppi on ns. kaksoispölkkyjatkos, jolloin pölkkyt ovat aivan vierekkäin /18/.



- | | |
|---|-------------|
| 1 | sidekisko |
| 2 | sideruuvi |
| 3 | jousirengas |

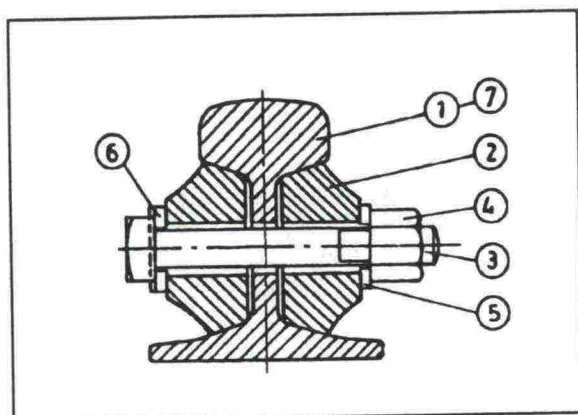
Kuva 20. Riippuva 54 E 1 -jatkossovitus, puuratapölkky ja Hey-Back-kiinnitys.

Jatkosten murtumat ovat verrattain yleisiä jo nykyisilläkin akselipainoilla ja akselipainojen nosto saattaa varovaistenkin arvioiden mukaan moninkertaistaa murtumien määrän. Sidekiskoajatkos on siis heikko kohta, jos akselipainoja halutaan korottaa /17/19/.

4.4.2 Eristysjatkos

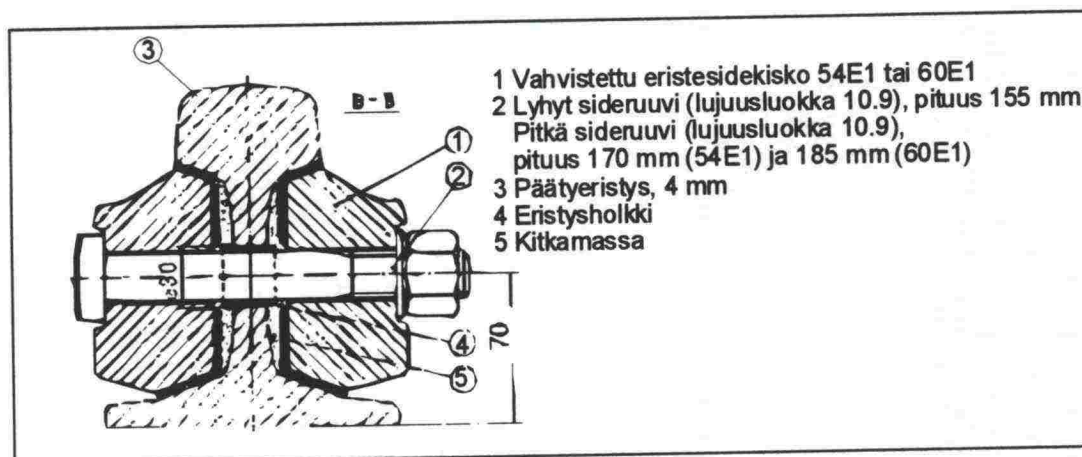
Junien kulkua ohjattaessa tarvitaan tietoa, onko määrättyllä alueella junaa. Tällainen tieto saadaan raidevirtapiirin avulla. Raiteen ollessa vapaa virta ei kulje kiskoja pitkin. Jos taas virtapiirin alueella on juna, sen akselit oikosulkevat kiskot. Koska virtapiirin tulee olla avoin silloin kun alueella ei ole junaa, kiskot on eristettävä toisistaan pituus- ja poikittaissuunnassa. Aluetta, jolla kiskot on eristetty, kutsutaan eristetyksi raideosuudeksi /17/19/.

Jatkuvakisko- ja pitkäkiskoraiteissa käytetään liimattuja eristysjatkoksia tai lujite-muovisia, lämpövoimat vastaanottamaan kykeneviä jatkoksia. Lyhytkiskoraiteissa on käytetty puu-permali-eristysjatkoksia (kuva 21), mutta nykyisin käytetään lujite-muovisia jatkoksia. Liimaeristysjatkoksissa eristeenä on liimamassa (kuva 22). Puu-permali-eristysjatkoksessa käytetään pyökkilaminaattisia sidekiskoja /14/17/.



1. K30-, K43-, 54E1- tai K60-ratakisko
2. Eristyssidekisko
3. Sideruuvi
4. Mutteri
5. Aluslaatta
6. Lukkolaatta
7. Päätteristin

Kuva 21. Puu-permali-eristysjatkos.



Kuva 22. MT-liimaeristysjatkos vahvistetuin sidekiskoin.

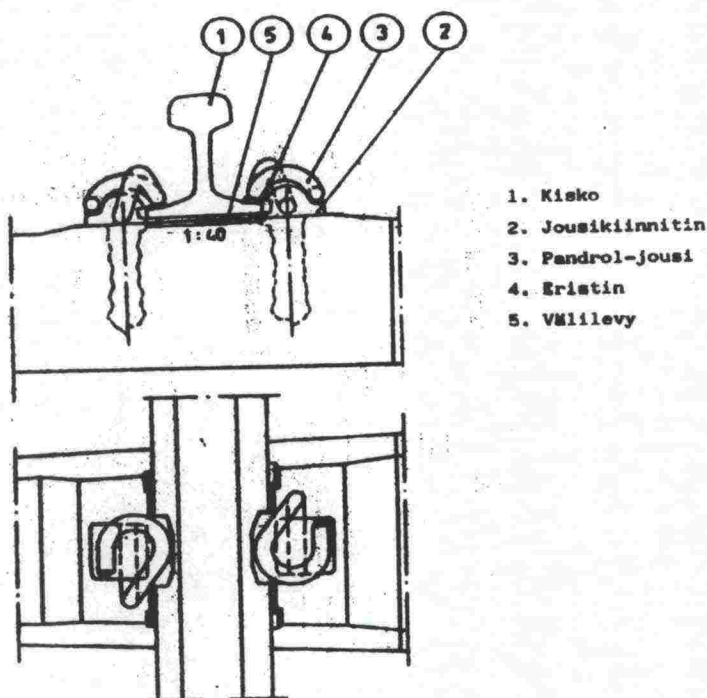
Nykyisistä eristysjatkostyypeistä ainoastaan S-tyyppin (Schmitz) jatkos tulee kestävämpään moitteetta akselipainojen noston aina 300 kN:iin asti. Ongelmana on jatkoksen asennettavuus. Kiskohitsaamossa liimattu S-jatkoselementti vaatii kaksi termiitti-hitsausta. Perinteisten jatkosten kestävyyttä voidaan kuitenkin parantaa sahaamalla kiskojen hamarat 30 asteen kulmaan suoran kulman sijaan. Tällöin akselin aiheuttama rasitus jakaantuu tasaisemmin jatkososalalle ja sidekisko joutuu pienemmälle rasitukselle /17/19/24/.

Varmin tapa poistaa jatkosmurtumat on siirtyä turvalaitetekniikassa ns. akselinlaskenta-menetelmään, jolloin eristysjatkoksia ei tarvita /17/19/.

4.5 Kiskonkiinnitykset

Kiskon kiinnityksen tehtävänä on kiinnittää kisko ratapölkkyyn tai muuhun alustaan ja samalla estää raideleveyden muuttuminen ja kiskon vaellus. Varsinkin jatkuvakiskoraiteessa vaaditaan suurta läpivetovastusta eli kiinnityksessä tulee olla suuri kitka. Lisäksi vaaditaan suurta kiinnityksen vääntövastusta, mikä osaltaan vaikuttaa raiteen taivutusjäykkyyteen /18/

Valtaosa suomalaisista betonipölkkyistä on varustettu Pandrol e-clip -kiinnityksin (Kuva 23).



Kuva 23. Pandrol e-clip-kiinnitys.

E-clip-jouset on valmistettu Inhan tehtailla Ähtärissä. Kiinnintyyppi on kuitenkin väistymässä markkinoilta. Tilaa valtaa Vossloh Skl 14 -kiinnitys, jonka merkittävä etu on mahdollisuus varustaa ratapölkky kiinnityselimin jo pölkkytehtaalla. Pandrolin e-clip -tarvikkeet jaetaan pölkkyille vasta asennuskohteessa, jolloin syntyy hävikkiä ja asennuskustannukset kasvavat. Skl:n vaihtoehto on Pandrolin Fastclip-kiinnitys, joka mahdollistaa nopean ja helpon kiskonkiinnityksen /9/.

Puupölkkyraiteessa keskeisin ominaisuus on pölkyn pintapaineen kesto. Kiinnitysten kestävyys on vasta toissijainen ominaisuus. Akselipainojen nostossa kiskonkiinnityksillä ei ole mitoitettavaa roolia, vaikka Raahen terässulatolla käytettävillä suurilla akselipainoilla ongelmia onkin esiintynyt. Muutamia jousia on mennyt poikki lähinnä kaarreosuuksilla /9/10/.

4.6 Sivueristimet ja välilevyt

Sivueristimien kestävyys suorilla rataosuuksilla ei aseta estettä akselipainojen nostolle. Kaarteissa vaarana on eristimen oheneminen, jos eristin joutuu mekaanisen rasituksen alaiseksi. Ongelmaa ei kuitenkaan koeta mitoittavaksi /15/19/.

Suomessa käytettävät välilevyt valmistetaan luonnonkumista, jolla on parempi pakkaskestävyys kuin Keski-Euroopassa yleisesti käytetyllä kloropreenillä. Välilevyn paksuusmitoituksen määrää käytettävä kiskon kiinnitysjärjestelmä. Jousto-ominaisuudet saadaan aikaan profiloimalla levyn pinta kuormitusta vastaavaksi. Profiloitu kumi on lähes kokoonpuristumatonta. Se tarkoittaa, että kaikissa kuormitustilanteissa sen kokonaistilavuus pysyy samana /15/.

Nyt käytössä olevien välilevyjen mitoitus kestää hyvin akselipainojen korotuksen ilman, että ennenaikaisista vaihtotoimista olisi vaaraa /15/.

5. VAIHTEET

5.1 Vaihdetutkimuksen taustaa

5.1.1 Tavoite

Osatutkimuksen tavoitteena oli selvittää rautatievaihteiden mitta-arvojen muutosta raskaalla kuormituksella. Tutkimuskohteiksi pyrittiin löytämään kaikkein vaativimpien olosuhteiden ja raskaimpien kuormitusten kohteiksi joutuvia vaihteita. Tutkimus toteutettiin siten, että tutustuttiin Vainikkalan ja Rautaruukki Oyj:n Raahan ratapihan alueilla oleviin rautatievaihteisiin sekä kyseisten vaihteiden mittauspöytäkirjoihin. Lisäksi tutkittiin alan kirjallisuutta ja aiemmin julkaistuja raportteja.

5.1.2 Vaihteiden nimitykset

Vaihteet ovat raiteiden liityntäkohtia, joiden avulla junaliikenne voidaan ohjata raiteelta toiselle. Vaihteita valmistetaan sekä puu- että betonipölkyillä varustettuina. Yksinkertainen vaihde koostuu seuraavista elementeistä: Etujatkoselementti, kielisovitus-elementti, välielementti, risteys-vastakiskoelementti ja takajatkoselementti. Kaksois- ja risteysvaihteissa on pitkälti samankaltaisia elementtejä, mutta risteysvaihteissa ja raideristeysissä joudutaan käyttämään myös 2-kärkisiä risteyskiskoja.

Erilaisia vaihdetyyppejä ovat:

- yksinkertainen vaihde (YV)
- kaksoisvaihde (KV)
- yksipuolinen risteysvaihde (YRV)
- kaksipuolinen risteysvaihde (KRV)
- raideristeys (RR).

Yksinkertaisia vaihteita ovat myös kaarrevaihteet ja tasapuoliset vaihteet.

Vaihteet luokitellaan myös risteysuhteen mukaan ns. lyhyisiin ja pitkiin vaihteisiin; 54 E 1 ja 60 E 1 -kiskopainon vaihteiden risteysuhteet ovat yleisimmin esim. 1:9 ja 1:7, jotka ovat ns. lyhyitä vaihteita, sekä 1:18 ja 1:25, jotka ovat pitkiä vaihteita /16/18/.

5.1.3 Vaihdealueen mittaus

Vaihteiden mittaus käsittää aina koko vaihdealueen mittauksen. Vaihdealue alkaa $S_n/2$ (S_n = suurin sallittu nopeus) ennen etujatkosta ja päättyy yhtä kaukana takajatkoksesta. Vaihdealue on kuitenkin aina vähintään 50 metriä jatkoksista molempiin suuntiin. Kuvassa 1 ja 2 on esitetty varsinaisesti vaihteiden mittauskohdat ja järjestys alkaen aakkosten alkupäästä /16/18/.

5.1.4 YV -vaihteet

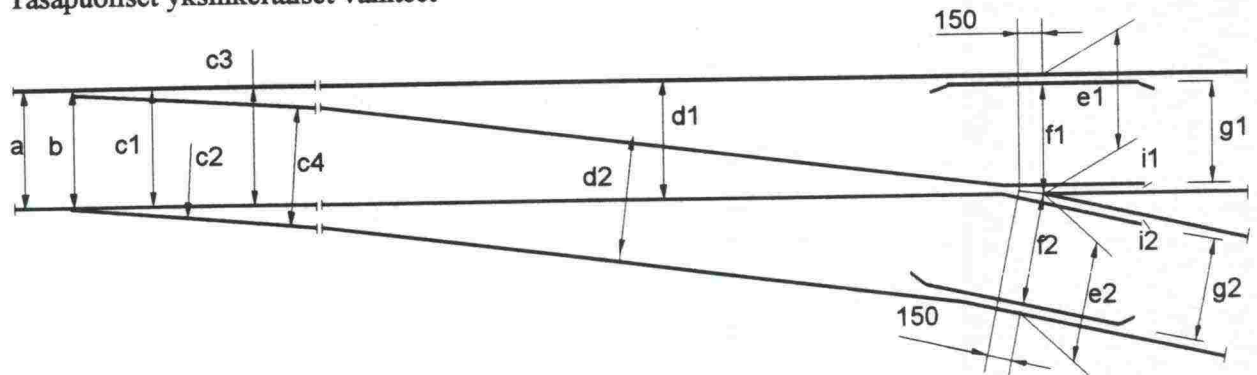
Vaihteiden tarkastuksen mittaluvut

Yksinkertaiset vaihteet

Ulkokaarrevaihteet

Sisäkaarrevaihteet

Tasapuoliset yksinkertaiset vaihteet



Kuva 24. Vaihteiden tarkastuksen mittaluvut, YV-vaihteet

Taulukko 22. Normaaliarvot ja toleranssit, YV-vaihteet

VAIHDETYYPPI	a	b	c _{1,3}	c _{2,4}	d ₁	d ₂	e _{1,2}	f _{1,2}	g _{1,2}	i _{1,2}
YV60-300-1:9	1524 -2, +5	1525 -2, +5	1524 -3, +5	1524 -2, +6	1524 -3, +5	1524 -2, +6	1524 -2, +2	1482 -2, +2	1438 -4, +0	44 -1, +3
YV60-900-1:18	1524	1524	1524	1524	1524	1524	1524	1482	1438	44
YV60-900-1:15,5	-3, +4	-3, +4	-3, +4	-3, +5	-3, +4	-3, +5	-3, +2	-2, +2	-4, +0	-1, +3
YV60-5000/2500-1:26	1524 -3, +4	1525 -3, +4	1) 1524 -3, +4	2) 1524 -3, +5	3) 1524 -3, +4	4) 1524 -3, +5	5) 1524 -3, +3		Raideleveys takajatkoksen kohdalla 1524 ±3	
YV54-200N-1:9	1524 -2, +5	1528 -2, +5	1524 -3, +5	1524 -2, +6	1524 -3, +5	1524 -2, +6	1524 -2, +2	1482 -2, +2	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV54-200N-1:9 (T)	1524 -2, +5	1528 -2, +5	1524 -3, +5	1524 -2, +15	1524 -3, +5	1524 -2, +15	1524 -2, +2	1482 -2, +2	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV54-200-1:9	1534 -3, +5	1538 -3, +5	1524 -3, +5	1534 -3, +5	1524 -3, +5	1534 -3, +6	1524 -2, +2	1482 -2, +2	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV54-200-1:9 (T)	1534 -3, +5	1538 -3, +5	1524 -3, +5	1534 -5, +10	1524 -3, +5	1534 -5, +10	1524 -2, +2	1482 -2, +2	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV54-900-1:15,5	1524 -3, +4	1524 -3, +4	1524 -3, +4	1524 -3, +5	1524 -3, +4	1524 -3, +5	1524 -3, +2	1482 -2, +2	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV54-1600-1:25	1524 -3, +4	1526 -3, +4	1524 -3, +4	1524 -3, +5	1524 -3, +4	1524 -3, +5	1524 -3, +3		Raideleveys takajatkoksen kohdalla 1524 ±3	
YV43-205-1:9,514	1534 -3, +5	1534 -3, +5	1524 -3, +5	1534 -3, +5	1524 -3, +5	1534 -3, +5	1524 -3, +5	1482 -3, +4	1435 -5, +2	47 -2, +4
YV43-300-1:7	1528 -4, +5	1531 -5, +5	1524 -3, +5	1536 -3, +4	1524 -3, +5	1536 -3, +6	e ₁ 1524 -3, +3 e ₂ 1530 -3, +3	f ₁ 1482 -3, +4 f ₂ 1481 -2, +2	g ₁ 1435 -5, +2 g ₂ 1426 -2, +2	i ₁ 47 -2, +4 i ₂ 55 -3, +2

YV43-300-1:9	1528	1531	1524	1536	1524	1536	1524	1482	1435	47
YV43-300-1:9,514	-4, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +4	-3, +5	-3, +6	-3, +3	-3, +4	-5, +2	-2, +4
YV43-300-1:9 (T)	1528	1531	1524	1536	1524	1536	1524	1482	1435	47
YV43-300-1:9,514 (T)	-4, +5	-5, +5	-3, +5	-5, +8	-3, +5	-5, +8	-3, +3	-3, +4	-5, +2	-2, +4
YV43-530-1:12	1525	1531	1524	1536	1524	1530	e_1 1524	1480 -2, +4	g_1 1435	i_1 45
	-3, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +4	-3, +5	-2, +6	-2, +2		-5, +2	-1, +3
							e_2 1530		g_2 1430	i_2 50
							-2, +2		-2, +3	-2, +2
YV43-530-1:15	1525	1531	1524	1536	1524	1536	1524	1480	1435	45
	-3, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +4	-3, +5	-3, +6	-2, +2	-2, +4	-5, +2	-1, +3
YV30-270-1:7	1528	1531	1524	1536	1524	1542	e_1 1524	1480 -3, +4	g_1 1435	i_1 45
	-4, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-5, +6	-3, +3		-5, +2	-1, +3
							e_2 1530		g_2 1426	i_2 55
							-3, +3		-2, +2	-3, +2
YV30-270-1:9,514	1528	1531	1524	1536	1524	1542	1524	1480	1430	50
	-4, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-5, +5	-3, +3	-3, +4	-2, +3	-3, +2
YV60-300-1:10	1524	1531	1524	1536	1524	1542	1524	1480	1430	50
	-3, +5	-5, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-5, +5	-3, +3	-3, +4	-2, +3	-3, +2
UKV54 SKV 54	1534	1538	1524	1534	1524	1534	1524	1482	1435	47
	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-3, +6	-2, +2	-2, +2	-5, +2	-2, +4
TYV54-225-1: 6,46	1534	1538	1534	1534	1534	1534	1524	1482	1435	47
	-3, +5	-3, +5	-3, +6	-3, +5	-3, +5	-3, +6	-2, +2	-2, +2	-5, +2	-2, +4
TYV54-200-1: 4,44	1534	1538	1536	1536	1534	1534	1524	1484	1434	50
	-3, +5	-3, +5	-3, +6	-3, +5	-3, +5	-3, +6	-2, +2	-2, +2	-5, +2	-2, +2

1) c_{1,3,5,7,9,11}

2) c_{2,4,6,8,10,12}

3) d_{1,3,5,7,9,11,13,15}

4) d_{2,4,6,8,10,12,14,16}

5) e_{1,2,3,4,5,6}

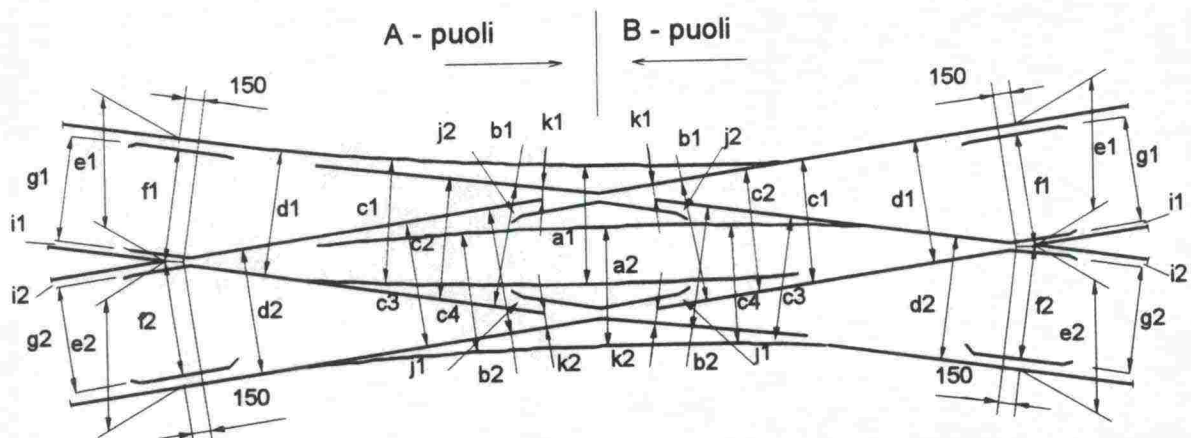
(T) = turvavaihte tms, jossa normaalisti ei liikennöidä poikkeavan raiteen kautta.

5.1.5 KRV -vaihteet

Vaihteiden tarkastuksen mittaluvut

Risteysvaihteet

Raideristeykset



Kuva 25. Vaihteiden tarkastuksen mittaluvut, KRV-vaihteet

Taulukko 23. Normaaliarvot ja toleranssit, KRV-vaihteet

VAIHDETYYPPI	e _{1,2}	f _{1,2}	g _{1,2}	i _{1,2}	d _{1,2}	c _{1,4}	c _{2,3}	j _{1,2}	k _{1,2}	b _{1,2}	a _{1,2}
KRV54-200-1:9	1524	1482	1435	47	1538	1534	1524	45	50	1524	1534
YRV54-200-1:9	-2, +2	-2, +2	-5, +2	-1, +2	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-1, +2	-1, +2	-2, +2	-3, +6
KRV43-233-1:9	1524	1482	1435	47	1534	1534	1524	45	50	1524	1534
	-3, +3	-3, +4	-5, +2	-1, +2	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-1, +2	-1, +2	-3, +3	-3, +6
KRV43-270-1:9,514	1524	1480	1430	50	1531	1536	1524	47	52	1524	1542
YRV43-270-1:9,514	-3, +3	-1, +4	-2, +3	-2, +2	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-2, +2	-2, +2	-3, +3	-3, +5
KRV30-270-1:9,514	1524	1480	1430	50	1531	1536	1524	47	52	1524	1540
YRV30-270-1:9,514	-3, +3	-3, +4	-2, +3	-3, +2	-3, +5	-3, +5	-3, +5	-2, +2	-2, +2	-3, +3	-3, +5

5.2 Puupölkkyvaihteet

Puupölkkyvaihteiden valmistus aloitettiin Suomessa ensimmäisenä Viipurin konepajalla 1870-luvulla. Vaihteissa tarvittavat komponentit tuotiin yleensä ulkomailta. Talvisota lopetti vaihteiden valmistuksen vuoden 1940 alussa. Sen jälkeen vaihteita on valmistettu mm. Turussa, Jyväskylässä, Pieksämäellä, Teijossa, Hyvinkäällä ja Kaipiaisissa. Nykyään vaihteita tehdään enää Kaipiaisissa, Pieksämäellä ja Teijossa. Vaihteiden osia valmistetaan nykyisin myös Suomessa. Suomen rautatieverkolla vaihteita on arviolta 10.000. Niistä noin 6.200 on valtion rataverkolla. Valtaosa on puupölkkyvaihteita. Vaihteiden uudisvalmistuksen rinnalle on tullut myös vaihteiden kierrätys. Käytöstä poistettujen vaihteiden kunto tarkastetaan ja kierrätyskunnossa olevia vaihteita peruskorjataan Kaipiaisissa, minkä jälkeen vaihteet asennetaan takaisin rataa. Kierrätysvaihteita käytetään yleisesti sivuraiteilla ja ratapihoilla /6/16/18/.

Puupölkkyvaihteiden vaurioista yleisimpiä ovat olleet aluslevyn painautumiset pölkkyyn, aluslevyjen sivuille pakeneminen sekä voimakas kiskojen ja risteyksen kuluminen. Aluslevyjen painautuminen pölkkyyn on ollut erityisen yleistä havupuu-pölkkyvaihteissa /6/17/19/24/26/.

Aluslevyjen painuminen aiheuttaa sen, että junan mennessä vaihteen yli aluslevyt tekevät pumppausliikettä. Pumppausliikkeestä aiheutuu suuria kuormituksia kiskolle ja etenkin kielisovituskiskot sekä kiskonjatkokset joutuvat kovalle kuormitukselle /6/11/17/19/24/26/.

Aluslevyjen sivuille pakeneminen on suurinta kaarrekiskossa. Sivuille pakeneminen aiheuttaa sen, että radan raideleveys kasvaa ja aluslevy vaurioittaa pölkkyä laajemmalla alueella kuin muuten. Raideleveyden kasvaessa kaarreosuudella juna ei kohtaa vaihteen risteystä suunnitellulla tavalla vaan ns. vispaten, mikä kuluttaa risteystä ja vastakiskoa huomattavasti. Varsinkin risteuksen kärki joutuu koville. Lisäksi kisko joutuu kovemmalta kuormitukselle, jos raideleveys kasvaa kaarreosuudella /6/17/19/24/26/.

5.3 Betonipölkkyvaihteet

Betonipölkkyjen asennus vaihteisiin aloitettiin Suomessa 60 E 1 -vaihteilla vuonna 1990. Kaikki 60 kg kiskopainon vaihteet ovat vuodesta 1993 olleet betonipölkkyisiä.

Vuosina 1990 – 1993 käytettiin 60 E 1 -vaihteissa myös kovapuupölkkyjä (azobé) /6/10/16/17/19/24/26/.

60 E 1 -vaihteet tulevat Suomeen ulkomailta. Kaikki 60 E 1 -vaihteet on hankittu vuodesta 1994 alkaen Cogiferilta Ranskasta. Kaikki betonipölkkyiset vaihteet on pääosin koottu Suomessa Pieksämäellä. Suomessa koottujen vaihteiden osista kiskot ja osa kiinnitysjärjestelmistä tulevat ulkomailta, mutta myös Suomessa valmistetaan kiinnitysjärjestelmän osia vaihteisiin /6/16/.

Betonipölkkyvaihteiden yleisimmät vauriot ovat olleet kiskon ja risteyksen nopea kuluminen. Suurinta se on kaarrekiskossa ja kielisovituksessa. Kaarrekiskon sisäreuna kuluu ja aiheuttaa muutoksia raideleveyteen. Kun raideleveys muuttuu kaarteessa, siitä aiheutuu sama ilmiö kuin puupölkkyvaihteissa eli juna menee risteyksen yli ns. vispaten alistaen risteyksen kärjen ja vastakiskon kovalle kulutukselle.

Suuret liikennemäärät ja kova kuormitus aiheuttavat joka tapauksessa kauttaaltaan pysyviä muutoksia vaihteissa. Esim. Oulun rata-alueella on yli 600 vaihdetta, joista jokaisessa on toleranssiylityksiä. Pääsääntöisesti toleranssiylitykset ovat kuitenkin niin pieniä, ettei välitöntä vaaraa ole. Tämä asia on kuitenkin otettava huomioon tarkastus- ja kunnossapitotoimintaa suunniteltaessa /6/10/16/17/19/24/26/.

Betonipölkkyvaihdetta 60 E 1 voidaan tällä edellytyksellä pitää riittävänä ratkaisuna, vaikka akselipainorajaa korotettaisiinkin. Poikkeavan raiteen eli ns. ”käyrän” puolelle ulottuvat pitkät pölkkyt eivät kuitenkaan näyttäisi täyttävän korkeampien akselipainojen asettamia vaatimuksia /6/19/.

5.4 Vaihdetutkimus

5.4.1 Mittauskohteet

Rautaruukin valssaamon ratapihalta mitattiin viisi vaihdetta, vaihteet V0601, V0602, V0603, V0607 ja V0608, joiden tyyppi on YV54-200/165-1.9/1:7. Ratapihalla liikennöi suurimmaksi osaksi VR Osakeyhtiön kalustoa ja akselipainot ovat enintään 225 kN, mutta Rautaruukin sisäisten kuljetusten akselipainot voivat satunnaisesti ylittää 225 kN. Vaihteista oli saatavissa mittaustulokset vuosilta 1998 ja 2000.

Masuunin ja terässulaton välillä, jossa liikennöi ainoastaan Rautaruukin omaa kalustoa ja akselipainot saattavat nousta jopa 430 kN:iin, mitattiin kolme vaihdetta. Mitattujen vaihteiden numerot ovat 45, 73 ja 706 ja niiden kaikkien tyyppi on YV60-300/180-1:7. Koska vaihteissa kulkee vain Rautaruukki Oy:n omaa kalustoa, vaihteista ei ollut saatavissa mittaustuloksia. Pääraiteen kaikki vaihteet on uusittu vuoden 1993 jälkeen. Näistäkään vaihteista ei ollut aiempia mittaustuloksia.

Vainikkalan ratapihalta valittiin vaihteet kovimman kuormituksen mukaan. YV-vaihteista V0002, V0074, V0082, V0084 ja KRV-vaihteista V0072 sijaitsivat ratapihan itäpäässä ja niiden yli kulkee itäliikenteen lähtevä ja tuleva liikenne. YV-vaihde V0123 ja KRV-vaihteet V0001, V0009, V0125 ovat ratapihan keskivaiheilta, jossa suoritetaan paljon vaihtotöitä.

5.4.2 Rautaruukin mittaustulokset

Valssaamon ratapihan vaihteet

Taulukko 24. Vaihde V0601, tyyppi YV54-200/165-1:9/1:7, Asennettu 1998, liikenne n. 4 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 1998	v. 2000	Muutos
A ₀	1535	1537	2
B ₀	1538	1542	4
C ₁	1524	1536	2
C ₂	1535	1539	4
C ₃	1527	1527	0
C ₄	1534	1528	4
D ₁	1526	1528	2
D ₂	1536	1539	3
E ₁	1524	1525	1
F ₁	1481	1480	-1
G ₁	1433	1433	0
I ₁	48	46	-2
E ₂	1529	1534	5
F ₂	1479	1477	-2
G ₂	1422	1421	-1
I ₂	57	56	-1

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kielikisko on kulunut noin 3 metrin matkalta ulkokaaren puolelta
- Risteyksen kärki muokkaantunut, korjattu
- Tukikisko kulunut, säädetty
- Kujakisko kulunut
- Kiskonkiinnitykset hyvässä kunnossa.

Taulukko 25. Vaihde V0602, tyyppi YV54-200/165-1:9/1:7, Asennettu vuonna 1998, liikenne noin 4 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 1998	v. 2000	Muutos
A ₀	1535	1538	3
B ₀	1539	1540	1
C ₁	1523	1526	3
C ₂	1533	1530	-3
C ₃	1524	1523	-1
C ₄	1537	1533	-4
D ₁	1525	1527	2
D ₂	1537	1539	2
E ₁	1525	1526	1
F ₁	1481	1480	-1
G ₁	1432	1434	2
I ₁	49	46	-3
E ₂	1533	1535	2
F ₂	1481	1479	-2
G ₂	1425	1424	-1
I ₂	56	55	-1

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kielikisko kulunut
- Risteyksen kärki muokkaantunut, korjailtu
- Kiinnitykset hyvät, mutta osa hieman löysällä
- Pölkkyt liikkuvat raiteen alla mm. kiinnitysten löysyyden takia

Taulukko 26. Vaihte V0603, tyyppi YV54-200/165-1:9/1:7, Asennettu vuonna 1996, liikenne noin 3 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 1998	v. 2000	Muutos
A ₀	1533	1535	2
B ₀	1538	1542	4
C ₁	1522	1527	5
C ₂	1533	1537	4
C ₃	1525	1528	3
C ₄	1536	1539	3
D ₁	1522	1525	3
D ₂	1534	1538	4
E ₁	1523	1525	2
F ₁	1481	1479	-2
G ₁	1433	1431	-2
I ₁	48	48	0
E ₂	1531	1534	3
F ₂	1482	1480	-2
G ₂	1425	1423	-2
I ₂	57	57	0

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kielikisko kulunut
- Vastakisko kulunut, säädetty

Taulukko 27. Vaihte V0607, tyyppi YV54-200/165-1:9/1:7, Asennettu vuonna 1998, liikenne noin 4 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 1998	v. 2000	Muutos
A ₀	1537	1535	-2
B ₀	1538	1540	2
C ₁	1521	1520	-1
C ₂	1533	1535	2
C ₃	1521	1523	2
C ₄	1532	1534	2
D ₁	1524	1527	3
D ₂	1536	1537	1
E ₁	1523	1525	2
F ₁	1480	1478	-2
G ₁	1432	1432	0
I ₁	48	46	-2
E ₂	1530	1533	3
F ₂	1479	1477	-2
G ₂	1423	1423	0
I ₂	56	54	-2

Lisähuomioita vaihteesta:

- Vaihteen silmämääräisessä tarkistuksessa huomattiin, että vaihde oli aukiajettu. Aukiajamisen vuoksi kieli ei levännyt vastatukia vasten vaihteen ollessa käännettyinä käyrille.
- Ulkokaarteessa sivueristimet olivat murtuneet ja raideleveys oli kasvanut 10...13 mm. Sivueristimien murtuminen johtuu raskaasta liikenteestä ja tiukasta kaarresäteestä.
- Ulkokaarteessa kiskonkiinnitys oli pettänyt
- Tukikisko oli kulunut

Taulukko 28. Vaihde V0608, tyyppi YV54-200/165-1:9/1:7, Asennettu vuonna 1996, liikenne noin 3 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 1998	v. 2000	Muutos
A ₀	1533	1536	3
B ₀	1539	1541	2
C ₁	1525	1527	2
C ₂	1533	1536	3
C ₃	1524	1527	3
C ₄	1535	1538	3
D ₁	1525	1528	3
D ₂	1535	1537	2
E ₁	1524	1526	2
F ₁	1482	1480	-2
G ₁	1434	1432	-2
I ₁	48	48	0
E ₂	1529	1531	2
F ₂	1478	—	—
G ₂	1422	1421	-1
I ₂	56	55	-1

Lisähuomioita vaihteesta:

- Risteyksen kärki muokkaantunut
- Tukikisko hieman kulunut
- Kujakisko kulunut ulkokaarteen sisäreunasta

Masuunin vaihteet

Taulukko 29. Vaihde 73, tyyppi YV60-300/180-1:7, Asennettu 1997, liikenne noin 7 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 2000
A ₀	1531
B ₀	1536
C ₁	1508
C ₂	1538
C ₃	1525
C ₄	1529
D ₁	1530
D ₂	1528
E ₁	1524
F ₁	1480
G ₁	1437
I ₁	43
E ₂	1508
F ₂	1477
G ₂	1434
I ₂	43

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kiskossa suuria pintavikoja kulkupinnalla, kiskosta irtosi lastuja jopa käsin
- Kielen ja risteyksen kärjet kuluneet. Risteystä korjailtu
- Kiskonkiinnitykset olivat pysyneet hyvin kiinni
- Jatkosten kohdalla kiskojen päät olivat painuneet kasaan

Taulukko 30. Vaihde 45, tyyppi YV60-300/180-1:7, Asennettu 1998, liikenne noin 16 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 2000
A ₀	1536
B ₀	1534
C ₁	1532
C ₂	1524
C ₃	1526
C ₄	1526
D ₁	1532
D ₂	1524
E ₁	1478
F ₁	1436
G ₁	42
I ₁	1524
E ₂	1522
F ₂	1473
G ₂	1534
I ₂	41

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kiristysrautoja asennettu kaarteessa, jotta raideleveys pysyy oikeana vaikka raiteessa on betonipölkkyt. Sivueristimet eivät kestä kovaa kuormitusta.
- Kiskot hyvässä kunnossa
- Kielen ja risteyksen kärki kulunut, risteystä on korjailtu
- Kielikisko ei levännyt tukiinsa kunnolla. (aukijattu?)

Taulukko 31. Vaihte 706, tyyppi YV 60–300/180–1:7, Asennettu 1994, liikenne noin 7 miljoonaa tonnia vuodessa

Mitta	v. 2000
A ₀	1531
B ₀	1541
C ₁	1537
C ₂	1543
C ₃	1527
C ₄	1534
D ₁	1531
D ₂	1538
E ₁	1527
F ₁	1483
G ₁	1441
I ₁	41
E ₂	1528
F ₂	1474
G ₂	1434
I ₂	43

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kiskot hieman kuluneet, yleisesti hyvässä kunnossa
- Kielet jonkin verran kuluneet
- Risteys hieman kulunut, korjailtu

5.4.3 Vainikkalan mittaustulokset

YV-Vaihteet

Taulukko 32. Vaihte V0123, betonipölkkyt ja 60 E 1 –kisko, sijainti ratapihan keskivaiheilla

Mitta	8.5.1998	10.5.1999	29.4.2000
A ₀	1530	1531	1530
B ₀	1529	1528	1529
C ₁	1525	1526	1525
C ₂	1529	1528	1529
C ₃	1527	1527	1527
C ₄	1533	1528	1533
D ₁	1527	1528	1527
D ₂	1539	1534	1539
E ₁	1524	1525	1524
F ₁	1478	1478	1478
G ₁	1434	1429	1434
I ₁	44	49	44
E ₂	1523	1523	1523
F ₂	1475	1475	1475
G ₂	1431	1426	1431
I ₂	44	48	44

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kisko oli selvästi kulunut
- Kielikisko oli kulunut ja kiskosta oli myös lohjennut palanen pois
- Kiskonkiinnityksissä oli ruuveja löysällä
- Vastakisko oli kulunut, ei ollut vielä säädetty

Taulukko 33. Vaihte V0084, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, sijainti ratapihan itäpäässä

Mitta	12.8.1998	12.5.1999	28.4.2000
A ₀	1540	1541	1536
B ₀	1543	1545	1540
C ₁	1542	1527	1529
C ₂	1550	1546	1549
C ₃	1535	1519	1520
C ₄	1550	1540	1544
D ₁	1528	1527	1526
D ₂	1546	1536	1539
E ₁	1528	1526	1526
F ₁	1480	1477	1479
G ₁	1436	1426	1432
I ₁	44	51	47
E ₂	1528	1528	1527
F ₂	1478	1476	1480
G ₂	1432	1424	1430
I ₂	46	52	50

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kisko oli kulunut kulkupinnalta voimakkaasti
- Kielen kärki oli kulunut selvästi
- Kiskonkiinnitysruuveja oli löysällä
- Vaihdetta oli kavennettu
- Risteyksen kärkeä oli korjailtu, nyt kunnossa
- Vastakisko oli kulunut

Taulukko 34. Vaihte V0082, betonipölkkyt ja 60 E 1 –kisko, sijainti ratapihan itäpäässä

Mitta	6.5.1998	1.12.1999	28.4.2000
A ₀	1525	1527	1527
B ₀	1524	1525	1526
C ₁	1522	1527	1527
C ₂	1525	1532	1531
C ₃	1523	1527	1526
C ₄	1523	1529	1529
D ₁	1523	1524	1524
D ₂	1523	1533	1533
E ₁	1524	1526	1526
F ₁	1482	1482	1482
G ₁	1436	1436	1436
I ₁	46	46	46
E ₂	1524	1524	1524
F ₂	1480	1477	1477
G ₂	1434	1433	1433
I ₂	46	44	44

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kielikiskon kärki oli kulunut
- Ns. kaarikiskon sisäreuna kulunut, metallihilettä irronnut koko kaarimatkan
- Pintavaurioita kiskossa
- Risteyksen kärki kulunut
- Vastakisko kulunut

Taulukko 35. Vaihte V0074, betonipölkkyt ja 60 E 1 -kisko, sijainti ratapihan itäpäässä

Mitta	12.8.1998	7.5.1999	28.4.2000
A ₀	1531	1534	1528
B ₀	1528	1531	1527
C ₁	1527	1527	1527
C ₂	1530	1531	1532
C ₃	1526	1528	1528
C ₄	1533	1532	1533
D ₁	1527	1526	1536
D ₂	1535	1537	1530
E ₁	1525	1524	1524
F ₁	1480	1478	1479
G ₁	1439	1429	1434
I ₁	41	49	45
E ₂	1524	1525	1525
F ₂	1478	1475	1475
G ₂	1438	1428	1430
I ₂	40	47	45

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kisko kulunut selvästi
- Kielikiskon kärki kulunut
- Kaarikisko kulunut pitkältä matkalta
- Pintavaurioita kiskossa
- Vastakisko kulunut, ei säädetty

Taulukko 36. Vaihte V0002, betonipölkkyt ja 60 E 1 -kisko, sijainti ratapihan itäpäässä

Mitta	13.2.1998	7.5.1999	28.4.2000
A ₀	1527	1526	1526
B ₀	1526	1526	1525
C ₁	1525	1528	1527
C ₂	1528	1529	1531
C ₃	1528	1527	1526
C ₄	1531	1532	1535
D ₁	1526	1526	1527
D ₂	1528	1535	1538
E ₁	1522	1523	1523
F ₁	1476	1474	1476
G ₁	1437	1426	1432
I ₁	39	48	44
E ₂	1527	1525	1524
F ₂	1481	1477	1477
G ₂	1438	1429	1433
I ₂	43	48	44

Lisähuomioita vaihteesta:

- Kiskoa uusittu hiljattain
- Kielen kärki hieman kulunut
- Muuten vaihde hyväkuntoinen

KRV –Vaihteet

Taulukko 37a. Vaihde V0125, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, A-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
E ₁	1523	1523	1523
F ₁	1479	1480	1479
G ₁	1435	1432	1431
I ₁	44	48	48
E ₂	1520	1520	1520
F ₂	1475	1477	1476
G ₂	1432	1430	1427
I ₂	44	47	49
D ₁	1539	1537	1538
D ₂	1548	1536	1539
C ₁	1543	1525	1536
C ₂	1526	1536	1527
C ₃	1527	1539	1529
C ₄	1550	1528	1542
A ₁	1546	1541	1542
A ₂	1547	1543	1546
B ₁	1527	1527	1527
K ₁	53	52	51
J ₁	45	48	50
B ₂	1528	1526	1528
K ₂	55	52	53
J ₂	45	45	50

Taulukko 37b. Vaihde V0125, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, B-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
B ₁	1526	1525	1528
K ₁	54	52	52
J ₁	45	48	51
B ₂	1528	1528	1526
K ₂	52	52	53
J ₂	43	47	50
C ₁	1543	1530	1535
C ₂	1525	1534	1529
C ₃	1531	1532	1532
C ₄	1547	1528	1535
D ₁	1539	1531	1540
D ₂	1544	1540	1541
E ₁	1524	1526	1523
F ₁	1478	1482	1478
G ₁	1434	1435	1431
I ₁	44	47	47
E ₂	1525	1523	1525

F ₂	1479	1478	1481
G ₂	1435	1431	1434
I ₂	44	47	47

Lisähuomioita vaihteesta:

A -puoli:

- Risteyksen kärjet kuluneet
- Hilettä kaarikiskojen luona
- Kielet hiukan kuluneet
- Vastakiskot kuluneet, ei säädetty

B -puoli:

- Pintavikoja risteyksessä, kärki kunnossa.
- Aluslevyt painautuneet pölkkyihin, huonoja pölkkyjä jonkun verran
- Kiskossa pintavikoja, kielikiskot kuluneet
- Risteyksen kärjet kuluneet

Taulukko 38a. Vaihte V0009, puupölkkyt ja 54 E 1 -kisko, tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, A-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
E ₁	1526	1524	1522
F ₁	1473	1468	1478
G ₁	1428	1416	1429
I ₁	45	52	48
E ₂	1522	1518	1521
F ₂	1477	1482	1477
G ₂	1433	1422	1430
I ₂	44	51	47
D ₁	1546	1548	1544
D ₂	1546	1546	1539
C ₁	1543	1547	1539
C ₂	1530	1527	1529
C ₃	1544	1526	1529
C ₄	1543	1543	1531
A ₁	1547	1552	1548
A ₂	1549	1551	1545
B ₁	1527	1525	1523
K ₁	48	51	48
J ₁	45	52	51
B ₂	1524	1525	1524
K ₂	46	50	50
J ₂	94	53	50

Taulukko 38b. Vaihte V0009, puupölkkyt ja 54 E 1 -kisko, tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, B-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
B ₁	1528	1525	1523
K ₁	51	50	49
J ₁	44	51	48
B ₂	1527	1526	1524
K ₂	49	51	49
J ₂	47	55	51

C ₁	1542	1545	1547
C ₂	1532	1534	1538
C ₃	1530	1525	1524
C ₄	1539	1547	1538
D ₁	1541	1545	1543
D ₂	1546	1547	1539
E ₁	1523	1523	1521
F ₁	1471	1568	1475
G ₁	1430	1417	1427
I ₁	41	51	48
E ₂	1523	1521	1524
F ₂	1481	1478	1481
G ₂	1436	1427	1432
I ₂	44	51	49

Lisähuomioita vaihteista:

A-puoli:

- Metallihilettä irronnut paljon
- Kielikiskot kuluneet
- Kieli liikkuu ylös-alas

B-puoli:

- Aluslevyt painautuneet, pölkyissä vaurioita
- Vastakisko kulunut
- Kiinnityksiä löysällä
- Kielet kuluneet

Taulukko 39a. Vaihte V0001, puupölkyt ja 54 E 1 -kisko, Tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, A-puoli

Mitta	13.2.1998	15.2.1999	29.4.2000
E ₁	1521	1517	1520
F ₁	1477	1472	1478
G ₁	1431	1422	1431
I ₁	46	50	47
E ₂	1524	1523	1519
F ₂	1477	1475	1477
G ₂	1431	1424	1429
I ₂	46	51	48
D ₁	1544	1543	1545
D ₂	1548	1543	1541
C ₁	1546	1535	1540
C ₂	1530	1531	1531
C ₃	1531	1530	1531
C ₄	1540	1543	1529
A ₁	1550	1552	1551
A ₂	1550	1554	1546
B ₁	1529	1530	1525
K ₁	46	53	49
J ₁	46	54	51
B ₂	1531	1529	1524
K ₂	50	51	49
J ₂	48	52	47

Taulukko 39b. Vaihde V0001, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, Tyyppi: KRV, sijainti ratapihan keskivaiheilla, B-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
B ₁	1531	1530	1525
K ₁	52	54	50
J ₁	49	54	51
B ₂	1529	1528	1523
K ₂	49	49	47
J ₂	43	50	48
C ₁	1539	1537	1542
C ₂	1530	1530	1527
C ₃	1530	1524	1531
C ₄	1540	1547	1534
D ₁	1547	1541	1537
D ₂	1539	1537	1542
E ₁	1526	1521	1524
F ₁	1479	1473	1479
G ₁	1434	1425	1432
I ₁	45	48	47
E ₂	1526	1521	1522
F ₂	1473	1465	1478
G ₂	1430	1418	1429
I ₂	43	47	49

Lisähuomioita vaihteesta:

A –puoli:

- Risteyksen pinta kulunut, kärki kunnossa
- Vastakiskot kuluneet
- Aluslevyt painautuneet, kiinnityksiä löysällä
- Kielet kuluneet, metallihilettä irronnut kaarikiskon alueella

B –puoli:

- Aluslevyjä painautunut, joitakin pölkkyjä vaihdettu uusiin
- Risteyksen kärki kunnossa
- Vastakisko kulunut, ei säädetty

Taulukko 40a. Vaihde V0072, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, Tyyppi: KRV, sijainti ratapihan itäpäässä, A-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
E ₁	1527	1523	1522
F ₁	1478	1472	1471
G ₁	1427	1419	1422
I ₁	51	53	49
E ₂	1528	1528	1528
F ₂	1484	1482	1484
G ₂	1436	1428	1436
I ₂	48	54	48
D ₁	1541	1545	1542
D ₂	1542	1540	1540
C ₁	1539	1542	1545
C ₂	1529	1531	1532
C ₃	1527	1527	1528
C ₄	1539	1540	1538
A ₁	1546	1548	1550
A ₂	1544	1545	1545
B ₁	1528	1527	1524
K ₁	52	53	51
J ₁	45	54	50
B ₂	1526	1525	1525
K ₂	51	53	50
J ₂	44	53	48

Taulukko 40b. Vaihde V0072, puupölkkyt ja 54 E 1 –kisko, Tyyppi: KRV, sijainti ratapihan itäpäässä, B-puoli

Mitta	v. 1998	v. 1999	v. 2000
B ₁	1527	1528	1528
K ₁	51	52	51
J ₁	46	55	51
B ₂	1530	1527	1527
K ₂	52	52	50
J ₂	46	53	51
C ₁	1536	1544	1545
C ₂	1535	1532	1533
C ₃	1533	1535	1535
C ₄	1540	1539	1537
D ₁	1541	1543	1541
D ₂	1542	1541	1541
E ₁	1523	1522	1523
F ₁	1477	1475	1477
G ₁	1434	1422	1428
I ₁	44	53	49
E ₂	1526	1526	1526
F ₂	1476	1472	1474
G ₂	1432	1420	1424
I ₂	44	52	49

Lisähuomioita vaihteesta

A-puoli:

- Kisko painunut kasaan, kulkureunalla purseita
- Aluslevyjä painautunut pölkkyihin jonkin verran, pölkkyjä rikki
- Vastakiskot kuluneet, säädetty, merkitty vaihdettaviksi
- Kiskot kuluneet reilusti, metallihilettä irronnut paljon
- Risteyksen kärki murtunut

B-puoli:

- Risteyksen kärki kulunut ja murtunut
- Kiskot kuluneet
- Aluslevyjä painautunut ja kiinnityksiä löysällä
- Vastakiskot kuluneet, merkitty vaihdettaviksi

5.4.4 Mittaustulosten arviointia

Rautaruukki Oyj:n Raahan ja Vainikkalan ratapihan tutkimuskohteina olleista vaihteista voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Yleisesti ottaen tutkimus on osoittanut, että vaihteet ovat vakaita kokonaisuuksia kestävämpiä koviakin kuormituksia ja vaativia olosuhteita. Varsinaisia mitta- toleranssien ylityksiä kyllä syntyy, mutta kriittisiä ylityksiä kuitenkin yllättävän vähän.
- Kaikki vaihteet muokkaantuvat kovassa kuormituksessa, josta aiheutuu palautuvia muutoksia raidelevyteen.
- Pysyviä mittamuutoksia aiheuttaa merkittävästi eri elementtien osien kulumisen, kuten kielen ja risteyksen kärjen sekä kaarikiskon ja vastakiskon kulumisen.
- Tulosten todellista arviointia vaikeuttaa se, että vaihteita on saatettu korjata tai säätää mittauskertojen välillä, mikä on muuttanut mittoja suuntaan tai toiseen.
- Vaihteiden kriittiset kohdat ovat kielikisko, kaarikisko, risteyksen kärki ja vastakisko. Havupuupölkyillä varustettujen vaihteiden ongelma on lisäksi aluslevyjen painautuminen pölkkyyn.
- Betoni- ja kovapuupölkyillä varustettujen vaihteiden mittaheitot ovat pääasiassa kiskon kulumisesta johtuvia muutoksia, kun havupuupölkyillä varustetuissa vaihteissa mittapoikkeamia aiheuttaa lisäksi aluslevyjen painautuminen.
- Kaikki tutkimuksessa olevat vaihteet olivat lyhyitä vaihteita, joten nopeuden merkitystä vaihteiden kestävyys ei voitu määrittää. Oletettavaa kuitenkin on, että nopeus on vaihteiden kulumisen kannalta keskeinen asia nykyistä raskaammilla akselipainoilla.
- Vaaka- ja pystygeometrian pysyvyyden vaikutus vaihteiden kestävyys on ilmeinen. Huonosti tuettu vaihde elää enemmän junaliikenteen alla ja eri elementtien kulumisen lisääntyy. Varsinkin kielikiskon kulumisen lisääntyy merkittävästi, kun pyörä ei tapaa kulkupintaa halutulla tavalla.

5.4.5 Yhteenveto

Vaihdetutkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta todeta seuraavaa:

- Pitkät 60 E 1 -kiskoilla ja betonipölkyillä varustetut vaihteet tulisivat kestämaan ainakin 250 kN:n akselipainot.
- Lyhyet 60 E 1 -kiskoilla ja betonipölkyillä varustetut vaihteet tulisivat kestämaan todennäköisesti 250 kN:n akselipainot ainakin pienillä nopeuksilla.
- Pitkät 54 E 1 -kiskoilla ja kovapuu- tai betonipölkyillä varustetut YV-vaihteet tulisivat kestämaan todennäköisesti 250 kN:n akselipainot.
- Lyhyet 54 E 1 -kiskoilla ja betonipölkyillä varustetut YV-vaihteet tulisivat kestämaan todennäköisesti 250 kN:n akselipainot ainakin pienillä nopeuksilla.
- Kaikki tutkimuksessa olleet KRV-vaihteet oli varustettu 54 E 1 -kiskoilla ja puupölkyillä. KRV-vaihteista voidaan todeta, että ne tulisivat todennäköisesti kestämaan ainakin 250 kN:n akselipainot hiljaisilla nopeuksilla.
- Vaihteen tuennan merkitys tulisi kasvamaan, koska huonosti tuettu vaihde ”huojuu” junan alla ja se rasittaa mm. kielikiskoa huomattavasti.
- On oletettavaa, että vaihteiden vikatiheys tulisi kasvamaan raskaammilla akselipainoilla, mikä nostaisi kunnossapitokustannuksia. Suurempien akselipainojen vaikutuksesta rasitukset kasvaisivat juuri kriittisimpiin kohtiin kuten kielikiskoihin, välielementin kaarikiskoon, vastakiskoon ja risteuksen kärkeen.
- Ratapihoilla olevien vaihteiden tarkastuskertoja tulisi lisätä, jotta alkavat viat saataisiin hyvissä ajoin kitkettyä pois.

Vaihteille tulisi tehdä lisätutkimuksia valitsemalla muutama vaihde pitempiaikaiseen seurantaan. Tutkimuksen aikana kirjattaisiin kaikki vaihteelle tehtävät toimenpiteet kuten esim. tuennat, mittaukset, korjaukset jne. Ihannetilanne olisi silloin, kun tutkimukseen saataisiin uusia vaihteita alueelta, jossa kuormitus olisi nykyoloissa maksimaalinen.

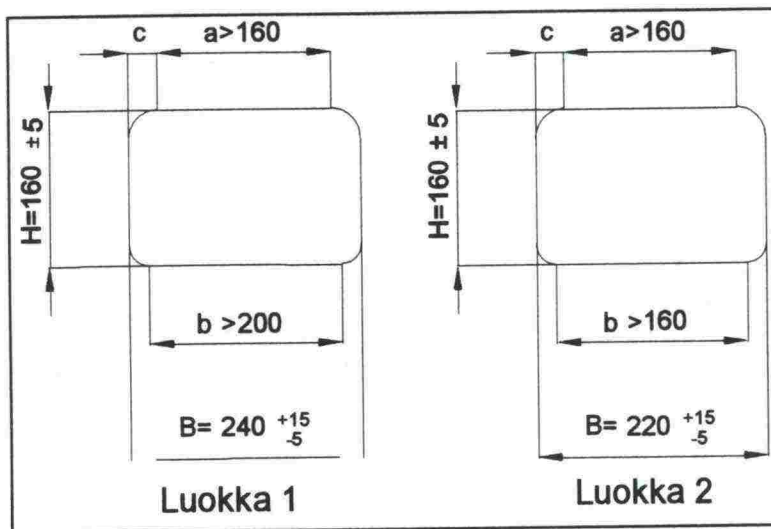
6. PÖLKYT

6.1 Puupölkkyt

6.1.1 Yleistä

Suomessa käytetään puupölkkyinä enimmäkseen havupuisia ratapölkkyjä, jotka kyllästetään ja varustetaan aluslevyillä Oy VR-Rata Ab:n kyllästämöllä Haapamäessä. Kyllästämö on perustettu vuonna 1954. Se työllistää tällä hetkellä 17 henkilöä. Tuotanto oli 134 000 pölkkyä vuonna 1999 kyllästämön kapasiteetin ollessa noin 350 000 pölkkyä vuodessa. Suomessa käytettävien ratapölkkyjen pituus on 2700 mm, korkeus 160 mm ja leveys joko 220 tai 240 mm. Normaaliraiteisilla radoilla muualla Euroopassa puuratapölkyn pituus on yleensä 2600 mm /18/22/.

Poikkileikkauksen mukaan ratapölkkyt jakautuvat Suomessa kahteen luokkaan. Nämä poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 26. Puuratapölkkyt painavat 70...100 kg puun kosteuden mukaan.



Kuva 26. Puuratapölkkyjen luokitus ja poikkileikkausmitat.

Puutavara on kotimaista ja se toimitetaan sahattuina aihioina kyllästämölle. Vaihdöpölkkyt ovat ruotsalaisia ja niiden pituudet vaihtelevat 3000...7500 mm välillä. Kyllästeenä käytetään kreosoottijä, joka on kivihiilen koksauksen yhteydessä saatava kivihiilitervajaloste. Suolalla kyllästäminen ei tule kysymykseen, sillä suolan sisältämät kupari, kromi, arseeni ym. metallit tekevät puun sähköä johtavaksi /18/22/.

6.1.2 Pölkkyjen valmistus

Puisen ratapölkyn valmistus on kolmivaiheinen. Se alkaa pölkkyjen porauksella, jatkuu kyllästyksellä ja loppuu aluslevyjen kiinnitykseen eli pölkyn levytykseen. Pölkyn valmistaminen aloitetaan siis poraamalla reiät aluslevyt kiinnittäville raideruuveille automaattisella poralaitteella /18/22/.

Kyllästysmenetelmänä käytetään ns. Rüping-prosessia. Poraamosta tulleet pölkyt lastataan pieniin vaunuihin, jotka työnnetään autoklaaviin. Autoklaaveja on Haapamaellä kaksi kappaletta (á 58 m³). Pölkyillä täytettyyn autoklaaviin pumpataan noin 4 bar ylipaine, jota pidetään yllä 10...15 min ennen 110 °C kreosoottijölyn pumppausta. Autoklaavissa on kreosoottipumppauksen aikana sama 4 barin alkupaine. Pumppauksen jälkeen paine nostetaan 40 min ajaksi 12 bar:iin. Tämän jälkeen kreosootti pumpataan pois ja autoklaaviin imetään noin 80 %:n alipaine runsaan kahden tunnin ajaksi /18/22/.

Kyllästyksen jälkeen pölkyt kuormataan levytyskoneeseen, jossa aluslevyt ruuvataan kiinni. Aluslevyt ovat käytettyjä/kierrätettyjä, mutta ruuvit ja jouset ovat yleensä uusia. Käytännössä kaikki aluslevyt ovat tarkoitettu hey-back-kiinnitysjoille /18/22/.

6.1.3 Yleisimmät vauriot

Puupölkyn mitoitusikä on 35 vuotta. Siinä ajassa yhdessä pölkkyssä olevan kreosoottijölyn määrä pienenee seitsemästä kilosta yhteen kiloon. Pölkky vanhenee nopeammin soratukikerroksissa kuin sepelitukikerroksessa. Suurimmat ongelmat aiheutuvat kuitenkin korkeista akselipainoista. Niiden seurauksena aluslevy uppoaa puupölkkyyn, jolloin aluslevyn kiinnitys löyhtyy. Silloin aluslevy pääsee hiertämään pölkyn rikki ja pölkky tuhoutuu nopeasti. Ilmiö korostuu kaarteissa ja on havaittavissa aluslevyjen sivuille pakenemisena /13/17/19/22/24/26/.

6.2 Betonipölkyt

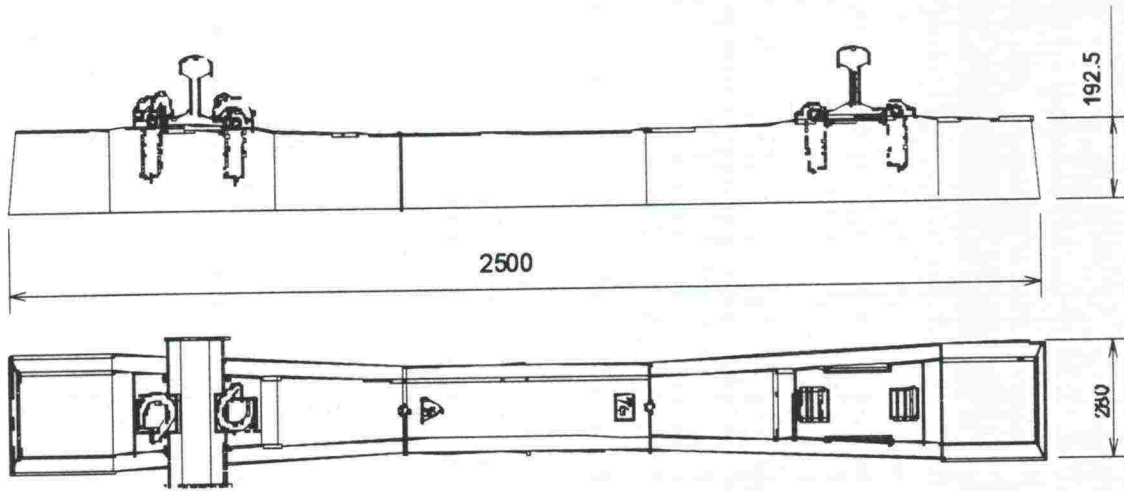
6.2.1 Yleistä

Betonin esijännitystekniikan kehittyminen on tehnyt betoniratapölkkyjen käytön yleiseksi. Betoniratapölkkyjen etuna esimerkiksi puupölkkyihin verrattuna on kestävyys sekä suuri omapaino, joka pienentää raiteen siirtymiä /10/18/.

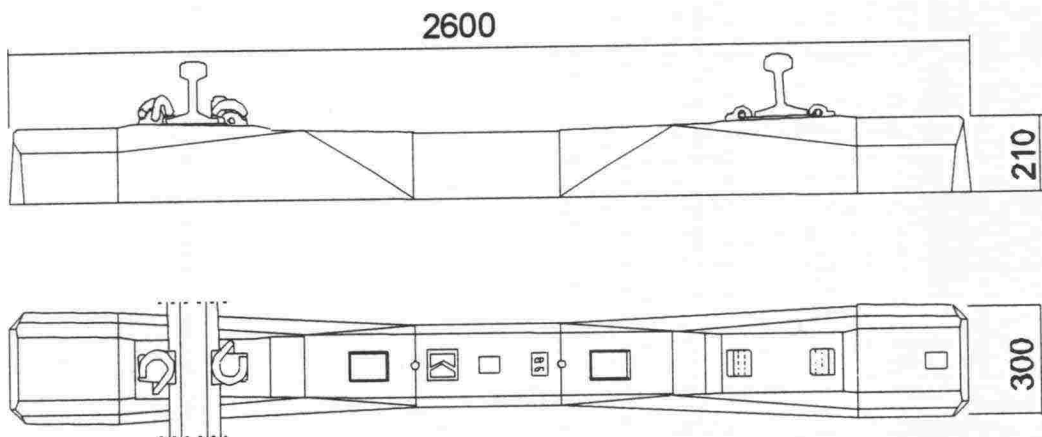
Betoniratapölkkyjä on sekä yksi- että kaksiosaisina. Kaksiosaisen betoniratapölkyn molemmat osat raudoitetaan erikseen ja niitä ei esijännitetä. Yksiosaiset ovat tavallisesti esijännitetyjä. Suomessa käytetään yksiosaisia betoniratapölkkyjä. Betoniratapölkkyjen etu on myös se, että ratapölkyt voidaan helposti valaa halutun muotoiseksi ja näin parantaa ratapölkyn ominaisuuksia. Esimerkkinä tästä ovat mm. vuosien aikana kokeillut korvalliset ratapölkyt ja kaukalomaiset ratapölkyt. Molemmilla ratkaisulla on pyritty hakemaan parempaa raiteen sivuttaisvastusta /10/18/.

Normaaliraiteisilla radoilla kaksiosaiset betoniratapölkyt ovat yleensä n. 2250 mm ja yksiosaiset 2300...2600 mm pitkiä. Betoniratapölkkyjen paino on 200...300 kg /10/18/.

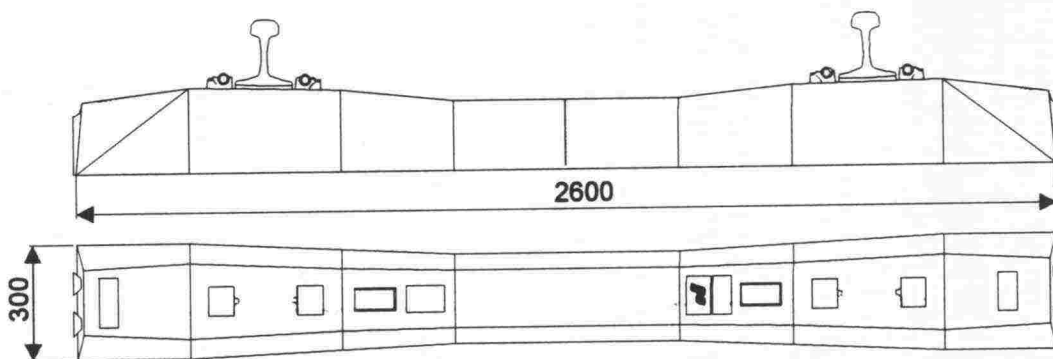
Kuvassa 27 on esitetty eräitä Suomessa käytettyjä yksiosaisia betoniratapölkkyjä. Niiden pituudet ovat 2500 ja 2600 mm.



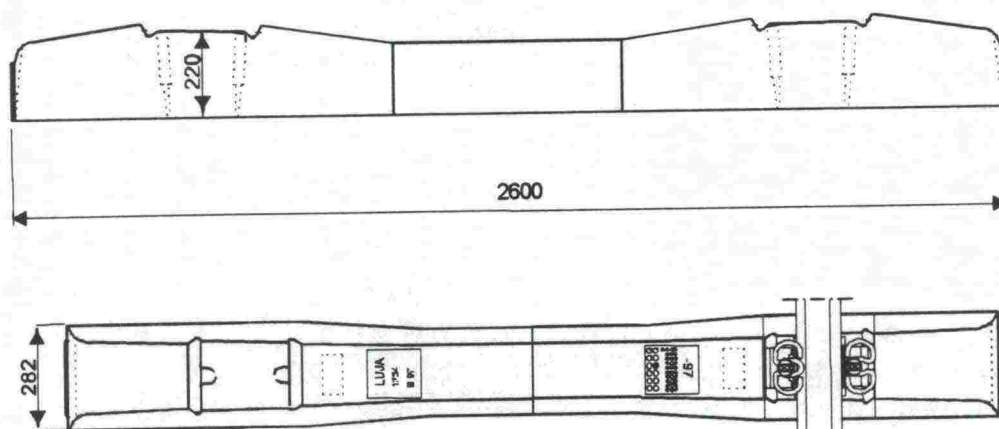
B75-betoniratapölkky



B86-betoniratapölkky



BP89-betoniratapölkky



B97-betoniratapölkky

Kuva 27. Suomessa käytettävät betoniratapölkkyt

6.2.2 Pölkkyjen valmistus

Betoniratapölkkyjä valmistavat Suomessa Parma Betonila Oy Forssassa sekä Lujabetoni Oy Siilinjärvellä. Betoniratapölkkyjä valmistetaan vuosittain noin puoli miljoonaa kappaletta /10/.

Betoniratapölkkyt valmistetaan liukuvalutekniikasta sovelletulla menetelmällä yhteensä kuudella valmistuslinjalla, joista neljällä valetaan Skl 14 -kiinnikkein varustettuja betoniratapölkkyjä ja yhdellä Pandrol e-clip -kiinnikkein varustettuja betoniratapölkkyjä. Lisäksi yhdellä linjoista valetaan vaihepölkkyjä. Jokaisella valulinjalla on viisi pölkkymuottia rinnakkain ja 32 peräkkäin. Yhteensä muotteja on siis 160. Forssan tehtaan valmistuskapasiteetti on 800 betoniratapölkkyä vuorokaudessa (5 linjaa x 160 betoniratapölkkyä) /10/.

Betoniratapölkkyjen valmistusprosessi alkaa asentamalla pölkkymuotit oikeaan muotoon ja paikkaan. Muoteissa on tunnistet ja valmistuspäivät helpottamassa valmistuserän jäljitettävyyttä. Skl-muotteihin asennetaan voitelun jälkeen muoviholkit (8 kpl/pölkky), joihin myöhemmässä vaiheessa ruuvataan aluslevyn kiinnittävät raide-ruuvit. Pandrol-pölkkyihin asennetaan vastaavasti jousikiinnitin. Pölkkyt raudoitetaan halkaisijaltaan 6 mm esijännityspunoksilla, joita asennetaan pölkyn pituussuunnassa 12 kpl/pölkky. Punokset jännitetään valulinjojen päissä olevilla tunkeilla. Varsinainen valu tehdään liukuvalutekniikalla. Betoni sekoitetaan myllyssä, josta se kuljetetaan betoni-kuupissa valuhallin katossa kulkevia kiskoja pitkin valukelkalle. Se levittää ja täyttää betonin muotteihin. Valumies tarkastaa silmämääräisesti jokaisen valukelkalle tulevan betonierän ennen sen pudottamista kelkkaan. Muotit peitetään välittömästi valun jälkeen /10/.

Valun jälkeen seurataan betonin hydratoitumista ja kypsyysastetta. Kun betoni on saavuttanut K30-lujuuden, esijännityspunosten jännitys päästetään pölkkyihin. Muotit lasketaan alas 10...14 tunnin kuluttua valun aloituksesta. Tämän jälkeen pölkkyt sahataan linjalla viiden peräkkäisen pölkyn elementeiksi, jotka nostetaan sahalinjalle, missä ne sahataan yksittäisiksi pölkkyiksi. Skl-pölkkyt matkaavat tämän jälkeen kiinnitys-

tarvikeautomaatille, missä pölkkyyn ruuvataan kiinni aluslevy, johon on kiinnitetty Skl-jouset, sivueristimet ja kuminen välilevy. Pandrol-pölkkyyn liimataan vain välilevy. Varustellut pölkkyt sivellään vielä jälkihoitoaineella ennen varastointia ja kuljetusta ratatyömaille. Valmiin ratapölkyn betonin lujuusluokka on K70...80 (vaatimus n. K50)/10/.

6.2.3 Yleisimmät vauriot

Pölkkyjen vaurioista yleisimpiä ovat olleet halkeamat, joista osa on syntynyt jo valmistuksen aikana ja osa tullut jostain muusta syystä esimerkiksi kuivumisen yhteydessä. Halkeamat ovat yleistyneet Skl-kiinnittimien yleistymisen yhteydessä, koska Skl:llä kiinnityselimet ruuvataan pölkkyyn. E-clip-jousen jousikiinnitin asennetaan valamalla /10/13/17/19/24/26/.

Asiantuntija-arvioiden mukaan uusimmat betonipölkkyt tulisivat kestäämään nykymitoituksellakin akselipainojen noston aina 300 kN:iin asti. Käytännön kokemukset Ruotsin malmiradalta tukevat ajatusta. Pölkkyt kestävät hyvin, joskin murtovarmuuskerrointa on pienennettävä. Nykyisillä akselipainoilla tapahtuneet pölkkyjen katkeamiset ovat usein johtuneet tukikerroksen ominaisuuksien heikentymisestä. Betonipölkky on altis raiteentuentakoneen lapojen aiheuttamalle vaurioitumiselle ja on lisäksi herkkä hajoamaan junavaunujen pudotessa kiskoilta pois. Pölkkyjen käytännön ikä on lähellä teoriaa eli noin 30 vuotta. Lyhytkiskoraiteessa betoniratapölkkyjen alla voi jatkosten kohdalla esiintyä sepelin murenemistä, mikä aiheuttaa lisää kunnossapitotarvetta. Muutoinkin betonipölkkyjen katkeamisen syyksi on arveltu, ja varmaan aivan oikein, tukikerroksen ja alusrakenteen puutteita /9/13/17/19/24/26/.

6.3 Betoniratapölkkytutkimus

Betoniratapölkkyjen katkeamista ja mitoitusta yleensäkin haluttiin tutkia tarkemmin. Teknillisen korkeakoulun rakenteiden mekaniikan laboratoriossa kehitettiin mainittuun tarkoitukseen laskentaohjelma, jolla saadaan selville betonisten ratapölkkyjen kestävyysmomenttia ja leikkausvoimaa vastaan erilaisissa kuormitusilanteissa. Ohjelmalla voidaan karkeasti tarkastaa tartuntajännemenetelmällä tehdyn pölkyn kestävyys, jos sen poikkileikkaus on puolisuunnikas. Pölkkyjen toimitusehtoihin sisältyy murtovarmuusvarmuuskertoimella 2,0. Leikkausvoimaa vastaan ei nykyisin aseteta vaatimuksia.

Betoniratapölkkyjä koskeva tutkimus ja siihen liittyvä laskentaohjelma julkaistaan eri raportissa. Tärkeimmät tulokset esitetään kuitenkin taulukoissa 41 ja 42. Sen jälkeen seuraa lyhyesti joukko betonipölkkyjä koskevia päätelmiä.

Taulukon 41 laskelmat on tehty käyttäen alustamallina NBS-menetelmää, alustalukua $C=0,4 \text{ N/mm}^3$, pölkkyväliä $a=610 \text{ mm}$, välilevyn dynaamista jousivakiota B75-pölkkyille 225 kN/mm ja muille 135 kN/mm , raiteen laatulukuna $\kappa=0,2$ ja tilastollisena varmuutena $97,5 \%$ ($t=2$). Kaikissa tapauksissa mitoituksessa on ollut määräävänä pölkyn leikkauskapasiteetti. Momenttikapasiteetista on ollut tällöin käyttämättä noin 30% . Murtorajatilatarkastelussa varmuus murtoon on kaikissa tapauksissa yli 3. Kaikki laskelmat sisältävät varmuuskertoimen ~ 2 .

Taulukko 41. Betoniratapölkkyille sallitut nopeudet ja vastaavat akselipainot

Max nopeus (km/h)	Max akselipaino (kN)						
	C=0,4 N/mm ³ , a=610 mm, c _{alki dyn} =135 kN/mm, k=0,2, tavarajuna, t=2.						
	B75	B86	B88	BP 89, BP 99		B97	
	54 E 1	54 E 1	60 E 1	54 E 1	60 E 1	54 E 1	60 E 1
260	175	205	205	190	200	185	195
250	180	210	210	190	205	185	200
240	180	215	210	195	205	190	205
230	185	215	215	195	210	195	205
220	185	220	220	200	210	195	210
210	190	220	220	200	215	200	210
200	190	225	225	205	220	200	215
190	195	230	230	205	220	205	220
180	195	230	230	210	225	205	220
170	200	235	235	215	230	210	225
160	205	240	240	215	230	215	230
150	205	245	240	220	235	215	230
140	210	245	245	225	240	220	235
130	215	250	250	225	240	225	240
120	215	255	255	230	245	225	240
110	220	260	260	235	250	230	245
100	225	265	260	240	255	235	250
90	225	270	265	245	260	240	255
80	230	275	270	245	265	245	260
70	235	275	275	250	270	245	265
60	240	280	280	255	275	250	270

Käytössä oleville raiderakenteille on taulukossa 42 arvioitu suurimmat sallitut nopeudet ja akselipainot. Arvio perustuu taulukossa 41 esitettyihin betoniratapölkkyjen kantavuuslaskelmiin ja toteutuneeseen käytäntöön.

Taulukko 42. Eri raiderakenteiden sallitut nopeudet ja akselipainot

Kisko	Pölkkyt	Kiskopituus	Tukikerros	Akselipaino kN / nopeus km/h		
				250	225	200
60 E 1	B88 / B97 / BP 89 / BP 99	Jk-raide	sepeli	100	160	200
54 E 1	B86 / B97 / BP 89 / BP 99	Jk-raide	sepeli	80	130	200
54 E 1	B86 / B97 / BP 89 / BP 99	Lk- tai Pk- raide	sepeli	30	100	120
54 E 1	B75 ja vanhem- mat betonipölkkyt.	Jk-raide	sepeli	60	100	140
54 E 1	puupölkkyt	Jk-raide	sepeli	60	100	120
54 E 1	puupölkkyt	Lk- tai Pk- raide	sepeli	30	100	120
54 E 1	Kaikki	Lk- tai Pk- Raide	sora	20	60	80
K43	Kaikki	Lk- tai Pk- raide	sepeli	20	80	90
K43	Puupölkkyt	Lk- tai Pk- raide	sora	10	50	60

Betonipölkkytutkimuksen päätelminä voidaan todeta seuraavaa:

1. Betonipölkkyjen mitoitusohjeet perustuvat saksalaisiin toimitusehtoihin vuodelta 1957. Ohjeissa otetaan huomioon vain pölkyn momenttikestävyys. Työssä kuitenkin osoittautui, että leikkauskestävyys on useissa tapauksissa pölkyn kestävyuden kannalta ratkaisevampi tekijä, minkä vuoksi mitoitusohjeet tulisi tarkistaa. Siinä yhteydessä tarvittaneen myös ulkomaisia näkemyksiä.
2. Alustaluvun ollessa $C=0,3$ useimmat pölkkyt täyttävät ne vaatimukset, joita 250 kN:n akselipaino edellyttää.
3. Alustaluvun ollessa $C=0,4$ useimmat pölkkyt täyttävät ne vaatimukset, joita 250 kN:n akselipaino edellyttää. Kun kiskona on 54 E 1, nopeutta joudutaan joissakin tapauksissa rajoittamaan alle 80 km/h. Kiskon ollessa 60 E 1 nopeusrajoituksia ei tarvita.
4. Alustaluvun ollessa $C=0,5$ mahdollisuudet akselipainojen nostoon ovat vähäisemmät.

5. 300 kN:n akselipaino ei ole mahdollinen laskennassa käytetyllä varmuuskertoimella 2.
6. Pölkyn momenttikestävyys ylittyminen ei aiheuta välitöntä junaturvallisuusvaaraa, mutta leikkauskestävyyden ylittyminen saattaa sellaisen aiheuttaa. Siksi uusien pölkkyjen suunniteltaessa olisi syytä paneutua leikkauskestävyyden lisäämiseen.

Tutkimuksen perusteella pölkkyt vaativat vielä lisätarkastelua, ennen kuin uusista akselipaino- ja nopeusrajoituksista voidaan päättää.

7. PÄÄTELMÄT

Jtt:n rataluokkajako päällysrakenteen osalta voisi jatkossa olla esimerkiksi taulukon 43 mukainen. Taulukon mukaisesti on tehty kartta (kuva 28) rataosien jakautumisesta eri rataluokkiin.

Taulukko 43. Ehdotus rataluokkajaoksi.

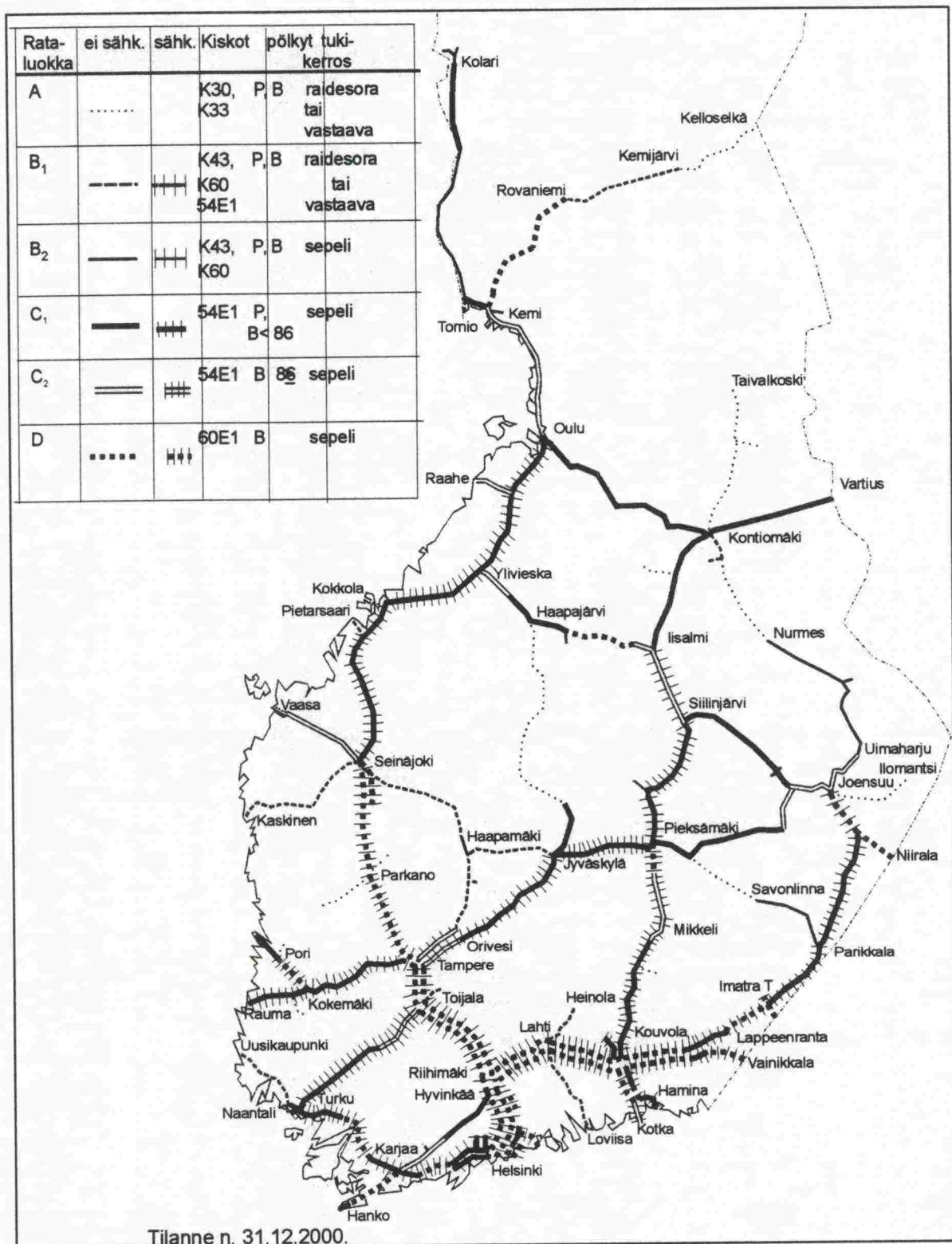
Rataluokka	Kiskotus	Pölkkytys	tukikerros	nopeus [km/h]	akselipaino ¹⁾ [kN]	koskee
A	K30	puu, betoni	sora, sepeli	(90)	(100)	henkilöjunat
				70	160	henkilöjunat
				50	160	tavarajunat
				40	200	tavarajunat
B ₁	K43, K60 54 E 1	puu, betoni	sora	100	160	kaikki junat
				60	200	tavarajunat
				50	225	tavarajunat
B ₂	K43, K60	puu, betoni	sepeli	110	160	kaikki junat
				90	200	tavarajunat
				80	225	tavarajunat
C ₁	54 E 1	puu, betoni < B86	sepeli	160 ²⁾	160	henkilöjunat
				180 ³⁾	160	henkilöjunat
				120	200	tavarajunat
				100	225	tavarajunat
				60	250	tavarajunat
C ₂	54 E 1 Jk-raide	Betoni ≥ B86 kovapuu	sepeli	200	160	henkilöjunat
				160	200	tavarajunat
				120	225	tavarajunat
				80	250	tavarajunat
D	60 E 1 Jk-raide	betoni	sepeli	220	180	henkilöjunat
				160	200	tavarajunat
				140	225	tavarajunat
				100	250	tavarajunat
				(60)	(300)	tavarajunat

1) Ei koske vetureita junassa

2) puuratapölkkyt, yli 120 km/h Jk-raide

3) betoniratapölkkyt, yli 120 km/h Jk-raide

Ehdotuksen mukainen rataluokkajako olisi huomattavasti monimutkaisempi kuin nykyisin käytössä oleva. Lienee järkevää, että nykyisenkaltainen rataverkko jaetaan kuljetuksia varten eri rataluokkiin raiteittain, kuten ehdotuksessa on tehty esim. Kouvolan ja Juurikorven välillä.



Kuva 28. Ehdotus rataluokkajaoksi rataosittain.

Tämän raidetutkimuksen päätelminä voidaan todeta seuraavaa:

- Akselipainojen nosto 250 kN:iin (tai 300 kN:iin) on mahdollista rataosuuksilla, joilla on joko 60 E 1 tai 54 E 1 -kisko ja
 - jatkuvakiskoraide
 - betonipölkkyt linjalla ja betoni- tai kovapuupölkkyt vaihteissa
 - S-tyyppin eristejatkokset tai akselilaskentajärjestelmä
 - suurilla kaarresäteillä olevat vaihteet.
- 60 E 1 -tyypin kisko tekee mahdolliseksi akselipainojen noston jopa 300 kN:iin, mutta 54 E 1 -tyypin kisko vain varauksin 250 kN:iin.
- Pölkkyt ovat joka tapauksessa ongelmakohta ja sen takia nopeusrajoitukseen tulee kiinnittää huomiota. Uudet pölkkyt tulisi ilmeisesti suunnitella uudella tavalla.
- Akselipainojen nosto 250 kN:iin ei ole ratapihojen ulkopuolella mahdollista, kun rataosuudella on:
 - havupuupölkkyt
 - 43 kg tai kevyempi kisko
 - ns. lyhytkiskoraiteet.
- Akselipainojen nostolle eivät aseta esteitä:
 - kiinnikkeet
 - välilevyt
 - sivueristimet, ainoastaan pienillä kaarresäteillä voi olla huono vaikutus eristimiin.
- Nykyisellä rataverkolla suurimmat ongelmat esiintyisivät:
 - eristejatkoksien murtumisina (esim. Exel)
 - vaihteiden nopeana kulumisena (risteykset, kielet ja kaarikisko)
 - aluslevyjen painumisena havupuupölkkyihin
 - raideleveyden muutoksena vaihteissa
 - kevyempien kiskotyyppien nopeutuneena kulumisena
 - kaarreosuuksien lisääntyvänä kunnossapitotarpeena
 - termiittihitsisaumojen murtumisten lisääntymisenä
 - pölkkyjen rikkoutumisena.
- Lisätutkimuksia vaativat ainakin
 - hitsausseamat
 - vaihteet
 - ratapölkkyt.

LÄHDELUETTELO

1. Banans vertikal belastning, NBS-raportti R 32, julkaisematon luonnos, 2000
2. Beanspruchung des Gleises, der Bettung und des Unterbaues durch Verkehrslasten – Beanspruchung der Betonschwellen, ORE D71/RP 9, Utrecht 1969
3. Fastenrath, Fritz. Railroad track: Theory and practice, 1981, ISBN 0-8044-4231-2
4. Geomekaniikka 1, Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry. Helsinki 1985
5. Gunnarsson, Johan. Haastattelu. Banverket, pääkonttori, Borlänge 9/2000
6. Halme, Arimo. Haastattelu. Cogifer Teijon tehtaas, Perniö, 2.3.2000
7. Hay, William W. Railroad Engineering. Second edition. New York 1982
8. Introduction to railway vehicle dynamics: Track forces. Seminaariluennot AEA Technology plc 1999
9. Johde, Reijo. Haastattelu. Inhan tehtaas, Ähtäri, 25.1.2000
10. Järveläinen, Markku. Haastattelu. Parmabetonila, Forssa 24.1.2000
11. Kolisoja, Pauli & Levomäki, Matti & Mäkelä, Erkki & Niskanen, Pasi. Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 6/1999 Helsinki
12. Lehtomäki, Jouko. Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot, RHK:n julkaisu A3/2000. Ratahallintokeskus. Helsinki 2000
13. Marola, Matti. Haastattelu. Oy VR- Rata Ab, Helsinki – Tampere perusparannus, Lempäälä, 26.1.2000
14. Myllynen, Helena. Radan suunnittelu ja rakentaminen, TTK tietekniikka, T21, Espoo 1982
15. Niemi, Antti. Haastattelu. Teknikum Oy, Vammala, 15.2.2000
16. Nummelin, Markku. Rautatievaihteet, Kehitys, rakenne ja kunnossapito. ISBN 951-47-8649-1 Länsi- Savo Oy, Mikkeli 1994
17. Ovaska, Matti. Haastattelu. Oy VR- Rata Ab, Tampereen rata-alueen hitsausmestari, Tampere, 26.1.2000
18. Ratateknilliset määräykset ja ohjeet (RAMO)
19. Rautanen, Pekka & Melamies, Markku. Haastattelu. Oy VR- Rata Ab Koe- ja koulutushitsaamo, Hyvinkää, 18.2.2000
20. Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO). Ratahallintokeskus. Helsinki
21. Riessberger, Klaus. Track – Part of the System "Railway". NBIU-luentomoniste. Graz 1994
22. Salmi, Erkki. Haastattelu. Oy VR-Rata Ab Haapamäen pölkkykyllästämö, Keuruu, 14.3.2000
23. Study of characteristics of rail fastening systems – final recommendations for test methods, ERRI D 170/RP 5. Utrecht 1994

24. Sääntti, Jaakko. Haastattelu. Oy VR- Rata Ab Kaipiaisten kiskohitsaamo, Anjalankoski, 18.1.2000 ja 28.2.2000
25. Testing and acceptance of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour, safety, track fatigue and running behaviour, UIC code 518, draft of second edition 1.10.1999
26. Tilus, Timo & Kyröläinen, Reijo. Haastattelu. Rautaruukki Oy, Raahel, 15.3.2000
27. Track/bridge interaction – Recommendations for calculations, UIC code 774-3 R, UIC 1999
28. Track stability, Improved Knowledge of forces in CWR track – Theory of CWR Track stability, ERRI D202/RP3. Utrecht 1995
29. VR Raidejaoston muistio nro 68, Liimapuiselle ratapölkylle asetettavat lujuusvaatimukset, 17.9.1984.

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
 2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
 3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
 4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
 5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
 1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutus selvitys
 2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
 3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
 4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
 5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
 6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankeissa
 1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset
 3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama värinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
 6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-Haaparanta akselipainojen korottamista varten
 8/1999 Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämismuutosten vaikutustarkastelut
 2/2000 Bantrum, 250 kN och 300 kN axellaster
 3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
 4/2000 Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään
 5/2000 Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
 6/2000 Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen ratateknisistä tutkimuksista
 7/2000 Intermediate Report, 250 kN and 300 kN axle loads
 8/2000 Ratatekniset määräykset ja ohjeet -julkaisun käytettävyydestä tutkimus
 9/2000 Ratakapasiteetin perusteet
 10/2000 Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 axle loads
 11/2000 Rautatieonnettomuuksien sisäiset ja ulkoiset kustannukset
 12/2000 Internal and External Costs of Railway Accidents
 1/2001 Rataverkko 2020 -suunnitelma
 2/2001 XPS-routaeristelevyt ratarakenteissa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot

RATAHALLINTOKESKUS
 KAIVOKATU 6, PL 185
 00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Kari Ojanperä, puh. (09) 5840 5183, sähköposti: kari.ojanpera@fi
 Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-048-8
 ISSN 1455-2604