

## Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella



Otto Lahti



Ratahallintokeskuksen  
julkaisu A 12/2008

Junan pyörävikojen havainnointi  
raiteeseen asennetulla mittalaitteella

Otto Lahti

Helsinki 2008



**Ratahallintokeskus**

Ratahallintokeskuksen julkaisu A 12/2008

ISSN 1455-2604

ISBN 978-952-445-243-4

Verkkajulkaisu pdf ([www.rhk.fi](http://www.rhk.fi))

ISSN 1797-6995

ISBN 978-952-445-244-1

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Seppo Mäkitupa

Paino: Kopijyvä Oy, Kuopio

Helsinki 2008

**Lahti Otto: Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella.** Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 12/2008. 90 sivua ja 2 liitettä. ISBN 978-952-445-243-4, ISBN 978-952-445-244-1 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf).

## TIIVISTELMÄ

Työ on selvitys raiteeseen asennettavista mittalaitteista, jotka havaitsevat ohittavien junien pyörien epäpyöreysviiat. Epäpyöreysviiat lisäävät ympäristöhaittoja sekä radan ja vaunun rasituksia. Junan pyöriin syntyy lukkojarrutuksissa tasaisia kohtia, niistä irtoaa materiaalivikojen takia palasia ja ne voivat kulua epätasaisesti. Radan ja vaunujen kulumisen lisäksi pyörävikojen on todettu aiheuttaneen lukuisia vakavia rautatie-onnettomuuksia. Pyörävikoja syntyy kaikkiin vaunutyyppisiin. Näiden syiden takia on tarpeen harjoittaa kaikkien junien pyörävikojen valvontaa. Suurimmalla osalla mittalaitteista voidaan valvoa myös yli- sekä sivuttaiskuormia.

Työn alussa esitellään erilaiset junan pyörien epäpyöreysviiat sekä kerrotaan, mitä vikoja missäkin kalustotyyppissä esiintyy. Kaikki epäpyöreysvikojen havainnointi perustuu pyörän ja kiskon välisen voiman selvittämiseen. Voimavaihtelun perusteella saadaan selville, kuinka pyöreä pyörä on. Voima saadaan selville mittaamalla kiskon ja pölkyn välistä voimaa, kiskon kiihtyvyyttä tai kiskon taipumaa. Työssä esitellään eri mittaus-tapojen toimintaperiaatteet ja markkinoilta löytyvät mittalaitteet.

Työn lopussa esitellään Utissa sijaitsevan Tamtron Oy:n Scalex Wild -mittalaitteen kehitystä ja toimintaa. Mittalaitteen tuloksia verrataan muiden tutkimuksien tuloksiin, ja tulosten avulla kartoitetaan radalla liikkuvan kaluston kuntoa. Mitattuja pyörävoimakuvaajia verrattiin näiden junien silminnähtäviin pyörävikoihin junan määränpäässä yli sadan vikoja sisältäneen akselin kohdalla. Mittausten toistotarkkuutta tutkittiin vertaamalla saman junan eri mittauskertoja sekä kahden samansuuruisen vian mittaus-tuloksia.

**Lahti Otto: Observation av tågets hjulskador med hjälp av på tågräls monterade mätinstrument.** Banförvaltningscentralen, Bannätsavdelningen. Helsingfors 2008. Banförvaltningscentralens publikationer A 12/2008. 90 sidor och 2 bilagor. ISBN 978-952-445-243-4, ISBN 978-952-445-244-1 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf).

## SAMMANDRAG

Arbetet är en utredning av på tågräls monterade mätinstrument som reagerar på passerande tåghjuls orundhetsfel. Orundhetsfel ökar belastningen på banan och vagnen samt skapar miljöskador. Vid bromslåsning uppstår plattslipade områden på tågets hjul. På grund av materialfel lösgörs bitar från dessa områden och hjulets slitage blir ojämnt. Utöver att räls och vagnar utsätts för slitage, har man konstaterat att hjulskador varit orsaken till många allvarliga järnvägsolyckor. Hjulskador uppstår på alla vagntyper. Det är alltså befogat att övervaka hjulens kondition på alla tåg. Med de flesta mätinstrumenten kan man även övervaka överbelastning och belastning i sidled.

Arbetet inleds med en presentation av orundhetsfel på hjul och beskrivningar på skador som förekommer på olika typer av rullande järnvägsmateriel. Observering av orundhetsfel baseras alltid på utredning av de krafter som verkar mellan hjul och räls. Kraftvariationerna indikerar hur runt hjulet är. Kraften kalkyleras genom att mäta kraften mellan rälsen och slipern, rälsens acceleration (böjningsbelastning). I detta arbete presenteras funktionsprinciperna för olika mätmetoder och olika mätinstrument på marknaden.

Avslutningsvis presenteras utvecklingen och användningen av i Utti installerats mätinstrumentet Scalex Wild, som är tillverkad av Tamtron Oy. Mätinstrumentets resultat jämförs med andra undersökningsresultat varefter de sammantagna resultaten används på den aktuella järnvägsbanan för kartläggning av rullande järnvägsmateriels kondition. Mätningarnas grafer, som beskriver de krafter som verkar på hjul och räls, jämfördes på tågets bestämmelseort med synliga fel på tåghjulen. Sammanlagt jämfördes drygt hundra hjulaxlar med fel. Mätningarnas repeternoggrannhet undersöktes genom att jämföra olika mätningar av samma tåg samt genom att jämföra mätresultaten för två lika stora fel.

**Lahti Otto: Monitoring railway wheel defects with rail installed measuring device.** Finnish Rail Administration, Rail Network Department. Helsinki 2008. Publications of the Finnish Rail Administration A 12/2008. 90 pages and 2 appendices. ISBN 978-952-445-243-4, ISBN 978-952-445-244-1 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995.

## SUMMARY

This thesis is a study on rail installed measuring devices, which detect out of round (OOR) failures of passing trains. OOR failures increase stress towards both track and wagon. They have caused serious accidents. They also increase noise and ground vibration. Railway wheels develop flats during block braking, pieces of metal can detach from them and they can wear uneven. It is necessary to monitor all trains, because all wagon types have OOR failures. Most measuring devices can also detect over and side load.

In the beginning of this thesis different OOR failures and typical failures of each wagon type are presented. All monitoring methods are based on measuring the force between wheel and track. Variation in the force indicates how round the wheel is. Force is calculated from force between rail and sleeper, rail's bending, or rail's acceleration. All measuring principles and products on the market will be presented in this thesis.

In the experimental part of this thesis the development of Tamtron's Scalex Wild prototype is followed up in Utti and the results are compared to other manufacture's results. The condition of Finnish train wheels is monitored for half a year. Measurements are compared to wagons and visible wheel failures are photographed in destination. Repeatability was analyzed comparing two measurements from the same train, as well as comparing measurements from two similar wheel failures.



## ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Teknillisen korkeakoulun auto- ja työkonetekniikan laboratorioon Ratahallintokeskuksen tilauksesta. Tutkimuksen on tehnyt tekniikan ylioppilas Otto Lahti. Työ on samalla tekijän diplomityö Teknillisen korkeakoulun konetekniikan osastolle.

Työn valvojana toimi professori Matti Juhala ja ohjaajana tekniikan lisensiaatti Panu Sainio Teknillisen korkeakoulun konetekniikan osastolta. Työtä ohjasi Ratahallintokeskuksesta ylitarkastaja Seppo Mäkitupa.

Helsingissä, elokuussa 2008

Ratahallintokeskus  
Rataverkko-osasto



## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SAMMANDRAG.....	4
SUMMARY .....	5
ALKUSANAT.....	6
1 JOHDANTO .....	9
2 TAUSTAA .....	10
2.1 Toiminta muissa maissa .....	10
2.1.1 Käyttökokemuksia ulkomailta .....	11
3 KISKON JA PYÖRÄN KONTAKTI.....	14
3.1 Pintapaine.....	14
3.2 Kuormitusrajat .....	15
3.3 Venäläinen ajoleveys .....	16
4 PYÖRÄVIAT.....	19
4.1 Vikatyypit ja niiden esiintyminen .....	19
4.1.1 Lovipyörät.....	19
4.1.2 Pinnan kuoriutumisen.....	20
4.1.3 Pinnan hilseily.....	21
4.1.4 Pyörien monikulmaisuus eli polygonalisuus.....	22
4.1.5 Materiaalin karkeneminen .....	22
4.1.6 Kulutuspinnan aaltoilu.....	24
4.2 Pyörävikojen vaikutukset rataan, junaan ja ympäristöön.....	24
4.2.1 Lovipyörän kiskoon aiheuttama voima.....	24
4.2.2 Viallisten pyörien vaikutus vaunuihin .....	25
4.2.3 Pyörävikojen ympäristöä kuormittava vaikutus .....	26
4.3 Pyörävikojen korjaus.....	27
5 LOVIPYÖRÄSÄÄNNÖT .....	29
5.1 Sääntöjä eri maissa.....	29
5.1.1 Lovipyöräsäännöt Suomessa.....	30
5.1.2 Englannissa käytössä olevat lovipyöräsäännöt.....	31
6 VIALLISEN PYÖRÄN TUNNISTAMINEN .....	33
6.1 Kuulohavainto .....	33
6.2 Hitaasti liikkuvan pyörän mittaaminen laserilla .....	33
6.3 Pyörän kiskoon kohdistaman voiman mittaaminen .....	33
6.4 Vaakaelementeillä toteutettu voimanmittaus .....	34
6.4.1 Esimerkki voimakuvaajan tulkinnasta.....	35
6.5 Vikojen havainnointi kiskon taipumasta.....	36
6.6 Vikojen havainnointi kiskon kiihtyvyydestä.....	38
6.7 Markkinoilla olevat tuotteet.....	40
6.7.1 Mattild ja Lasca .....	40

6.7.2	Scalex Wild.....	41
6.7.3	Schenck Multirail Wheelscan .....	42
6.7.4	Gotcha.....	45
6.7.5	Wheelchex by AEA Rail.....	46
6.7.6	Teknis WCM ja WMS .....	46
6.7.7	Salient Systems WILD.....	47
6.7.8	GE:n Wheel flat detector .....	48
6.7.9	DafuR ja Atlas .....	48
6.7.10	Argos systems .....	50
6.7.11	Markkinoilta hävinneet tuotteet .....	51
6.7.12	Sensorline.....	52
6.7.13	Käsi­käyttöiset mittalaitteet .....	53
6.8	Vaunujen tunnistus.....	55
6.9	Pyörävika­havaintojen esittäminen .....	56
7	LOVIPYÖRÄN AIHEUTTAMAN VOIMAN LASKENNALLINEN TARKASTE­LU .....	57
8	KENTTÄTUTKIMUKSET UTIN SCALEX WILD -ASEMALLA.....	59
8.1	Voimakäyrän ja vikatyypin välinen yhteys.....	64
8.2	Mittalaitteen hälytysten vertaaminen pyöriin .....	70
8.2.1	Havain­toja vikojen kuvauksista .....	70
8.3	Voimaimpulssin ja loven koon välinen yhteys .....	72
8.4	Mittausten toistettavuuden arviointi.....	78
9	RAJA-ARVOJEN ASETTAMINEN.....	82
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMET .....	83
11	YHTEENVETO .....	85
	KIRJALLISUUSLUETTELO .....	86
	LIITTEET	
Liite 1	Kilpilahteen 12.11. saapuneen junan pyörävikojen kuvia ja voimakuvaajia	
Liite 2	Kilpilahteen 16.11. saapuneen junan pyörävikojen kuvia ja voimakuvaajia	

## 1 JOHDANTO

Tämä työ on tehty Ratahallintokeskuksen (RHK) tilauksesta RHK:n tulevien laitehankintojen arvioimista varten. Suomessa ei vielä ole käytössä laitteita, jotka pystyvät kiskosta käsin tarkkailemaan ohittavan junan pyörien epäpyöreyttä. Suomeen ollaan hankkimassa näitä laitteita, mikä on pelkästään kansainvälisten kokemusten perusteella hyvin suositeltavaa.

Junan pyöriin voi syntyä epäsuotuisan käytön takia paikallisia vikoja, tai pyörät voivat kulua epätasaisesti. Kun pyörän säde ei vian takia ole vakio, pyörän ja kiskon välinen voima ei myöskään säily vakiona. Vikojen takia pyörän ja kiskon välinen voima voi nousta hetkellisesti yli kaksinkertaiseksi. Tämä lisää huomattavasti radan ja vaunujen kulumista, mikä voi johtaa jatkuvien taloudellisten haittojen lisäksi vakaviin onnettomuuksiin. Pyörän epätasaisesta kosketuksesta syntyy myös voimakas ääni, ja se saa ympäröivän maan tärisemään.

Tässä työssä esitellään ensin, minkälaisia vikoja pyöriin voi syntyä. Perinteisesti puhutaan lovipyöristä. Loviviat ja pinnan kuoriutuminen ovat tavaravaunujen tyypilliset vikatyypit. Matkustajavaunuissa, moottorijunissa ja vetävässä kalustossa esiintyy harvemmin pyörien lukkiintumisesta johtuvia vikoja. Niiden pyörät kuluvat monikulmaisiksi. Näitä vikoja ei voi havaita paljaalla silmällä, mutta tyypillisellä millimetrin suuruisella säteittäisheitolla on huomattava voimavaikutus junaan ja rataan.

Vikojen havainnointi perustuu kiskon ja pyörän välisen voiman mittaamiseen suurella näytteenottotaajuudella. Voima voidaan mitata kiskon ja pölkyn väliin sijoitetuilla vaakaelementeillä tai epäsuorasti mittaamalla kiskon taipumaa tai kiihtyvyyttä. Taipuman tai kiihtyvyyden mittaaminen on helpompaa ja laitteistojen asennus huomattavasti yksinkertaisempaa. Muilla kuin vaakaelementteihin perustuvilla mittauksilla ei voida tarkkailla ylikuormia luotettavasti. Työssä esitellään mittaus- tapojen lisäksi kaikki markkinoilla olevat tuotteet.

Koko työn tekemisen ajan seurattiin Tamtronin mittausaseman kehitystä ja koekäyttöä Utissa. Mittaustoiminnan haasteet selvisivät hyvin seurannan aikana. Tuloksia seuraamalla saatiin käsitys Suomen radoilla liikkuvan kaluston pyörien kunnosta ja ylikuormista. Kaikista junatyypeistä, Pendolinoja lukuun ottamatta, löytyi pyörävikoja. Ongelmasta pyritään vaikenemaan, joten vikojen tarkkaa kohdentamista tiettyihin juniin ei pystytty tekemään. Seurannan aikana paljastui huomattavasti odotettua enemmän ylikuormia.

Kahden venäläisen öljyjunan pyörät käytiin tarkastamassa Kilpilahdessa Utissa tehtyjen mittauksen perusteella. Molemmissa junissa oli yli 200 akselia, ja niiltä löydettiin yli 100 paikallista vikaa, jotka kuvattiin. Kuvien perusteella määritettiin vikojen pituus, ja sitä verrattiin pyörien voimakuvajiin. Mittaustavan luotettavuutta ja toistotarkkuutta tutkittiin usealla tavalla.



## 2 TAUSTAA

Vuonna 1991 säädettiin EU-direktiivi 91/440, joka muutti dramaattisesti Euroopan raideliikennejärjestelmää. Valtion yritysten monopolijärjestelmä lakkautettiin, ja vanhat raideliikennemonopolit jaettiin radanpitäjiin ja liikennöitsijöihin. Uudessa järjestelmässä liikennöitsijät aiheuttavat radan kulumisen ja radanpitäjät hoitavat ylläpidosta aiheutuvat kulut. Tämän muutoksen jälkeen radan kuluttaminen ei ole ollut enää junayhtiön sisäinen asia vaan kahden eri laitoksen yhteinen asia. /7/

Ratahallintokeskuksen Verkkoselostuksessa 2008 todetaan seuraavasti: ”Tavara-liikenteen avautumisen myötä RHK:n rooli muuttuu pelkämästä radanpitäjästä kohti väyläpalvelujen tarjoajaa.”/38/ Pyörävikojen valvonta on yksi palvelu, jonka radanpitäjä tulevaisuudessa tarjoaa liikennöitsijöille nykyisen kuumakäyntivalvonnan tapaan.

Suorien taloudellisten kulujen lisäksi vialliset pyörät aiheuttavat myös turvallisuus-riskin. Onnettomuustutkinnassa on havaittu lovipyörän aiheuttaneen akselivaurion ja sitä kautta junan suistumisen kiskoilta. Tämän takia onnettomuustutkintakeskus on esittänyt suosituksessa S113 seuraavaa: lovipyöriä tunnistavien laitteiden käyttöä tulisi lisätä, ja liikennepaikoilla ja mahdollisesti myös muualla suoritettavaa lovipyörien kuuntelua tulisi tehostaa. /44//45//60/

Lovipyöräilmaisimien asennus on määritetty liikenneministeriön liikenteen telematiikkastrategiassa yhdeksi RHK:n tärkeäksi tehtäväksi. Vuosien 2004–2007 väliselle ajalle on budjetoitu 2 miljoonaa euroa lovipyöräilmaisimien hankintaan ja asentamiseen. Vertailun vuoksi mainittakoon, että kuumakäynti-ilmaisimiin on budjetoitu samalle ajanjaksolle 10 miljoonaa euroa /43/. Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämissstrategiassa on mainittu lovipyöräilmaisimista (EXO ja SMi) seuraavaa: Turvallisuuden ja myös taloudelliselta kannalta on perusteltua löytää sopiva lovipyöräilmaisinmalli, jolla valvontaa voi suorittaa "automaattisesti". Mallin tulee olla sellainen, jolla voi mitata myös pyöräkuormat. Utissa on asennettu koekäyttöön lovipyörä- ja akselien mittausjärjestelmä 28.11.2005. Kehitystyötä jatketaan koekäytöllä vuoden 2006 aikana. Laitteiston tulosten valvontaa suunniteltiin järjestettäväksi liikenteenohjauskeskukseen Kouvolaan vuoden 2006 aikana, mikä suunnitelma ei ole toteutunut. Nykyisissä suunnitelmissa valvonta tullaan sijoittamaan uuteen liikenteenohjauskeskukseen. /46/

Kaikissa virallisissa lausunnoissa puhutaan virheellisesti ja vanhanaikaisesti lovipyöräilmaisimista. Lovipyörät ovat yksi pyörävikatyyppeistä muiden joukossa. Pyörävikailmaisimista käytetään nykyisin englanninkielistä lyhennettä WILD (Wheel impact load detector), joka on vapaasti suomennettuna pyöränvoimaimpulssintunnistin. Laitteistot tunnistavat kaikki ylimääräiset voimapiikit ja määrittelevät niiden perusteella, kuinka suuri ja minkälainen vika ne on aiheuttanut. Oikea nimitys näille laitteille on suomeksi siis pyörävikailmaisimet.

### 2.1 Toiminta muissa maissa

Useimmissa länsimaissa on asennettu nykyaikaisia pyörävikojen mittausasemia 2000-luvun alusta lähtien. Norjassa on jonkin aikaa ollut käytössä kolme mittausasemaa, ja

Ruotsi tilasi kymmenen mittausasemaa kahden koeaseman lisäksi. Nykyisen kaltaista pyörävikojen valvontaa kiskoon sijoitetuilla antureilla ei ole ollut vielä missään yli kymmentä vuotta, joten toimintatapaa voidaan pitää varsin uutena. Radanpitäjät ovat selkeästi olleet tyytyväisiä uusiin valvontalaitteisiin, koska kaikki vuosituhannen alussa niihin investoineet ovat tehneet myöhemmin lisähankintoja tai suunnittelevat niitä.

Joissakin maissa käytetään jo pelkkää pyörävoima-arvoa sakkomaksun tai liikenteestä poisvedon perusteena. Perinteisillä säännöillä pyörä voidaan todeta vialliseksi ainoastaan paikallaan tapahtuvan mittauksen perusteella.

### ***2.1.1 Käyttökokemuksia ulkomailta***

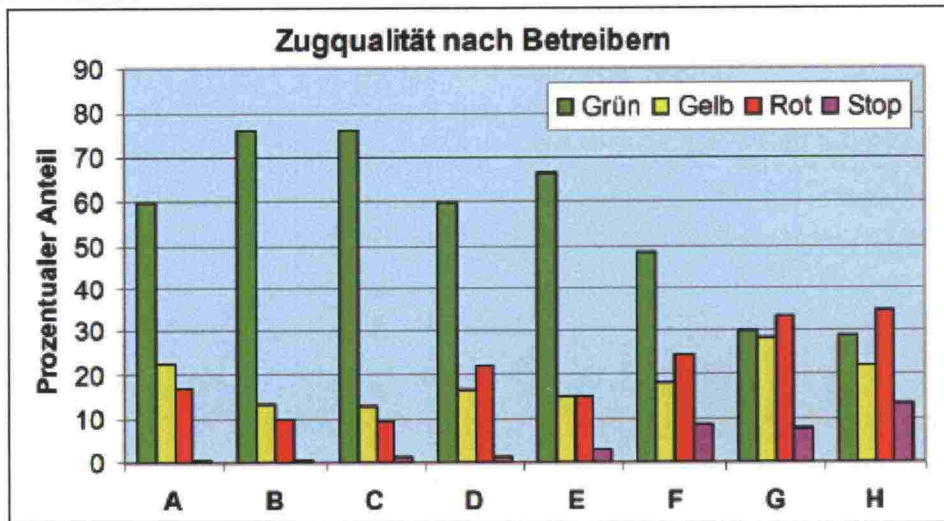
Canadian Pacific Railwayn rataverkko sijaitsee USA:n ja Kanadan rajalla. Radalta poistetaan vaunut, joiden pyörävoima on suurempi kuin 140 kips. Kolmellatoista asemalla mitataan kuukaudessa puoli miljoonaa vaunua. Näistä 100–1 400 otetaan sivuun liian suuren pyörävoiman takia. Yhteensä vaunuja otetaan sivuun noin 5 000 vuodessa. 75 % vioista havaitaan neljän talvikuukauden aikana. Pyörävikailmaisimen hälytys on Canadian Pacific Railwayn rataverkolla ylivoimaisesti yleisin syy (72 % tapauksista) siihen, että vaunu määrätään ylimääräiseen huoltoon. /17/

Saksan rautatiet ovat mitanneet pyörävoimia ja tarkkailleet viallisia pyöriä tällä tavoin vuosituhannen vaihteesta lähtien. Maassa on yli kolmekymmentä mitta-asemaa. DB Netz (Saksan rataverkkoyhtiö) on tarkastellut Giessenin kaupungin lähellä sijaitsevan mittausaseman tuloksia pitkällä aikavälillä. Tarkasteluaika oli 787 päivää pitkä (päivämääriä ei annettu). Tänä ajanjaksona mitattiin 74 261 junaa, joissa oli 3 306 771 akselia. Junia kulki keskimäärin 94 päivässä, mikä on enemmän kuin Suomessa millään radalla. Junat olivat kahdeksan eri operaattorin liikennöimiä. Operaattorien nimiä ei annettu, eikä myöskään kerrottu, minkä tyyppisellä kalustolla operaattorit liikennöivät.



Taulukko 1. LASCA-laitteistolla tehtyjen mittausten tuloksia Giessenin kaupungin läheltä Saksasta

Company	Trains	Trains (%)	Green	Yellow	Red	Stop
A	7 934	10.70	4 757	1 792	1 357	37
B	31 443	42.34	23 969	4 228	3 116	130
C	1 939	2.61	1 474	255	185	25
D	6 850	9.22	4 098	1 134	1 536	82
E	417	0.56	277	64	64	12
F	2 827	3.81	1 365	521	695	246
G	2 217	2.99	669	631	744	173
H	20 626	27.77	5 990	4 601	7 231	2 803
	Trains	Trains (%)	Green	Yellow	Red	Stop
All trains	74 261		42 618	13 207	14 928	3 508

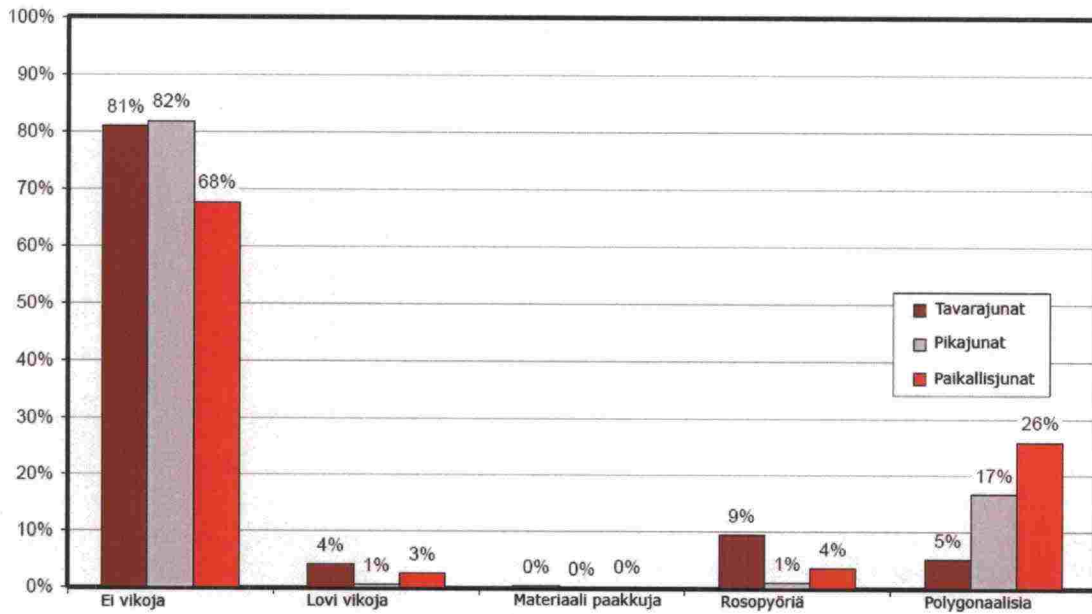


Tulostaulukosta näkyy hyvin, kuinka paljon viallisia pyöriä oli liikenteessä (Taulukko 1). Heikoimmalla operaattorilla, joka oli liikennemäärältään toiseksi suurin, puolet junista sai vakavan varoituksen tai pysähtymismääräyksen pyörävikojen takia. Kaikista mitatuista junista 57 %:lla pyörät olivat kunnossa eivätkä aiheuttaneet hälytystä. 18 % junista sai lievän hälytyksen ja 20 % vakavan hälytyksen. Pysähtymismääräys annettiin 5 %:lle mitatuista junista. Pyörävikojen valvonta on selkeästi ollut tarpeellista, koska joka päivä on jouduttu pysäyttämään keskimäärin kolme junaa ja antamaan punainen varoitus yhdeksälletoista junalle. Punainen varoitus tarkoittaa nopeusrajoitusta junalle ja pyöräkerran vaihtoa tai korjausta määränpäässä. /24/

Uusin versio DafuR-mittalaitteesta otettiin käyttöön viidellä mitta-aseamalla Saksassa 23.11.2006. (Laitteen tarkempi esittely on luvussa 6.7.9.) Uusin versio ilmoittaa hälytysten yhteydessä vikatyypin ja vian suuruuden. Laitteisto jakaa viat neljään ryhmään: lovipyöriin, pyörään hitsautuneisiin kohoumiin, aaltomaiseen kulutuspintaan ja polygonaaliseen muotoon. Vanhat versiot eivät ole analysoineet vikatyyppejä, vaan ne ovat mitanneet pelkästään voimapoikkeamia.

Viisi uudistettua mitta-asemaa mittasivat 134 422 pyörää 24.–29.11.2006. Mittaus-tulokset on esitetty valmistajan tekemässä kuvaajassa (Kuva 1). Tuloksissa junat on jaettu kolmeen ryhmään käyttötarkoituksen mukaan ja kullekin tyypille on ilmoitettu

prosentteina niistä löytyneet pyöräviat. Tulokset osoittavat hyvin, ettei mitään kalustoryhmää voi jättää valvonnan ulkopuolelle ja että mittalaitteiden on havaittava kaikki vikatyypit. Vikojen jakautuminen eri kalustotyyppien välillä vastaa hyvin yleisiä odotuksia vikojen esiintymisestä. /37/



Kuva 1. DafuR-laitteella tehtyjen mittausten tuloksia /37/

### 3 KISKON JA PYÖRÄN KONTAKTI

Pyörä on kosketuksissa kiskon kanssa yhden tai kahden pisteen kautta. Kosketuskohdan pinta-ala ja pintapaine määritetään Hertzin säännöllä. Kosketuspinta on aina ovaalin muotoinen, ja sen pinta-ala on välillä 80–300 mm<sup>2</sup>. Pintapaine ei jakaudu tasaisesti kosketusalalle vaan on suurimmillaan sen keskikohdassa. Laskuissa määritetään maksimipintapaine,  $p_0$ .

Liikkuva juna vaeltaa koko ajan sivusuunnassa. Stabiilissa kulussa kitka pitää pyöräkerran koko ajan lähellä keskiasentoa, jolloin kosketuspisteen paikka pysyy lähellä kiskon keskiasentoa. Epästabiilissa kulussa tai kompensoimattomassa kaarteissa kitka ei riitä pitämään pyörää lähellä keskiasentoa vaan kosketuspinnan paikka muuttuu siten, että tukireaktio tarjoaa y-suuntaisen komponentin. Tällöin resultantti voima ja pintapaine kosketuksessa kasvavat.

Radan pääasiallinen kulumismuoto on pitkän aikavälin väsyminen. Kun juna kulkee suoraan, voimapiste kiskolla vaihtelee vaeltamisen takia, joten rasituskertoja tulee yhdelle kohdalle vähemmän. Kaarteissa, joiden kallistuskompensaatio ei ole sopiva käytetyille nopeuksille, kosketuspiste on aina kiskon yläkulmassa, jolloin kaikki rasituskerrat kohdistuvat samaan kohtaan kiskoaa.

Kiskon muoto sisäpuolisessa yläkulmassa on oleellinen kiskon ja pyörän kontaktissa. Suuri ero kiskon ja pyörän pyörityssäteissä pienentää kosketusalaa ja nostaa pintapainetta. Suurempi pyöritys lisää toisaalta kahden pisteen kosketuksen riskiä. Kaksipistekosketuksissa esiintyy aina luistoa, minkä takia sitä vältetään. Sopivilla pyörä/kisko-profiilipareilla voidaan vaikuttaa syntyviin jännityksiin ja vähentää kiskojen kuormitusta. Modernilla hiontatekniikalla voidaan kiskoprofiiliin tehdä paikallisia optimointeja. /39/

#### 3.1 Pintapaine

Kiskon ja pyörän välinen pintapaine riippuu seuraavista tekijöistä: /10/

- pyöräkuorma
- pyörän materiaali (kovuus)
- kiskon materiaali (kovuus)
- pyörän profiilin pyörityssäde kosketuskohdassa
- kiskon profiilin pyörityssäde kosketuskohdassa
- pyörän halkaisija.



Akselikuorman aiheuttama Hertzin pintapaine voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$p = \frac{3F_N}{2\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

jossa

$$a = k_a \sqrt[3]{\frac{3F_N R''}{2E'}}$$

$$b = k_b \sqrt[3]{\frac{3F_N R''}{2E'}}$$

Kertoimet  $k_a$  ja  $k_b$  saadaan tribologian taulukoista.

Yhdistetty säde ja kimmokerroin määritetään kaavoilla

$$\frac{1}{R''} = \frac{1}{R_{Ax}} + \frac{1}{R_{Ay}} + \frac{1}{R_{Bx}} + \frac{1}{R_{By}}$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

Kaava ei päde aina, vaan se antaa usein aivan liian suuren tuloksen. Hertzin teoriassa kontaktialueen tulee olla pieni verrattuna kontaktipintojen säteisiin. Tämä ei toteudu esimerkiksi kiskoprofiilin kulmissa, joissa kontaktipinta voi olla yhtä suuri kuin profiilin säde. /3//4/

Laskukaavojen perusteella voidaan pintapaineesta kiskon ja pyörän kosketuksessa todeta seuraavaa:

- Mitä suurempi ero kiskon ja pyörän pyöristyssäteellä on, sitä suurempi on pintapaine.
- Kuluneilla pareilla (pyöristyssäteet kasvaneet) on pienin pintapaine.
- Kiskon nurkassa on erityisen korkea pintapaine, vaikka kiskon ja pyörän pyöristyssäteet olisivatkin lähellä toisiaan.
- Pintapaineen riippuvuus on lähes lineaarinen, muttei suoraan verrannollinen normaalivoimaan. 50 %:n lisäys normaalivoimaan kasvattaa pintapainetta noin 15 %.
- 25 %:n lisäys pyörän halkaisijaan vähentää pintapainetta noin 7–10 %.

### 3.2 Kuormitusrajat

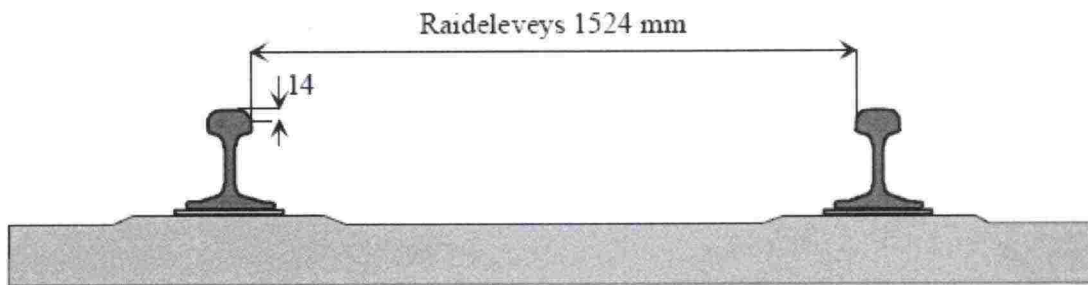
Kiskon kestävyys kannalta kriittisimpiä voimia ovat kosketuskohdan alapuoliset jännitykset. Leikkausjännityksen maksimi sijaitsee kosketuskohdan keskipisteessä syvyydessä  $0,25 \dots 0,4 \cdot b$ , jossa  $b$  on kosketusellipsin leveys. Käytännössä se on yleensä 4–6 mm:n syvyydessä. Leikkausjännityksen korkeimpana sallittuna arvona pidetään arvoa

$$\tau_{sallittu} = \frac{\sigma_{sallittu}}{\sqrt{3}}$$

Kokemusperäisesti on määritetty väsyttävän kuormituksen vaikuttavan siten, että sallittuna vetojännityksenä voidaan käyttää arvoa, joka on puolet materiaalin vetomurtolujuuden arvosta. Nämä kestävyysarvot määrittävät kiskon kestävyuden käytössä katkeamisen varalta. Käytössä kiskon pinta kovettuu lukuisten puristusten vaikutuksesta, ja siitä täytyy hioa ohut siivu pois ennen kuin se alkaa lohkeilla. /14/

### 3.3 Venäläinen ajoleveys

Raideleveys on kiskon sisäreunojen välinen etäisyys 14 mm kiskon selän alapuolelta mitattuna Kuva 2). Suomessa raideleveys on 1 524 mm eli viisi jalkaa ja Venäjällä 1 520 mm. Alun perin myös Venäjällä käytettiin samaa Yhdysvaltojen etelävaltioista peräisin olevaa raideleveyttä, mutta 1950-luvulla siellä siirryttiin paremmin SI-järjestelmään sopivaan leveyteen kallistamalla kiskoja sisäänpäin. /62/



Kuva 2. Raideleveyden määrittely

Raitteen raideleveys toleransseineen ja pyöräkerran raideleveysmitta toleransseineen määrittelevät ns. raidevälyksen suuruuden Kuva 3). Raidevälyksellä on vaikutusta pyöräkerran liikkeisiin suoralla raiteella ja kaarteissa (kaluston kulun tasaisuus, kaarrevastus ja sekä kiskoon että raiteeseen kohdistuvat voimat).

Koska pyörän kulkupinta on kartiomainen, pyöräkerta liikkuu raiteella poikittais-suunnassa säännöllisesti edestakaisin, jolloin sen painopiste on raidetta pitkin etenevässä aaltoliikkeessä. Aaltoliikkeen muodosta johtuu pyöräkerran liikkeen nimitys siniliike.

Siniliikkeen muoto määritetään kaavan  $y = y_0 \sin 2\left(\frac{x}{L}\right)$  mukaan.

$y$  = sinikäyrän ordinaatta

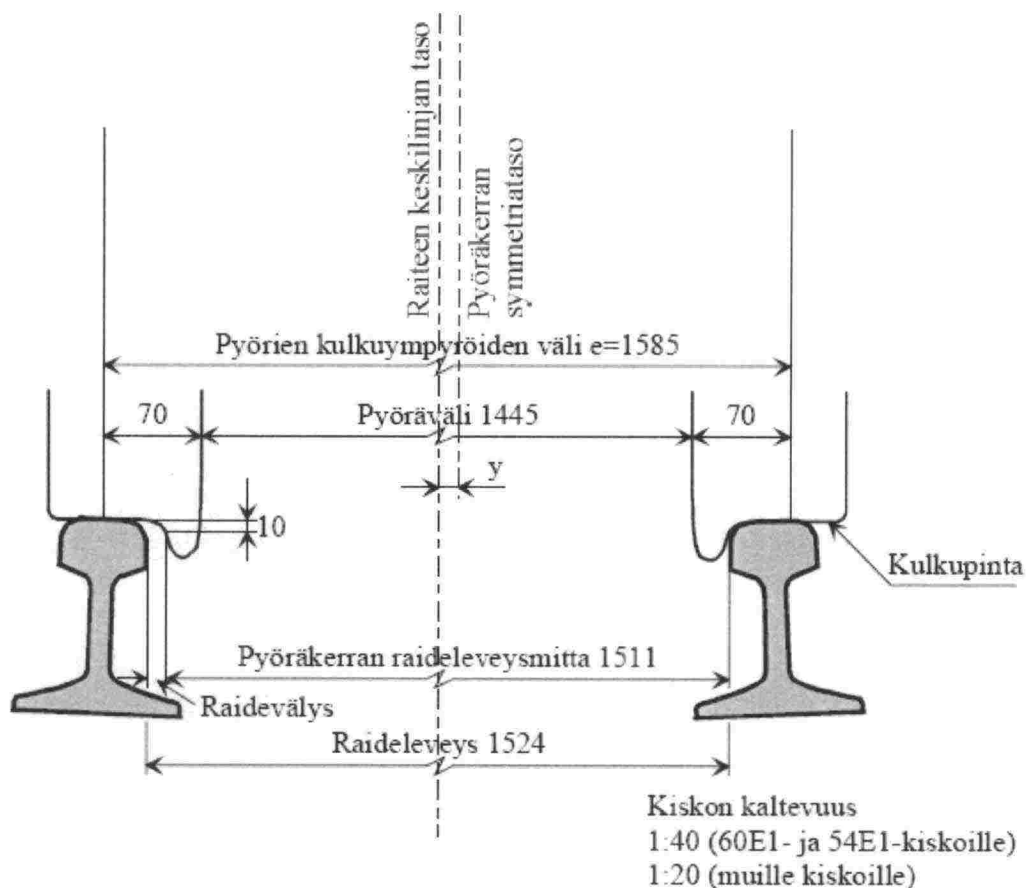
$y_0$  = sinikäyrän ordinaatan maksimiarvo

$x$  = sinikäyrän abskissa

$L$  = sinikäyrän aallonpituus

Siniliikkeen aallon korkeus kasvaa nopeuden lisääntyessä. Se saavuttaa tietyllä nopeudella maksimiarvon ( $\frac{1}{2} \times$  raidevälys), jolloin aaltoliikkeen taajuus kasvaa epästabiiliksi. Pyöräkerran jouheva siniliike muuttuu siksakmuotoiseksi, mistä seuraa erittäin huono matkustusmukavuus.





Kuva 3. Pyöräkerran sijainti raiteella /48/

Venäläisessä kalustossa pyörien kulkuympyröiden väli on 5 mm pienempi kuin suomalaisessa kalustossa. Merkitsevä mitta tässä tapauksessa on pyöränlaippojen väli, joka on vain 3 mm pienempi Kuva 4). Tämän takia raidevälys on näillä vaunuilla 1,5 mm suurempi. Suoralla rataosuudella suomalainen vaunu voi liikkua keskikohdasta molemmille sivuille 7,5 mm ja venäläinen 9 mm. Pyörän ja kiskon välinen kontaktipinta on noin 9–15 mm leveä. Leveys riippuu kuormituksesta ja kiskon kuluneisuudesta. Näillä perusteilla kulkupinnan reunassa oleva pieni paikallinen pyörävika ei välttämättä osu kiskoon pyörän ylittäessä mitta-aseman. Venäläisessä kalustossa ongelma on hieman suurempi. Muuten venäläisellä kapeammalla ajoleveydellä ei ole vaikutusta pyörävikojen valvontaan. /48/



## 4 PYÖRÄVIAT

Junan pyörän yleisimmin havaitut viat ovat kulutuspinnan lohkeilu, lovet ja monikulmaisuus. Näiden vikojen vuoksi pyöriä joudutaan sorvaamaan tai vaihtamaan. Suurin osa Suomen junakaluston pyöristä huolletaan Pieksämäen konepajalla, missä vuoden 2007 ensimmäisten kuuden kuukauden aikana kunnostettiin noin 7 000 pyöräkertaa. Pyöräkerralla tarkoitetaan akselia ja sen kahta pyörää.

Pyörävikojen vuoksi raiteeseen ja vaunukalustoon kohdistuu normaalia suurempia voimia. Tykyttävä kuormitus saa rakenteet väsymään ja voi aiheuttaa lopullisen murtuman, jos vikaa ei havaita ajoissa. Viallisilla pyörillä liikennöinti aiheuttaa jatkuvasti turhia kuluja vaunun omistajalle ja radan pitäjälle, koska se lisää huomattavasti kulumista ja vaatii rakenteilta ylimitoitusta. Suurimmat kulut syntyvät kuitenkin pyörävikojen aiheuttamista onnettomuuksista. Vakavimmillaan pyörävika voi rikkoa pyörän kokonaan ja suistaa koko junan kiskoilta, jolloin koko juna ja pitkä matka rataa tuhoutuvat. /2/ /12/

### 4.1 Vikatyypit ja niiden esiintyminen

#### 4.1.1 Lovipyörät

Tilastojen mukaan pyörän lovia syntyy erityisesti kahtena ajankohtana vuodesta: syksyllä lehtien pudottua ja lämpötilan laskettua nollan tietämille sekä talvella helmikuun tienoilla. Lovipyörä syntyy joko lukkojarrutuksessa tai jarrujen jäädessä päälle liikkeelle lähdössä. Lukkojarrutukset syntyvät yleensä kiskon ja pyörän välisen kitkan alentumisen takia. Syksyllä lehtien liukastamilla kiskoilla kitkakerroin voi olla vain 0,08. Vaunujen jarrujen voima on säädetty yleensä tuota suuremmalle kitkalle, jolloin pyörät lukkiutuvat täydellä voimalla jarrutettaessa.

Lovipyöriä esiintyy etenkin tavaravaunuissa, koska niissä käytetään hyvin alkeellista jarrujärjestelmää, joka huomioi huonosti hetkellisen akselipainon. Tavaravaunun kokonaispaino voi olla lähes nelinkertainen omapainoon nähden. Jarruissa on kuitenkin vain kaksi käsin valittavaa asentoa jarrutusvoiman säädölle. Talvella tönkkäjarrut voivat jäätyä junan seistessä ratapihalla. Veturi jaksaa vetää junaa hyvin, vaikka joku akseli ei pyörisikään, jolloin lukkoon jääneen akselin pyöriin hioutuu hyvin nopeasti lovet. Matkustajavaunuissa käytetään levyjarruja ja erilaisia lukkiintumisenestojärjestelmiä. Tämän ansiosta niihin ei muodostu pitkiä lovia juuri koskaan. Epätasaisella kitkalla tai lukkiintumiseneston toimiessa huonosti voi pyöriin muodostua sarja pieniä lovia.

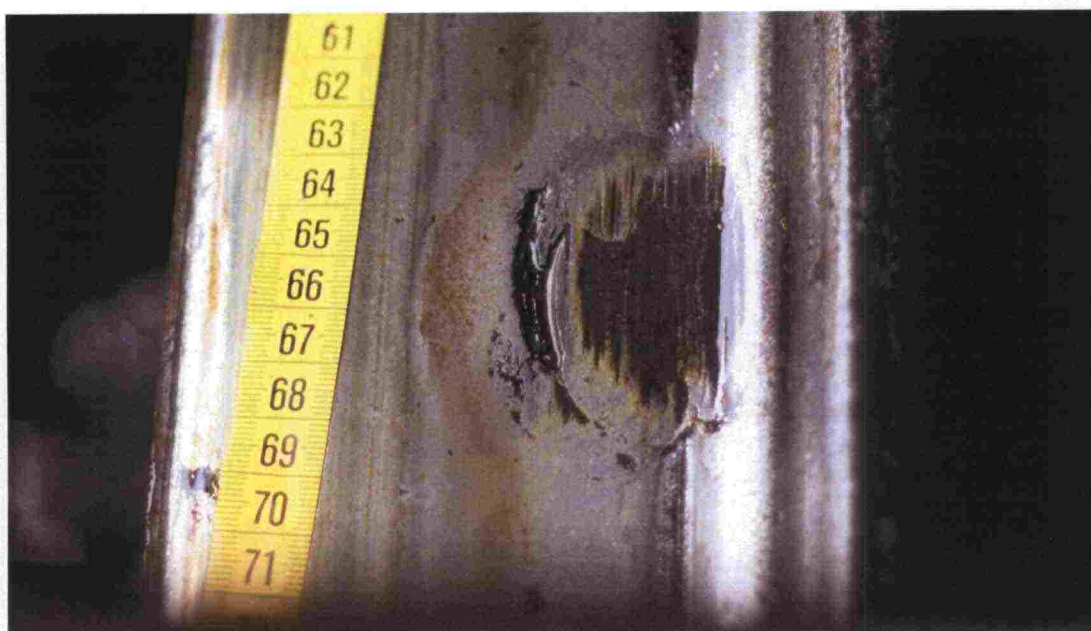
Ajossa loven reunat pyöristyvät ajan myötä. Tällöin loven dynaamiset kuormitukset kasvavat. Muutos on kuitenkin vähäinen, koska lovi ei syvene ja loven syvyys vaikuttaa eniten sen aiheuttamiin voimiin. Pitkällä aikavälillä lovi katoaa silmämääräisesti kokonaan sen reunojen pyöristyttyä riittävästi. Pyörään jää kuitenkin säteittäisheittoa loven syvyyden verran sekä materiaalivika loven pohjan kohdalle.

Loven syntymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu paljon. Johan Jergeus teki paljon kokeita täysikokoisella junalla 1990-luvun puolivälissä Ruotsissa. Viidellätoista pyöräkerralla tehtiin 140 lukkojarrutusta. Osa lovista sattui päällekkäin, mutta suurin



osa oli tunnistettavissa ja erillään muista lovijäljistä. Testijunan viimeisenä vaununa oli avoin tavaravaunu, jonka viimeisen akselin jarruja voitiin ohjata erikseen. Liukasta lehtikeliä simuloitiin saippuavedellä. Testeissä tutkittiin jarrujen lukkiutumisen vaikutuksia pyörään reippaassa nopeudessa, pysähtymisen yhteydessä ja liikkeelle lähdössä. Testejä tehtiin useilla eri nopeuksilla ja akselipainoilla.

Lukkojarrutuksen pituudella on yllättävän vähän vaikutusta syntyvän loven kokoon. Viiden sekunnin lukkojarrutuksella syntyy noin 40 mm pitkä lovi, joka jatkaa sen jälkeen hyvin hitaasti kasvua. 25 sekunnin jarrutuksessa syntyi noin 50 mm:n suuruinen lovi. Merkillepantavaa oli suuri hajonta kokeissa. Akselikuormalla on myös varsin vähän vaikutusta syntyvän loven kokoon. 25 sekunnin lukkojarrutuksessa nopeudessa 20 km/h kuuden tonnin kuormalla syntyi 35 mm pitkä lovi ja täydellä 18,5 tonnin akselikuormalla 47 mm:n lovi. /2/

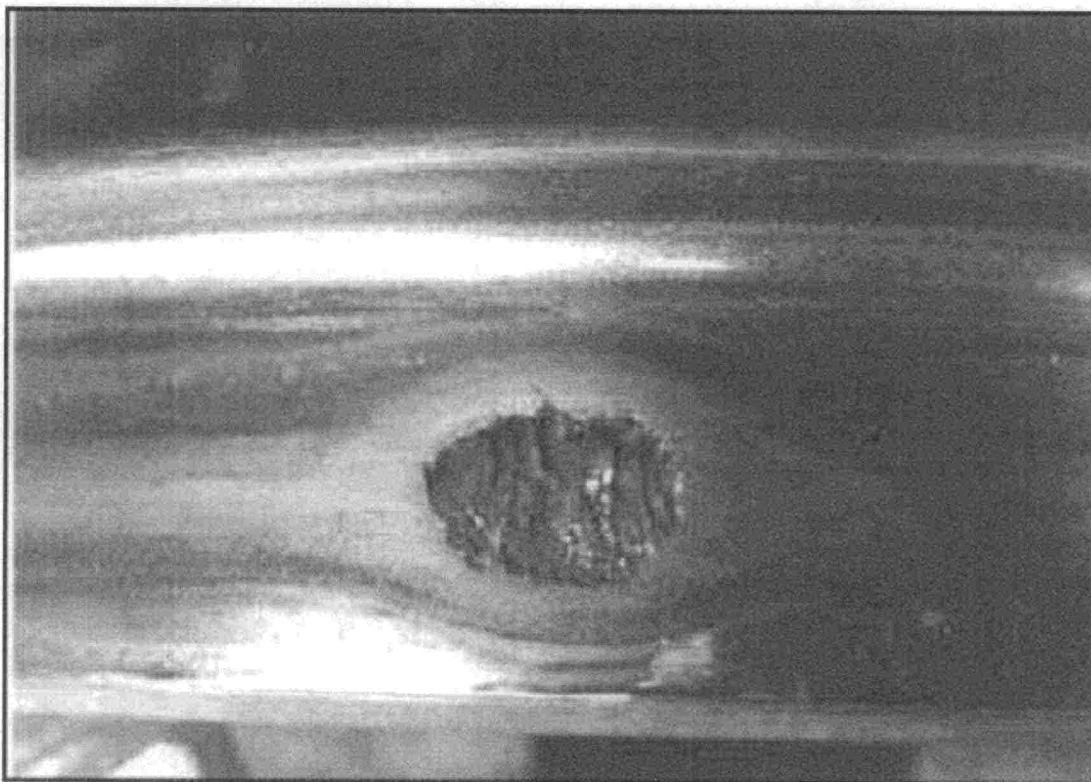


*Kuva 5. Tuore lovijälki venäläisen säiliövaunun pyörässä*

#### **4.1.2 Pinnan kuoriutuminen**

Pyörän pinnasta voi kuoriutua materiaalia pois, jolloin kulutuspintaan jää terävä-reunainen kuoppa. Kuopan syvyys on yhdestä viiteen millimetriä ja pinta-ala 200–1 500 mm<sup>2</sup>. Kuoriutuminen johtuu lähes aina materiaaliviasta. Materiaalivirhe syntyy useimmiten käytön aikana (katso kohtaa 0). Materiaalivirhe voi syntyä myös valmistusvaiheessa, jos materiaali, josta pyöräihio valetaan, sisältää epäpuhtauksia.

Kirjallisuudessa tästä vikatyypistä oli muihin verrattuna varsin vähän tietoa. Tätä työtä varten tehdyissä tutkimuksissa kyseinen vikatyyppe oli kuitenkin hyvin yleinen. Tämä voi johtua venäläisten tavasta sorvata lovivikoja liian ohuelti. Tämän tyyppisistä vioista on liitteissä paljon kuvia.



*Kuva 6. Syväälle ulottuva kulkupinnan kuoriutuminen /14/*

#### **4.1.3 Pinnan hilseily**

Pinnan hilseily johtuu samoista materiaalivirheistä kuin pinnan kuoriutuminen. Hilseilyksi katsotaan kuitenkin pienemmät materiaalin irtoamiset kulutuspinnasta. Hilseilyyn johtavat viat ovat syntyneet usein pyörien sutiessa tai niiden liukuessa hitaasti jarrutuksessa. Tällöin pintamateriaali karkenee vain hyvin ohuelti, mutta koko matkalta. Hilseilyä esiintyy enemmän kevyillä akselikuormilla. Suomessa tämänkaltaisesta vaurioituneista pyöristä käytetään yleisesti nimitystä rosopyörä. Rosopyörässä voi olla hilseilyn lisäksi myös muita vikoja.





Kuva 7. Kulutuspinnan hilseilyä /14/

#### **4.1.4 Pyörien monikulmaisuus eli polygonalisuus**

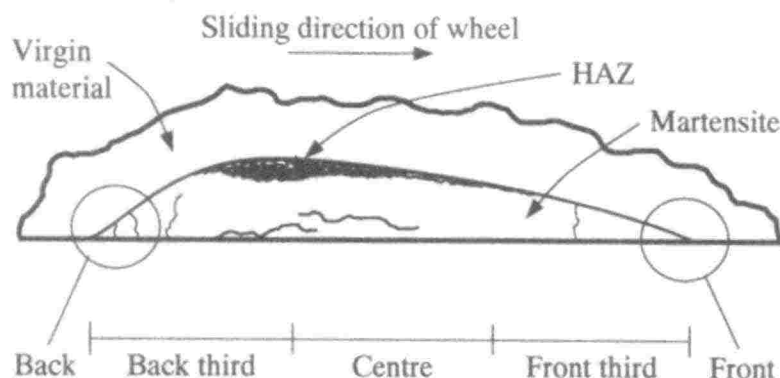
Jaksottaista pyörien epäpyöreyttä esiintyy vetävissä pyörissä ja levyjarruilla varustetuilla akseleilla. Jakson pituus voi olla kymmenestä sentistä pyörän ympärysmittaan eli noin kolmeen metriin. Kun jakson pituus on ympärysmittaan suuruinen, pyörä vaikuttaa epäkeskiseltä, ja kun jakson pituus on puolet ympärysmittaan, pyörä vaikuttaa ovaalilta. Tämän tyyppisistä epäpyöreysvioista käytetään usein lyhennettä OOR (Out-Of-Round).

Ruotsissa tehtiin laaja tutkimus junan pyörien OOR-vioista. Tutkimuksessa mitattiin 99 pyörän säteittäisheitto. Tutkimukseen otettiin kaikkia erilaisia junanvaunuja ja vetureita sekä metrojunia. Mittauksissa määritettiin kulkupinnan muotovirheen aallon pituus ja korkeus. Tavarajunien pyörien virheiden aallon pituus oli 3–8 cm, joten virheet lasketaan kulutuspinnan aaltoiluksi. Suurimmat säteittäisheittojen vaihtelut löytyivät C20-metrovaunujen pyöristä. Säteittäisheitto vaihtelee aallon pituuden mukaan, ja eniten säteittäisheittoa oli perinteisten matkustajavaunujen pyörissä ja X2-suurnopeusjunien vetävissä pyörissä. Vähiten heittoa havaittiin X2:n rullaavista pyöristä. Kaikissa junatyypeissä oli aika paljon pyörien epäkeskisyyttä. /1/

#### **4.1.5 Materiaalin karkeneminen**

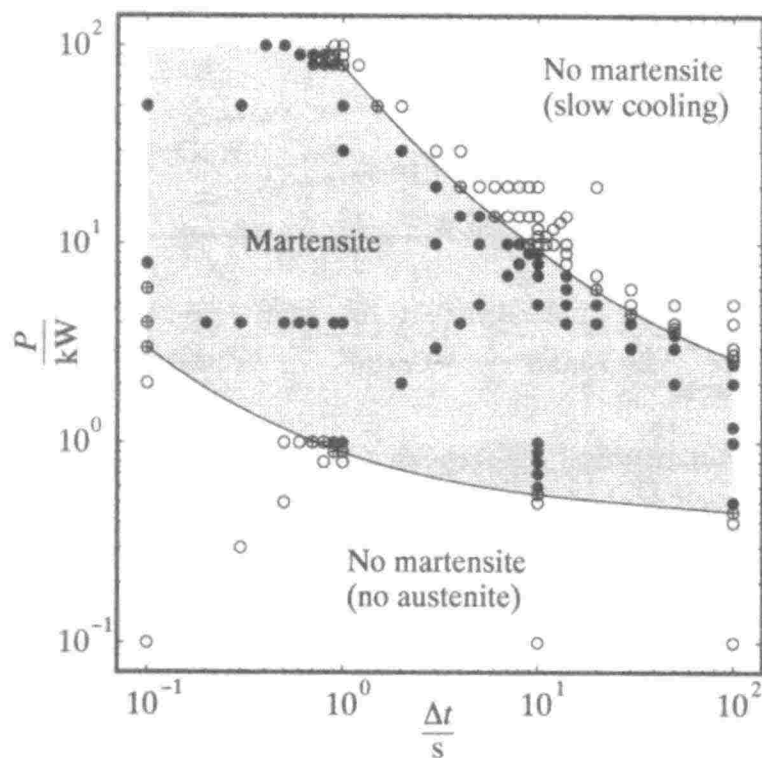
Lukkojarrutuksen aikana kiskoa pitkin liukuvan pyörän pintalämpötila kasvaa nopeasti. Pyörän lämpötila nousee paikallisesti yli 800 °C:seen lukkiutumisen kestäessä yli 10 sekuntia, jolloin kiskoa pitkin laahaava kohta saavuttaa austenisoitumislämpötilan. Lämpötilan kasvu riippuu lukkiutumisaikasta ja akselipainosta, liukunopeudella on hyvin vähän vaikutusta. Pyörän alkaessa jälleen pyöriä kuumentunut kohta jäähtyy nopeasti. Nopea lämpötilan lasku saa aikaan karkaisua vastaavan lämpökäsittelyn, joka johtaa kovan mutta hauraan martensiittisen rakenteen muodostumiseen liukukohdalle. Martensiittinen rakenne vie noin 0,5 % suuremman tilan kuin sitä ympäröivä perliittinen

rakenne, joten siihen muodostuu puristusjännitys. Martensiittisen rakenteen hauraus yhdistettynä siihen liittyvään pyörän geometriavirheen aiheuttamaan dynaamiseen kuormitukseen aiheuttaa rakenteeseen murtumia. Ajossa murtumat kasvavat ja voivat ulottua jopa 15 mm:n syvyyteen. Murtumien kasvaessa ja lisääntyessä alkaa pyörästä lohkeilla materiaalia 1–5 mm paksuina paloina. /2/



Kuva 8. Materiaalimuutokset loven kohdalla /2/

Materiaalimuutosten selvittämiseksi valvotuissa olosuhteissa syntyneitä lovikohtia sahattiin irti pyöristä ja tutkittiin materiaalitekniikan laitoksella. Tutkimusten perusteella tehtiin periaatekuva materiaalimuutoksista loven kohdalla (Kuva 8). Lovien synty- mekanismin perusteella laskettiin myös loven kohdalla vaikuttanut lämpöteho, jota verrattiin vaikuttaneeseen aikaan ja materiaalimuutoksiin. /2/



Kuva 9. Materiaalimuutosten syntyminen tehon ja vaikutusajan funktiona /2/

Pintaan muodostuneen martensiittisen rakenteen ja alkuperäisen materiaalin väliin muodostui epämääräinen lämpövaikutuksen saanut alue (HAZ). Tällä alueella lämpötila on ollut riittävän suuri austenisaatioon, mutta jäähtyminen ei ole ollut riittävän nopeaa martensiittisen rakenteen syntymiseen. Joissakin matalalla energialla lämmenteissä näytteissä ei ollut ollenkaan HAZ-aluetta. HAZ-alue oli sitä suurempi, mitä suurempi lämpöteho näytteeseen oli vaikuttanut. Kuumenemisajan ja kuumennustehon vaikutus materiaalimuutoksiin on esitetty Kuva 9. Materiaalimuutosta ei aina tapahdu koko loven pohjan alueella. Kaikista analysoiduista loven pohjista 78 prosentissa oli martensiittistä materiaalia ja 66 prosentissa oli halkeamia. Materiaalimuutokset ulottuivat syvimmillään 3 mm lovenpohjaa syvemmälle.

#### **4.1.6 Kulutuspinnan aaltoilu**

Pyörän kulutuspinna voi kulua aaltomaiseksi. Aaltoilun tärkeimpänä syntymekanismina pidetään kulutuspinnan ja pölkkejarrun termomekaanista vuorovaikutusta. Aallon pituus riippuu jarrupalan koosta ja aallon korkeus materiaaliparin ominaisuuksista. Ilmiötä voidaan ehkäistä käyttämällä pehmeämpiä jarrupaloja.

### **4.2 Pyörävikojen vaikutukset rataan, junaan ja ympäristöön**

Epäpyöreysvikojen takia kiskon ja pyörän välinen voima muuttuu tasaisesta kuormituksesta vaihtelevaksi kuormitukseksi, jonka huippuarvo on huomattavasti staattista arvoa suurempi. Tämän takia pyörä kuormittaa tiettyjä radan kohtia huomattavasti sallittua suuremmalla voimalla. Tykyttävä kuormitus lisää myös vaunun raskuuksia. Siitä on eniten haittaa akselien laakereille. Melu ja maan värinä ovat suurimmat junan paikalliset ympäristöhaitat. Loviviat lisäävät huomattavasti melua ja värinää.

#### **4.2.1 Lovipyörän kiskoon aiheuttama voima**

Loven kohdalla pyörä iskeytyy raidetta vasten ja aiheuttaa dynaamisen lisäkuormituksen. Iskeytyminen johtuu sekä kuorman alla painuneen kiskon nousemisesta että pyörän putoamisesta alaspäin. Kuormitus kasvaa nopeuden mukaan, koska nopeuden kasvaessa pystykiihtyvyydetkin kasvavat. Tietyn nopeuden jälkeen pyörän ja kiskon kontakti menetetään hetkeksi ja pyörä lentää osittain lovikohdan yli. Tällöin dynaaminen kuormitus pienenee nopeuden kasvaessa. Nopeutta, jossa käänne tapahtuu, kutsutaan lovipyörän kriittiseksi nopeudeksi. Kriittisen nopeuden jälkeen iskuvoima laskee jonkin verran nopeuden kasvaessa, minkä jälkeen se kääntyy tasaiseen nousuun. Iskun suuruuteen vaikuttaa myös radan jousto. Joustavin kohta radassa on pölkkyjen puolivälissä.

Lovipyörien aiheuttamia dynaamisia vaikutuksia on tutkittu aktiivisesti 1980-luvulta lähtien. Tietokoneiden ja mekaniikansimulointiohjelmien kehityksen myötä tulokset ovat tarkentuneet huomattavasti. Tällä vuosituhanella on opittu mittaamaan tarkasti ja luotettavasti pyörien kiskoon aiheuttamia dynaamisia voimia kiskosta, minkä ansiosta simulointimalleja on päästy verifioimaan.



Lovipyörien kriittinen nopeus on noin 30 kilometriä tunnissa, jolloin loven dynaaminen voimavaikutus on yhtä suuri kuin 70 kilometrin tuntinopeudessa. Vaarallisia aineita kuljettavat junat ajavat Suomessa yleisesti 60 kilometrin tuntinopeudella, jolloin loven vaikutus on vähäinen. Loven aiheuttama voimaimpulssi on kohtalaisella tarkkuudella suoraan verrannollinen loven syvyyteen, johon vaikuttavat loven pituus ja pyörän halkaisija. Suomessa pienin sallittu pyöräkoko on 790 mm ja suurin sallittu loven pituus 45 mm. Tällöin loven syvyys on 0,64 mm.

Scalex Wildilla Utissa suoritettujen mittausten perusteella tyypilliset pyöräviat aiheuttavat akselin ja radan välisen voiman kaksinkertaistumisen. Pahimmissa tapauksissa voima on kasvanut yli kolminkertaiseksi. Pyörävikojen vaikutusta rataa ei voida pitää satunnaisena vaikutuksena, koska vikoja esiintyy paljon. Marraskuun lopussa 2007 vuorokaudessa havaittiin pahimmillaan yli 150 akselia, joiden hetkellinen voimavaikutus rataa oli yli 60 % suurempi kuin niiden staattinen kuorma. Monissa hälytyksen aiheuttaneissa akseleissa oli useita vikoja. Jos havaituilla akseleilla on keskimäärin kaksi vikaa ja 600 cm kulkupintaa, osuu kiskoon huonona päivänä pyörävika keskimäärin kahden sentin välein.

VR teki 1980-luvulla testejä lovipyörän vaikutuksista rataa. Testejä tehtiin lämpimällä kesäkelillä ja talvella. Kiskon lämpötila testeissä oli kesällä noin +40 °C ja talvella -9...+10 °C. Talvikelillä kiskon rasitukset olivat jopa kolme kertaa suuremmat kuin kesällä. Ratakiskossa vallitsee huomattava vetojännitys kylmällä ilmalla. Teräs on myös hauraampaa kylmänä. Näiden syiden takia lovipyörät aiheuttavat kiskoille enemmän vahinkoa talvella, ja siksi kylmille ilmoille on tiukemmat lovipyöräsäännöt monissa maissa.

Betonipölkyn rasitus kasvaa vain silloin, kun lovi osuu sen kohdalle. Talvella pölkyn rasitukset olivat puolitoistakertaiset kesään verrattuna. Molempia rasituksia saatiin pienennettyä käyttämällä pölkyn ja kiskon välissä pehmeämpää välilevyä. Myös British Railissa on tutkittu välilevyjen vaikutusta. Pehmeät välilevyt eristävät kiskon pölkystä ja estävät haitallisten värähtelyjen kulkemisen. Tästä on etua pölkylle ja kiskolle. Sopiva välilevyn jäykkyys on 200...300 MN/m.

#### ***4.2.2 Viallisten pyörien vaikutus vaunuihin***

Lovesta aiheutuvat iskut aiheuttavat suuria kiihtyvyyksiä koko pyöräkertaan. Akselin päissä oleviin laakereihin kohdistuu tämän takia todella suuria rasituksia. Kasvaneet voimat rikkovat laakerista ensimmäisenä rullapitimen, minkä jälkeen laakerit leikkaavat pian kiinni, mikä aiheuttaa suurta tuhoa. Laakerivikojen syitä ei ole tilastoitu, mutta SKF:llä on arvioitu, että 90 % laakerivioista on johtunut lovipyörästä tai pyörästä, joiden kulutuspinna on kuoriutunut.

Tällä hetkellä valvonta painottuu Suomen radoilla vahvasti kuumakäynti-ilmaisimien käyttöön. Tämä ei laakerivalmistajan lausuntojen perusteella vaikuta oikealta ratkaisulta, koska laakerien kuumakäynnin aiheuttajat voisi karsia pois liikenteestä ennen kuin ne vaurioittavat laakerin. Toisaalta kuumakäynti-ilmaisimista on kokemuksia pitemmältä ajalta, ja ne osoittavat suoraan, mitkä pyöräviat aiheuttavat huomattavaa laakerien rasituksen kasvua.



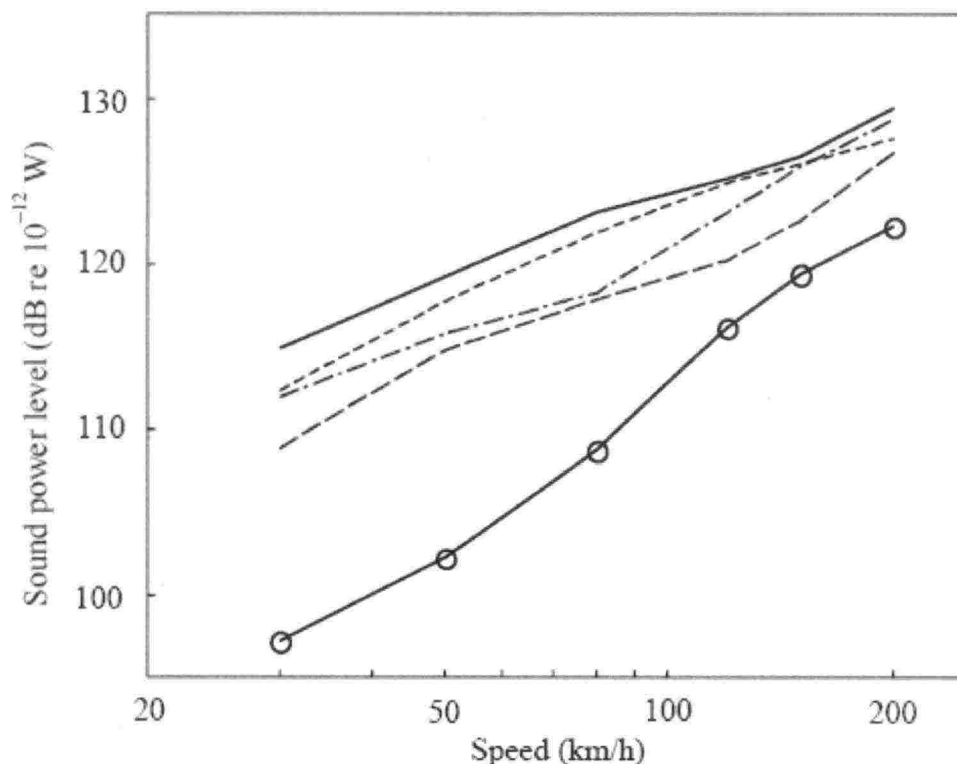
Hollannissa laakerien kuumakäyntihälytysten määrä väheni lovipyöräilmaisimien käyttöönoton jälkeen 90 %. Teliin käyttöikä piteni saman tutkimuksen mukaan 10 %. Teliin käyttöikää pidensi mm. jousien katkeilun vähentyminen. Viallisten pyörien poistaminen liikenteestä tehokkaan valvonnan avulla vähentää tämän mukaan vaunujen akselistojen ylläpitokuluja dramaattisesti. Tietoihin täytyy kuitenkin suhtautua hieman varauksella, koska ne ovat peräisin Gotchan (esitellään kappaleessa 0) markkinointimateriaalista.

Jos pyöriä käytetään vioista huolimatta, pyörävioista kasvaa säröjä kohti akselia. Viat voidaan usein havaita ennen kuin ne ylittävät radanpitäjän asettamat rajat. Jos vikojen annetaan kasvaa yli hälytysrajan, pyöristä täytyy sorvata kunnostuksessa paljon enemmän materiaalia pois. Tämä lyhentää pyörän elinikää. Pyörät, joissa on ollut suuria vaurioita, vaurioituvat todennäköisemmin uudestaan, koska vaurioista lähtee usein hyvin syvälle ulottuvia säröjä. Myös niiden riski tuhoutua totaalisesti on vähemmän vaurioituneita pyöriä suurempi.

#### **4.2.3 Pyörävikojen ympäristöä kuormittava vaikutus**

Ihminen aistii lovipyörän varsin helposti, sillä se pitää kolkottavaa ääntä. Rataa ja vaunua dynaamisilla voimillaan vaurioittava pyörä voidaan äänen avulla paikallistaa ja saattaa huoltoon. Radanvarren ympäristölle kolkotuksesta on huomattavasti haittaa, sillä se lisää junan ohiajamelua.

Lovesta aiheutuva melu kasvaa nopeuden mukaan noudattaen kaavaa  $20 \log_{10} V$ . Ehjä pyörä taas noudattaa kaavaa  $30 \log_{10} V$ . Akselikuorman kaksinkertaistaminen kasvattaa melua noin 3 dB. Erilaisten pyörien äänitehoja nopeuden funktiona on esitetty Kuva 10. Tyypillisillä tavarajunien ajonopeuksilla lovipyörän ääni on huomattavasti voimakkaampi, ja ero tasaantuu yli sadan kilometrin tuntinopeuksissa, jolloin aerodynaaminen melu on vallitseva melun lähde.



Kuva 10. Erilaisten pyörien A-painotettu ääniteho nopeuden funktiona. Viivat ylhäältä lukien: 2 mm syvä uusi lovi, 2 mm syvä pyörästynyt lovi, 1 mm syvä uusi lovi, 1 mm syvä pyörästynyt lovi ja ehjä pölkkejarrullinen pyörä. /11/

Melun lisäksi junat aiheuttavat maan tärinää. Ongelma on huomattava savimailla ja vastaavissa olosuhteissa. Tärinätorjunta on vaativampaa kuin meluntorjunta, koska vaimentimet on upotettava syvälle maahan. Lovipyörät ja muut selkeitä voimapiikkejä aiheuttavat pyöräviat lisäävät selkeästi ympäristön tärinää. Aiheesta ei löytynyt selkeitä mittaustietoja, mutta sen pystyi helposti aistimaan radanvarressa seistessä. Pendolinon ja huonokuntoisen tavarajunan ympäristöä täristävän vaikutuksen ero oli todella suuri.

### 4.3 Pyörävikojen korjaus

Suomessa rautatiekaluston pyörien kunnostus on keskitetty Pieksämäen konepajalle. Vuoden 2007 ensimmäisten kuuden kuukauden aikana siellä huollettiin 7 000 pyöräkertaa, joista vajaaseen kahteen tuhanteen vaihdettiin kokonaan uudet pyörät. Loput korjattiin sorvaamalla pyörän kulutus pintaa. Korjauksessa pyörästä sorvataan loven tai muun vian syvyyden lisäksi materiaalivian verran. Materiaalia ei kannata poistaa turhaan, koska pyörässä on rajallinen paksuus materiaalia, josta voidaan sorvata uusi kulutus pinta. Toisaalta pyörään generoituu hyvin nopeasti uusi vika, jos pyörästä ei sorvata riittävästi, ja siihen jää martensiittistä materiaalia tai muita vikoja. Pyörien sorvaussyyt ja sorvaussyvydet esitetään Taulukko 2.

Taulukko 2. Pyörien sorvaustilasto 2007/1-6

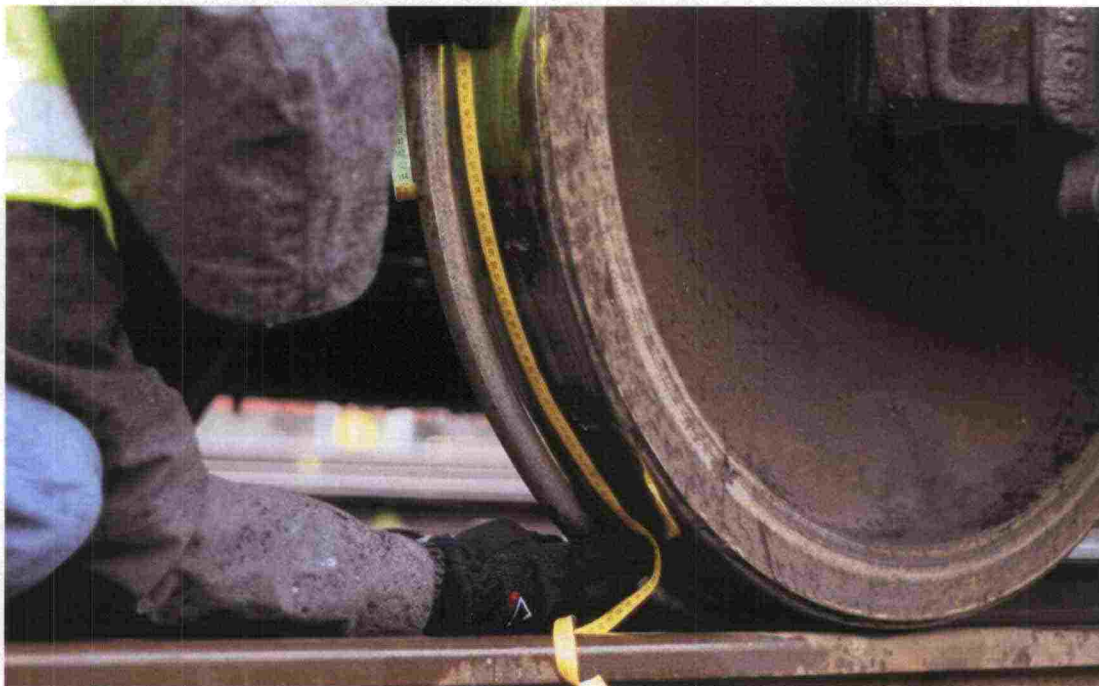
Vikatyyppe	Osuus vioista	Keskimääräinen sorvaussyvyys
Kuluma	38 %	3 mm
Laippavika	7 %	5,9 mm
Lovipyörä	30 %	4,6 mm
Materiaalivika	25 %	6,4 mm

Uudesta junan pyörästä voidaan huoltotoimina sorvata noin 40 mm säteestä sen elinkaaren aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa, että pyörää voidaan sorvata 5–10 kertaa. Sorvausten väli on puoli miljoonaa kilometriä, jos pyörässä ei havaita mitään vikaa. Pyörän elinkaari on hyvin pitkä, jos siihen ei tule vikoja, jotka aiheuttavat pyörään syviä säröjä, joita ei voida korjata. Loviviat ja pinnan kuoriutumuksesta johtuvat kolot aiheuttavat pyörään säröjä, joiden takia pyörä on poistettava käytöstä.

## 5 LOVIPYÖRÄSÄÄNNÖT

Kaikissa maissa, joissa harjoitetaan junaliikennettä, on jonkinlaiset junan pyörien pyöreyttä ja kulkupinnan profiilia koskevat säännöt. Sääntöjen luonne riippuu hyvin paljon siitä, mikä on liikenteenharjoittajien ja radanpitäjän suhde. Useimmissa länsimaissa valtio hallinnoi junaratoja ja yksityiset yritykset harjoittavat liikennettä. Nämä yritykset ovat monissa maissa osittain tai kokonaan valtion omistamia, kuten VR Suomessa. Suurimmat sallitut viat pyörissä on määritelty ensisijaisesti turvallisuussyistä. Vialliset pyörät lisäävät myös radan kulumista, minkä takia radanpitäjä haluaa määrätä, millaisilla pyörillä radalla on lupa liikennöidä.

Pyörävioista johtuvat ylimääräisten dynaamisten kuormitusten suuruudet riippuvat pääasiassa virheen syvyydestä. Tämän mittaaminen on huomattavasti vaativampaa kuin virheen pituuden mittaaminen, ja siksi säännöissä puhutaan lähes aina virheen pituudesta. Vian syvyyden mittaamiseen tarvitaan tarkoitusta varten kehitetty erikoismittalaite, joka mittaa kulkupinnan säteittäisheiton. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi Miniprof tai RUDI. Vian pituuden mittaamiseen riittää tavallinen mittanauha, jolla voi mitata vian pituuden millimetrin tarkkuudella (Kuva 11). Vian pituuden tarkka määrittäminen on mittavälineestä riippumatta vaikeaa, koska lovijäljen reunat ovat useimmiten epämääräisen pyöreät.



*Kuva 11. Loven pituuden mittaamista*

### 5.1 Sääntöjä eri maissa

Vuonna 2000 Suomessa kerättiin tietoja eri maiden lovipyöräsäännöistä. Vain harvat maat vastasivat kyselyyn tai julkaisivat sääntöjään jossakin helposti löytyvässä lähteessä. Ohessa on taulukko saaduista tuloksista (Taulukko 3). /39/



Taulukko 3. Lovipyörille asetettuja rajoituksia /39/

	Pyörän halkaisija [mm]	Ilman lämpötila [°C]	Loven pituus [mm]	Sallittu nopeus [km/h]
DSB Tanska			60 65 85	Ei rajoituksia
NSB Norja	= 900 = 900 < 900 < 900	< -10 > -10 < -10 > -10	> 40 > 60 > 30 > 40	= 10 = 10 = 10 = 10
SJ Ruotsi		< -10 > -10	> 60 40-60 40-60	= 10 = 10 Vältettävä 15-45
VR		< -10 > -10	> 80 61-80 46-60 46-60	Ajokielto = 10 = 10 Vältettävä 20-45
UIC International Union of Railways	631-1 000 631-1 000 330-630		60 30 30	= 160 = 200 = 160

Säännöt eivät oletettavasti ole muuttuneet ainakaan paljoa tämän jälkeen. Suomen tarkat säännöt esitetään seuraavassa luvussa. Vertailun vuoksi sitä seuraavassa luvussa on esitetty Englannin säännöt. Tavarajunien kohdalla lovivikoihin puututaan Tanskaa lukuun ottamatta, kun mitattu loven pituus on suurempi kuin 40-46 mm. Kaikissa maissa seuraamukset ovat tiukempia, kun mitattu loven pituus on yli 60-65 mm. Perinteistä loven pituutta määrittävien rajojen lisäksi Kanadassa käytetään rajana iskuvoimaa, joka saa olla korkeintaan 140 kips. Myös Alankomaissa pyörä voidaan tulkita laittomaksi pelkän dynaamisen mittauksen perusteella. Siellä mittaukseen liittyy aina automaattinen vaunun tunnistus, ja liian suurista pyörävoimista seuraa sakkomaksu liikennöitsijälle.

### 5.1.1 Lovipyöräsäännöt Suomessa

Suomen lovipyöräsäännöt annetaan Junaturvallisuussääntöön liittyvissä teknisissä määräyksissä ja ohjeissa (Jtt). Luvun 7.5, Viallinen ja ilmajarruton kalusto junassa, kappaleet kolme ja neljä käsittelevät pyörävikoja. Säännöissä kerrotaan, kuinka lovipyöriä pitää tarkkailla sekä miten on toimittava, jos pyörässä havaitaan lovivika. 7.1.2008 lähtien säännöt määrittellään RHK:n Rataverkon kuvauksessa kohdassa 6.3. Säännöt säilyivät täysin muuttumattomina määrittelypaikan vaihtuessa.

3) Ohikulkevaa junaa on tarkkailtava lovipyörien, kuumenneiden laakereiden, kuorman siirtymisien tai muun epäilyttävän havaitsemiseksi. Tarkkailu on tehtävä, milloin

miehistöä on käytettävissä, junan kummaltakin puolen. Mikäli epäilyttävää huomataan, vika on korjattava välittömästi tai kalusto poistettava junasta. Lovipyöräinen kalusto on kuitenkin pyrittävä kuljettamaan samassa junassa lähimmälle varikkoasemalle asti, mikäli siitä ei aiheudu ilmeistä vaaraa tai vahinkoa, ja ilmoitettava kalustosta varikolle.

4) Mikäli junassa havaitaan epäilyttävä lovipyörä, loven pituus on mitattava seuraavalla pysähdyspaikalla. Lovipyöräisen kaluston kuljettaminen edelleen on sallittua seuraavilla ehdoilla:

a) Jos loven pituus on enintään 45 mm, ei toimenpiteitä.

b) Jos loven pituus on 46–60 mm ja ulkoilman lämpötila alle  $-10\text{ °C}$ , suurin nopeus on 10 km/h. Lämpötilan ollessa  $-10\text{ °C}$  tai yli ei nopeusrajoitusta, nopeusaluetta 20–45 km/h on kuitenkin vältettävä. Pyöräkerta on vaihdettava seuraavalla varikkoasemalla.

c) Jos loven pituus on 61–80 mm, sn (nopeusrajoitus) on 10 km/h. Pyöräkerta on vaihdettava seuraavalla varikkoasemalla.

d) Jos loven tai lovien yhteinen pituus on yli 80 mm, pyöräkerta on vaihdettava sillä liikennepaikalla, missä lovi mitataan.

e) Jos loven pituus on ylliraskaassa vaunussa yli 45 mm, vaunu on pyrittävä vajauttamaan lähimmällä liikennepaikalla tai se on kuljetettava lähimmälle varikkoasemalle enintään nopeudella 10 km/h. /41/

### ***5.1.2 Englannissa käytössä olevat lovipyöräsäännöt***

Englannin lovipyöräsäännöt löytyvät standardista RSSB (2003) Railway Group Standard GM/RT2466 ”Railway Wheelsets” /14/. Englannin tavaravaunujen säännöt ovat hyvin lähellä suomalaisia säädöksiä. Heillä on lisäksi selkeästi tiukemmat säädökset nopeille matkustajajunille.

Taulukko 4. Englannin rautateiden lovipyöräsäännöt

Vaunutyyppi	Loven pituus	Liikenteestä poisto
Kaikki yli 125 mph liikkuvat kulkuneuvot 140 mph asti (yli 200 km/h kulkevat eli Pendolinot)	Yli 60 mm 40–60 mm 30–40 mm	Välittömästi Määränpäässä, nopeusrajoitus 125 mph 24 tunnin kuluessa
Matkustajajunat, joiden maksiminopeus 125 mph (200 km/h)	Yli 60 mm 40–60 mm	Välittömästi 24 tunnin kuluessa
Veturit, moottorivaunut, radanhoitokoneet ym.	Yli 60 mm 40–60 mm	Välittömästi Määränpäässä
Tavaravaunut, akselipaino alle 17,5 t	Yli 80 mm 60–80 mm	Välittömästi Määränpäässä, nopeusrajoitus 60 mph
Tavaravaunut, akselipaino yli 17,5 t	Yli 70 mm 50–70 mm	Välittömästi Määränpäässä, nopeusrajoitus 60 mph
Muut kulkuneuvot	Yli 60 mm 40–60 mm	Välittömästi Määränpäässä, nopeusrajoitus 60 mph

## 6 VIALLISEN PYÖRÄN TUNNISTAMINEN

### 6.1 Kuulohavainto

Lovipyöriä on perinteisesti valvottu kuuntelemalla rauhallisesti ohiajavan junan pyörääniä. Molemmiin puolin junaa asiaan harjaantunut ihminen tarkkailee kolkottavia ääniä ja kirjaa ylös akselit, joista kuuluu ääntä. Kuuntelun jälkeen juna pysähtyy ja epäillyt akselit tarkastetaan silmämääräisesti. Havaittujen vikojen pituus mitataan, ja vialliset pyörät huolletaan sääntöjen määräämällä tavalla.

### 6.2 Hitaasti liikkuvan pyörän mittaaminen laserilla

Pyörän kulkupintaa voidaan mitata laserilla alle viiden kilometrin tuntinopeuksissa. Pyörän kulkupinnalle heijastetaan viiva, jonka muotoa tarkkaillaan konenäöllä. Laitteistot asennetaan aina varikoille tai ratapihoille. Tällaisia laitteistoja ovat Graw /28/, Type Argus /34/ ja Treadview by Matrox /6/.

### 6.3 Pyörän kiskoon kohdistaman voiman mittaaminen

Pyörävoimien mittauslaitteisto voidaan jakaa suoritettavien toimintojen perusteella neljään osaan:

1. kiskoon sijoitetut voimaa, taipumaa tai kiihtyvyyttä mittaavat anturit
2. anturien mittakortit ja niiden antaman tiedon tallennus
3. mittaustietojen yhdistäminen ja esittäminen
4. mittaustietojen analysointi.

Fyysisesti laitteisto voi rakentua monella tavalla. Sen jälkeen, kun anturitiedoista on muodostettu tiedosto, tiedosto voidaan tallentaa ja siirtää analysoitavaksi. Tämä voi tapahtua samalla tietokoneella tai jossakin keskusvalvomossa keskitetysti. Mittaustieto kertyy paljon etenkin pitkästä, hitaasti liikkuvasta junasta. 500 metriä pitkän 60 kilometriä tunnissa kulkevan junan ohitus kestää 30 sekuntia. Tyypillisellä 5 000 Hz:n näytteenottotaajuudella syntyy 150 000 riviä mittaustuloksia, joissa on yhtä monta saraketta kuin mittauslaitteistossa kanavia. Mittauskanavia on laitteesta riippuen 10–42. Yhdestä junasta saadaan tällöin 1,5–6,3 miljoonaa arvoa sisältävä matriisi. Näistä arvoista muodostetaan noin 500 pyörän voimakuvaukset. Mittaustiedoston muodostaminen ja analysointi onnistuu tavallisella pc:llä. Mittaustulosten siirtämiseen tarvitaan kohtuullisen nopea laajakaistayhteys ja tallentamiseen paljon levytilaa. Suora mittaustiedosto voi olla kymmeniä megatavuja. Analysoituna tiedosto voi olla huomattavasti suurempi tai pienempi sen mukaan, mitä kaikkea siihen sisällytetään.

Viime aikoina suurin kehitys on tapahtunut pyörävoimatietojen analysoinnissa. Monelta laitevalmistajalta on tullut uusi ohjelmistoversio viimeisen vuoden aikana. Alkuun kaikki keskittyivät vain lovipyörien ja muiden paikallisten vikojen tarkkailuun. Uudet versiot tunnistavat myös pinnan aaltoilut ja pyörien polygonaalisuuden ja määrittävät näiden vikojen suuruuden. Akselipainon ja dynaamisen voimatiedon avulla voidaan vikatyyppi ja sen suuruus määrittää koko ajan tarkemmin.



#### 6.4 Vaakaelementeillä toteutettu voimanmittaus

Vialliset pyörät halutaan poistaa liikenteestä, koska ne aiheuttavat kvasistaattisten voimien lisäksi huomattavia dynaamisia voimia rataan ja kalustoon. Radalle haitallisten pyörien löytämisen kannalta on hyvin tehokasta mitata suoraan kiskoon kohdistuvia voimia. Niiden mittaaminen on kuitenkin vaativaa, koska juna liikkuu nopeasti mitta-anturien yli ja kisko välittää siihen kohdistuvan voiman epätasaisesti sitä kannatteleville pölkyille. Tämän takia kisko jaetaan punnitusalueisiin, joiden päässä on leikkausvoima-anturit. Punnitusalueen päiden leikkausvoima-antureista saadaan tietoa siitä, kuinka paljon voimaa välittyy punnitusalueen ulkopuolella oleville pölkyille. Pyörän aiheuttama pystykuormitus saadaan yhdistämällä punnitusalueen pölkkysten ja kiskon välisten voima-anturien tiedot ja leikkausvoima-anturien tiedot. Junan etenemistä mitta-alueella seurataan leikkausvoima-anturien avulla. Etenemistietojen avulla mitta-alueetta vaihdetaan junan etenemisen mukana. Eri valmistajilla on tähän toisistaan poikkeavia ratkaisuja.

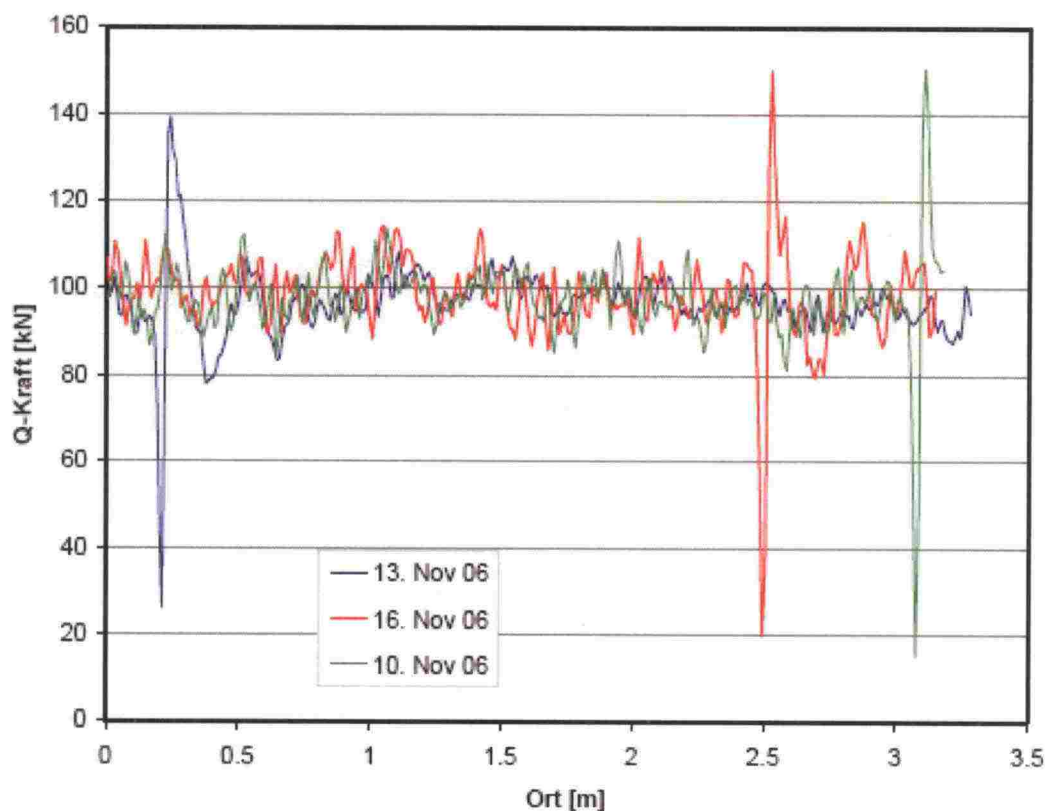
Lämpötilojen vaihtelun takia kiskossa esiintyy huomattavia pitkittäisiä voimia, jotka häiritsevät leikkausvoima-anturien mittaustarkkuutta. Pölkkysten tuenta vaihtelee huomattavasti pölkkysten välillä ja pölkkyykohtaisesti vuoden aikojen mukaan. Näiden tekijöiden takia mittalaitteen kalibrointi on hyvin vaativaa, ja laitteisiin on kehitettävä toimintoja, joilla ne kalibroivat itse itsensä ennen mittausta. Pölkkyyanturien kohdalla asia voidaan ratkaista itsekalibroivilla voima-antureilla. Mittauksessa halutaan tietää pölkin ja kiskon välinen voiman muutos, ei absoluuttista voimaa.

Voimakuvaajasta voidaan sopivalla dynaamisten voimapiikkien suodatuksella laskea akselipainot, jolloin laitteisto valvoo myös akselipainoja. Akselipainot pystytään punnitsemaan 80 kilometrin tuntinopeudessa parhaimmillaan alle kahden prosentin tarkkuudella. Pyöräviat tunnistetaan vertaamalla kuvaajan huippuja ja laskettua akselipainoa. Näistä tiedoista saadaan dynaaminen voimasuhde, jonka suuruuden perusteella arvioidaan pyörävikojen suuruudet. Vikatyyppejä voidaan päätellä kuvaajan muodosta (asia esitellään luvussa 0). Määräysten perusteella lovipyöräksi luokiteltavien pyörien tunnistus on helppoa, koska määräysten mukaan liian suuret lovet aiheuttavat hyvin selkeän ja suuren voimapiikin, jonka suuruus korreloi kohtalaisen hyvin loven pituuden kanssa. Teräväreunaisen uuden ja hieman kuluneen loven voimakuvaajissa on kuitenkin selkeä ero. Rosopyörien ja muiden koko matkalla esiintyvien vikojen tulkitseminen on huomattavasti vaikeampaa.

Vian aiheuttamaan voimasuhteeseen vaikuttaa vaunun jousitetun ja jousittamattoman massan välinen suhde. Jousittamattomalla massalla on suurempi vaikutus vian aiheuttamaan voiman kasvuun kuin jousitetulla massalla. Tämän takia saman vian aiheuttama voimasuhdeluku pienenee kuorman kasvaessa. Täysin uusi pyörä on kaksi kertaa painavampi kuin useita kertoja sorvattu pyörä, minkä takia jousittamaton massa voi vaihdella huomattavasti eri akselien välillä. Vaunujen eri akseleiden jousittamattomia massoja on hyvin vaikea saada selville. Tämän takia dynaamisen voimasuhdeluvun korjaus täytyy tehdä pelkän akselimassan perusteella. Vaunun kuorman vaikutuksen suuruutta loven aiheuttamaan voimapiikin suuruuteen ei tunneta. Vaikutus on kuitenkin ilmeinen, koska myös Utin koemittauksissa tyhjien vaunujen lovipyörähälytykset ovat useammin viitanneet suurempiin vikoihin kuin mihin

kuormattujen vaunujen hälytykset ovat viitanneet. Myös täydet ja jopa ylikuormatut vaunut ovat aiheuttaneet yli 120 %:n voimannousun, joten staattisen kuorman ja hetkellisen voimamaksimin suhdetta voi käyttää vian suuruuden perusmääränä.

#### 6.4.1 Esimerkki voimakuvaajan tulkinnasta



Kuva 12. Lovipyörän voimakuvaaja

Saksan rautateiden käyttämällä DafuR-mitta-asemalla mitattiin kolme kertaa sama BR 151 -veturin kolmas akseli (lisätietoa veturista <http://www.baureihe151.tk/>). Mittauksien voimakuvaajat esitetään Kuva 12. Akselin toisella pyörällä oli pieni lovi. Pieni pyörän lovi muuttuu hyvin vähän muutaman päivän käytössä, jos pyörällä ei tehdä uutta lukkojarrutusta, joten pyörä voidaan olettaa täysin samanlaiseksi jokaisella mittauskerralla. Lovi osuu mittausalueen eri kohtiin täysin sattumanvaraisesti. Loven aiheuttamasta voimaimpulssista päätellään loven syvyys ja pituus. Impulssin kokoa määrittävä dynaaminen voimasuhde tarkoittaa staattisen voiman ja pyöräviasta aiheutuneen hetkellisen suuremman voiman suhdetta.



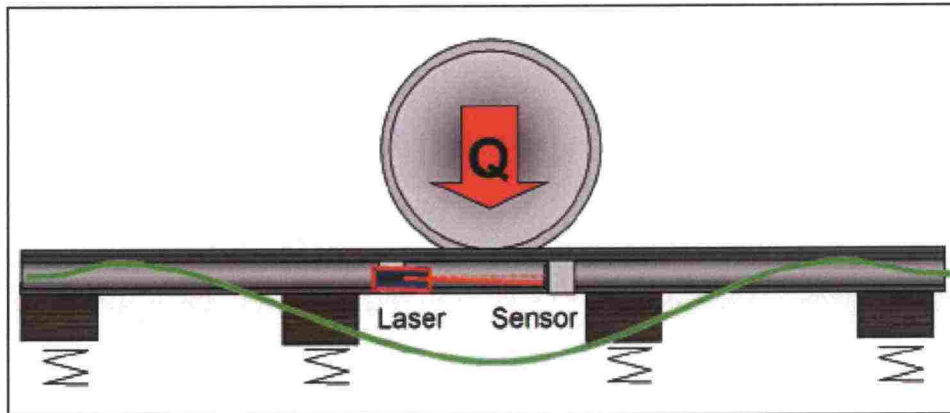
Taulukko 5. Lovimittauksia

Mittauspäivä	Dynaaminen voimasuhde	Loven syvyys	Loven pituus
13.11.2006	1.45	0,10 mm	20 mm
16.11.2006	1.53	0,13 mm	22 mm
10.11.2006	1.55	0,14 mm	23 mm

BR 151 -veturin akselimassa on 19,7 tonnia, jolloin jokaisesta pyörästä kohdistuu rataan 96,6 kN:n staattinen voima. Mittalaitteen tekemät voimakuvaajat näyttävät tämän perusteella aivan oikeilta ja osoittavat +/- 10 %:n vaihtelun voimassa Kuva 12). Mittauksissa havaittu lovi on niin pieni, ettei se aiheuta välittömiä toimia missään kalustoluokassa. Sen havaitseminen voimakuvaajasta on kuitenkin helppoa.

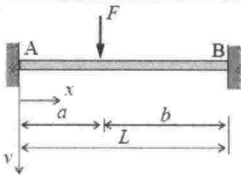
### 6.5 Vikojen havainnointi kiskon taipumasta

Suoraan voiman mittaamiseen liittyvien haasteiden lisäksi voima-anturien asentaminen kiskon ja pölkyn väliin vaatii käytännössä kyseisen radanpätkän uusimisen, jos mittausasema tehdään vanhalle radalle. Näiden syiden takia on kehitetty epäsuora kiskoon kohdistuvan voiman mittaustapa.



Kuva 13. Kiskon taipuman mittausperiaate /25/

Kiskon normaaliakseli taipuu kuvassa esitetyn vihreän viivan tavoin pyörän ollessa pölkkyjen puolivälissä, jolloin kiskon taipuma on suurimmillaan 0). Laser on kiinnitetty jäykästi kiskoon, ja sen säde osoittaa kiskon kallistuskulman laserin kiinnityskohdassa. Sensori on niin ikään kiinnitetty jäykästi kiskoon, ja se taipuu samoin kuin laser, mutta vastakkaiseen suuntaan. Mitä enemmän kisko taipuu, sitä enemmän lasersäde siirtyy alaspäin sensorilla. Pyörävoiman aiheuttama kiskon taipuma saadaan lujuusopin kaavalla, joka tunnetaan yleisesti suoran palkin taipuman kaavana. Kiskon tuenta yhdellä pölkkyvälillä vastaa tapausta, jossa molemmat päät on jäykästi tuettu Kuva 14).

Tapaus	Tukireaktiot ja taivutusmomentti	Taipuma ja kiertymät tuilla
10 	$A = \frac{Fb^2}{L^2} \left(1 + 2\frac{a}{L}\right) \quad B = \frac{Fa^2}{L^2} \left(1 + 2\frac{b}{L}\right)$ $M_A = -\frac{Fab^2}{L^2}, \quad M_B = -\frac{Fa^2b}{L^2}$ $M(x) = Ax + M_A - F \langle x - a \rangle$ $M_{\max} = M(a) = Aa + M_A - Fb$	$v(x) = \frac{F}{6EI} \left[ 3ab^2 \left(\frac{x}{L}\right)^2 - b^2(L + 2a) \left(\frac{x}{L}\right)^3 + \langle x - a \rangle^3 \right]$ $v_F = v(a) = \frac{Fa^3b^3}{3L^2EI}$ $\phi_A = \phi_B = 0$

Kuva 14. Kiskon taipuman kaavat

Kaavoissa esiintyvä I-termi tarkoittaa kiskon jäyhyysmomenttia, joka on Suomessa käytettävälle R65-kiskolle  $3\,540\text{ cm}^4$ . Kiskon taipuma on hyvin pientä, eikä sitä voi havaita paljaalla silmällä. Taipumia on esitetty eri pyörävoimilla Taulukko 6. Optiset anturit ovat erittäin herkkiä ja nopeita, joten pieni kiskon liike saadaan mitattua tarkasti ja siitä voidaan päätellä pyörävoimat.

Taulukko 6. Kiskon taipumia eri pyörävoimilla

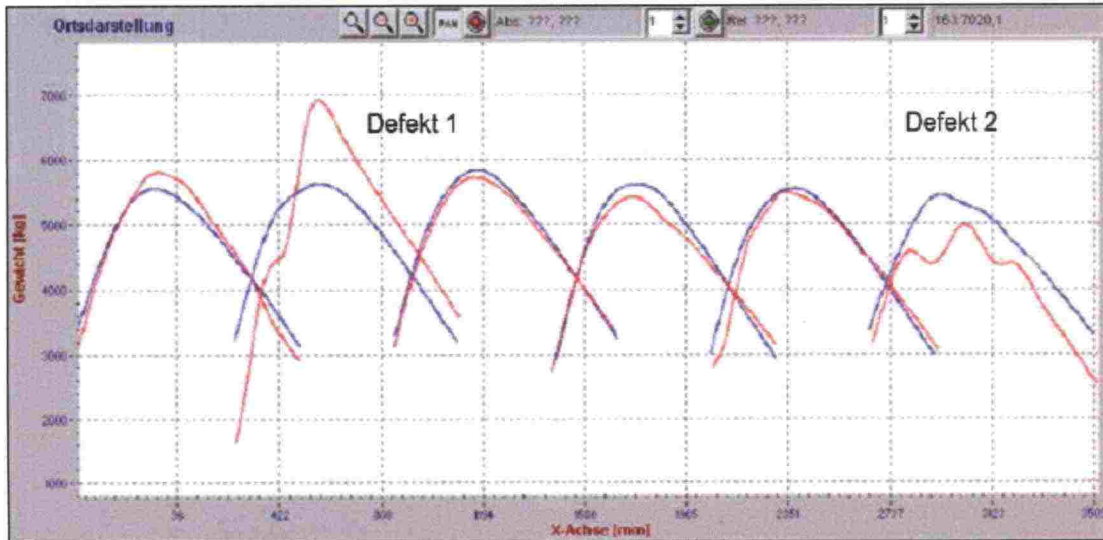
Pyörävoima [kN]	50	100	150	200
Taipuma [mm]	0,007	0,015	0,023	0,03

Mittaustavalla ei päästä suoraan käsiksi todellisiin pyörävoimiin, koska kiskossa vallitsevat pitkittäisvoimat vaikuttavat taipumaan. Järjestelmällä voidaan punnita vaunut, jos tunnetaan veturin paino. Tällöin vaunujen aiheuttamia taipumia verrataan veturin aiheuttamiin taipumiin.

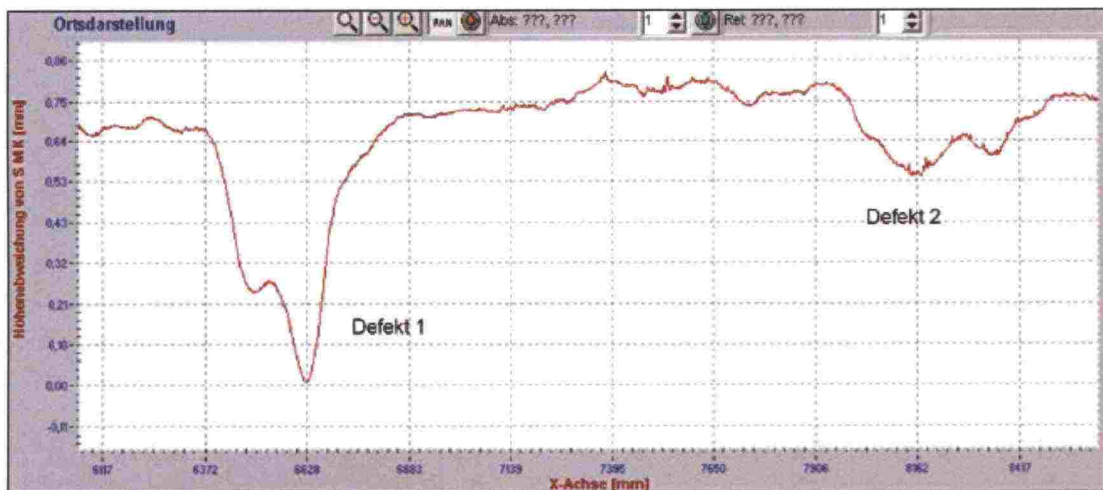
Paljaalla silmällä katsottuna kisko liikkuu tietyissä radan kohdissa huomattavan paljon. Tämä johtuu pääosin pölkkyjen painumisesta sorapatjaan. Sorakerroksen kovuus vaihtelee jonkin verran eri pölkkyjen alla, ja ajan myötä tuenta voi kadota lähes kokonaan jonkin pölkyn alta. Pölkkyjen välisten erojen lisäksi koko alustan jäykkyys vaihtelee sen mukaan, onko maa kuiva, märkä vai jäässä.

Kaikki anturit muodostavat ehjistä pyöristä samannäköisen taipuma-/voimakuvaajan. Pyörävikojen kohdalla taipuma ei kasva tasaisesti, koska pyörän ja kiskon välinen voima vaihtelee (Kuva 15). Esimerkkitapauksen viallinen pyörä mitattiin RUDI-mittalaitteella, jolla saatiin kuvaaja pyörän säteittäisheitosta (Kuva 16).





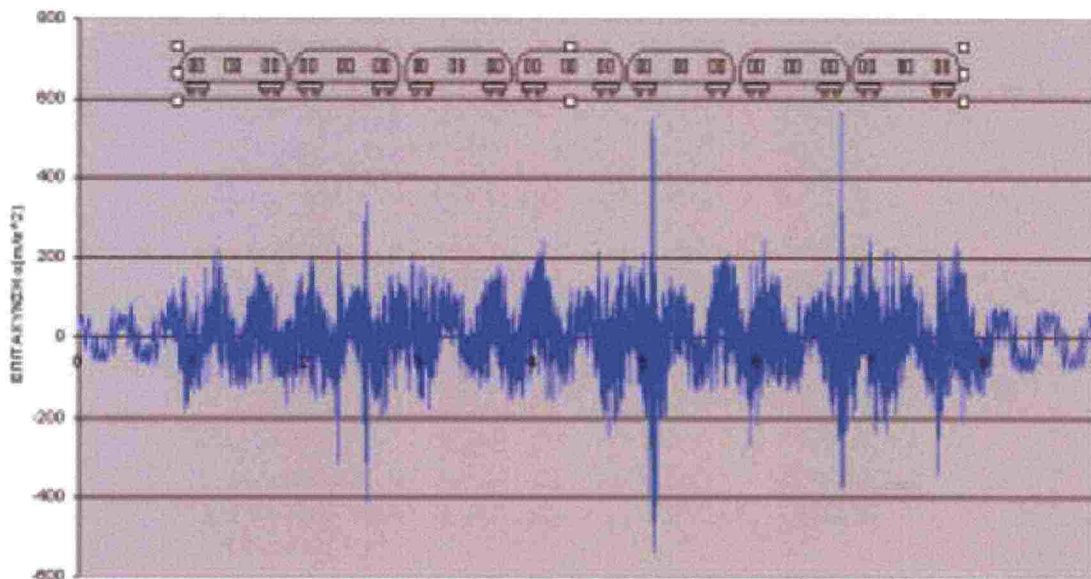
Kuva 15. MATTILD-laitteiston anturikohtaiset painokuvaajat 100 km/h kulkevasta junasta. Siniset kuvaajat ovat ehjästä pyörästä, punaiset viallisesta. /25/



Kuva 16. Edellisen kuvan viallisen pyörän kulkupinnan muoto; y-akselin viivaväli tarkoittaa 0,1 mm virhettä /25/

## 6.6 Vikojen havainnointi kiskon kiihtyvyydestä

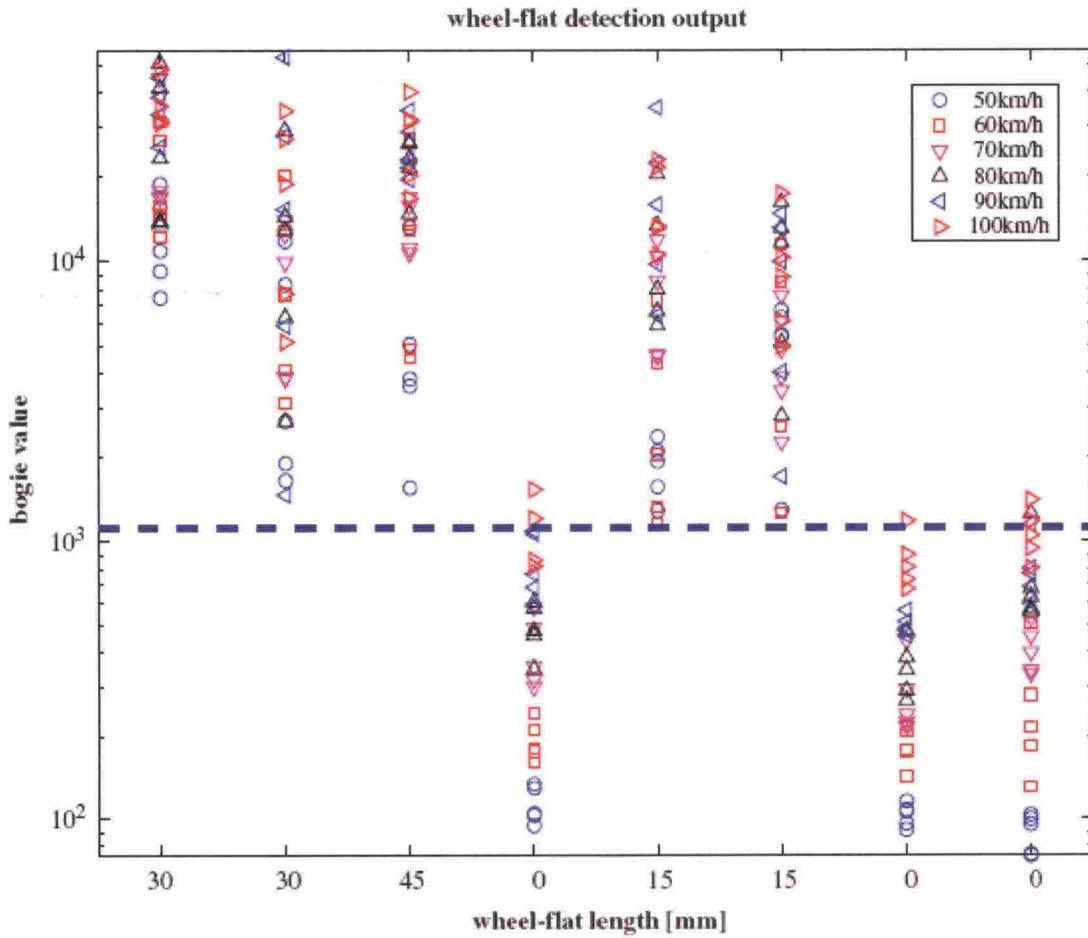
Lovipyörä aiheuttaa kiskoon teräviä iskuja, jolloin kiskossa on hetkellisesti hyvin suuria kiihtyvyyksiä. Kiihtyvyyssanturit on helppo asentaa kiskoon, ja ne ovat muihin antureihin nähden kohtalaisen edullisia. Italiassa ja Kreikassa tutkittiin erilaisten lovipyörien kiskoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä. /7//8//13/



Kuva 17. Junan kiskoon aiheuttamia kiihtyvyyksiä, viivaväli  $200 \text{ m/s}^2$

Kuvan sininen viiva kuvaa kiskon kiihtyvyyttä kreikkalaisten testijunan ajaessa mittauskohdan yli. He eivät paljastaneet, minkä suuruisia pyörävikoja testijunassa oli. Kaksi pyörää on aiheuttanut testissä kolminkertaisen kiihtyvyyden muihin pyöriin nähden, joten menetelmällä voi selkeästi havaita vialliset pyörät.

Genovan yliopistossa Italiassa kehitettiin virherajoja pyörävioille kiskon kiihtyvyyden perusteella. Heidän testijunassaan oli ehjiä pyöriä ja pyöriä, joihin oli koneistettu  $15 \text{ mm:n}$ ,  $30 \text{ mm:n}$  tai  $45 \text{ mm:n}$  lovi. Akseleille laskettiin vertailuarvo kiihtyvyyden suuruuden ja keston mukaan. Virherajaksi asetettiin arvo  $1\,000$ , jonka yläpuolelle jäivät juuri kaikki viallisten pyörien mittaukset. Testijunalla ajettiin useita kertoja mittalaitteen yli, ja tuloksista koottiin taulukko Kuva 18). Ehjillä pyörillä vertailuarvo nousi kymmenkertaiseksi nopeuden kaksinkertaistuessa, jolloin ehjän pyörän vertailuarvo oli yhtä suuri hitaammin kulkevan rikkinäisen pyörän kanssa. Hyvällä nopeuskompensoinnilla kiskon kiihtyvyyden perusteella pystyy tunnistamaan lovipyörät. Testilaitteisto oli suunniteltu mahdollisimman edulliseksi ja yksinkertaiseksi lovipyörien tunnistuslaitteeksi. Pidemmällä anturointimatalla voi seurata tarkasti pyörän eri kohtien aiheuttaman kiihtyvyyden ja määrittää niiden vaihtelun perusteella myös muut epäpyöreysviat.



Kuva 18. Kiihtyvyydestä laskettuja virhearvoja erilaisille pyörille eri nopeuksilla

## 6.7 Markkinoilla olevat tuotteet

Junan pyörien mittauslaitteet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: täydessä ajonopeudessa mittaaviin, kävelynopeudessa mittaaviin sekä käsikäyttöisiin paikallaan olevan pyörän mittalaitteisiin. Tässä työssä esitellään ja arvioidaan kaikki markkinoilta löytyvät mittausasemat, jotka tunnistavat pyöräviat täydessä ajonopeudessa.

### 6.7.1 Mattild ja Lasca

Mattild on General Electricin pyörävoimia mittaavan laitteiston nimi. Täysin sama kiskontaipuman mittaamiseen perustuva laitteisto on Lasca, joka on saksalaisen Innotec GmbH Europan tuote. Laitteiston mittaustekniikka on Innotecin erityisosaamista. General Electric täydentää laitteella erittäin monipuolista kiskokalustotekniikan tarjontaansa.

Laitteisto koostuu kahdestatoista taipumaa mittaavasta sensorista ja mittaradan päihin sijoitetuista ohiajotunnistimista. Taipumaa mittaavat anturit on sijoitettu kuudelle pölkkyvälille 3,6 metrin matkalle, joten laitteisto mittaa pyörän vain kertaalleen. Optiset anturit ovat herkäät, ja ne havaitsevat tarkasti laserin liikkeitä. Anturien näytteenottotaajuus on 7 kHz, ja niiden herkkyys vastaa 100 N:n voimanmuutosta kiskolla. Kyseinen voimanmuutos lisää kiskon painumaa  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ . Optiset anturit ovat



itsestään kalibroivia nollakohdan suhteen. Valmistajan on kuitenkin kalibroitava laitteistokokonaisuus kerran vuodessa.

Laitteiston ohjelmistolla on laitteiston toiminnan kannalta suuri merkitys. Ohjelmistoon voidaan ohjelmoida 60 erilaista raja-arvoa lovipyörille tai muille pyörävirheille. Ohjelmiston tuottamat tulokset ovat yhteensopivat Saksan rautateiden pyörävoimien tietopankin kanssa.



*Kuva 19. Mattild/Lasca-aseman anturit kiskoon kiinnitettyinä*

Mittalaitteet eivät kannata tässä järjestelmässä kuormaa ollenkaan, ja ne asennetaan yksinkertaisilla puristimilla kiskoon kiinni. Järjestelmän asennus on esitetty Kuva 19. Asentaminen on hyvin helppoa, ja se voidaan tehdä päivässä tavallisen liikenteen häiriintymättä. Helpon asennuksen ansiosta järjestelmä voidaan myös siirtää paikasta toiseen. Radan tuenta ei muutu asennuksen yhteydessä, mikä parantaa mittausten luotettavuutta. Laitteita on käytössä rautateillä Saksan lisäksi Virossa Narvan raja-asemalla, Italiassa, Sveitsissä ja USA:ssa sekä New Yorkin metrolla. /25//27/

### **6.7.2 Scalex Wild**

Suomalainen kuorma-autojen ja junien punnituslaitteita valmistava Pivotex kehitti junavaa'an pohjalta pyörävikoja tarkkailevan Scalex Wildin. Yrityskaupan myötä Pivotexistä tuli Tamtron Solutions. Scalex Wildin prototyyppiä testattiin ensin Mussalon satamassa, ja sen jälkeen sitä on testattu ja kehitetty pari vuotta Utissa Kouvolan itäpuolella. Prototyyppilaitteisto on yksinkertaistettu versio lopullisesta tuotteesta. Sen mittausaluetta on lyhennetty molemmista päistä yhdellä pölkkyvälillä, eikä se erittele pyöräkohtaisia voimia vaan antaa voimat akselikohtaisesti. Prototyyppiä ollaan päivittämässä suunnitelmanmukaiseksi mittausasemaksi.

Laitteiston toiminta perustuu vaakaelementeillä tehtävään kiskon ja pyörän välisen voiman mittaamiseen. Laitteisto koostuu kymmenestä mittauspölkystä ja alueen päihin sekä jokaiselle pölkkyvälille sijoitetuista leikkausvoima-antureista. Mittauskanavia on tällöin 42. Voima-arvo muodostetaan summaamalla peräkkäisten pölkkyjen voima-arvot ja alueen päiden leikkausvoimatiedot. Mittausaluetta siirretään pölkkyväli kerrallaan eteenpäin akselin etenemisen mukana leikkausvoimatietojen perusteella. Mittaustavalle on haettu EU:n laajuinen patentti (EP patentti numero 04396039.2). Hakuprosessi on vielä kesken. Voimatietojen analysointiohjelman toimittaa NSD.



Kiskon ja pölkyn välistä voimaa mittaavat anturit, Kuva 20, on suunniteltu erityisesti tätä käyttöä varten. Kisko on kiinnitetty anturin keskikohtaan ja anturi pienien korotuspalojen välityksellä päistä pölkkyyn. Anturin hoikimmassa kohdassa on venymäliuskatyyppiset voiman mittaukset. Anturit kalibroivat automaattisesti nollakohdan, ja anturin eri puolien voimatiedot yhdistetään anturilla. Anturien sääsuojaluokka on IP 67. Anturien mittakortit ja tiedonkeruuohjelmiston toimittaa Etteplan.



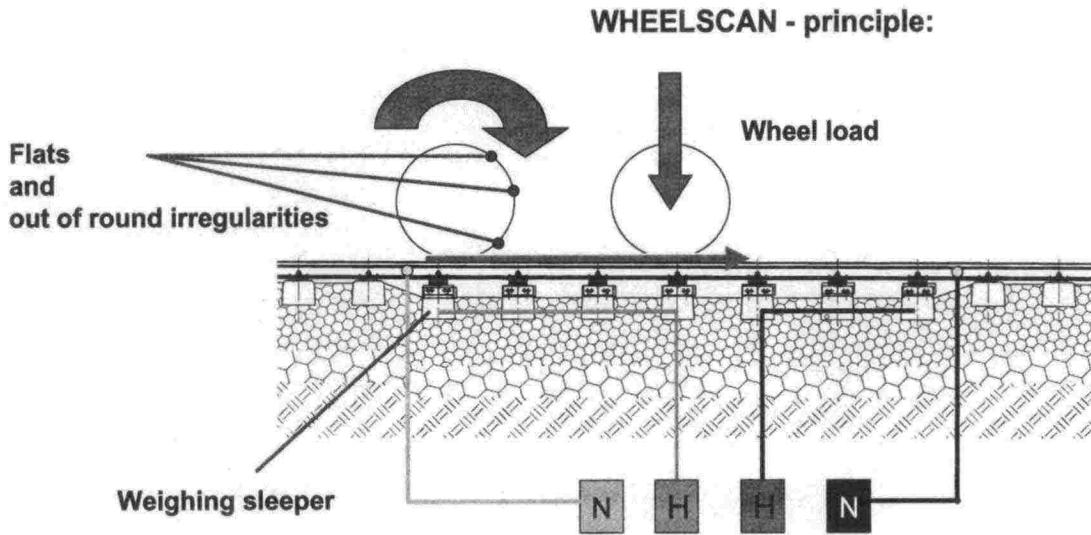
*Kuva 20. Kiskon ja pölkyn välinen voima-anturi*

Pyörävikojen havainnoinnin lisäksi laitteisto punnitsee junat ja tarkkailee niistä sivukuormia. Punnitustarkkuudeksi ilmoitetaan  $\pm 2\%$  alle 40 kilometrin tuntinopeuksissa ja  $\pm 5\%$  alle 150 kilometrin tuntinopeuksissa. Pyörävikoja laitteisto mittaa nopeusvälillä 20–250 km/h. Myöhemmin tässä työssä esiteltävät mittaukset on tehty tämän laitteen prototyypillä. Prototyypin mittaustarkkuus niin vikojen tunnistuksen kuin punnituksenkin kohdalla on ollut vähintään suunnitellun tasoista. Laitteiston luotettavuudessa on vastaavasti ollut odotettua enemmän ongelmia.

### **6.7.3 Schenck Multirail Wheelscan**

Schenck Process GmbH on suuri, yli satavuotias saksalainen teollisuustuotteiden monialayhtiö. Yhtiö valmistaa paljon erilaisia korjaamoilla käytettäviä kiskokaluston pyörien mittalaitteita. Yhtiön valikoimista löytyy myös täydessä vauhdissa pyörät analysoiva Multirail Wheelscan -laitteisto. Laitteisto koostuu seitsemästä betonisesta mittauspölkystä ja mittausalueen päissä olevista leikkausvoima-antureista. Mittausalue on noin viisi metriä pitkä, joten se kattaa lähes kaksi pyörän pyörähdystä. Mittalaite on kehitetty Schenck Process GmbH -yhtiön valmistaman junien punnitsemislaitteen pohjalta. Se ei ole läheskään niin kehittynyt kuin DafuR tai Scalex Wild, joita voidaan

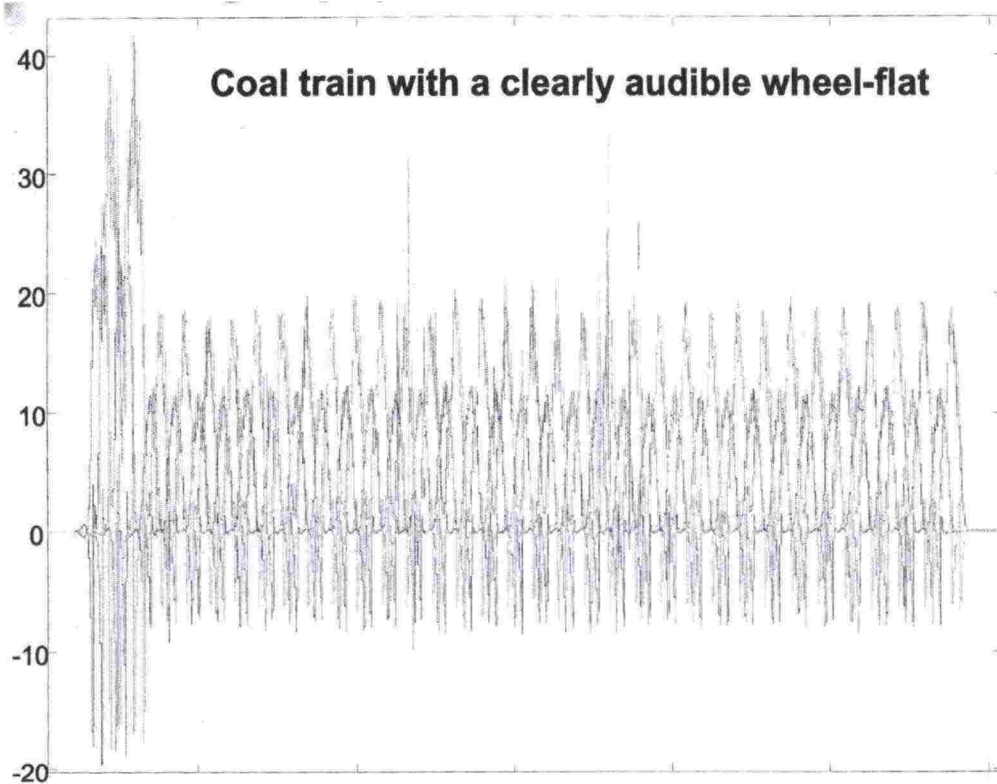
pitää samantapaisina laitteina. Multirailissa on vain kuusi mittauskanavaa Kuva 21). Mittausalueen päissä on leikkausvoima-anturit, joilla havaitaan, kuinka suuren osan voimasta mittausalueen ulkopuoliset pölkkyt kantavat akselin ollessa mittausalueella. Mittauspölkkyt on jaettu kahteen ryhmään, joissa niiden anturit on kytketty sarjaan. Pölkkyantureilta (kuvassa H) saadaan erikseen oikean ja vasemman kiskon voima. Tämän ansiosta havaitaan sivukuormat. Yhden päädyn leikkausvoima-anturit ovat kytketty rinnan, joten niiden anturikohtaisia tietoja ei saa.



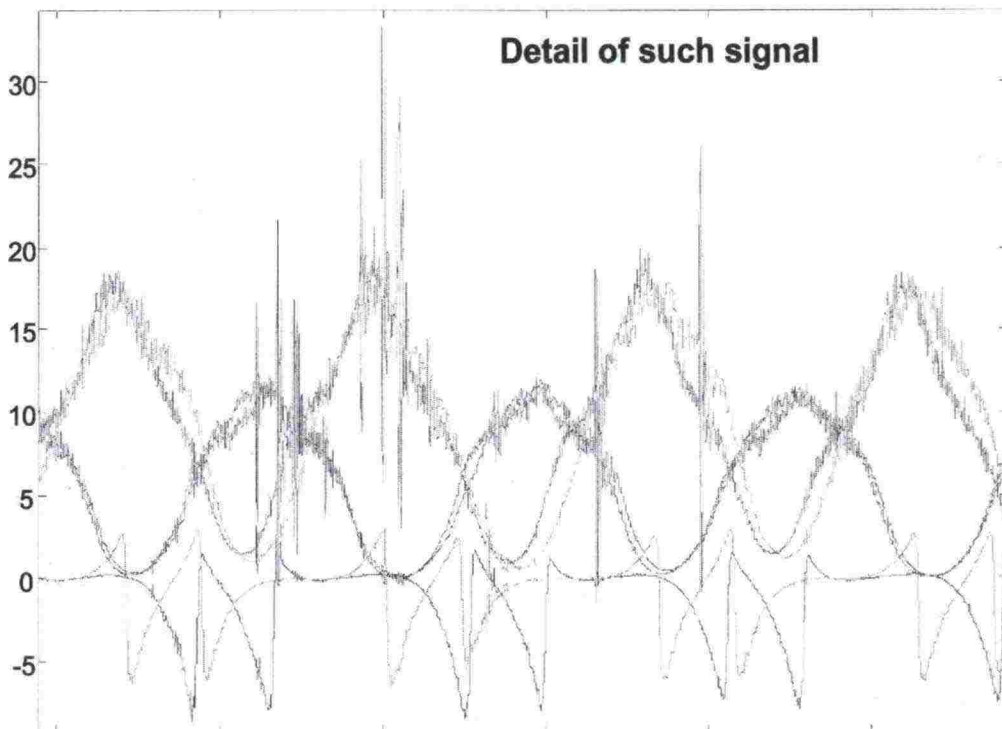
Kuva 21. Multirailin anturointi

Yksinkertaisemman tiedonkeruun takia laite ei muodosta kiskon ja pyörän välistä voimakuvaajaa. Tuloksista saa ainoastaan suorat anturiarvokuvaajat (Kuva 22). Vikojen arviointi näistä kuvaajista on huomattavasti vaikeampaa kuin arviointi pyörävoimakuvaajista. Selkeän voimapiikin aiheuttavat viat, kuten lovipyörät, havaitsee näistäkin kuvaajista helposti. Suurennetusta kuvasta, Kuva 23, nähdään, millainen kuvaaja lovipyörästä saadaan.





Kuva 22. Multirailin signaalikuvat hiilijunasta



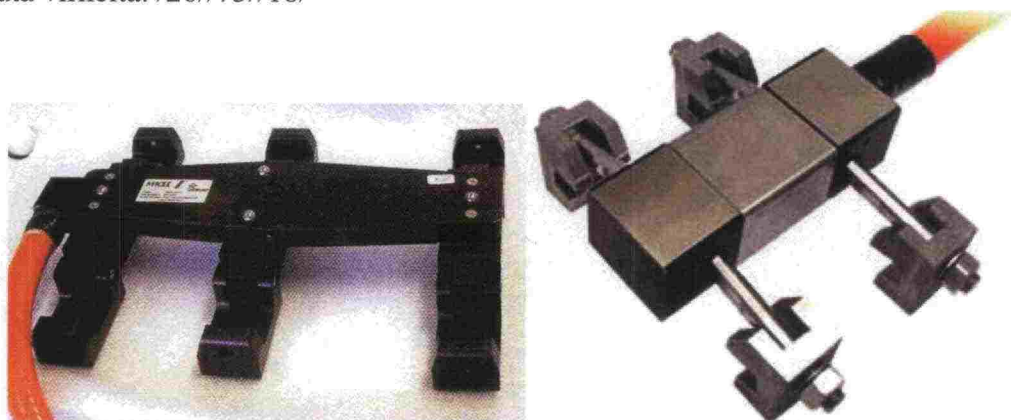
Kuva 23. Signaali lovipyörän kohdalla

Laite punnitsee junat kaikissa nopeuksissa. Sen lisäksi alle 16 kilometrin tunti-nopeuksissa punnitus kelpaa kaupallisiin tarkoituksiin (OIML). Ruotsi valitsi tämän laitteiston tulevaisuuden pyörävikojen havainnointilaitteeksi ja tilasi näitä kymmenen. Varsinaisessa tarjouskilpailussa oli neljä ehdokasta, joiden teknisiä ominaisuuksia

arvioitiin 160 kysymyksellä. Teknisten ominaisuuksien ja elinkaarikustannusten perusteella Multirail Wheelscan oli paras vaihtoehto Ruotsin tarpeisiin. /30/

#### 6.7.4 Gotcha

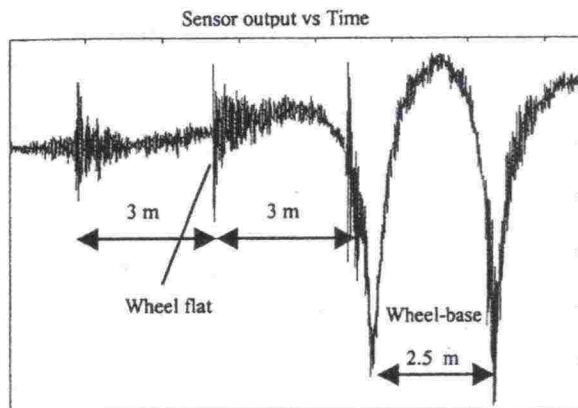
Hollantilaiset Nedtrain ja Baas sekä ruotsalainen TagMaster valmistavat Gotcha-nimisiä pyörävoimanmittausasemia. Laitteiston kehityksestä on vastannut NedTrain Consulting ja Baas:n tuotekehitystoimisto Coenecoop. Laitteiston kehitys aloitettiin simuloimalla ADAMS-rail-ohjelmalla kiskon käyttäytymistä erilaisten epäpyöreiden pyörien alla. Saatujen tietojen pohjalta kehitettiin anturi, joka tunnistaisi nämä liikkeet mahdollisimman hyvin. Laitteistoon on integroitu Tagmasterin RFID -vaunujen tunnistus. Pyörien mittaus perustuu kiskon taipuman mittaamiseen. Pitkä anturi Kuva 24) kiinnitetään kiskon alapuolelle kolmesta kohtaa. Anturielementti taipuu kiskon mukana yhtä paljon kuin kisko taipuu. Anturista on tullut myös uudempi versio, joka on lyhyempi ja jossa on momenttia välittävät kiinnitykset, minkä takia se on vain kahdesta kohtaa kiskossa kiinni. Taipuman mittaus hoidetaan optisen kuidun taipumaa tarkastelemalla. Mittaustaajuus on 1 000 Hz. Koska mittaus perustuu optisen kuidun ominaisuuksien mittaamiseen, eivät rautateiden voimakkaat sähkömagneettiset kentät aiheuta virheitä. /26//73//18/



Kuva 24. Gotchan taipuma-anturi. Vasemmalla aikaisempi malli, oikealla uusin.

Molempiin kiskoihin tulee taipuma-anturit vain kahdelle pölkkyvälille. Tämä tekee järjestelmästä yksinkertaisemman ja edullisemman, mutta myös epätarkemman. Herkät anturit havaitsevat myös kauempana tapahtuvat voimavaihtelut, joten neljä anturia havaitsee varmasti kaikki pyöräviat, vaikka vikakohta ei koskettaisi kiskoa anturin kohdalla (Kuva 25). Vian havainnointi näyttää toimivan hyvin esimerkkitapauksessa, mutta anturikuvaajat eivät enää ole kovin helposti tulkittavissa, jos mittalaitteen ylittää neliakselinen teli, jolla on vikaa kahdella akselilla. Yksi anturi havaitsee tällöin samanaikaisesti kaikki akselit. Valmistaja lupaa laitteiston havaitsevan yli 0,5 mm syvät viat.





Kuva 25. Gotchan anturisignaali lovipyörälle

Gotcha-pyörävikatunnistimia on ollut Alankomaissa käytössä viisi vuotta. Nyt mittausasemia on jo 42. Baas tarjosi tätä järjestelmää Ruotsin rautateille ja rakensi Kiirunaan Pohjois-Ruotsiin yhden koeaseman. Valmistaja testasi Kiirunassa laitteiston toimivuutta arktisissa olosuhteissa. Gotcha jäi Ruotsin valinnassa toiseksi. Puolan rautateilla on kaksi Gotcha-mittausasemaa. Laitteiston käyttöjärjestelmä modifioitiin yhteensopivaksi Puolan liikenteenohjauksen ASDEK-järjestelmän kanssa. Ison-Britannian Network Raililla on yksi Gotcha-mittausasema koekäytössä Kentin lähellä. Network Rail on korvaamassa nykyiset Wheelchex-laitteensa uusilla, ja Gotcha on mukana kilpailussa. Sveitsiläisellä Rhätische Bahnilla on yksi Gotcha-asema koekäytössä Verain tunnelissa. Bombardier käyttää tämän laitteen mittaustietoja kalustonvalvonnassa. Järjestelmään saa lisävarusteena myös junien melun valvonnan.

### 6.7.5 Wheelchex by AEA Rail

Brittiläinen AEA Technology valmistaa paljon erilaisia laitteistoja rautateille. Yhtiön WheelChex-laitteiston toiminta perustuu kiskoon kiinnitetyillä venymäliuskoilla tehtävään mittaukseen. Kiskon kokoonpuristumista seuraamalla saadaan selville junan paino ja pyörävoiman vaihtelu. Vuonna 2003 Network Raililla oli 16 WheelChex-asemaa käytössä, Skotlannin radoilla oli näistä viisi. Niillä suoritettu valvonta vähensi huomattavasti kiskovaurioita. Network Rail ei silti ole ollut tyytyväinen WheelChex-asemiin. He ovat uusimassa laitteistoja ja ovat hankkineet koekäyttöön ainakin yhden Gotchan./6/

### 6.7.6 Teknis WCM ja WMS

Australialainen Teknis Electronics valmistaa Wheel Condition Monitor -nimistä laitetta pyörävikojen valvomiseen ja pyörien kulumisen seuraamiseen. Teknis Electronicsin laite on toimintamalliltaan hybridilaitte, koska se mittaa pölkyn ja kiskon välistä voimaa sekä kiskon kiihtyvyyttä. Pyörävikojen havainnointi perustuu radan pystysuuntaisen värähtelyn seuraamiseen kiihtyvyyksmittauksen avulla. Laitteistoon kalibroidaan radan taajuusvaste sen tuennan perusteella. Pyörävian tyyppi selvitetään tulkitsemalla sen tuottamaa värähtelyä. Vian suuruus arvioidaan värähtelyn energian perusteella. Järjestelmä tunnistaa myös pitkäaaltiset virheet, joita on vaikeampi havaita.



WMC-mittausasemia on maailmanlaajuisesti käytössä kuusitoista. Näistä kymmenen asemaa sijaitsee Australiassa ja kolme Koillis-USA:ssa. Norjassa on kolme asemaa, yksi Oslosta etelään vievällä radalla sekä Trondheimin etelä- ja pohjoispuolella.

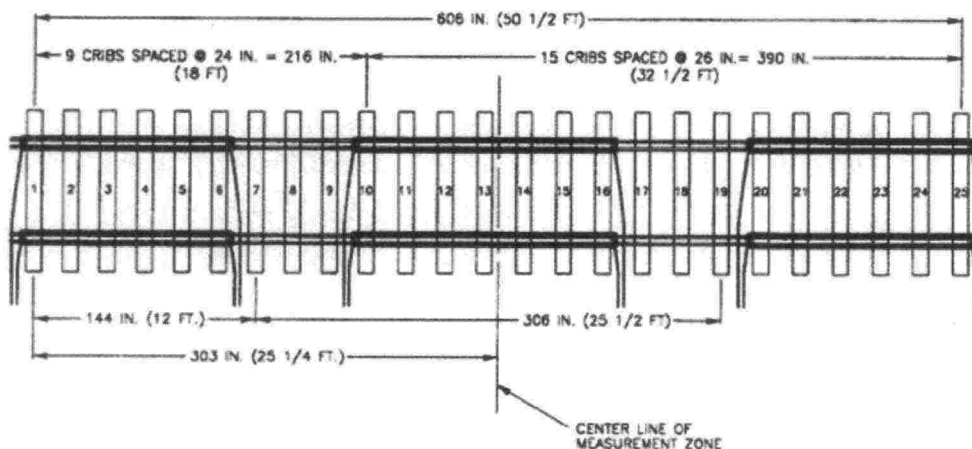
Laitteiston mittausalue on alle kuusi metriä pitkä. Staattisen painon punnitus-tarkkuudeksi ilmoitetaan 130 kilometrin tuntinopeudessa  $\pm 2\%$ , jos akselilla ei ole huomattavia pyörävikoja, ja  $\pm 5\%$ , jos pyörissä on vikoja. Virheilmoitusten toistotarkkuudeksi ilmoitetaan  $\pm 10\%$ . Tällä tarkoitetaan sitä, kuinka tarkasti laitteisto antaa samalle pyörävialle saman ilmoituksen akselipainosta ja ajonopeudesta riippumatta.

Kilpailijoiden patenttien takia Teknis ei voi käyttää voima-anturien tietoja pyörävikojen havaitsemiseen, vaan se tehdään pelkkien kiihtyvyystietojen perusteella. Pelkkien kiihtyvyyssanturien käytöllä voidaan eliminoida turhat vaunun jousitetun ja jousittamattoman massan väliset heilahtelut, jolloin saadaan tarkempi tieto pyörävikojen aiheuttamista voimista. Valmistaja kehuu järjestelmää, koska vaunun kvasistaattinen kuorma ja dynaamiset pyörävoimat mitataan eri tavalla, joten ne eivät sekoitu tuloksia muodostettaessa. Tästä saatavaa hyötyä on vaikea arvioida, koska muut ovat onnistuneet hoitamaan toiminnot ilman kahdennettua mittausta.

Wayside Monitoring System on WCM:n ja muiden Teknis Electronicsin mittalaitteiden tulostenhallintajärjestelmä. Järjestelmään voi liittää vaunujen tunnistuksen, jolloin mittauksista kehittyi monipuolinen tietokanta, josta voi hälytystietojen lisäksi tarkastella kaluston kulumista. /32/

### 6.7.7 Salient Systems WILD

Salient Systems USA:sta valmistaa voima-antureihin perustuvaa pyörävoimien mittauslaitetta. Ensimmäinen Salient Systemsin tekemä pyörävoimien mittauslaitteisto asennettiin Braidwoodiin jo vuonna 1985. Tämän jälkeen laitteisto on kehittynyt hyvin paljon. Tämä laitteisto poikkeaa muista huomattavasti pidemmän mittausalueensa takia. 15 metriä pitkän mittausalueen päissä on kuuden pölkyn mittausyksiköt ja keskellä seitsemän pölkyn mittausalue.

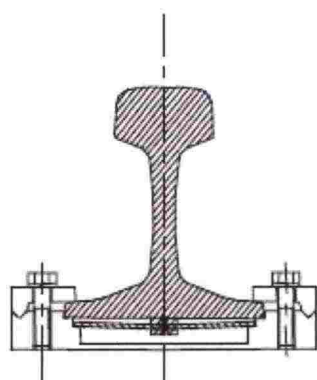


Kuva 26. Salient Systems WILD -järjestelmän anturien sijoitus

Näiden pölkkyjen ja kiskon välissä on voima-anturit. Niiden lisäksi mittausalueiden päissä on leikkausvoima-anturit kiskon neutraaliakselilla. Näiden laitteiden tärkein asiakas on ollut Canadian Pacific Railway, jolla on käytössä 13 laitetta. /33//6/(6.1.1)

### 6.7.8 GE:n Wheel flat detector

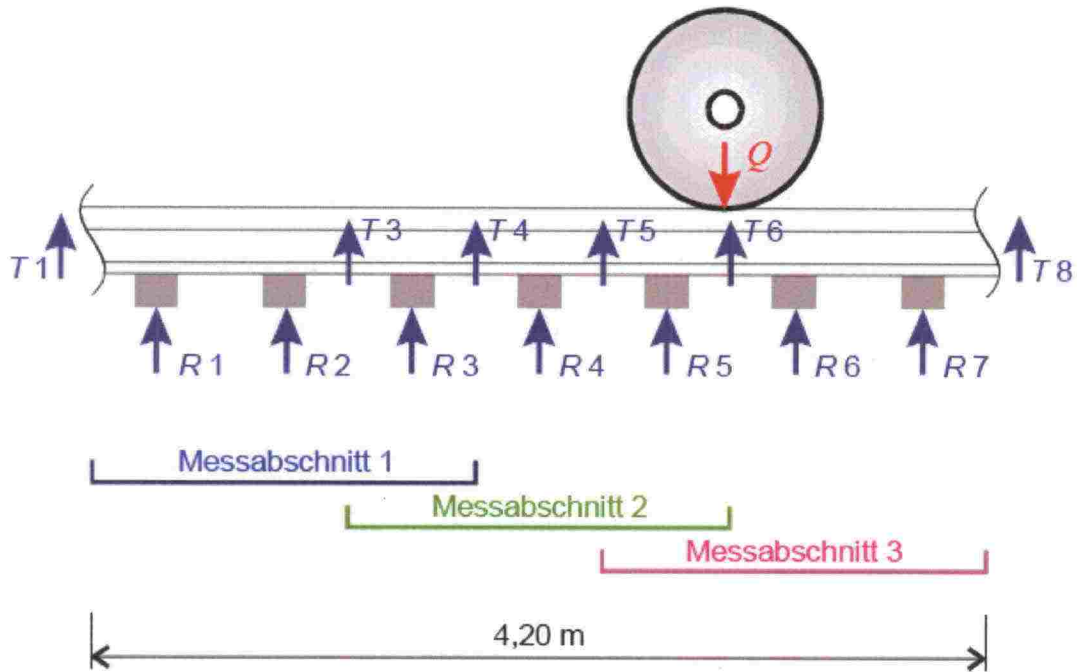
GE ja Genovan yliopisto kehittivät yhteistyössä mahdollisimman yksinkertaisen lovipyörien tunnistusmenetelmän. Tarkoituksena ei ollut selvittää pyörävoimia, akseli-kuormia tai muita pyörävikoja. Prototyypin laitteistossa toisessa kiskossa on kaksi kiihtyvyyssanturia ja toisessa kaksi akselin ohitusta tarkkailevaa anturia. Anturit on sijoitettu 1,8 metrin päähän toisistaan, joten ne ovat noin puolen pyörän kehän mitan päässä toisistaan. Kiihtyvyyssanturit ovat piezo-tyyppisiä. Pieni alumiinin pala on kiinnitetty kiskoon piezoelektronisilla johdoilla ja esijännitetty pienellä lehtijousella (Kuva 27). Anturit on kehitetty juuri tätä laitteistoa varten, ja ne tarjoavat hyvän herkkyyden ja matalat häiriötasot. Pienen anturimäärän takia pyörän tarkkaa paikkaa mitataan koko ajan. Paikka-anturit ovat aivan tavallisia akselin ohitusta tarkkailevia induktiosilmukoita. Hetkellinen akselin paikka selvitetään laskennallisesti ohitustietojen perusteella. Tulos on hyvin tarkka, koska junan nopeus ei ehdi muuttua mittaus-tapahtuman aikana. Laitteiston tarkkuutta on esitetty Kuva 18. /7/



Kuva 27. Laitteiston kiihtyvyyssanturi

### 6.7.9 DafuR ja Atlas

Deutsche Bahn Systemtechnik on kehittänyt oman pyörienmittausasemansa. Aseman nimi DafuR tulee sanoista Detektionsanlage für unrunde Räder eli epäpyöreiden pyörien ilmaisinalteisto. Signal & System Technik myy samaa laitteistoa Atlas-nimellä. Signal & System Technik toimittaa laitteiston komponentit. Järjestelmän kehittämisestä on vastannut DB. Ensimmäinen mittausasema otettiin käyttöön vuonna 1998, vuonna 2001 niitä oli käytössä 17 kappaletta, ja nyt niitä on ainakin 25 kappaletta. Laitteiston mittausperiaate on samantapainen kuin Tamtronin Scalex Wild -järjestelmässä. 4,2 metriä pitkällä mittausalueella on 14 pölkyn ja kiskon välistä voima-anturia ja 12 leikkausvoima-anturia. Mittausalue jaetaan kolmeen osaan. Jokainen osa muodostaa mittaustietonsa kolmen pölkyn mittaustiedoista ja mittausalueen päiden leikkausvoimatiedoista. Anturien sijoitus ja mittausalueiden muodostus on esitetty Kuva 28.



Kuva 28. DafuR mitta-aseman anturointi

Mitta-alueet ovat 180 cm pitkiä eli juuri niin pitkiä, etteivät telin molemmat akselit tai peräkkäisten vaunujen akselit osu yhdelle mitta-alueelle samaan aikaan. Jokainen mitta-alue muodostaa oman voimakuvaajan pyörästä viiden anturin avulla. Mitta-alueet menevät yhden pölkkyvälin verran päällekkäin, minkä ansiosta niiden muodostamat käyrät saadaan yhdistettyä helposti yhdeksi voimakäyräksi, joka kuvaa pyörän ja kiskon välistä voimaa mitta-alueen matkalla. Voimakuvaaja ilmoitetaan ajan funktiona.

Virheiden suuruuden arviointi perustuu dynaamisen voimakertoimen laskentaan. Voimakuvaajasta poimitaan pienin ja suurin arvo sekä lasketaan staattinen voiman arvo.

Näistä lasketaan dynaaminen voimakerroin kaavalla  $\frac{Q_{\text{staattinen}} + |\Delta Q|}{Q_{\text{staattinen}}}$ ,  $\Delta Q$  on suurin poikkeama staattisesta voima-arvosta. Raja-arvo pyörän tarkastamiselle on Saksan rautateillä 1,8.

Vuoden 2006 marraskuussa tullut uusi versio tunnistaa voimakuvaajasta vian suuruuden lisäksi vikatyypin. Vikatyypin tunnistetaan voimakuvaajan muodosta ja vian suuruus voimavaihtelun suuruudesta. Lovipyörästä annetaan loven pituus ja syvyys, ja materiaalikasautumasta ilmoitetaan vian korkeus. Kulkupintavauriosta ilmoitetaan voimavaihtelun amplitudi, ja polygonaalista pyörästä ilmoitetaan aallonpituus ja voima-amplitudin suuruus.

Mitta-asemien tiedot kootaan yhteen keskuspalvelimelle, joka tekee niistä erilaisia taulukoita. Saksassa julkaistaan tiedot siitä, kuinka pyöräviat jakautuvat eri liikennöitsijöiden kesken, sekä siitä, minkälaisia ja kuinka suuria pyörävikoja on löytynyt. Laitteiston keskustietokone osaa myös yhdistää eri mitta-asemilta tulleet saman pyörän mittaukset. Tämän avulla voidaan arvioida laitteiston mittatarkkuutta



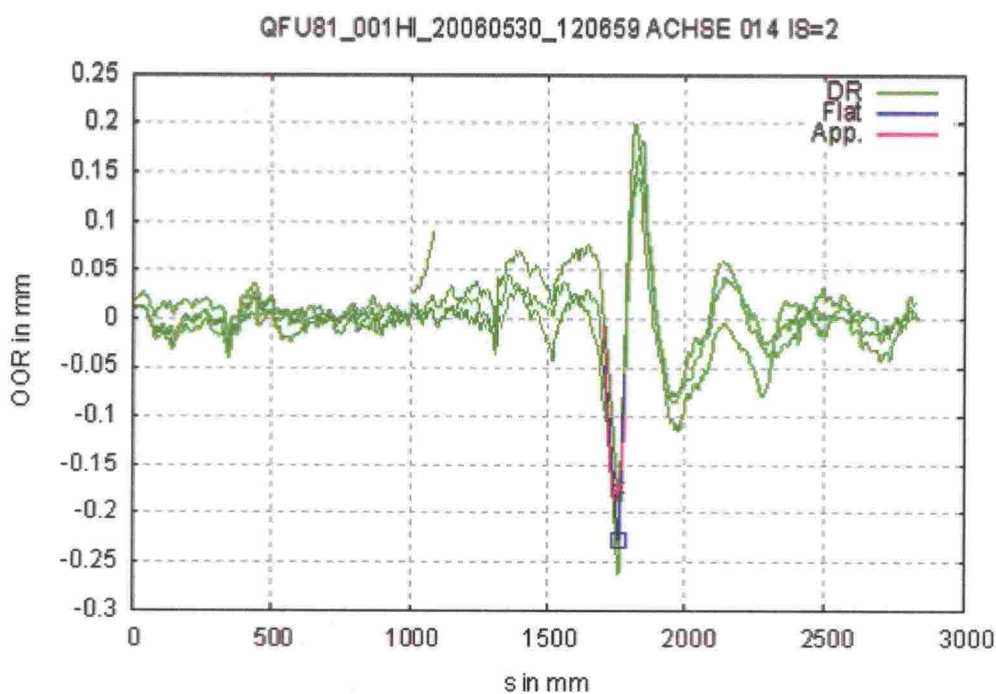
kyseisen pyörävian kohdalla ja saadaan varmuus mittaustuloksesta. Esimerkki voimakäyrien yhdistämisestä on esitetty edellä Kuva 12). /37//35/

#### **6.7.10 Argos systems**

Itävallan rautatiet eli ÖBB on kehittänyt oman järjestelmänsä junien valvomiseen. Argos systems koostuu neljästä moduulista. Kakkosmoduuli mittaa kiskon ja pyörän välistä voimakomponenttia, josta käytetään nimitystä Q-voima. Laitteistossa käytetään HBM:n voima-antureita, ja sen kehityksestä ovat vastanneet insinööritoimistot BAMB ja Psia. Laitteiston nelosmoduuli on standardin ”EN 14363 Kiskoliikenne. Kiskoajoneuvojen kulkuominaisuuksien hyväksymistestaus. Liikkeessä olevan ajoneuvon testaus ja paikallaan olevan testit” mukainen.

Laitteistolle luvataan aivan uskomaton mittaustarkkuus. Q-voiman hajonnaksi ilmoitetaan  $\pm 0,6\%$ . Virhe on kymmenesosan kilpailijoiden tasosta ja vaikuttaa lähinnä yksittäisen anturin mittaustarkkuudelta eikä pyörän ja kiskon välisen voiman mittaustarkkuudelta.

Valmistajan mukaan laitteisto pystyy ilmoittamaan pyörän säteen suuntaisen virheen suoraan millimetreinä. Säteittäispoikkeaman kuvaaja on esimerkkituloksissa kuitenkin samanmallinen kuin muiden tuotteiden voimakuvaajat Kuva 29). Silmämitalla pyörässä on noin 50 mm pitkä ja 0,7 mm syvä lovi. Ainakin se on syvempi kuin 0,25 mm.



Kuva 29. Erään pyörävian mittaustulos Argosilla

### 6.7.11 Markkinoilta hävinneet tuotteet

ABB WILD -nimistä laitetta on markkinoitu 1990-luvun lopulla. Laitteesta ei löytynyt mitään tietoa vanhan esitteen lisäksi. Tuote on luultavasti myyty, tai sen valmistus on lopetettu. /36/

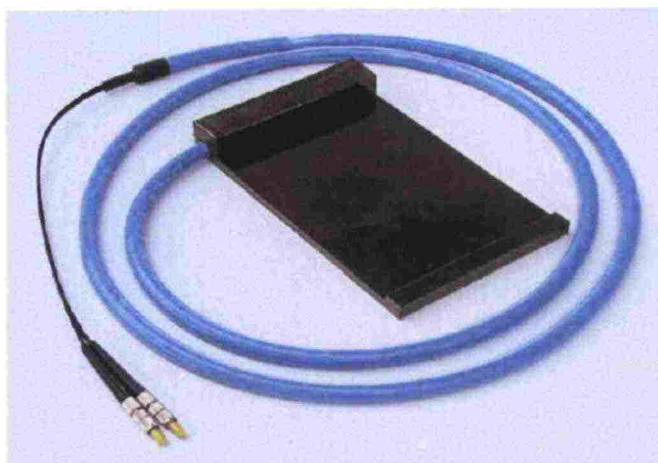
Sercon Railtest-osasto on suunnitellut TracCell-pyörävoimienmittauslaitteen lukuisten muiden mittausslaitteiden lisäksi. Voimamittaus tapahtuu kiskon ja pölkyn välisillä voima-antureilla. Laitteisto asennetaan vaihtamalla alkuperäiset pölkyt anturoituihin

pölkkyihin. Koeaseman rakentamista on suunniteltu vuonna 2000, mutta sen jälkeistä tietoa laitteistosta ei ole. /6/(6.1.3)

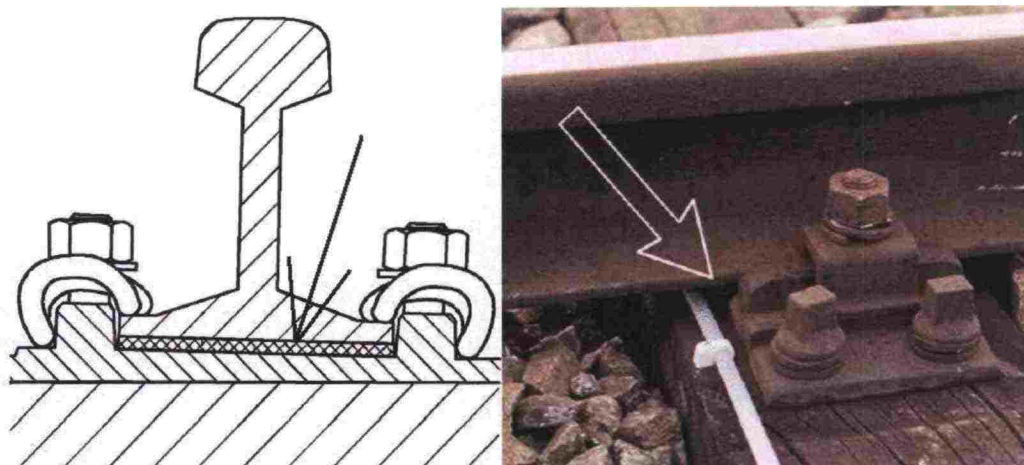
Ruotsalainen Amtab valmistaa junien punnituslaitteita ja on suunnitellut Ruotsin rautateiden kanssa pyörävikailemisen. Pyörävikailemisen tunnistus perustuu kiskon aaltoilun tarkkailuun junan alla. Jos pyörässä on virheitä, aalto ei etene tasaisesti. Laitteisto tallentaa signaalitiedot ja käsittelee ne tietokoneella. Sensorien määrää lisäämällä voidaan parantaa laitteiston mittaustarkkuutta. Yhtään Amtabin laitetta ei ole koekäytössä, eikä niitä ole myyty kenellekään. Ruotsin rautateiden valittua toisen toimittajan tämän laitteen kehitys todennäköisesti loppuu ennen sen valmistumista. /76/

### 6.7.12 Sensorline

Sensorline valmistaa optisen kuidun ominaisuuksiin perustuvia antureita pölkyn ja kiskon välisen voiman mittaamiseen. Sensorlinen anturit ovat erittäin ohuita, ja ne voidaan sijoittaa tavallisen kumieristeen paikalle kiskon ja pölkyn väliin. Tällöin radan rakenne ei muutu ollenkaan anturoinnin takia ja yksi epävarmuustekijä jää pois mittauksista. Kumisen levyn sisällä on pystysuunnassa mutkitteleva valokuitu. Kumin puristuessa kuitu taipuu eri asentoon ja valon kulkunopeus siinä muuttuu. /31/



Kuva 30. Sensorlinen kiskon ja pölkyn välinen voima-anturi

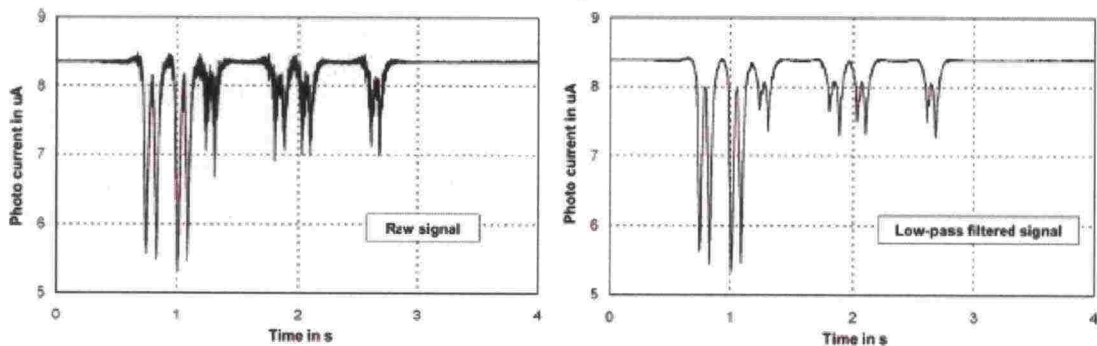


Kuva 31. Sensorlinen anturin sijoitus ratarakenteeseen



Sensorline ei valmista täydellisiä mittausjärjestelmiä vaan toimii pelkkänä anturi-valmistajana. Yhtiön anturit vaikuttavat varsin valmiilta tuotteelta. Antureiden antama voimakuvaaja Kuva 32) on samannäköinen kuin muiden valmistajien pölkkyanturien voimakuvaajat. Näitä antureita hyödyntäviä mittalaitteita voi odottaa markkinoille varsin pian.

Sample Signals: Locomotive BR 218 with two "silver fish" coaches



Kuva 32. Sensorlinen anturin testijunasta tuottama signaali

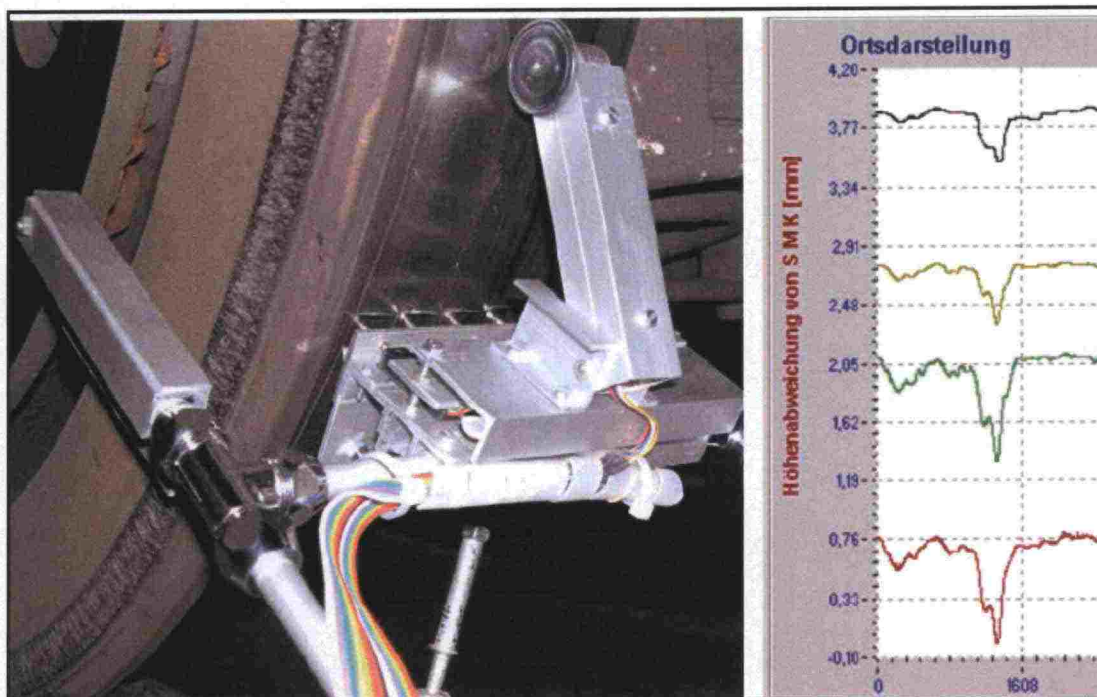
### 6.7.13 Käsikäyttöiset mittalaitteet

Tanskalainen Greenwood Engineering valmistaa Mini-prof-nimistä käsikäyttöistä junan pyörän profiilin mittauslaitetta. Laitteen runko tuetaan pyörän laippaan, missä se pysyy kiinni magneeteilla Kuva 33). Laite mittaa kyseisen kohdan pyörästä kolmessa sekunnissa. Laitteen tulosten tarkastelu ja ohjaus hoidetaan yleensä kannettavalla tietokoneella. Helsingin metrolla on käytössä näitä laitteita. /6/ /29/



*Kuva 33. Mini-prof kiinnitettynä pyörään*

Innotec valmistaa Lascan lisäksi myös muita mittalaitteita rautateille. Pyörien tarkan säteittäisvirheen määrittämistä varten heillä on RUDI-niminen laite. Laite tuetaan kiskoon pyörän vierestä, minkä jälkeen se mittaa pyörän säteittäisheiton neljältä eri kohdalta kulkupinnalta Kuva 34).



*Kuva 34. RUDI, paikallaan olevan pyörän mittalaite*



## 6.8 Vaunujen tunnistus

Pyörien vikatiетоjen tehokas hyödyntäminen vaatii automaattisen vaunujen tunnistuksen, jotta kaikki mittaukset yhdistyvät tiettyyn pyöräkertaan. Ilman automaattista tunnistusta pyörien mittaustiedot täytyy yhdistää käsityönä junien liikennöinti- ja kokoonpanotietojen tai videon perusteella vaunuihin. Vaunujen kyljessä lukee huomattavan suurin merkein niiden rekisterinumero. Numero on luettavissa jopa kännykällä kuvatusta videosta. Tunnistuksen avulla viallinen pyörä löydetään junan seuraavalla pysähdyspaikalla nopeasti ja varmasti. Vaunujen tunnistuksen avulla voidaan seurata pyöräkerran kulumista, koska kaikki pyöräkerran mittaustiedot yhdistyvät kyseiseen pyöräkertaan. Mittauksista nähdään dynaamisen voimavaihtelun suuruuden kehittyminen. Polygonaalinen tai aallottunut muoto kehittyy pyörään pikkuhiljaa, joten epäpyöreiden kehittyminen liian suureksi voidaan ennustaa hyvän seurannan avulla.

Yhdellä mittausasemalla mitataan vuorokaudessa 20–40 junaa, joissa on 8–250 akselia. Huomautuksia voi tulla kymmenille akseleille, jolloin maanlaajuisesti joka päivä pitäisi yhdistää yli sata voimakuvaajaa ja vaunua toisiinsa hälytysten takia. Vikatiетоjen yhdistäminen junatietoihin käsityönä ei olisi tämän takia käytännössä mahdollista. Näiden lisäksi kaikki muut mittaustiedot täytyisi yhdistää jotenkin vaunuihin, jos pyörien kulumista halutaan seurata. Tällä hetkellä Suomen radoilla liikennöi pelkästään VR, jolla on kaluston liikkeiden seuraamiseen monipuolinen Caravan-järjestelmä. Tulevaisuudessa radoilla tulee liikkumaan myös muiden operaattorien kalustoa, ja niillä tulee olemaan omat järjestelmänsä. Erilaisten järjestelmien ja omien tietojen suojaamisen takia vaunujen tunnistus ei voi perustua operaattorien tietojärjestelmien hyödyntämiseen.

Pyörävikatunnistimien valmistajilta löytyy pääasiassa RFID-tekniikkaan perustuvia tunnistusjärjestelmiä. Kaikkiin alueella liikkuviin vaunuihin kiinnitetään aktiivinen tai passiivinen tunnistinlätkä. Vastaavasti pyörävikojen mittauspaikeille asennetaan vastaanottimet, jotka tunnistavat ohi ajavien junien vaunutiedot. Aktiiviset tunnistinlätkätkä toimivat paremmin myös suurissa nopeuksissa, mutta ne vaativat virtalähteen ja maksavat enemmän. RHK on suunnitellut, että Suomessa otettaisiin käyttöön aktiivisiin tunnistimiin perustuva vaunujen seuranta pyörävikatunnistimien käyttöönoton yhteydessä, jotta niistä saataisiin kaikki hyöty irti. Tämä on nykyisten tietojen perusteella ainoa järkevä tapa hoitaa asia.

Suomen kiskoilla liikkuu aktiivisesti noin 16 000 vaunua. Kotimaista kalustoa on noin 250 dieselveturia, 150 sähkömoottorivaunua, 150 sähköveturia, 16 dieselmoottorivaunua (kiskobussia), 1 100 matkustajavaunua ja 11 000 tavaravaunua. Kotimaisen kaluston lisäksi radoilla liikkuu päivittäin 4 000 venäläistä vaunua. Kotimaisen kaluston varustaminen tunnistinlätkillä on suuri ja kallis projekti. Vaunukohtaiset kulut eivät kuitenkaan ole montaa kymmentä euroa, ja tunnisteita voidaan hyödyntää myös muuhun käyttöön. Vaunujen elinkaari on myös hyvin pitkä, joten uusia vaunuja tulee liikenteeseen vain pieniä määriä vuodessa. Venäläisten vaunujen varustaminen muuten kuin edullisilla passiivisilla tunnistinlätkillä tuskin onnistuu.



## 6.9 Pyörävikahavaintojen esittäminen

Mittalaitteiston havaitsemien voima-, kiihtyvyy- tai taipumapoikkeamien perusteella viat jaetaan kolmeen ryhmään vikojen suuruuden mukaan. Ryhmiä voisi kuvailla seuraavasti:

1. Vakava hälytys: juna pysäytetään seuraavaan sopivaan paikkaan ja vika tarkistetaan.
2. Hälytys: vika tarkistetaan määränpäässä.
3. Huomautus: pyörässä havaitaan vika, joka ei aiheuta sääntöjen perusteella välitöntä korjaamista mutta on syytä korjata kohtalaisen pian.

Vikarajat määräytyvät sen mukaan, kuinka suurella nopeudella kalustolla ajetaan, ja siitä, onko käytössä tiukennetut talvisäännöt. Vikahavainnoissa tulisi esittää vian vakavuuden lisäksi sen tyyppi ja arvio vian suuruudesta.

Vikahälytykset ja huomautukset tulee esittää usealle taholle ja usealla eri tavalla vastaanottajan tarpeiden mukaan. Suomessa tiedot tulisi toimittaa seuraaville tahoille:

- liikenteenohjaajat
- kalustonseuranta
- eri kalustovastaavat
- ratahallinto
- laitteiston ylläpito.

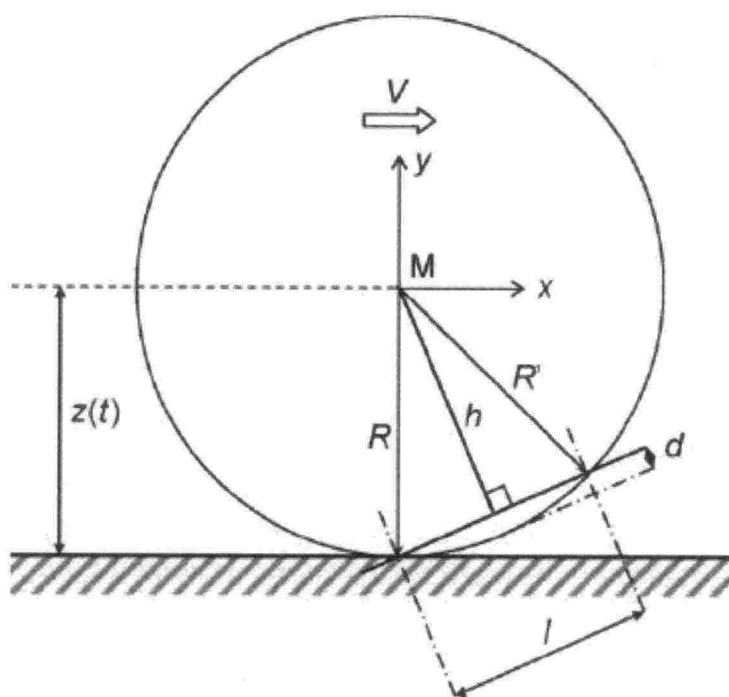
Liikenteenohjaajilla ei ole tarvetta seurata pieniä pyörävikoja aktiivisesti, vaan he tarvitsevat tiedot välittömästi ainoastaan vakavista vioista ja suurista ylikuormista, jotka aiheuttavat välittömiä toimenpiteitä. Liikenteenohjaajat hoitavat vakavien hälytysten aiheuttamat junien pysäytykset. Liikenteen ohjauksesta toimitetaan tieto myös määränpäähän, jos junissa havaitaan vikoja, jotka tulisi tarkastaa tai korjata määränpäässä.

Liikennöitsijöiden valvomoissa kaluston kunnonseurantaan erikoistuneille ihmisille tulee tarjota kaikki heidän oman kalustonsa mittaustieto kaikilta mittausasemilta. Heidän tulisi nähdä käyttöliittymästään kaikenlaiset hälytykset, varoitukset ja huomautukset. Se, miten pyörien kulumisesta kertovien huomautusten jälkeen toimitaan, on täysin liikennöitsijöiden päätettävissä. Jotta liikennöitsijät osaisivat toimia oikein, niille tulee antaa mahdollisimman paljon tietoa pyörän mittauksesta. Anturitietojen analysointi on kehittynyt viime aikoina huomattavasti, ja tietokoneet osaavat tulkita voimakuvaajien muodoista vikatyypin, mutta harjaantunut ihmissilmä on vikojen tulkinnassa korvaamaton. Tämän takia liikennöitsijöille tulee tarjota mahdollisuuksien mukaan mittauksien voimakuvaajat. Kaikki vikatiedot tulee tallentaa siten, että uusia mittaustuloksia pääsee vertaamaan saman pyöräkerran aikaisempiin mittauksiin. Sama vaunu voidaan mitata useaan kertaan sen kulkiessa Suomen halki, joten mittauksen luotettavuus paranee toistojen myötä.

Huoltotoiminnan suunnittelijoille tulisi esittää pyörien kulumishistoriaan perustuva ennuste pyörien seuraavasta huollon ajankohdasta. Polygonaalisen pyörän ja rosopyörän virhe kasvaa hitaasti. Kulumisen kehittymisen perusteella pyörille voisi ennustaa sopivan huoltoajan. Tämä olisi oleellinen palvelu kaluston omistajille. Oletettavasti se vähentäisi myös huonoilla pyörillä liikennöintiä radoilla, jolloin siitä olisi hyötyä myös radanpitäjälle.

## 7 LOVIPYÖRÄN AIHEUTTAMAN VOIMAN LASKENNALLINEN TARKASTELU

Lovipyörän aiheuttaman voiman suuruus riippuu loven syvyydestä, ajonopeudesta, akselipainosta, jousittamattomasta akselimassasta ja radan jousto-ominaisuuksista. Matemaattisissa tarkasteluissa käytetään yleensä täysin tasaista lovea, jonka reunat eivät ole pyöristyneet (kuva 35). Lovipyörän voimavaikutukselle on johdettu useita erilaisia laskentakaavoja useiden eri tutkimuksien perusteella. Ilmiöiden laskeminen on hyvin vaativaa, eikä yksiselitteistä oikeaa laskentatapaa ole olemassa. Seuraavat kaavat ovat viimeisimmistä asiaa käsittelevistä tutkimuksista.



Kuva 35. Lovipyörän malli /18/

Loven syvyys  $d$  voidaan laskea tasaisen osan pituuden ja pyörän säteen avulla.

$$d = R - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}l^2}$$

Lovipyörän voimavaikutuksen kaava: /18/

$$F_{\max} = \mu \frac{mV^2 \sqrt{d} (1/K_{\min, \text{tread}} - R)}{\sqrt{8R^5}};$$

$$0 \leq K_{\min, \text{tread}} \leq \frac{1}{R}$$

$$d = d_{\text{eff}} = \frac{4\beta d R (\sqrt{\beta R} - V)^2}{(\beta R - V^2)^2};$$

$$\beta = g + \frac{F_{\text{stat}}}{m}$$

$$V \leq V_{\text{erit}};$$

$$V_{\text{erit}} = \sqrt{\left(g \frac{F_{\text{stat}}}{m}\right) R}$$

Termien selitykset:

$d$	loven syvyys [m]
$d_{eff}$	loven tehollinen syvyys [m]
$F$	dynaaminen pyörän ja radan välinen voima [N]
$F_{max}$	radan ja pyörän välinen maksimivoima [N]
$F_{stat}$	staattinen pyörän ja radan välinen voima [N]
$g$	gravitaatiovoima [ $m/s^2$ ]
$l$	loven pituus [m]
$m$	pyörän jousittamaton massa [kg]
$p$	jousittamattoman massan vertikaalinen hitausmomentti [kgm/s]
$R$	pyörän säde [m]
$t$	aika [s]
$x$	pyörän painopisteen vaakasuora koordinaatti [m]
$y$	pyörän painopisteen pystysuora koordinaatti [m]
$z$	pyörän keskipisteen ja radan välinen etäisyys [m]
$\eta$	radan jouston häviökerroin [-]
$K$	pyörän kaarevuus [ $m^{-1}$ ]
$\mu$	vakio [-]
$\omega$	pyörän kulmanopeus [rad/s]

Schrammin kaavalla voidaan laskea karkeasti pyörän aiheuttama jännitys kiskon alapinnalla, jossa pyörän aiheuttama vetojännitys on suurimmillaan. Kaavalla voidaan laskea myös viallisten pyörien vaikutus kiskoon käyttämällä pyöräkuormana pyörävoiman maksimiarvoa.

$$\sigma = \frac{(15700 + 1,1 * Q) \sqrt{d}}{W}$$

$Q$  = pyöräkuorma [kN]

$d$  = loven syvyys [mm]

$W$  = rataiskkon taivutusvastus [ $cm^3$ ]

$\sigma$  = jännitys rataiskossa [MPa]

Schramm on myös esittänyt korrelaatiokerroimen, joka ottaa huomioon nopeuden vaikutuksen taivutuskuormitukseen:

$$\omega = 1 + 0,33 * v^2 * 10^{-4}, v < 100 km/h$$

$$\omega = 1 + 0,45 * v^2 * 10^{-5} + 1,5 * v^3 * 10^{-7}, v > 100 km/h$$

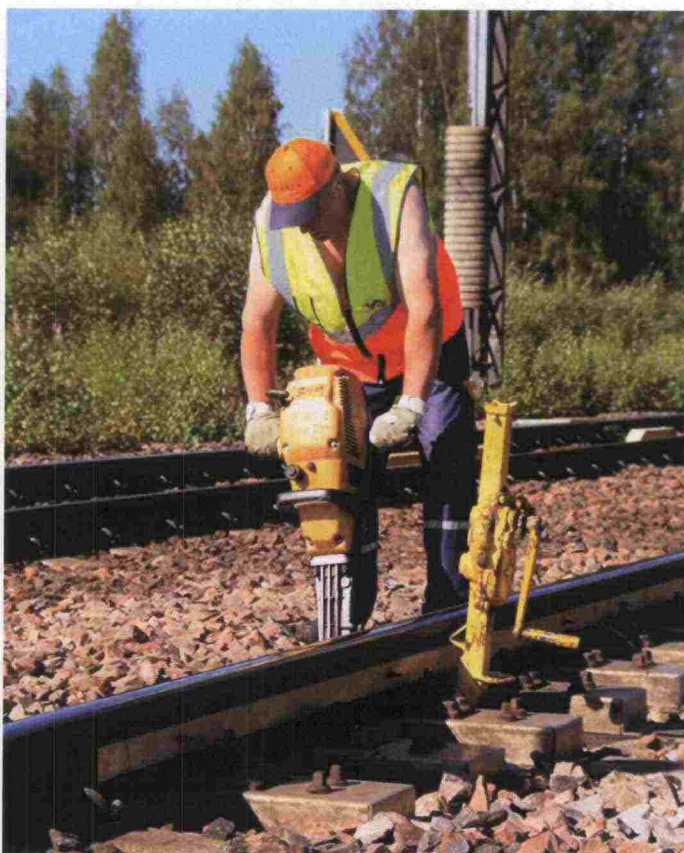
Näiden kaavojen avulla voi laskea, minkä suuruiset loviviatiot ovat vaarallisen suuria raiteiden kestävyyskannalta. Tarkastelu on rajattu tämän työn ulkopuolelle.



## 8 KENTTÄTUTKIMUKSET UTIN SCALEX WILD -ASEMALLA

Tämän työn kokeelliset mittaukset on suoritettu Tamtronin Scalex Wild -prototyypillä Utissa. Utti sijaitsee Kouvolan itäpuolella rataosuudella Kouvola–Luumäki. Rataosuus on Suomen vilkkain, kun vilkkautta mitataan kuljetettuina bruttonneina /47/. Diplomityön tekemisen alkaessa toukokuussa 2007 Tamtronin mittalaitteet olivat päivitettävänä Etteplan oy:llä. Laitteisto asennettiin uudestaan Uttiin kesäkuun puolivälissä. Ohjelmistoissa ja mittakorteissa esiintyi kuitenkin asennuksen jälkeen erilaisia ongelmia, joiden korjaaminen eteni hyvin hitaasti, sillä laitteistosta vastaavat olivat vuorotellen kesälomalla. Loppukesästä laitteiston kehitystyöstä vastannut Vesa Pajunen alkoi aktiivisesti viedä kehitystä eteenpäin. Mittausdataa kerättiin raakoina taulukoina, joista pääsi analysoimaan mittalaitteen toimintaa. Elokuun alussa laitteisto tuotti mittausdataa kaikista junista. Toiminta ei kuitenkaan ollut täydellistä, koska mittauslaitteisto loi välillä haamutiedostoja ja teki virherivejä mittausdataan, jolloin analysointiohjelma ei pystynyt käsittelemään niitä.

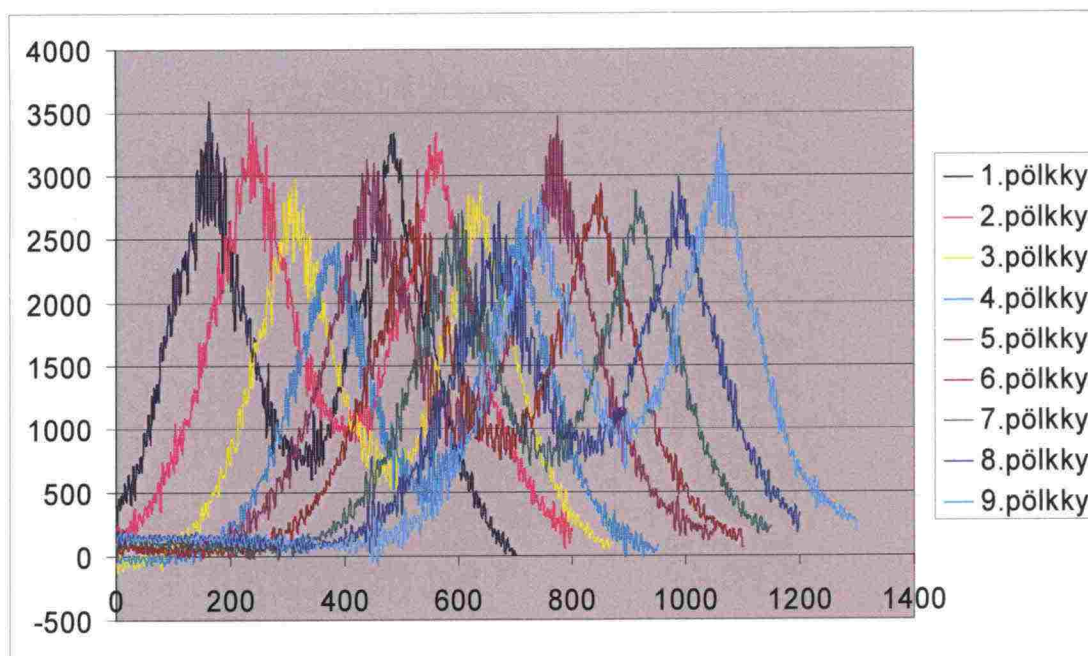
Radan oikeanpuoleisessa kiskossa havaittiin huomattava painauma ennen mittausasemaa, ja mittausaseman pölkkyt joustivat silminnähden junien alla. Tämän epäiltiin vaikuttavan mittalaitteiden toimintaan, ja Tamtron tilasi VR-radalta parannustyöt. Elokuun kahdeksantena rata oikaistiin ja pölkkyjen tuentaa parannettiin perinteisellä menetelmällä käsityönä Kuva 36). Rataa nostettiin veivattavalla tunkilla niin, että se oli silmämääräisesti suorassa. Tämän jälkeen nostokohdan molemmille puolille pölkkyjen alle painettiin sepeliä täryttimellä.



Kuva 36. Utin mitta-aseman pölkkyjen tuentaa

Kokeneet tekijät saivat tällä varsin yksinkertaisella menetelmällä suoristettua kiskon ja korjattua mittapölkkyjen tuennan. Tuennan tasoa tutkittiin piirtämällä pölkkyjen voima-anturien tiedoista kuvaajat yhden telinyhteyksen ajalta. Ennen tuennan korjausta eri pölkkyjen voima-arvojen huiput vaihtelivat välillä 1 200...5 500, vaikka voiman kuuluisi olla sama jokaisen pölkyn ja kiskon välissä. Tuennan korjauksen jälkeen pölkkyvoimien maksimiarvo asettui arvoon  $3\ 000 \pm 500$  Kuva 37). Arvot ovat suoria anturien signaaliarvoja, eivät voima-arvoja newtoneina. Jos pölkkyt olisi tuettu yhtä hyvin, tulisi jokaisen pölkylle samanlainen voimakuvaaja. Sattumanvarainen sepelipatja ei voi tarjota kaikille pölkkyille täysin samanlaista tuentaa. Nämä satunnaisvaihtelut huomioiden radantuenta saatiin niin hyvään kuntoon kuin mahdollista.

Hyvin onnistuneen korjauksen hyöty oli lyhytaikainen, koska kuukautta myöhemmin tulokset olivat heikentyneet korjausta edeltävään suuntaan. Ensimmäisen pölkyn ja kiskon välinen voima oli puolet keskimääräisestä ja viidennen pölkyn neljänneksen enemmän. Tämän selvittyä alettiin suunnitella parempaa tuennan korjausta mittaustaikalle. Mittaustavan takia tuentaeroilla ei ole teoriassa vaikutusta tuloksiin, koska kaikkien pölkkyjen välillä vaikuttava leikkausvoima mitataan ja viereiselle pölkylle kulkeutunut voima tiedetään. Huonommin tuettujen pölkkyjen signaalissa on kuitenkin aina enemmän kohinaa, joka voi aiheuttaa virheitä leikkausvoima-anturitietoihin, joiden avulla seurataan junan liikkeitä mittauksen aikana. Kohina johtuu huonommin tuettujen pölkkyjen suuremmasta värinäliikkeestä.



Kuva 37. Pölkkyvoimien vertailua

Mittaustulosten aktiivista seuranta varten Utin mitta-asemalta järjestettiin etäyhteys Tamtronin Westendin toimistolle. Tiedonkeruu ja analysointi asennettiin uudelle koneelle, johon oli etäkäyttöyhteys. Analysointiohjelmiston toimittaja (NDS) säätö myös ohjelman asetuksia ja sai sen toimimaan huomattavasti entistä sujuvammin. Mittauksessa kertyvän suuren tietomäärän takia usean junan täydellisiä mittaustietoja ei voi pitää katseltavana. Laitteistoa testattaessa kertyy koko ajan myös tuloksia junista, ja samalla alkaa hahmottua kuva ohikulkevan kaluston pyörien kunnosta ja ylikuormista.



Syyskuun alussa laitteisto tuotti luotettavan tuntuisia tuloksia reilusti yli puolesta junista, ja tuloksia ruvettiin keräämään systemaattisesti talteen. Tulosten keruulla kartoitettiin, kuinka paljon viallisia pyöriä laitteisto havaitsee ja kuinka paljon missäkin junatyypissä esiintyy vikoja. Tulokset olivat hyvin samantapaisia päivittäin muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Päivittäin noin viidessä junassa oli huomautusrajan ylittäviä pyöriä yli kymmenessä pyöräkerrassa. Seurannan aikana havaittiin myös muutama juna, jossa oli yli sata viallista pyöräkertaa. Tuloksia ei käyty vertaamassa juniin, joten osa vikailmoituksista voi olla peräisin mittalaitteen häiriöistä.

Taulukossa 7 esitetään yhden päivän mittaustulokset. Taulukko on tehty niillä tiedoilla, jotka analyysiohjelma on antanut. Oikeasti osa vetureista on ollut Sr2-mallisia ja painot ovat olleet hieman suurempia. Erinäisten toimintahäiriöiden takia mittalaitteet eivät minään päivänä analysoineet kaikkia junia. Tulokset eivät myöskään osoittaneet mitään tiettyjä junia, joissa olisi muita enemmän vikoja.

Yleistäen kaluston kunnosta voidaan kertoa seuraavaa:

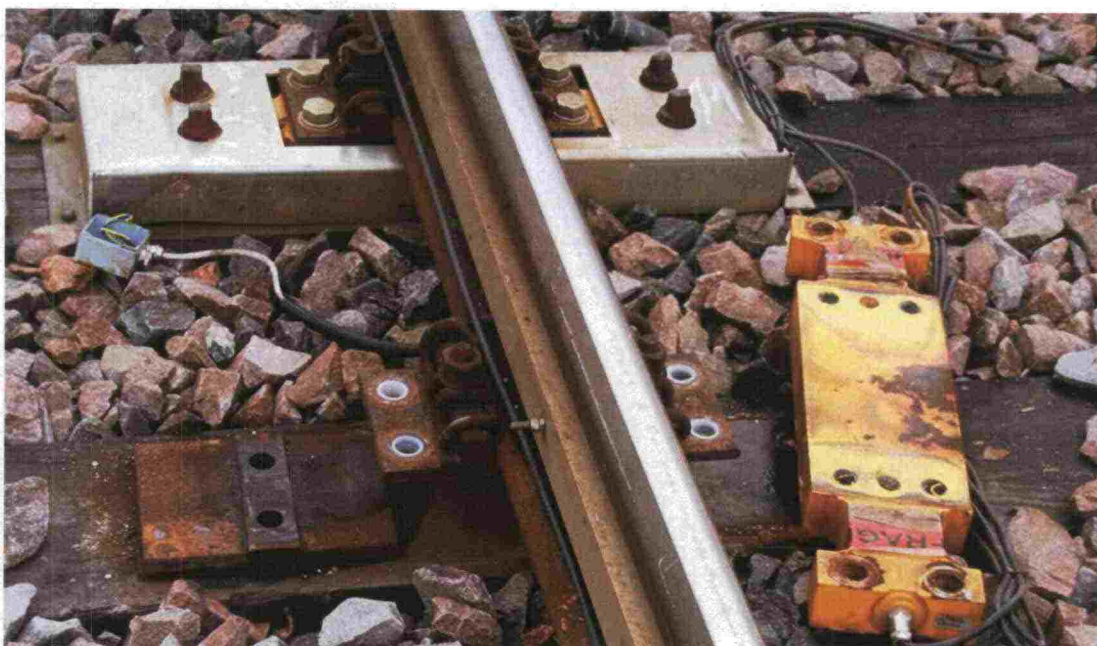
- Yksikään Pendolino ei saanut huomautusta.
- Muutamissa IC-junissa havaittiin polygonaalaisia pyöriä.
- Venäjän matkustajaliikenteessä havaittiin muutamia lovipyöriä, sama vika toistui jopa viikon ajan ennen korjausta.
- Kotimaisessa tavaraliikenteessä havaittiin päivittäin useita lovipyöriä ja viikoittain yli 2,5 tonnia (akselikohtaisia) ylikuormia.
- Lähes kaikissa venäläisissä tavarajunissa havaittiin pyörävikoja. Vikojen määrä vaihteli yhdestä huonosta pyöräkerrasta yli kolmeen kymmeneen.
- Venäläisissä junissa ei havaittu yli 2,5 tonnin ylikuormia.



Taulukko 7. Lovipyörätuloksia Utin mittausasemalta

maanantai 1. lokakuuta	Vaunut	Nopeus	Paino	Hälytykset	
				Vaunut	Akselit
1:01	2sr1+50	62	4 195	14	19
1:12	sr1+18	74	1 018	4	5
1:27	sr1+25	78	1 273	2	2
1:48	2sr1+40	57	2 363	15	32
6:23	2sr1+47	63	4 473	15	21
6:37	sr1	83	81,856		
7:05	sr1+7	137	427	1	1
7:58	sr1	138	83,461		
8:11	6sm3	136	330		
8:51	2sr1+55	57	4506	1	2
9:12	sr1+6	137	388		
9:30	sr1+12	120	761	1	1
10:38	sr1+7	117	461		
10:58	sr1+12	78	1129	1	1
12:12	sr1+7	137	432		
12:33	dr14+24	71	663	4	4
14:15	dr14+16	69	887	3	4
15:15	6sm3	138	333		
16:13	2sr1+26	58	2170	1	2
16:33	2sr1+35	78	2126	1	1
17:37	sr1+25	83	586	10	14
18:15	sr1+7	141	438	2	2
18:40	sr1+13	87	1215		
19:00	sr1+9	135	506		
19:23	sr1+35	78	1924	3	3
21:22	sr1+6	137	383		
21:48	sr1+26	80	1497	1	1
22:07	sr1+22	78	1522		
22:20	2dr14+38	70	726	7	8
22:24	2sr1	101	163,181		
23:19	sr1+29	76	627	9	14

Raiteeseen kantavana osana toimivat anturit joutuvat hyvin suurien rasitusten alle, ja niiden huoltaminen tai vaihtaminen on kallista suuren työvoimatarpeen takia. Lokakuun lopussa yksi kiskon ja pölkyn väliin sijoitettu anturi lakkasi toimimasta, ja se jouduttiin vaihtamaan. Työhön tarvittiin sähkömies hoitamaan anturin kytkennät ja rata-työntekijöitä hoitamaan anturin irrotus ja sen kiinnitys pölkkyyn sekä kiskoon. Työ pystyttiin hoitamaan liikennettä häiritsemättä kolmessa puolen tunnin jaksossa ohittavien junien välillä. Kiinnityspulttien ja sähkökytkentöjen irrotuksen jälkeen kisko nostettiin hieman tunkilla, minkä jälkeen anturin pystyi vetämään kiskon ja pölkyn välistä pois (Kuva 38). Myöhemmin anturi tutkittiin, ja viaksi paljastui yhden johdon irtoaminen anturin sisällä.



Kuva 38. Pölkkyanturi irrotettuna paikaltaan, taustalla toinen paikallaan

Jotta tulokset saataisiin toimitettua mahdollisimman tehokkaasti niitä tarvitseville, mittaustulosten seuraamista varten tehtiin internetkäyttöliittymä. Utin analyysiohjelma lähettää jokaisesta junasta tietopaketin Tamtronin palvelimelle. Jokaisen päivän tuloksista kerääntyy taulukko, jossa on perustiedot mitatuista junista sekä niiden aiheuttamien hälytysten määrä (Kuva 39). Hälytystiedoista pystyy avaamaan myös tarkan junakohtaisen raportin, josta selviää, millä akseleilla viat on havaittu. Epäpyöreysvikojen ja ylikuormatietojen lisäksi TTIS antaa junasta vaunukohtaisen punnitusraportin.

Last trains			Weighings and alerts						
Time	Number of locomotives	Number of wagons	Total weight	Over speed alert	Number of over load wagons	Number of over load axles	Number of flat wheels		
							C	W	N
01:06:17	2	18	1187.510		3	4			1
01:32:50	2	61	4568.160					1	10
01:44:27	1	11	533.025				3		3
02:27:38	1	20	921.727		4	4			
04:06:06	1	26	1670.900						1
05:46:09	2	56	4580.460				1		12
07:01:15	5	3	384.229						1
08:07:14	6	0	330.294						
09:06:47	7	0	395.100						1
09:33:51	1	29	592.629				7	1	8
09:53:32	2	6	609.770		1	1		1	2
10:17:34	1	12	771.607						

Kuva 39. Tamtron Train Information System tulossivu 7.12.



Tiedon jakaminen verkossa hallitaan nykyään hyvin luotettavasti, eikä parin kuukauden seurannan aikana havaittu mitään teknisiä ongelmia verkkokäyttöliittymässä. Käyttöliittymän tekeminen tulee olemaan haastavaa, koska siinä pitää esittää todella paljon erilaista tietoa.

Tulosten vaivaton seuraaminen mahdollisesti kaikkien mittaustietojen arvioimisen yli kuukauden ajalta. Pyörävikojen kohdalla kaikki aiemmat havainnot pätevät edelleen. Niiden lisäksi havaittiin muutamia pitkiä tyhjiä junia, joissa oli todella paljon hyvin huonokuntoisia pyöriä. Mittaustulokset aiheuttaneita junia yritettiin selvittää VR:ltä, mutta he eivät halunneet kommentoida asiaa tarkemmin. Aikataulutietojen perusteella osa näistä junista olisi ajanut idän liikennettä. Näissä junissa tiedetään olevan välillä paljon vikoja. VR kertoi myös siirtävänsä ajoittain huonokuntoisia vaunuja ison erän kerralla korjattavaksi. Mittausten perusteella vaunuissa oli kuitenkin lukuisia niin suuria vikoja, ettei niitä olisi saanut siirtää. Tammikuun puolivälissä havaittiin peräkkäisinä päivinä kaksi juna, jotka aiheuttivat todella paljon pyörävikahälytyksiä. Junien kokoonpano saatiin selvitettyä. Molemmat junat koostuivat pääasiassa tyhjästä idän liikenteen VGK-vaunuista. Kyseessä olivat aivan tavalliset idän liikenteen vaunut, ja niiden akseleista puolet oli huomattavasti viallisia. Vaunuja tuskin oltiin korjaamassa Suomessa, joten samat erittäin huonokuntoiset vaunut palasivat kuormattuina Venäjälle pahasti kolkottaen.

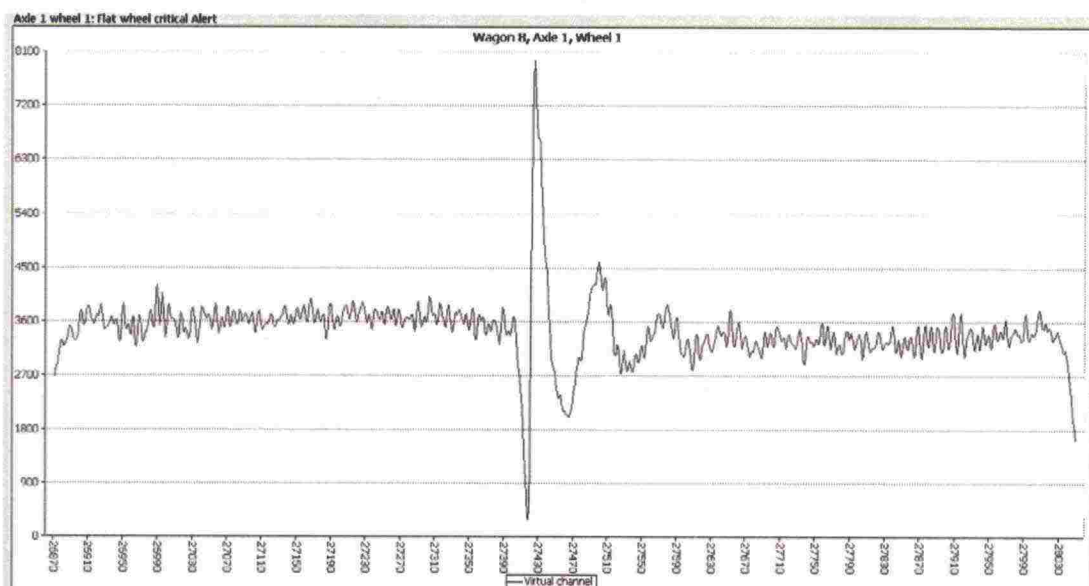
Suuntaa-antavan punnituksen kalibroinnin jälkeen ylikuormien hälytysraja laskettiin arvoon 23 tonnia (500 kg:n ylitys). Lähes päivittäin havaittiin junia, joilla oli ylikuormaa yli kahdellakymmenellä akselilla. Ylikuormahälytykset tulivat suurelta osin peräkkäisistä vaunuista, ja hälytysten yhteydessä vaunujen kokonaispaino oli myös yli suurimman sallitun. Tämän perusteella tietyillä kuljetuksilla ahnehditaan hieman liikaa kuormaa. Vaunukohtaiset ylikuormat pysyivät alle kahdessa tonnissa, joten ylikuormat eivät olleet kovin suuria vaunujen 60 tonnin kantavuuteen nähden. Lastin sijoittelussa on myös ongelmia, koska päivittäin havaittiin lukuisia vaunuja, joissa toisessa päässä oli 1–3 tonnia ylikuormaa, vaikka vaunun kokonaispaino pysyi laillisena. Seurannassa havaittiin myös yksi törkeästi ylipainoinen juna. Kuudessa peräkkäisessä vaunussa oli yhteensä yli 40 tonnia ylikuormaa, ja pahin akselipaino oli 26,6 tonnia. Juna tuskin oli erikoiskuljetus, koska ylikuormattuja vaunuja oli niin monta peräkkäin.

## 8.1 Voimakäyrän ja vikatyypin välinen yhteys

Kirjallisuudessa esitetään, minkälainen voimakuvaaja syntyy mistäkin pyörävika-tyypistä. Utin mittaustuloksista etsittiin kuvaajia, joissa näkyisi mahdollisimman selkeästi näitä vikoja.

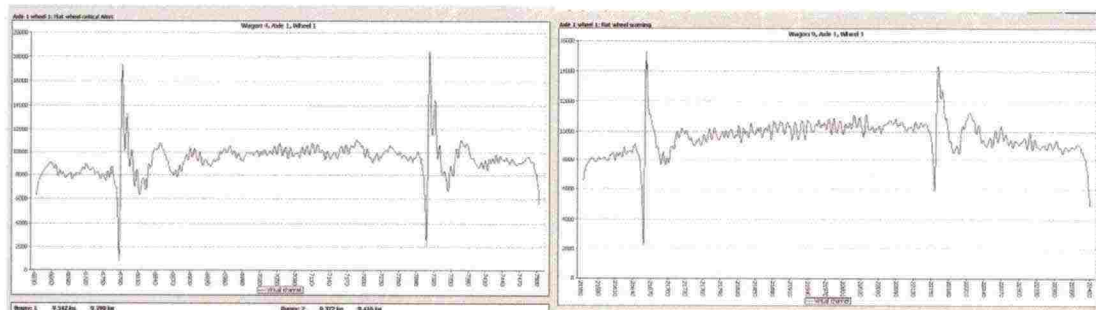
Paikallisen tasaisen kohdan tunnistaminen on helpointa, ja se on yleisin pyörässä esiintyvä vika. Loven tai kuoriutumisesta johtuvan kolon alkaessa kiskon jännitys laukeaa, kisko lähtee nousemaan ylöspäin ja pyörä laskeutumaan alaspäin. Pystyliike jatkuu, kunnes kisko ja pyörä törmäävät toisiinsa suurella voimalla, mikä näkyy voimakuvaajassa erittäin nopeana voiman kasvuna. Tämän jälkeen voima laskee vielä alle staattisen arvon ennen kuin palaa vakioksi. Koko ilmiö on erittäin nopea: esimerkkikuvaajassa ensimmäinen terävähuippuinen aalto on kestänyt alle 0,01 sekuntia. Lovipyörän voimakuvaaja esitetään Kuva 40. Lovi on osunut tässä kuvassa keskelle mittausaluetta, joten se näkyy vain kerran.



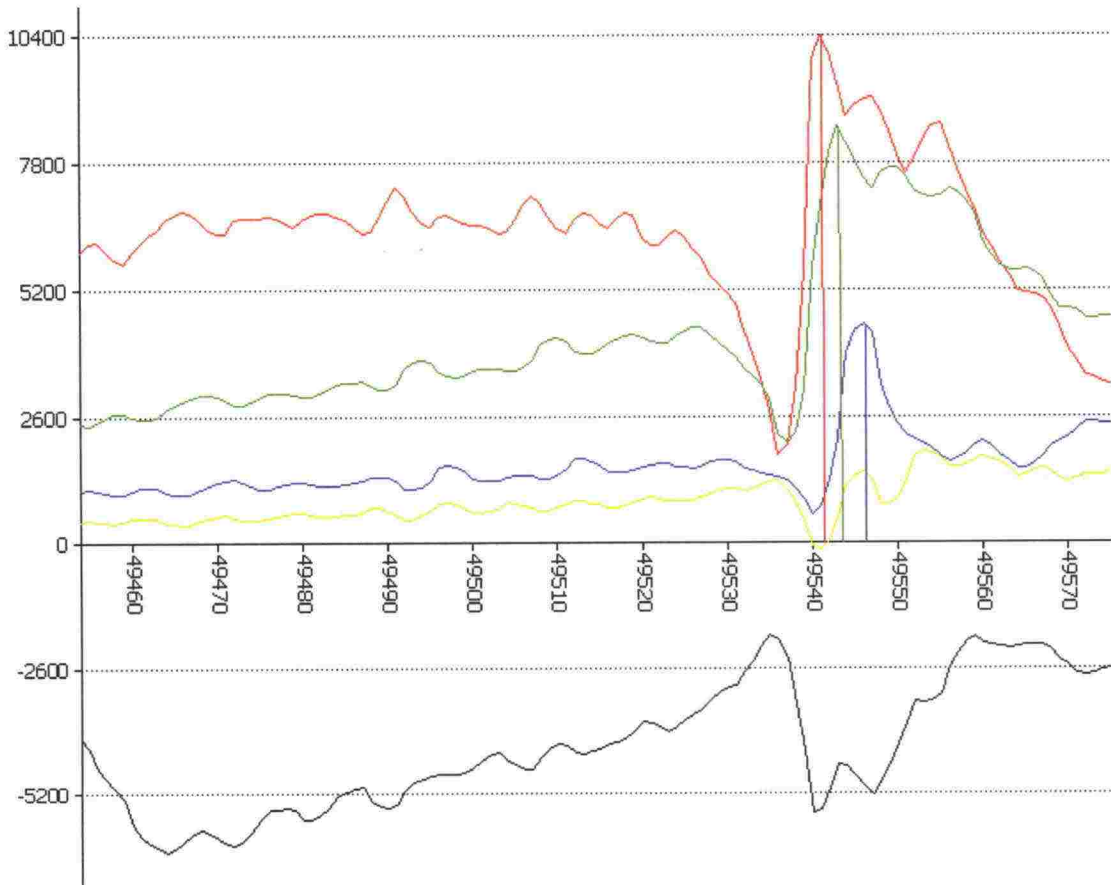


Kuva 40. Lovipyörän voimakuvaaja

Useissa tapauksissa sama lovi ehtii osua kaksi kertaa mittausalueelle, jolloin se näkyy kahtena piikkinä kuvaajassa. Saman loven pitäisi aiheuttaa kaksi identtistä voimapiikkiä kuvaajaan. Näin ei kuitenkaan aina tapahdu (Kuva 41). Tämä johtuu radan kimmoisuusvaihteluista ja virheestä, joka syntyy, kun anturisygnaalit summataan. Signaalien summaamisessa tapahtuvan virheen suuruus riippuu siitä, miten loven osuma sijoittuu antureihin nähden. Rata joustaa eniten pölkkyjen puolivälillä ja pomppaa tämän takia voimakkaimmin ylös, jos lovikohta on osunut pölkkyjen puoliväliin. Dynaaminen voiman lasku on tällöin suurempaa kuin lovikohdan osuessa pölkyn kohdalle.



Kuva 41. Lovipyörrien voimakuvaajia

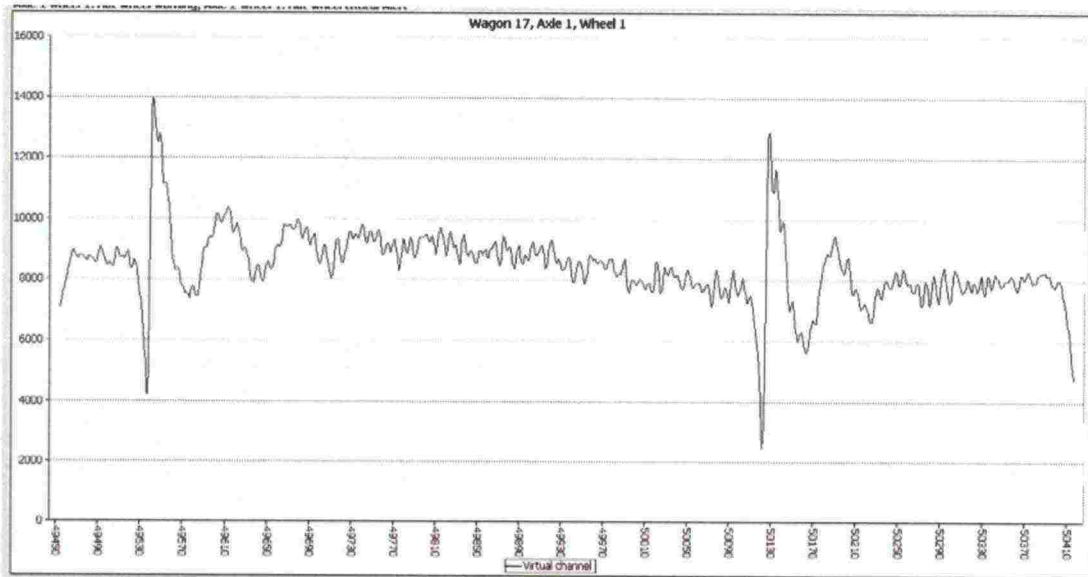


Kuva 42. Signaalitiedot viideltä voima-anturilta loven osumahetkellä

Loven aiheuttaman voimapiikin nousuun tulee pykälää, koska se muodostetaan usean anturin voimatiedoista, jotka lähtevät nousemaan eri aikoihin. Pölkyn voimatietojen lisäksi tuloksiin lisätään mittaussektorin päiden leikkausvoimatiedot. Loven iskukohdasta on erimittainen matka eri antureille, joten nämä havaitsevat iskun eri aikaan. Yhdistettyä voimakuvaajaa muodostettaessa näitä viiveitä ei voida huomioida, minkä takia voimapiikistä tulee leveämpi ja matalampi kuin sen todellisuudessa pitäisi olla. Eri anturien voimahuipuilla on aikaeroa noin 1/1 000 sekuntia. Tähän vaikuttavat kiskon lämpötila ja kiskossa vallitseva jännitys. Esimerkkitapauksessa, Kuva 42, lovi on iskenyt ensimmäisen kerran ensimmäisen (punainen kuvaaja) ja toisen (vihreä kuvaaja) pölkyn väliin, hieman lähemmäs ensimmäistä pölkkyä. Signaalikuvaajat ovat voimakuvaajan vasemmanpuoleisesta lovijäljestä Taulukko 8). Pelkkiä pölkkyjen mittaustietoja tarkastelemalla voimien summauksessa syntyvän virheen suuruus on tässä tapauksessa 11 % osumassa, jos se muodostetaan kolmella pölkkyllä.

Taulukko 8. Punnituselementtikohittaiset arvot loven mittauksessa

Kohta	punainen	vihreä	sininen	summa
Pun max	10 400	7 000	800	18 200
Vihr max	8 600	8 400	2 600	19 600
Sin max	8 800	7 400	4 700	20 900
maksimiarvojen summa				23 500

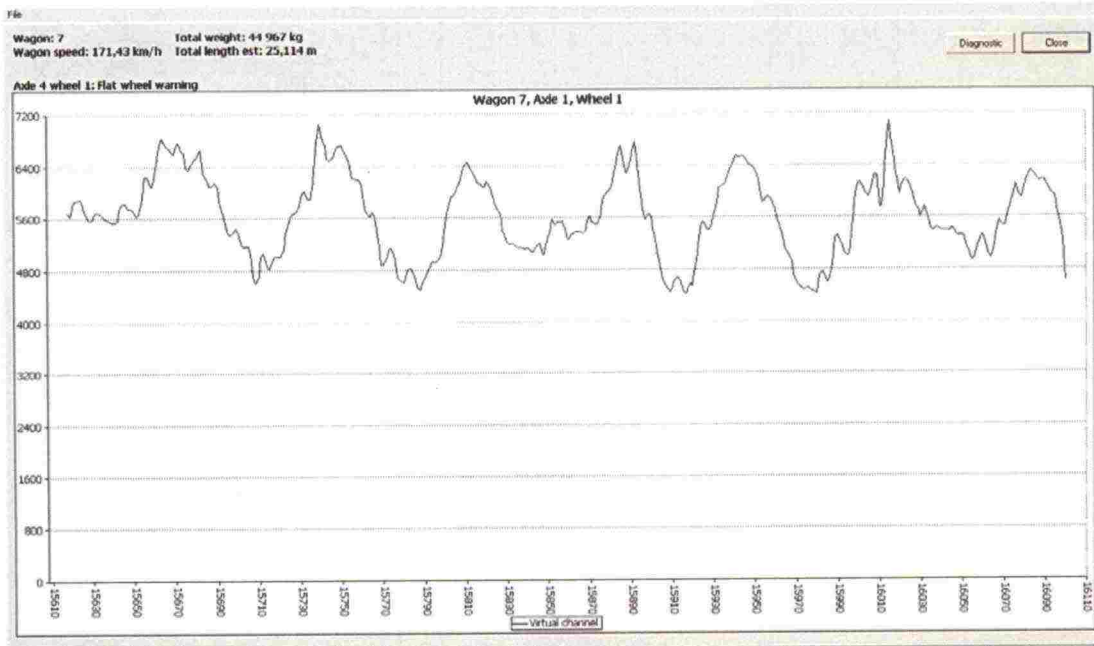


Kuva 43. Voimakuvaaja Kuva 42 signaalitiedoista

Summauksessa syntyvä virhe ei ole pelkästään Scalex Wild -laitteiston ominaisuus, vaan sama virhe tapahtuu kaikissa punnituselementteihin perustuvissa mittalaitteissa. Virheen syntyminen johtuu junaradan mekaanisista ominaisuuksista. Kiihtyvyyssmittaukseen perustuvilla mittalaitteilla on tämän takia saatu suurempia voima-arvoja samansuuruisista vioista. Virhe näkyy voimakuvaajassa voiman nousun pykälinä. Tarkasti katsomalla tämän näkee Scalex Wildin kuvaajien lisäksi myös DafuR:n voimakuvaajista (Kuva 12).

Matkustajavaunuissa esiintyy harvoin lovipyöriä, mutta niiden pyörät kuluvat polygonaaliseksi. Ero johtuu vaunujen erilaisista jarruista. Suomalaisen IC-vaunujen pyörät kuluvat useimmiten nelikulmaisiksi, ja niiden voimakuvaajasta tulee tasaisesti aaltoileva Kuva 44). Pyörien kulumismuoto selvitetiin voimakuvaajista, joissa on ollut myös lovivika. Tällöin pystyi helposti määrittelemään, kuinka monta voima-aaltoa yhdellä pyörähdyksellä syntyy. Aaltojen määrän (7 kpl) vertaaminen mittauskentän pituuteen (n. 5 m) ja pyörien ympärysmittaan (n. 3 m) vahvisti tiedon.

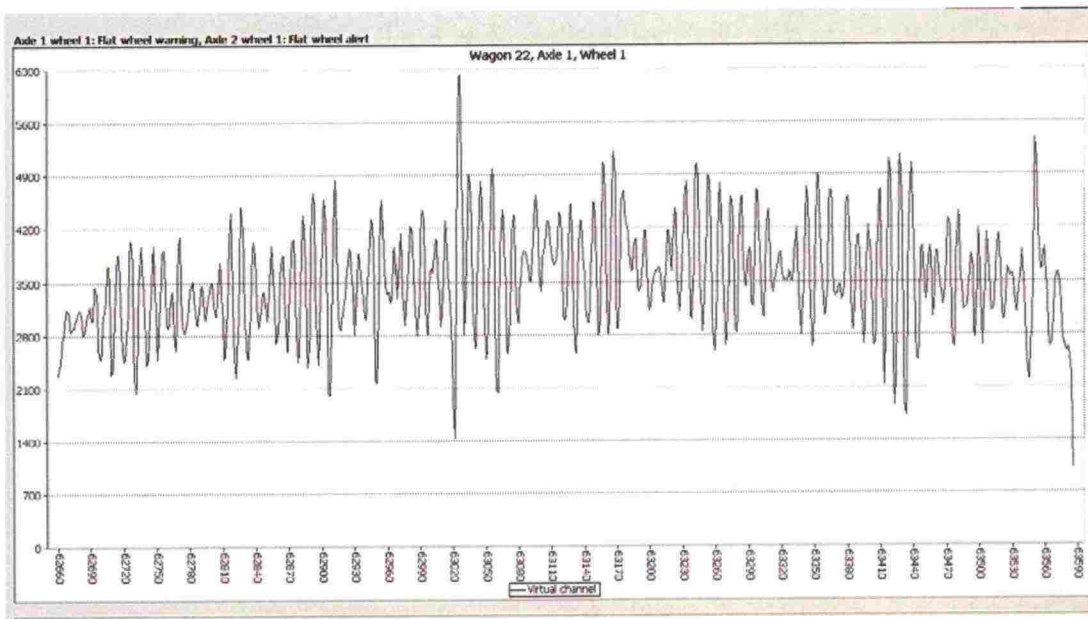




Kuva 44. Kuluneen IC-vaunun pyörävoimakuvaja

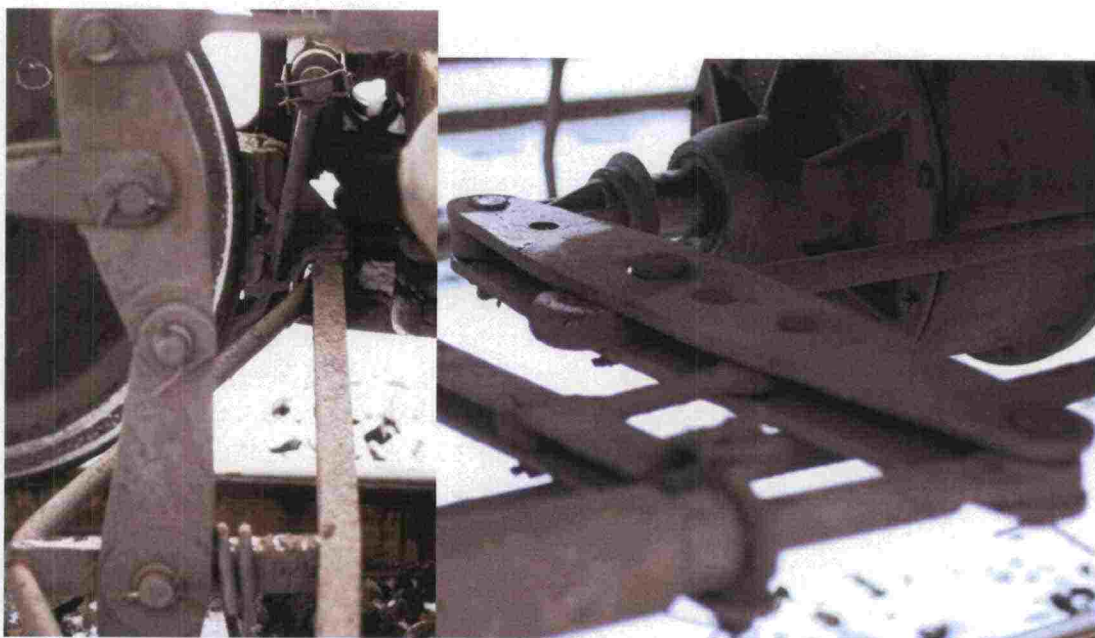
Sama ilmiö esiintyi myös Pendolinoissa ja vetureissa, mutta niissä kuluminen ei ollut koskaan kovin suurta. Niiden jarrujärjestelmä on kehittyneempi kuin IC-vaunujen, tai niiden pyöriä huolletaan useammin. Venäjälle liikennöivissä matkustajajunissa esiintyi varsin vähän polygonaalaisia pyöriä.

Kotimaisia tavaravaunuja vaivaava rosopyöräongelma näkyy voimakuvajassa hyvin lyhytaaltoisena voimavaihteluna. Voimavaihtelu muuttuu satunnaisesti aivan kuten pyörän kulkupinnalla oleva rosainen pinta (Kuva 45). Jos vika havaittiin, se esiintyi yleensä kaikilla vaunun akseleilla. Vikatyypin aiheuttama voimannousu on pienempi kuin lovipyörillä, joten niiden havaitseminen pelkkää voimasuhdetta tarkkailemalla ei onnistu.



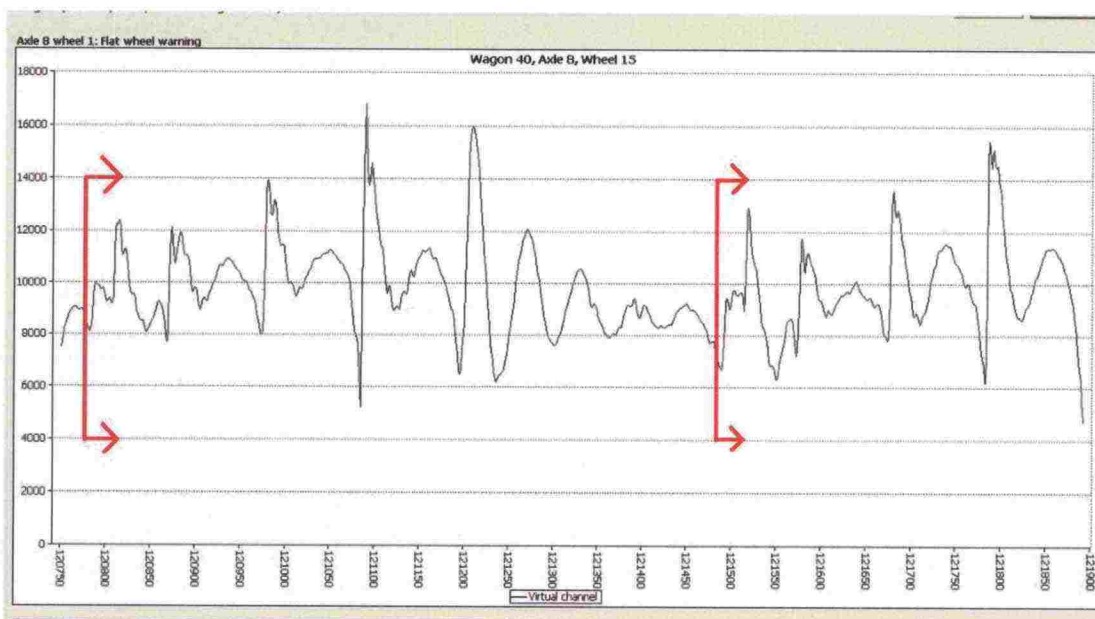
Kuva 45. Rosopyörän voimakuvaja

Tavaravaunun kaikkien pyörien jarruja käytetään yhdellä paineilmakellolla ja monimutkaisella vipumekanismilla, joka käyttää pyöräkohtaisia jarruja (Kuva 46). Koko järjestelmä sijaitsee vaunun alla ilman suojausta. Jarrujärjestelmän vikaantuessa pyöriin syntyy lukuisia vikoja, koska vikaantuminen havaitaan usein vasta pyörävikojen aiheuttamasta laakerien kuumakäynnistä.



Kuva 46. 8-akselisen vaunun pölkkejarrujen käyttömekanismi

Useita vikoja sisältävän pyörän voimakuvaaja on hyvin epäselvä ja voi vaikuttaa alkuun mittalaitteen toimintahäiriöltä. Esimerkkikuvaajassa, Kuva 47, toistuu sama vikasarja hyvin samannäköisenä. Sarjan alussa on hieman rosoa, minkä jälkeen tulee kolme lovivikaa. Lopussa olevat aallot viittaavat vanhoihin, jo pyöristyneisiin lovi- tai kuoriutumisvikoihin.



Kuva 47. Useita vikoja sisältävän pyörän voimakuvaaja



## 8.2 Mittalaitteen hälytysten vertaaminen pyöriin

Pyörävikojen ja voimakuvaajien välinen riippuvuus haluttiin selvittää myös käytännössä. Aikaisemman seurannan perusteella vertailujunaksi valittiin yön aikana itärajalta Kilpilahteen kulkeva öljyjuna. Kyseiseen junavuoroon päädyttiin sen helpon tavoitettavuuden ja runsaan vikamäärän takia. Junavuoro ohittaa Utin mittausaseman yhden jälkeen yöllä ja saapuu aikaisin aamulla Kilpilahden ratapihalle, jossa sen pyöriin pääsee tutustumaan. Pyörävoimamittauksista otettiin talteen kaikkien pyörien voimakuvaajat sekä tiedot vikahälytyksistä. Tämän jälkeen ratapihalla kuvattiin hälytyksen aiheuttaneet viat, jos se oli mahdollista. Näiden lisäksi kuvattiin silmämääräisesti pyöristä havaitut viat, vaikka ne eivät olleet aiheuttaneet hälytystä.

Ensimmäisellä kuvauskerralla 9.11. havaittiin, että suurin osa hälytyksistä oli johtunut materiaalin kuoriutumisenesta. Tämän takia molemmilta puolilta akselia ei löytynyt samalta kohtaa vikaa. Monien vikojen voimavaikutus ei siksi ollut ylittänyt hälytysrajaa, joka oli asetettu 50 % staattista voimaa suuremmaksi. Selkeiden lovijälkienkin kohdalla eri puolilla oli usein hyvin erisuuruiset viat. Tämän perusteella akselikohtainen pyörävoiman mittaus osoittautui huonoksi ratkaisuksi pyörävikojen valvonnassa. Ensimmäisen kuvauskerran tuloksia esitetään liitteessä 1.

Mittalaitteen päivitykseen pyöräkohtaisia voimia mittaavaksi oli vielä aikaa, joten seuraavalla vikojen kuvauskerralla 16.11. asia yritettiin kompensoida muuten. Jokaisesta viasta mitattiin sen sijaintipaikka pyörän kehällä. Vian sijainti on vian keskikohdan ja jarrupalan yläreunan välinen etäisyys pyörän kulkupintaa pitkin mitattuna. Mittausten avulla pystytään tarkistamaan, onko voimamuutoksen aiheuttanut pelkästään toisen puolen vika vai ovatko sen aiheuttaneet molemmilla puolilla samassa kohtaa olevat viat. Niissä pyörissä, joissa oli molemmilla puolilla samassa kohtaa lovivika, viat olivat hyvin erikokoisia. Tämän takia näiden akseleiden vikakuvaajien perusteella on mahdotonta päätellä, kuinka suuri voimamuutos tulee mistäkin viasta. Voimasuhteita laskettaessa on oletettu, että kaikki voimamuutos on tullut yhdeltä puolelta, koska näin on useimmiten tapahtunut. Toisen kuvauskerran kuvia esitetään liitteessä 2.

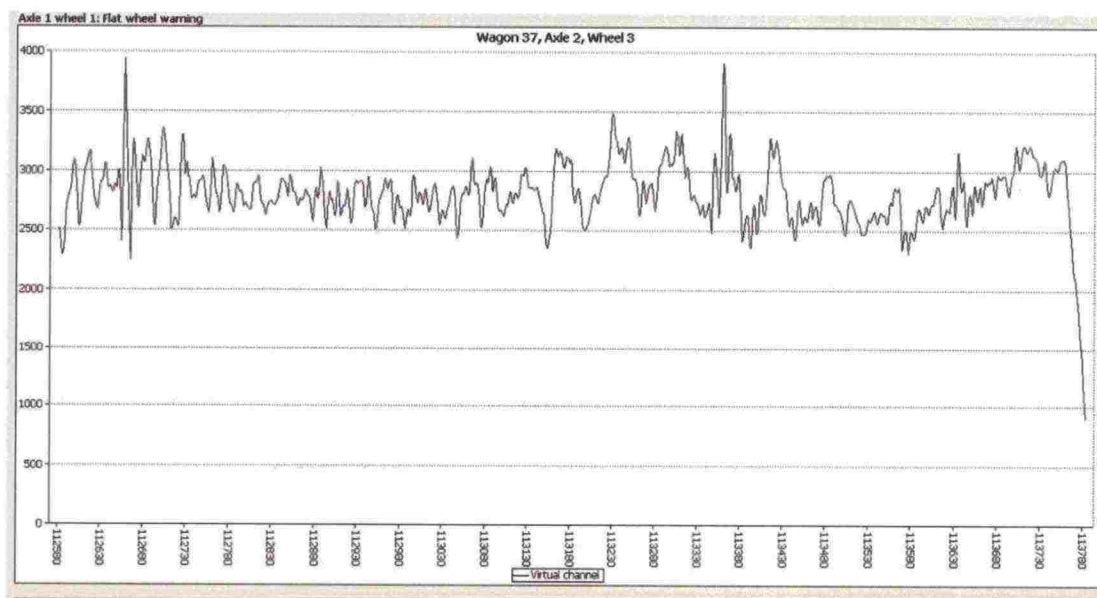
### 8.2.1 Havaintoja vikojen kuvauksista

Kaasunkuljetusvaunujen ja öljynkuljetusvaunujen välissä olleessa tyhjässä VR:n vaunussa oli voimakuvaajien perusteella rosopintaiset pyörät. Silmämääräisessä tarkastelussa pyörä näytti aluksi olevan hyvässä kunnossa. Rosopintaan oli tarttunut hienojakoista likaa, joka täytti kaikki kuopat ja sai pyörän näyttämään vain pölyiseltä. Pyörän puhdistamisen jälkeen paljastui sen todellinen tilanne: koko pinta oli täynnä pieniä koloja ja painaumuksia (Kuva 48). Rosopyörän voimakuvaajan huippujen väli vastaa 5–15 cm:n kuljettua matkaa mittauksessa. Aallon pituus on tässä samaa luokkaa kuin aikaisemmin esitetyssä rosopyörän voimakuvaajassa (Kuva 45). Voimavaihtelut ovat tässä kuvaajassa kuitenkin huomattavasti pienempiä. Kuvatun akselin maksimivoima on 30 % suurempi kuin pyörän staattinen voima. Saman vaunun ensimmäisellä akselilla oli samanmallinen voimakuvaaja, mutta se aiheutti huomautuksen hieman suuremman voimavaihtelun takia.



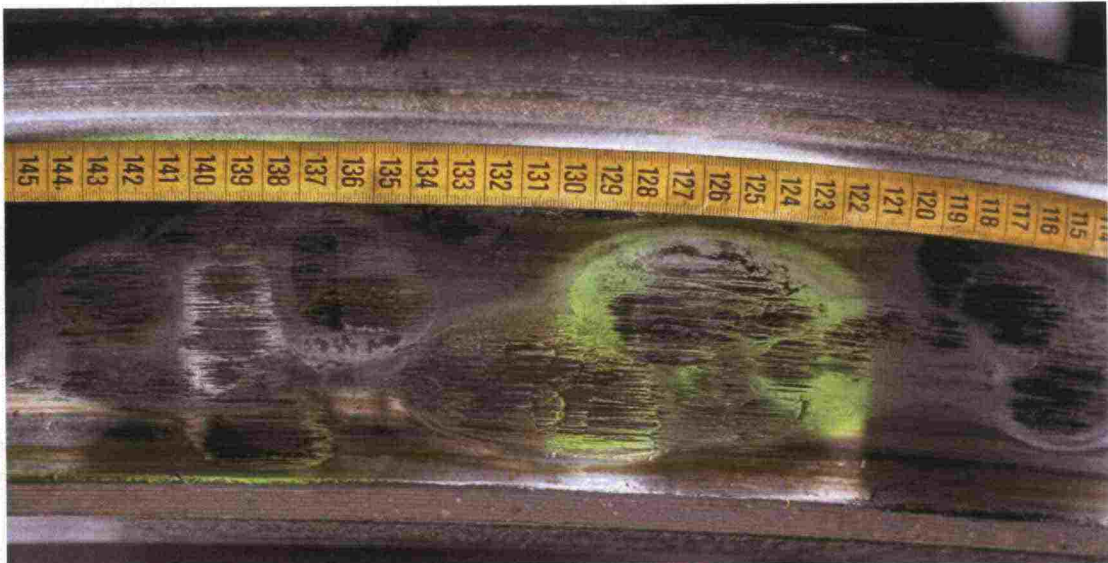


Kuva 48. Rosopyörän pinta



Kuva 49. Rosopyörän voimakuvaaja

Junassa oli yksi vaunu, jonka pyörissä oli kymmeniä lovivikoja (Kuva 50). Ensimmäisellä akselilla vikoja oli koko matkalla. Muilla akseleilla oli vain yksi vakavampi vikakohta. Kaikilla akseleilla akselivoima oli voimapiikeissä kaksinkertainen staattiseen voimatasoon nähden. Kyseisessä vaunussa vikoja oli niin paljon ja ne olivat niin suuria, että kaikissa pyörissä näkyi vikoja jo usean metrin päästä katsottuna. Vaikka junan ensimmäinen akseli olisi lukkiutunut jokaisessa jarrutuksessa, on vikojen syntymiseen kulunut silti pitkä aika. Mittaustulosten perusteella tällaiset vaunut eivät ole ainutlaatuisia, vaan niitä havaitaan joka päivä.



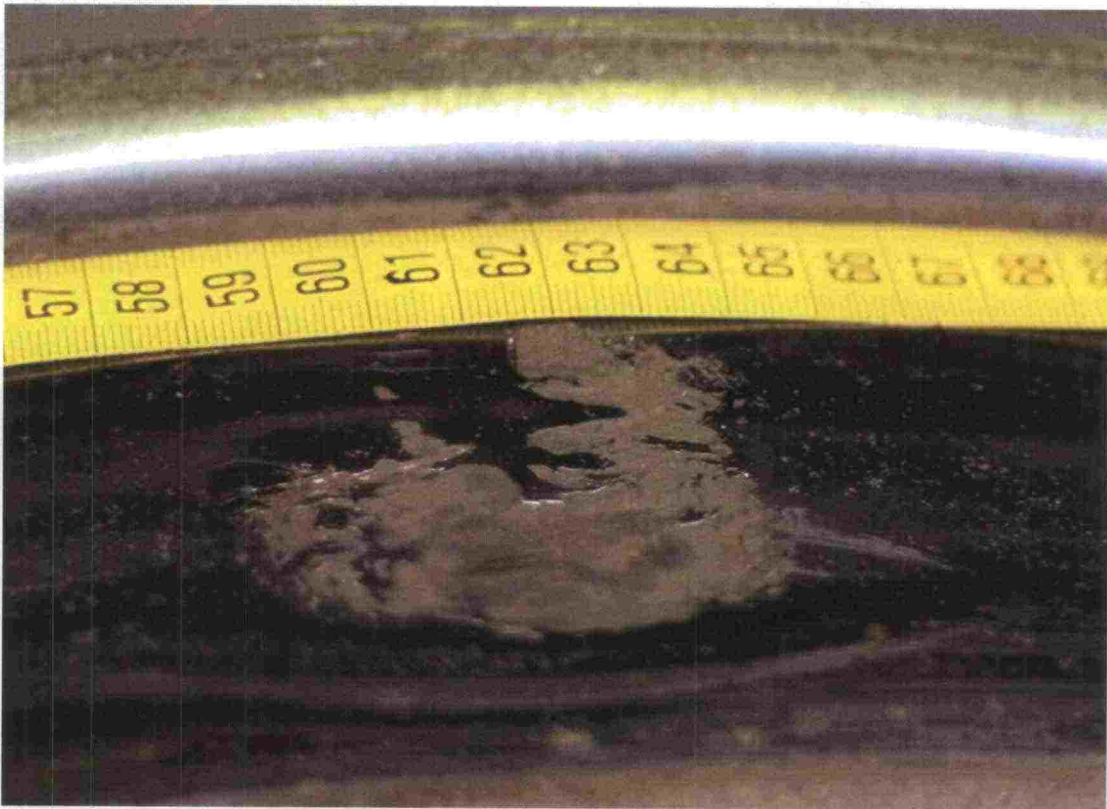
Kuva 50. Useita lovivikoja samassa pyörässä

### 8.3 Voimaimpulssin ja loven koon välinen yhteys

Scalex Wildin prototyypin pyörävoimakuvaajat muodostetaan jakamalla hetkellinen akselivoima kahdella. Molemmista pyöristä ei kuitenkaan tule koko ajan yhtä suurta voimaa. Tämän takia todellinen voimavaihtelu pyörän ja kiskon välillä on suurempaa kuin miltä se tuloksissa näyttää. Jos vain toisessa pyörässä on vika, joka aiheuttaa pyörävoiman hetkellisen kolminkertaistumisen, voimakuvaajassa näkyy ainoastaan voiman hetkellistä kaksinkertaistumista kuvaava voimapiikki. Tätä ei pidä mieltää kyseisen tuotteen viaksi vaan prototyypin ominaisuudeksi, joka poistuu seuraavassa laitepäivityksessä.

Etenkin pienet, materiaaliviasta johtuvat kuopat ovat huomattavasti kapeampia kuin pyörän kulkupinta. Ei ole mahdollista tietää, millä kohtaa sivuttaista kulkuvälystä akseli on mittaushetkellä ollut. Tämän takia ei tiedetä, onko kiskoon osunut pahin vikakohta vai sen vieressä ollut kohta. Asialla on suuri merkitys, kun verrataan vian pituutta syntyneeseen voimapiikkiin. Pienien vikojen (leveys alle 20 mm, pituus alle 40 mm) kohdalla voidaan määrittää vain, kuinka suuren voimapiikin vika voi pahimmillaan aiheuttaa. Vastaavasti voimapiikin suuruuden avulla tiedetään, kuinka suuri vika pyörässä vähintään on. Eli viat saadaan selville ainoastaan parin sentin levyiseltä sattumanvaraisesti määräytyvältä alueelta pyörän kulkupinnalta. Kuva 51 esittää vikaa, joka voi näyttää voimamittauksessa hyvin erilaiselta sen mukaan, mikä kohta viasta osuu kiskoon mittausalueella. Jos pyörän laippa on lähellä kiskoa, osuu vian yläreunan noin 20 mm pitkä kolo kiskoon ja aiheuttaa hyvin pienen voimapiikin. Jos pyörän laippa on mahdollisimman kaukana kiskosta, osuu alareunan 50 mm pitkä vika kiskoon. 50 mm pitkä vika on Suomen sääntöjen mukaan korjattava määränpäässä, ja se aiheuttaa noin 100 %:n voimapiikin.



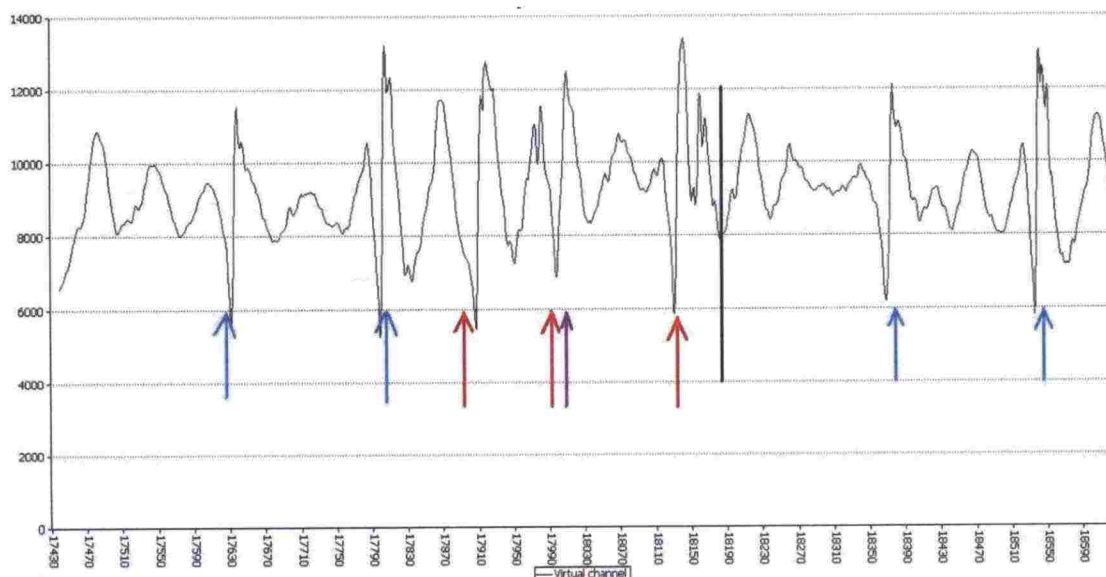


*Kuva 51. Vaihtelevan levyinen materiaalivika*

Vian suuruuden ja voimakuvaajan välisen yhteyden selvittäminen vaatii edellä mainittujen syiden takia todella paljon toistoja. Seuraavaksi esitetään esimerkitapauksia, joiden avulla saa jonkinlaisen käsityksen siitä, minkälainen voimakuvaaja syntyy yleisesti pyörissä esiintyvistä vioista.

Ensimmäisessä esimerkkivoimakuvaajassa Kuva 52) on viisi lovijälkeä. Kuvauksessa toisesta pyörästä havaittiin lovijäljet kohdissa 38 cm, 81 cm ja 146 cm ja toisesta pyörästä rosoista pintaa alueella 80–100 cm Kuva 53). Voimakuvaajasta etsittiin jäljet, joiden etäisyys vastaisi vikojen välisiä etäisyyksiä. Ne merkittiin kuvaajaan punaisilla nuolilla. Ensimmäinen sinisellä nuolella merkitty voimapiikin kohta oli kiskoa vasten pyöriä kuvattaessa, toisen sinisen nuolen kohta oli jarrupalan takana vikoja kuvattaessa. Rosoinen kohta on merkitty lilalla nuolella. Mustan pystyviivan kohdalla akseli on pyörähtänyt kerran ja saman kulkupinnan mittaus alkaa uudestaan.





Kuva 52. Voimakuvaaja vaunun viisi akselista kolme, staattinen voima 9637

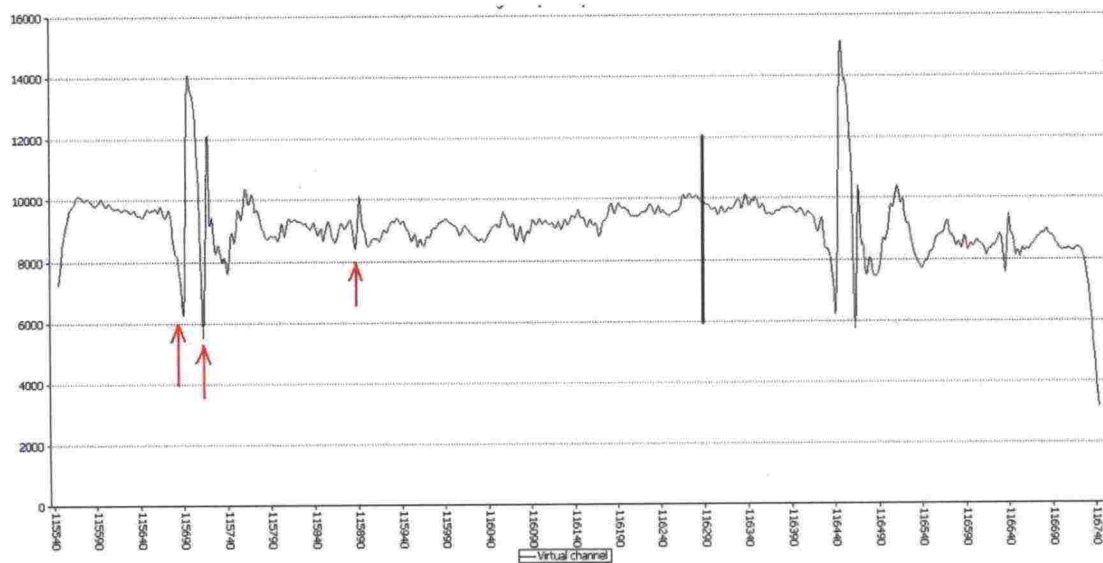
Ensimmäisessä viassa on tasaista kulkupintaa tai kuoppaa pisimmillään 60 mm. Dynaaminen akselivoima on tämän vian kohdalla noussut arvoon 26 000. Toinen vika on 40 mm pitkä, ja akselivoima tämän kohdalla on 25 000. Viimeisen vian kuoppa on 50 mm pitkä, ja lisäksi sen yläpuolella on tasaista aluetta. Dynaaminen voima vian kohdalla nousee arvoon 27 000. Vian aiheuttama pyöräkohtainen voimannousu

prosentteissa saadaan kaavalla 
$$\frac{\text{akselivoima}_{\text{dyn}} - \text{akselivoima}_{\text{staattinen}}}{\text{pyörävoima}_{\text{staattinen}}} * 100\%.$$
 Vikojen aiheuttamat voimannousut ovat 70 %, 60 % ja 80 %.

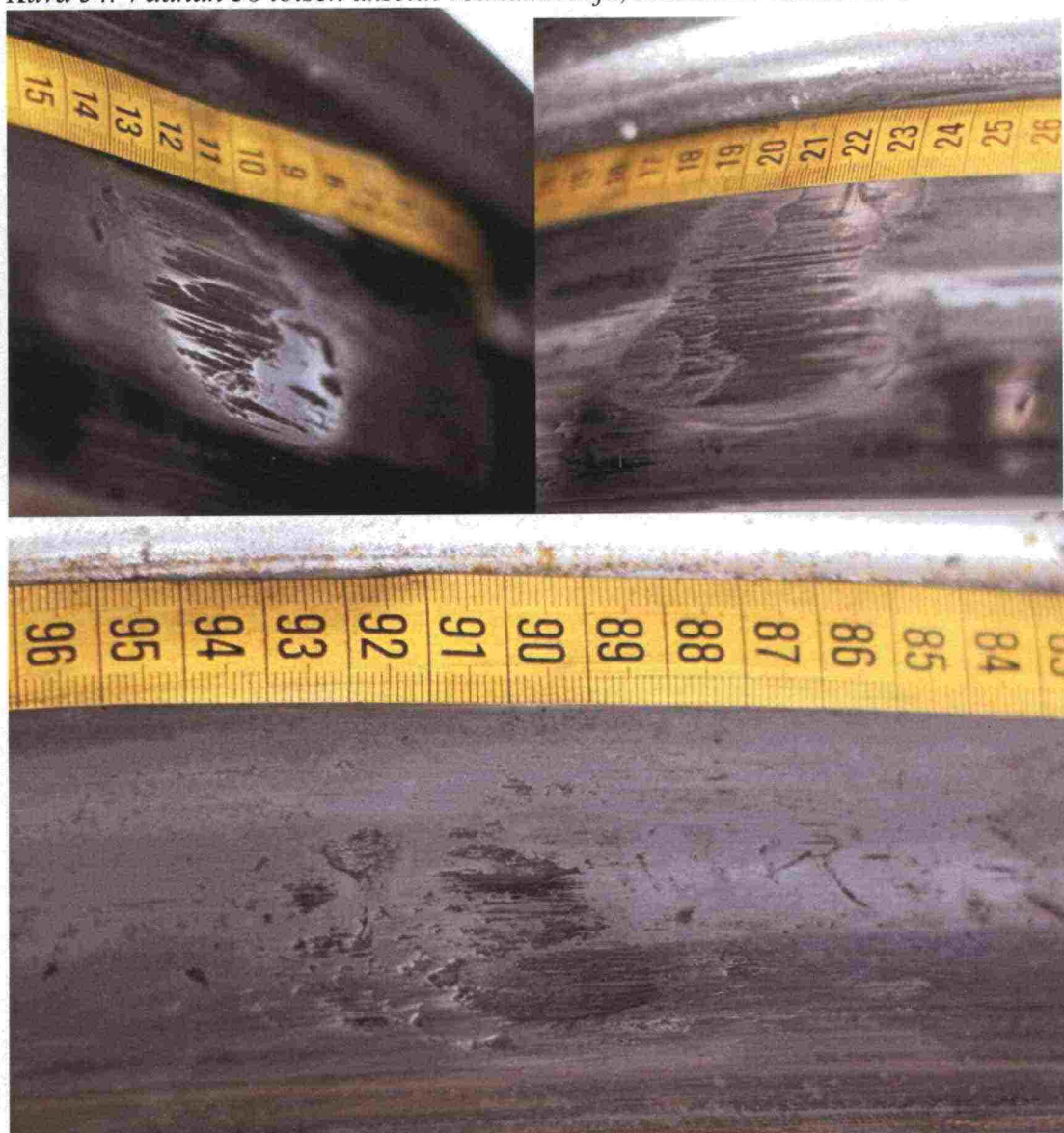


*Kuva 53. Vaunun viisi kolmannen akselin pyöräviat*

Toinen esimerkkikuvaaja on vaunusta 38, jossa oli toisella akselilla kaksi noin 50 mm:n lovivikaa ja yksi pieni 20 mm:n lovivika. Isot viat olivat eri puolilla junaa, ja toinen alkoi suunnilleen siitä, mihin edellinen loppui. Pientä vikaa ei tunnista kuvasta, ellei sen paikkaa suurempiin vikoihin nähden tietäisi. Ensimmäisellä kerralla voimamuutos suurien vikojen kohdalla on 91 % ja toisella kerralla 112 %, jos oletetaan, etteivät ne lisää voimaa samanaikaisesti. Pieni lovi jälki aiheuttaa noin 20 %:n voiman nousun.



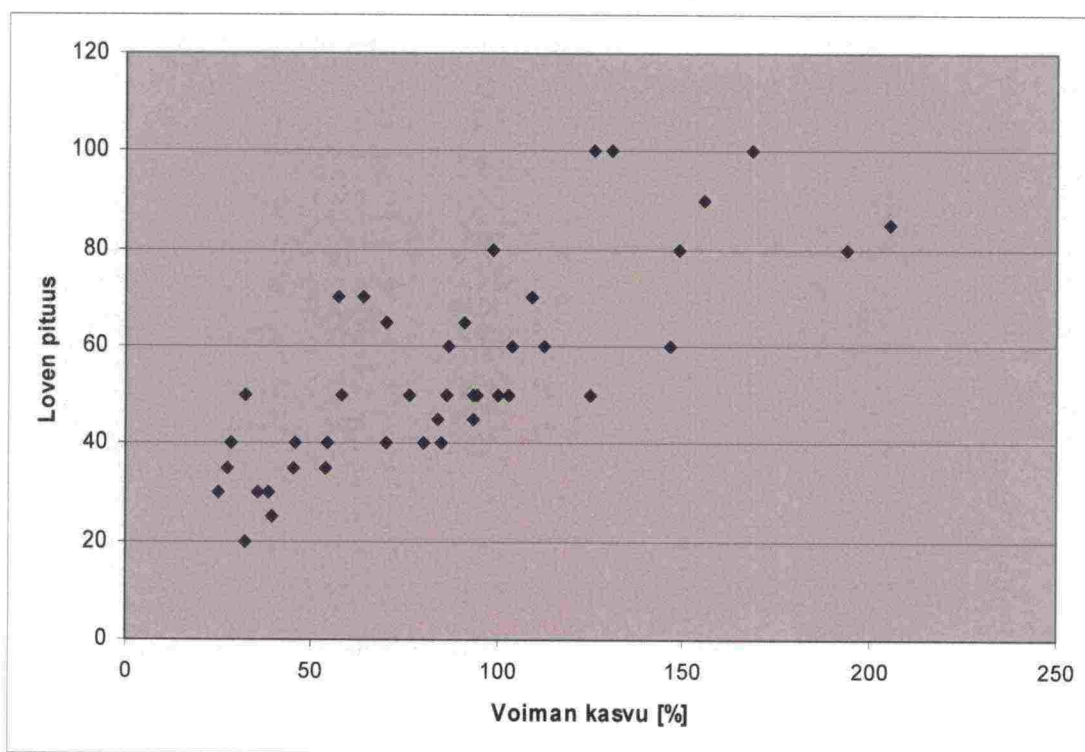
Kuva 54. Vaunun 38 toisen akselin voimakuvaja, staattinen voima 9598



Kuva 55. Vaunun 38 toisen akselin pyöräviat, ensimmäinen vika vasemmalla ylhäällä



Kaikista toisen kuvauskerran pyörävikojen voimakuvaaajista laskettiin vikojen prosentuaalinen voimavaikutus. Tämän jälkeen kuvista katsottiin vikojen pituus ja näistä muodostettiin kuvaaja Kuva 56). Kuvaaja vahvistaa oletuksen, jonka mukaan voimavaikutuksen perusteella voidaan ennustaa, minkä kokoinen vika pyörässä vähintään on. Loven pituuden voi laskea likimääräisesti voimamuutoksesta kaavalla  $lovenpituus[mm] = \frac{\Delta F[\%]}{2}$ , missä F on vertikaalinen pyörävoima. Tämän perusteella Suomessa pitäisi mitata kaikki pyörät, jotka ovat aiheuttaneet yli 90 % suuremman voiman kuin staattinen pyöräkuorma, ja pysäyttää tai määrätä 10 kilometrin tunti-nopeusrajoitus vaunuille, joiden dynaaminen pyörävoima on ollut 120 % suurempi kuin niiden staattinen pyörävoima. Esitettyjen raja-arvojen suuruusluokka on varmasti oikea, koska Saksassa käytetään DafuR-mitta-aseilla tarkastuksen raja-arvona voimasuhdetta 1,85, joka tarkoittaa 85 % suurempaa tai pienempää hetkellistä voimaa kuin staattinen voima.



Kuva 56. Loven pituuden vaikutus pyörävoiman kasvuun

Vikamääriä seurattaessa tyhjästä vaunuista tuli huomattavasti enemmän vakavia vika-hälytyksiä kuin kuormatuista vaunuista. Oletettavasti tyhjästä ja täysissä vaunuissa on sama määrä vikoja. Kirjallisuudesta ei löytynyt selitystä tyhjien vaunujen suuremmalle hälytysherkkyydelle, joten asialle kehitettiin oma hypoteesi. Vian vakavuus määritettiin yksinkertaisesti maksimivoiman ja staattisen voiman suhteesta. Oletettavasti jousittamattomalla massalla on enemmän vaikutusta vian aiheuttaman voimapiikin suuruuteen kuin jousitetulla massalla. Jousittamattoman massan suuruus riippuu siitä, kuinka paljon pyöristä on huoltotoimenpiteinä sorvattu materiaalia pois. Akselikohtainen jousittamaton massa on 1 000–1 500 kg. Jousitetun massan suuruus riippuu kuormasta, ja se on 4–21 tonnia akselia kohti. Vaikutuksen suuruudesta ei ole arviota.

Kuorman kasvaessa myös pyörän ja kiskon välinen kosketusala kasvaa. Vaunun ollessa täyteen kuormattu kosketuspinta on noin 2,4-kertainen tyhjään vaunuun verrattuna Kuva 57). Kun kyseessä on rosopyörä, suurempi kulkupinta vähentää voimavaihtelua huomattavasti, koska pyörä ei putoa jokaisen pienen kolon kohdalla alaspäin koloja suuremman kosketuspinta-alan takia. Tulosten perusteella vaikutus on huomattava myös kosketuspintaa suurempien vikojen kohdalla.



Kuva 57. Pyörän ja kiskon välinen kosketuspinta-ala. Punaisella on merkitty täyden kuorman tapaus ja vihreällä tyhjään vaunun tapaus.

#### 8.4 Mittausten toistettavuuden arviointi

Mittausten toistotarkkuutta arvioitiin kolmella tavalla. Ensimmäiseksi tuloksista etsittiin saman matkustajavaunun kahden eri mittauskerran voimakuvaajat ja verrattiin niiden voimavaihteluita keskenään. Tarkkoja junien kokoonpanotietoja saatiin vasta työn loppuvaiheessa, joten tunnistus tehtiin aluksi vikojen perusteella. Esimerkitapauksessa aamulla ja illalla menneissä junissa oli viat samoilla akseleilla. Saman akselin aamun ja illan tulokset olivat myös kaikkien akseleiden kohdalla samanmuotoisia, joten kyseessä täytyi olla sama juna.

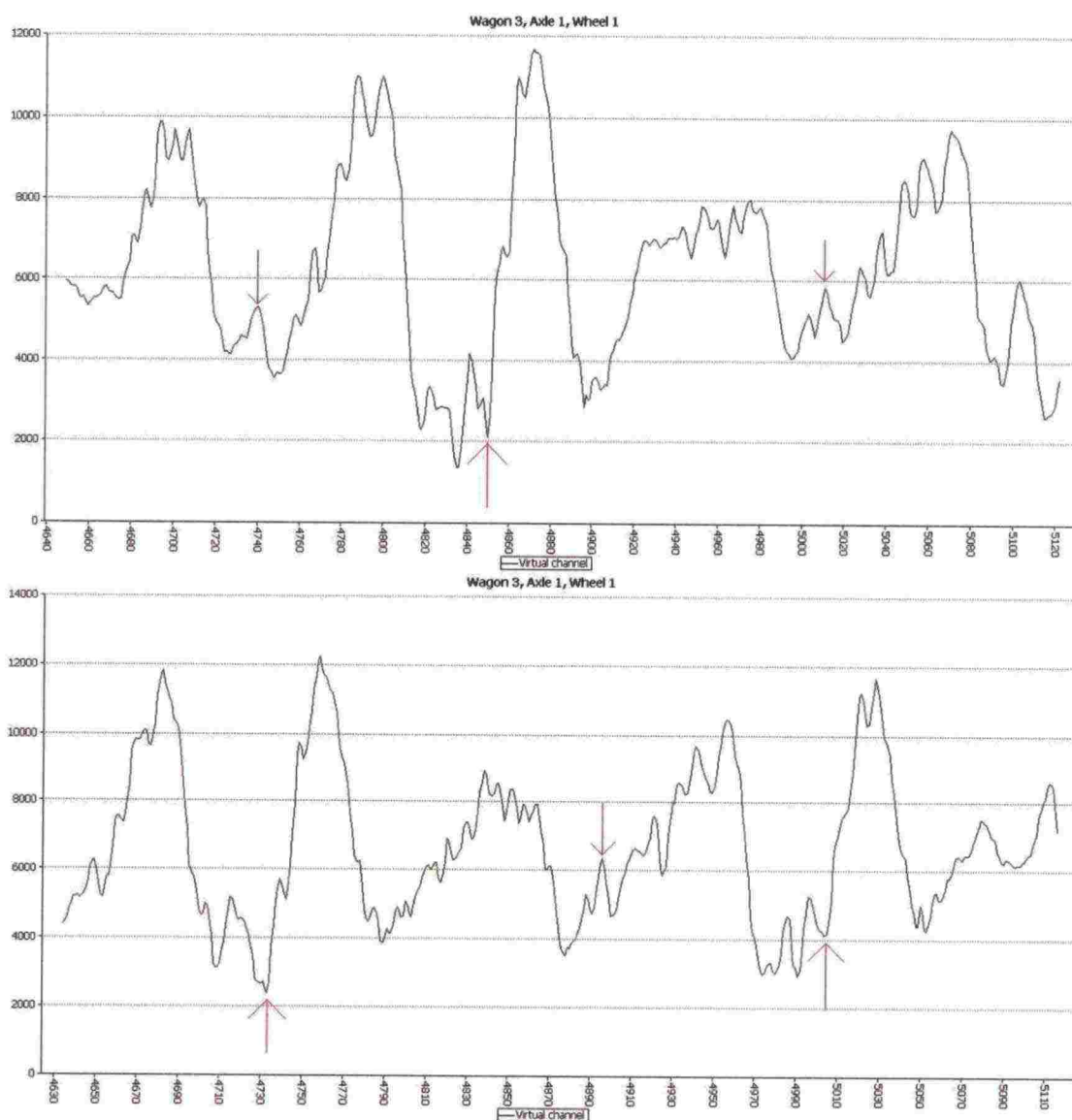
Kahden eri mittauskerran välillä voimakuvaajiin tulee luonnollisesti vaihesiirtymä, koska pyörän kulkupinnan mittaus alkaa sattumanvaraisesta kohdasta. Kuvaajien samankaltaisuuden hahmottamiseksi molempiin kuvaajiin on merkitty nuolia, jotka osoittavat aina samaa kulkupinnan kohtaa. Alaspäin ja ylöspäin osoittavat nuolet kuvaavat eri kohtia.

Ensimmäisessä mittauksessa pyörävoiman staattinen arvo on ollut 6 415 (ylempi kuvaaja), ja toisella kerralla se on ollut 6 561. Tarkasteltavalla akselilla kuorma on kasvanut 2,2 % ja koko vaunun massa on kasvanut 4,6 %. Tämän suuruinen muutos tarkoittaisi kolmeakymmentä matkustajaa, mikä on täysin mahdollista. Tarkasteltavalla



akselilla voimahuiput kasvavat 5–10 % toisella mittauskerralla. Voiman maksimiarvot kasvavat enemmän kuin staattinen arvo, mutta voimasuhteen suuruusluokka säilyy samana.

Samalla mittauskerralla samannäköisen voimakuvaajan pitäisi alkaa uudestaan yhden pyörähdyksen jälkeen. Kuva 58 ylemmän kuvaajan keskellä olevan korkeimman huipun molemmilla puolilla tulisi olla samanlainen kahden huipun sarja, jonka keskellä on alaspäin osoittava nuoli. Oikealla puolella voimahuiput ovat kuitenkin 20 % matalampia. Alemman kuvaajan keskellä nämä kaksi huippua toistuvat. Siinä arvot ovat ensimmäisen kuvaajan arvojen puolivälistä.



Kuva 58. Kaksi voimakuvaajaa samasta IC-matkustajavaunun akselista peräkkäisiltä mittauskerroilta

Vikojen kuvaamisen yhteydessä verrattiin kahden samankokoisen ja -näköisen vian muodostamia voimakuvaajia toisiinsa. Vikoihin tutustuttaessa ei ollut mahdollista mitata vikojen kulkupinnan tarkkaa säteittäisheittoa, jonka mukaan voimakuvaaja muodostuu. Tuloksista löytyi kuitenkin useita samannäköisiä ja yhtä pitkiä vikoja, joista tuli samaa suuruusluokkaa oleva voimanmuutos.

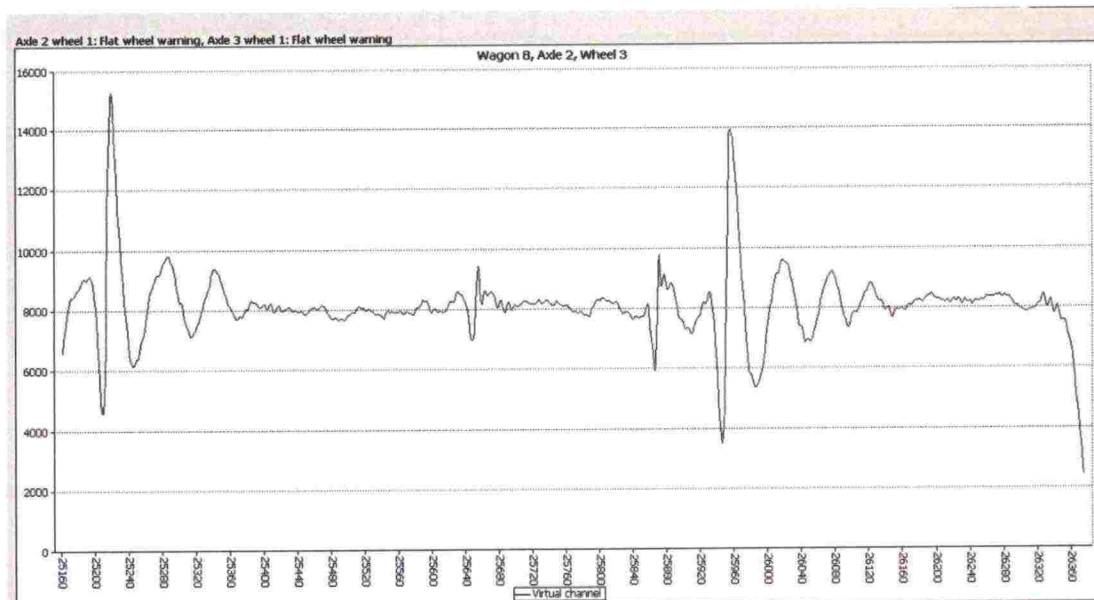


Kuva 59 esittää kahta samasta vaunusta eri akseleilta löytynyttä vikaa. Molemmissa tapauksissa kuvan vika on ainoa akselilla havaittu vika. Molempien vikojen päihin on vedetty punaiset viivat kymmenen sentin päähän toisistaan helpottamaan vikojen pituuden arvioimista. Vikajälki on molemmissa tapauksissa hieman yli 100 mm, mutta täysin tasainen kohta on kuitenkin vain 50–60 mm.

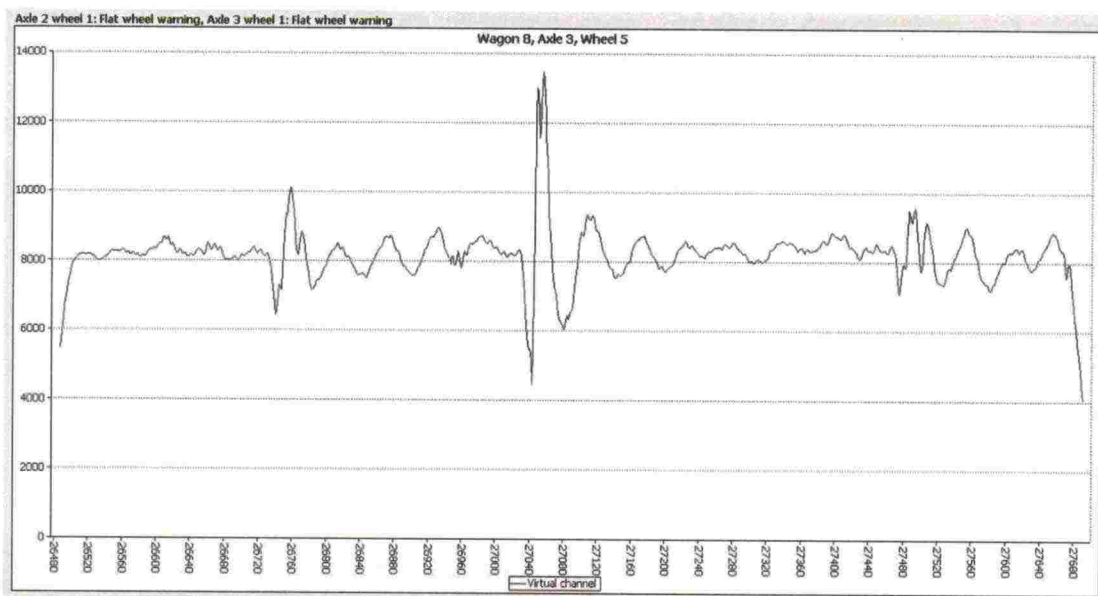
Vasemmanpuoleisen vian voimakuvaaja on ylempänä Kuva 60). Vikakohta on mittauksessa osunut kiskoon kaksi kertaa aiheuttaen ensimmäisellä kerralla 7 % suuremman voimapiikin. Oikeanpuoleinen vika on osunut kiskoon vain kerran. Sen aiheuttama voimavaikutus on ollut hieman pienempi, mutta selvästi pitkäkestoisempi. Vasemmanpuoleisen vian suhteellinen voimavaikutus on ollut ensimmäisellä osumalla 155 % ja toisella kerralla 132 % staattisesta voimasta. Oikeanpuoleisen vian voimavaikutus on ollut 106 % staattisesta voimasta.



Kuva 59. Vaunun 8 akseleilta 2 ja 3 löytyneet viat



Kuva 60. Akselin 2 voimakuvaaja, staattinen voima 8431



Kuva 61. Akselin 3 voimakuvaaja, staattinen voima 8603

Myöhemmin VR:n matkustajajunien liikennöintirytmää verrattiin Scalex Wildin verkkokäyttöliittymään kertyneisiin pyörävikojen hälytystietoihin. Joka päivä mittaustaikaa ylitti kaksi Pendolinoa ja viisi IC-junaa. Keskimäärin yhdestä junasta päivässä ei saatu mittaustulosta. Kahden viikon aikana ainoastaan yksi Pendolinon akseli sai huomautuksen. IC-junissa havaittiin päivittäin muutama akseli, jotka aiheuttivat huomautuksen tai varoituksen. Parhaimmillaan sama juna mitattiin kolme kertaa viikon aikana, ja joka kerta samalle akselille annettiin varoitus. Yhden junan neljä eri akselia saivat peräkkäisillä mittauskerroilla samat huomautukset. Jos jokin akseli sai varoituksen kerran, sai se myös muilla mittauskerroilla varoituksen tai huomautuksen. Jotkin akselit saivat toisella kerralla huomautuksen, mutta toisella kerralla eivät. Tämä on varsin ymmärrettävää, jos vian aiheuttama voimavaihtelu on juuri huomautusrajan tuntumassa. Kaiken kaikkiaan tulokset olivat hyvin samankaltaisia samalle junalle eri mittauskerroilla.

Mittalaitteiden valmistajat ilmoittavat pyörävikojen suuruuden määrittämistarkkuuden eri tavoin. Voiman mittauksen toistotarkkuudeksi luvataan esimerkiksi  $\pm 10\%$  tai loven pituuden määrittämistarkkuudeksi  $\pm 25\%$ . Käytännössä edellä mainitut tarkkuudet tarkoittavat hyvin lähelle samaa asiaa. Yleisesti pyörän tasaisen kohdan pituutta ei voida määrittää kovin tarkasti. Käytännössä tarkkuudeksi voidaan olettaa jotakin väliltä  $\pm 5\text{...}\pm 10\text{ mm}$  vian leveyden mukaan.

## 9 RAJA-ARVOJEN ASETTAMINEN

Mittalaitteet tarkkailevat pyörän kiskoon aiheuttamia rasituksia tarkkailemalla kiskon ja pölkyn välistä voimaa, kiskon pystysuuntaista kiihtyvyyttä tai kiskon taipumaa. Radan ja radalla liikkuvan kaluston kulumisen ja vaurioitumisen kannalta oleellista on kiskon ja pyörän välissä vaikuttava voima, ei pyörän kulkupinnan epäpyöreiden jollakin tavalla määritetty mittavirhe. Tämän takia junan pysäytykseen johtavan vakavan hälytyksen raja-arvona tulisi käyttää mittalaitteen ilmoittamaa suurinta hetkellistä voimaa, jotta vaarallisen suuria voimia aiheuttava kalusto tulee määritellyksi oikein ja saadaan välittömästi pois liikenteestä. Raja-arvon tulisi muuttua automaattisesti kalenterin ohjaamana tiukempien talvisääntöjen mukaiseksi. Radalle vaarallisen suuret voimat on selvitetty ratakiskojen väsymistä käsittelevässä diplomityössä. /40/

Tavallisen hälytyksen, joka aiheuttaa pyörän tarkastuksen vasta määränpäässä, raja-arvossa tulee huomioida ensisijaisesti voimasuhde tai muu arvo, joka kuvaa mahdollisimman hyvin pyörässä olevan vian suuruutta. Näin vialliset pyörät havaitaan vaunun mittaushetken kuormasta riippumatta. Raja-arvon pystyy säätämään parhaiten laitteentoimittaja, joka tekee sen radanpitäjän vaatimusten mukaan.

Huomautuksen raja-arvon asettaminen tehdään kaluston huoltajan toiveiden mukaan, ja se voi vaihdella vikatyypin ja kalustotyypin mukaan. Mittalaitteen tulisi hälyttää rosoisuudesta, polygonaalisuudesta ja lovi- tai kuoriutumisvioista, niin että niiden korjaaminen voitaisiin hoitaa ajoissa.

Radan pitäjällä ei ole vielä mitään sääntöjä suurimmalle sallitulle säteittäisheitolle polygonaalisten pyörien yhteydessä. Tätä määriteltäessä voisi suoraan määritellä suurimman sallitun epäpyöreiden aiheuttaman voiman tai voimamuutoksen. Suurin sallittu voimamuutos voisi olla sama, minkä 45 mm pitkä lovi aiheuttaa.



## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMET

Suomen rautateillä liikkuvassa kalustossa on havaittu tämän työn tekemisen aikana useita erilaisia pyörävikoja. Matkustajavaunujen pyörät ovat osittain kuluneet voimakkaasti polygonaalisiksi, ja tavaravaunujen pyörissä esiintyy lovivikoja, materiaalin kuoriutumista ja rosopintaa. Myös vetureissa havaittiin muutamia lovivikoja ja polygonaaliseksi kulumista. Paikallisiikenteen kalustoa ei mitattu työn aikana, mutta muiden maiden kokemusten perusteella etenkin vetävät pyörät kuluvat niissä nopeasti, joten valvonta tulee ulottaa myös niiden liikennöintialueelle. Pieniä ylikuormia havaittiin myös todella paljon, minkä takia mittausasemien tulisi havaita pyörävikojen lisäksi myös liian suuret akselipainot.

Alkuperäisissä kaavailuissa Suomeen tulevien valvontalaitteiden tulisi tunnistaa kaiken-tyyppiset pyöräviat ja ylipainot. Seurannan perusteella asia on juuri näin. Kiskon taipuman mittaamiseen perustuvilla laitteilla ei voida punnita junia, vaan vaunupainoja voidaan ainoastaan verrata veturin painoon, joka tiedetään sähkövetureista muutamien satojen kilojen tarkkuudella. Punnitustarkkuus on tällöin varsin huono, dieselvetureiden kohdalla surkea. Näin ollen Suomen tarpeisiin sopivia mittauslaitteita ovat DafuR, Schenck, Teknis ja kohta markkinoille saapuva kotimainen Scalex Wild. Mainittujen laitteiden keskinäistä paremmuusjärjestystä on vaikea arvioida. Norjassa on käytössä Teknis, ja Ruotsiin on tulossa Schenck, joten kokemuksia laitteiden käytöstä pohjoisissa sääolosuhteissa löytyy läheltä. DafuR ja Scalex Wild ovat toimintaperiaatteeltaan keskenään samanlaisia, ja ne ovat kehittyneempiä kuin Schenck. Itävaltalainen Argos on tietävästi hienompi laite kuin siitä saatu materiaali antoi ymmärtää, joten se voisi olla viides vaihtoehto.

Nykyisillä menetelmillä ja resursseilla ei pystytä valvomaan riittävän tehokkaasti Suomen radoilla liikkuvan kaluston pyörien kuntoa. Seurannan perusteella useina päivinä yli puolet pyörävikahälytyksistä on tullut yhdestä junasta. Nämä junat pystyttäisiin karsimaan liikenteestä millä tahansa työssä esitellyllä vikojenhavainnointilaitteella. Suurimpia pyörävikojen aiheuttamia uhkia ovat niiden aiheuttamat vakavat onnettomuudet, joissa syntyy aina paljon aineellisia vahinkoja ja joissa voi syntyä myös paljon henkilövahinkoja. Suurimman onnettomuusuhan aiheuttavat junat voitaisiin karsia liikenteestä jo tulevien laitteiden koekäytön yhteydessä. Koekäyttö tulisikin aloittaa mahdollisimman pian. Kiskojen tärkeä kulumismekanismi on niiden pinnan muokkauslujittuminen pyörien aiheuttaman puristusjännityksen voimasta. Lujittuessaan materiaali menettää sitkeysominaisuutensa, ja kiskoista on hiottava pintakerros pois. Vialliset pyörät aiheuttavat suurempia voimia kiskoihin, mikä nopeuttaa niiden pinnan kovettumista ja lisää huoltokuluja.

Suurien dynaamisten voimien mittaaminen pitkästä teräspalkista, joka on joustavalla alustalla, on hyvin vaativaa. Radan taajuusvaste vaihtelee, ja siinä esiintyy suuria veto- tai puristusjännityksiä, jotka vaihtelevat lämpötilojen mukaan. Muuttuvia olosuhteita täytyy kompensoida tai virherajoja kasvattaa. Mitattavia pyöriä on hyvin paljon, ja ainakin tällä hetkellä myös vikoja on paljon. Tulosten saaminen oikeaan aikaan oikeaan paikkaan on haasteellista ja hyvin tärkeä osa valvontaa. Mittaustavasta riippumatta pyörän voimavaikutuksen mittaaminen on hyvin vaativaa, koska radan tuenta joustaa ja kisko jakaa voiman laajalle alueelle. Voimakkaat iskut saavat myös radan värähtelemään, jolloin yksi vika näkyy useana voimamuutoksena mittauksessa.



Ympäristövaikutusten hallintaa vaikeuttaa niiden jatkuva muuttuminen. Ratapohjan jousto vaihtelee sään mukaan ja taajuusvaste radan jännityksen mukaan. Jännitys taas riippuu lämpötilasta. Vikojen aiheuttama voimavaikutus vaihtelee, sillä kosketuskohta muuttuu junan sivuttaisliikkeen vuoksi. Tämän takia vika voi olla osumatta kiskoon, tai se osuu kiskoon välillä vain osittain. Tämä ongelma on sama kaikilla mittausavoilla. Ongelma voidaan ratkaista ainoastaan pidemmällä mittausalueella, jolloin vika todennäköisemmin osuu mittausalueella kiskoon.

Paikallisen virheen aiheuttama voimamuutos on hyvin lyhykestoinen ja vaikeasti mitattava. Vaakaelementtejä käytettäessä mittausulos muodostetaan summaamalla usean anturin tiedot. Kiskon jouston takia voiman eteneminen kestää jonkin aikaa, ja voimamuutos näkyy tämän takia eri aikaan eri antureilla. Anturitietojen summauksessa eri anturien voimahuiput asettuvat eri kohtiin yhdistetyllä voimakuvaajalla. Tämän ja muiden mittausvirheiden takia mittausvirhe on yli 10 %. Muille mittausavoille ei ilmoiteta parempaa tarkkuutta, ja lisäksi niiden tarkkuus punnituksessa on selvästi huonompi.

Pyörän ja kiskon välinen voimavaihtelu yhden pyörähdyksen ajalta kertoo, kuinka isoja vikoja pyörässä vähintään on. Pyörässä voi olla myös suurempia vikoja kuin mittaus osoittaa. Isot viat eivät osu aina kokonaan kiskoon ja pienet voivat olla osumatta lainkaan, koska pyörän kulkupinta on huomattavasti leveämpi kuin sen kosketuspinta kiskoon. Vian aiheuttamaan voimavaihteluun vaikuttaa myös mittaushetken akselipaino. Pelkän voimasuhteen avulla voidaan luotettavasti havaita selkeät viat, jotka on kaikkien osapuolten kannalta syytä korjata mahdollisimman pian.

Tamtron Systems Oy:n Utissa sijaitsevan Scalex Wild -laitteiston prototyypin tuloksia on suunniteltu otettavaksi käyttöön Suomen rautateillä liikkuvan kaluston kunnan valvonnassa. Laitteiston ja sen käyttöjärjestelmien kehityksen ansiosta se olisi mahdollista vuonna 2008. Teknisesti tuloksien seuraaminen on mahdollista internetin välityksellä, joten eri tahot pääsevät helposti seuraamaan niitä. Tuloksista näkee ainoastaan, koska juna on ohittanut mittauspaikan, joten liikenteen ohjauksen tai muun vastaavan tahon on nimettävä junat, jotta vikahälytyksen aiheuttaneet vaunut voidaan löytää. Kun tiedetään, mikä juna on kyseessä, VR:n Caravan-järjestelmästä löytyy tieto siitä, mistä vaunuyksilöistä se oli koottu. Näitä tietoja VR ei halua luovuttaa ulkopuolisille, joten tulokset olisi annettava VR:lle sellaisessa muodossa, että siellä voidaan täydentää tuloksiin vaunutiedot. Aluksi valvonnan tulisi olla pelkkää tiedottamista, jotta liikennöitsijä saisi käsityksen kalustonsa kunnosta. Vaiheittain tulisi alkaa puuttua vaaralliseksi luokiteltaviin vikoihin ja myöhemmin kaikkiin haitallisiin vikoihin.

Pyörävikojen valvontalaitteiden koekäyttö tulisi aloittaa mahdollisimman nopeasti, jotta varsinainen valvonta voitaisiin sen jälkeen käynnistää myös Suomessa. Kotimaiset junaoperaattorit toivovat pyörävikojen valvontaa, koska huonoilla pyörillä liikennöinti aiheuttaa heille ylimääräisiä kuluja. Idän liikenteen vaunujen suuri vikamäärä on ollut tiedossa hyvin pitkään, ja tilanne on tämän työn mittausten perusteella vähintään niin paha kuin on kuviteltu. Asiasta on pyritty vaikenemaan sen sijaan, että tehtäisiin rohkeita parannuksia. Viro on näyttänyt hyvää esimerkkiä asian ratkaisemiseksi asentamalla Narvan raja-asemalle Lasca-pyörävikailmaisimen.

## 11 YHTEENVETO

Junan pyöriin voi syntyä käytön aikana paljon erilaisia vikoja, jotka lisäävät hetkellisesti pyörän ja kiskon välistä voimaa. Voima voi kasvaa jopa kolminkertaiseksi staattiseen voimaan nähden, mikä lisää huomattavasti radan ja vaunun rasiuksia. Rasiusten kasvaminen aiheuttaa vaunujen laakerivaurioita ja lyhentää telien käyttöikää. Pahat loviviati ovat suurin kiskojen katkeamisten aiheuttaja. Vakavien vaurioiden lisäksi pyöräviati lisäävät kiskojen pinnan kovettumista, mikä lyhentää kiskojen huoltovälejä. Etenkin lovipyörät lisäävät myös junan ohiajomelua sekä maan tärinää radan ympäristössä. Näistä syistä on kaikkien etu, että vialliset pyörät saadaan liikenteestä pois mahdollisimman nopeasti. Kaikkiin vaunutyyppeihin muodostuu pyörävikoja, joten mitään kalustoryhmää ei voi jättää valvonnan ulkopuolelle.

Pyöräviati voidaan havaita mittaamalla kiskon ja pyörän välistä voimaa. Voimamittaus tehdään epäsuorasti mittaamalla kiskon ja pölkyn välistä voimaa, kiskon taipumaa tai kiskon kiihtyvyyttä. Kaikilla mittaustavoilla voidaan havaita pyörien epäpyöreysviati varsin luotettavasti. Mittaustarkkuudessa, laitteiston asennuksessa ja punnitus-toiminnoissa on huomattavia eroja eri mittaustapojen välillä. Varsinaisten pyörävika-ilmaisimien laitevalmistajia on maailmassa alle kymmenen. Pyörävikojen lisäksi ylikuormat ovat yleisiä Suomessa, joten laitteiston tulee mitata myös niitä.

Pyörävikojen mittaustarkkuus on hyvin vaihtelevaa, mutta vikojen jonkin tasoinen havainnointivarmuus on suuri. Suurin epätarkkuuden aiheuttaja on pyörän sivuttaisliike kiskoon nähden. Vian muoto ja suuruus vaihtelevat sivuttaissuunnassa, ja vain osa viasta osuu kiskoon kapean kosketuspinnan takia. Pyörästä tulee mitatuksi vain 10–20 mm leveä kaistale yhdellä mittauskerralla, minkä takia vika näyttää eri mittauksilla erilaiselta. Myös rata joustaa eri tavoin eri kohdista, minkä takia paikalliset viati näyttävät erilaisilta osumakohdasta riippuen. Mittalaitteet näyttävät noin kymmenen prosentin tarkkuudella, kuinka suuri voima pyörän ja kiskon välissä on vaikuttanut. Lovipyörän aiheuttama voimamaksimi kestää alle  $\frac{1}{1000}$  sekuntia, joten voimien ja virheiden määrittäminen on hyvin vaativaa.

Pyörien dynaamisen voimamittauksen jälkeen tulokset vaativat paljon automatisoitua analysointia. Suomen vilkkaimmilla radoilla liikkuu yli 700 vaunua vuorokaudessa. Vaunut ovat enimmäkseen neliakselisia, joten pyörien voimamittauksia kertyy todella paljon jokaisella mittauspaikalla. Laitteiston tulee määrittää mittausdatasta täysin automaattisesti voimamittauksen perusteella, minkä tyyppisiä ja kuinka suuria vikoja pyörissä on. Tulosten hyödyntäminen vaatii automaattisen vaunujen tunnistuksen, jotta vikatiedot yhdistyvät oikeisiin vaunuihin. Viimeinen askel mittauksen jälkeen on suorien tulosten ja niistä muodostettujen raporttien toimittaminen eteenpäin.



## KIRJALLISUUSLUETTELO

### Väitöskirjat

- /1/ Anders Johansson, Out-of-Round Railway Wheels – Causes and Consequences Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden 2005
- /2/ Johan Jergéus, Railway wheel flats – Martensite Formation, Residual Stresses and Crack Propagation, Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden 1998

### Kirjat

- /3/ Bernhard Lichtberger, Track Compendium – Formation, Permanent way, Maintenance, Economics, Eurailpress 2005
- /4/ Coenraad Esveld, Modern Railway Track – Second Edition MRT-productions 2001

### Artikkelit

- /5/ D. W. Barke and W. K. Chiu, A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components, Department of Mechanical Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 2004
- /6/ Whu Thanh and Alan Stirling, Condition monitoring of wheel and rail, The University of Birmingham and Manchester Metropolitan University, 2002
- /7/ Andrea Bracciali, Gianvito Lionetti, Moreno Pieralli, Effective Wheel Flats Detection Through A Simple Device, Università di Firenze
- /8/ Chris A. Papadopoulos, Nikolaos Th. Niakas, Konstantina Diplari, FLATNESS IDENTIFICATION IN WHEELS OF PASSING TRAINS, University of Patras, 2001
- /9/ K. Hou, J. Kalousek, R. Dong, A dynamic model for an asymmetrical vehicle/track system, Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council, Canada, 2003
- /10/ M. Wallentin, H. L. Bjarnehed, R. Lundén, Cracks around railway wheel flats exposed to rolling contact loads and residual stresses, Chalmers University of Technology, SE-41296 Göteborg, Sweden, 2003
- /11/ T. X. WU AND D. J. THOMPSON, A HYBRID MODEL FOR THE NOISE GENERATION DUE TO RAILWAY WHEEL FLATS, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 2001

- /12/ Johan Ahlström, Birger Karlsson, Microstructural evaluation and interpretation of the mechanically and thermally affected zone under railway wheel flats, Department of Engineering Metals, Chalmers University of Technology, 1999
- /13/ Vittorio Belotti, Francesco Crenna, Rinaldo C. Michelini, Giovanni B. Rossi, Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform, PMARLab Laboratory of Design and Measurement for Automation and Robotics, DIMEC-Department of Mechanics and Machines Design, University of Genova, 2005
- /14/ Vu Thanh, Wheel deterioration, The University of Birmingham and Manchester Metropolitan University, 2003
- /15/ Todd Snyder, D. H. Stone, Joseph Kristan, WHEEL FLAT AND OUT-OF-ROUND FORMATION AND GROWTH, 2003
- /16/ Yukata Satoh, Dynamischer Einfluss einer Radflachstelle auf die Gleissenkung, MONATSSCHRIFT DER INTERNAT. EISENBAHN-KONGRESS-VEREINIGUNG - NOVEMBER 1965
- /17/ Marion Bergeron director of Car Maintenance & Planning, Canadian Pacific Railway, Managing railroad safety using trackside technologies to monitor the stress of freight cars
- /18/ Michaël J. M. M. Steenbergen, The role of the contact geometry in wheel-rail impact due to wheel flats, Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility
- /19/ H. J. de Graaf, E. J. J de Jong, M. J. van der Hoek, Gotcha: compact system for measuring train weight and wheel defects, 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System (CM2003) in Gothenburg

#### Lehtiartikkelit

- /20/ Dr.rer.nat. Detlev Ullrich, Dipl.-Ing. Andreas Zoll, Dr.-Ing. Katrin Mädler, Testing of wheel/rail technologies on test rigs and in operational trials
- /21/ Dipl.-Ing. (FH) Erhard Hofmann, Dipl.-Ing. Thomas Oelschlägel, The "Shuttle": An automated ultrasonic test system for hollow-bored wheelset axles
- /22/ Dipl.-Ing. Bernd Rockstroh, Dipl.-Phys. Wolfgang Kappes, Dipl.-Ing. Friedhelm Walte, New systems for testing wheels and wheel sets
- /23/ Prof. Dr.-Ing. Peter Meinke, Monitoring the rolling quality of wheelsets
- /24/ Dipl.-Ing. Gerd LeDosquet, Dipl.-Ing. Frank Pawellek, Dr.-Ing. Frank Müller-Boruttau, Lasca®: Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles, Railway Technical Review issue 2/2007

- /25/ Wolfgang Zottl, Condition detection – an intelligent solution, European Railway Review issue 4/2006

#### Tuote-esitteet

- /26/ Tagmaster, GOTCHA – Wheel Flat Detection and Axle Load Measurement
- /27/ GE Rail, MATTILD Mainline and Transit Train Impact Load Detector
- /28/ Graw laser measurement system, WF Wheel flats and out of round wheels detection system
- /29/ Greenwood Engineering, Miniprof
- /30/ Schenck Process, Multirail
- /31/ Sensor Line, Fibre-Optic Railway Sensors
- /32/ Teknis Electronics, Wayside Monitoring System ja Wheel Condition Monitor
- /33/ Salient Systems, Wheel Impact Load Detector – WILD
- /34/ Hegenscheidt MFD, Wheel diagnostic system – Type Argus
- /35/ Signal & System Technik, ATLAS
- /36/ ABB Signal, Wheel Impact Load Detector
- /37/ Detektionsanlage für unrunde Räder, DafuR

#### Muut

- /38/ Ratahallintokeskus, Verkkoselostus 2008
- /39/ Jouko Lehtomäki, Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus 250 kN ja 300 kN akselipainot, Ratahallintokeskus
- /40/ Bergström, Tommi, Ratakiskojen väsyminen, Diplomityö 2007
- /41/ Junaturvallisuussäätöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt)
- /42/ Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet (LIMO)
- /43/ Liikenteen telematiikka strategia 2004, Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu, ISBN 951-723-477-5
- /44/ Tutkintaselostus C2/1999 R Tavarajunan suistuminen kiskoilta Jalasjärvellä 19.2.1999



- /45/ Tutkintaselostus C 5/1999 R Tavarajunan suistuminen kiskoilta Kiuruvedellä 16.3.1999
- /46/ A 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- /47/ Suomen rautatietilasto 2007, Ratahallintokeskus
- /48/ RHK, Ratatekniset määräykset ja ohjeet

#### Internet-lähteet

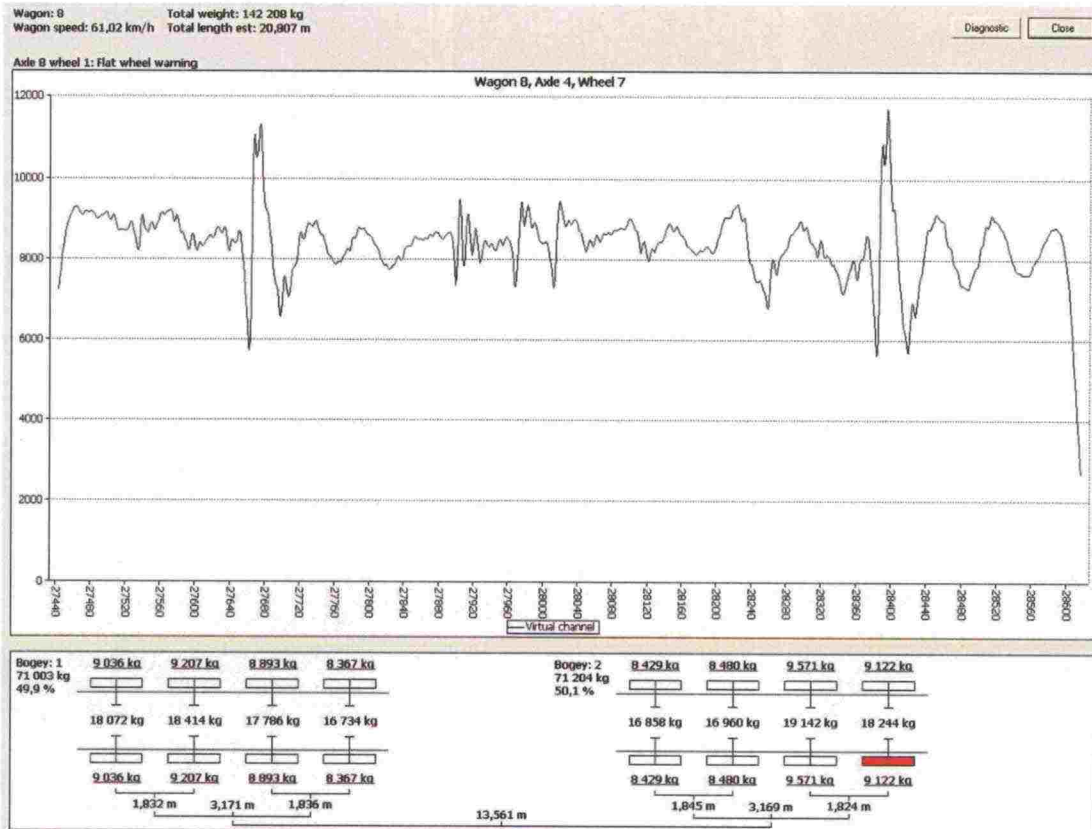
- /49/ Rautatieteollisuuden sivusto, <http://jwr.janes.com/public/jwr/index.shtml> , Viitattu 28.5.2007
- /50/ ORR, Office of Rail Regulation Eurooppalaista junalainsäädäntöä, <http://www.rail-reg.gov.uk/server/show/nav.253>, viitattu 30.5.2007
- /51/ Rautatiealan julkaisuja, <http://www.railwaydirectory.net/home.php>, viitattu 30.5.2007
- /52/ Englantilainen rautatiealan lehti, <http://www.railwaygazette.com/Home/Default.aspx> , viitattu 4.6.2007
- /53/ Saksalainen kiskokalustotekniikan lehtien kustantaja, <http://www.eurailpress.com/>, viitattu 4.6.2007
- /54/ Japanilainen juna-alan lehti englanniksi, <http://www.jrtr.net/>, viitattu 4.6.2007
- /55/ Rautatiealan konsultti, <http://www.esveld.com/>, viitattu 12.6.2007
- /56/ Rautatieteknologian lehti, <http://www.europeanrailwayreview.com/>, viitattu 12.6.2007
- /57/ International heavy haul association, <http://www.ihha.net/>, viitattu 12.6.2007
- /58/ Göteborgin teknillinen korkeakoulu, jossa tehdään paljon juna-alan tutkimusta, <http://www.chalmers.se/en/sections/research/publications>, viitattu 12.6.2007
- /59/ Rautatiealan tutkimuskeskus Göteborgissa, <http://www.charmec.chalmers.se/>, viitattu 12.6.2007
- /60/ Onnettomuustutkintakeskuksen suositukset, <http://www.onnettomuustutkinta.fi/12499.htm#S117>, viitattu 28.6.2007
- /61/ Argos Systemsin kehittänyt insinööritoimisto, <http://www.bamm.at>, viitattu 8.8.2007
- /62/ <http://fi.wikipedia.org/wiki/Raideleveys>, Viitattu 14.9.2007

## Pyörien mittausrakenteita

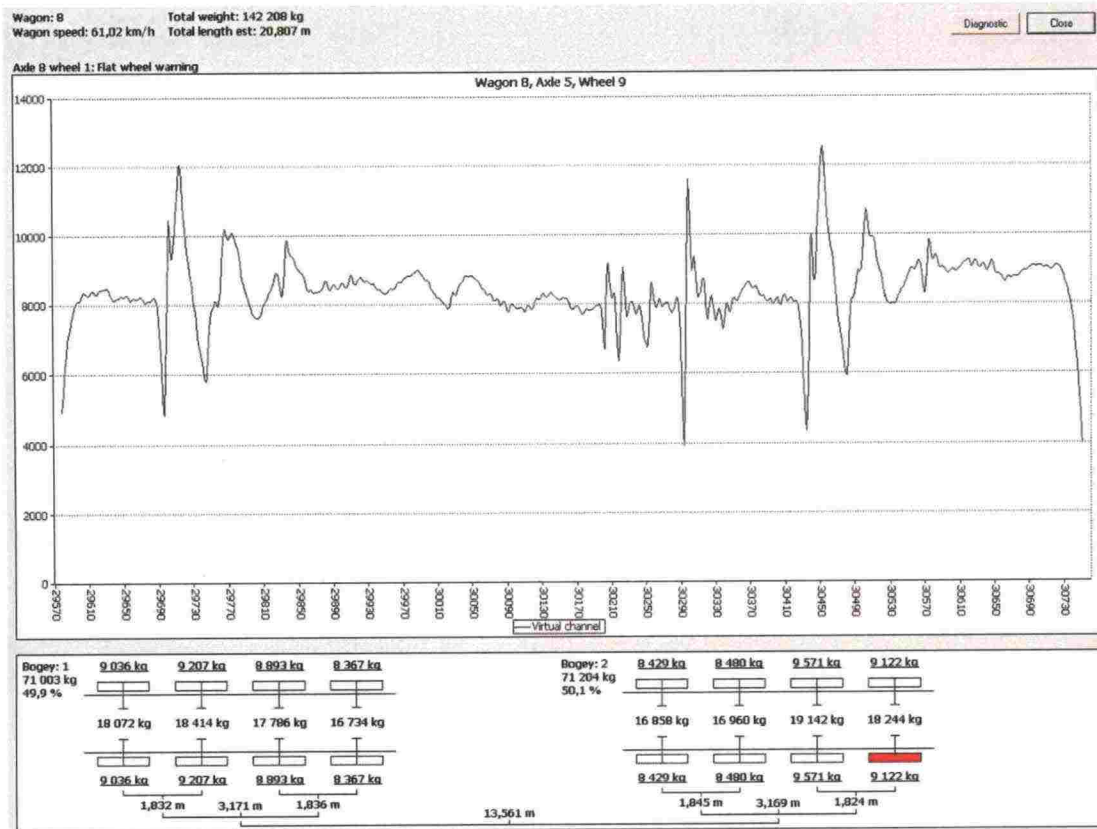
- /63/ Lasca, kiskon taipumaa mittaava laite, <http://www.innotec-eu.de/>, viitattu 4.8.2007
- /64/ Tamtronin mittalaite, <http://www.pivotex.com/wild.html>, viitattu 6.8.2007
- /65/ WheelSpec, <http://www.imagemap.com/WheelSpec.html>, viitattu 10.8.2007
- /66/ Hitaasti liikkuvan junan pyöriä laserilla mittaava laite, [http://www.tecnoeuropa.it/products.asp?id=26&id\\_art=](http://www.tecnoeuropa.it/products.asp?id=26&id_art=) , viitattu 10.8.2007
- /67/ Teollisuusportaalin tarjoamat mittalaitteet, <http://www.railway-technology.com/contractors/weighing/>, viitattu 10.8.2007
- /68/ Artikkele mittalaitteista, [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_m0BQQ/is\\_12\\_39/ai\\_58446312](http://findarticles.com/p/articles/mi_m0BQQ/is_12_39/ai_58446312), viitattu 15.8.2007
- /69/ Artikkele mittalaitteista, <http://www.railway.bham.ac.uk/wheels.htm>, viitattu 15.8.2007
- /70/ Britannian rautateiden kehittämä lasermittalaite, [http://www.matrox.com/imaging/de/nachri\\_ere/feature/archives/2001/treadview.cfm](http://www.matrox.com/imaging/de/nachri_ere/feature/archives/2001/treadview.cfm) , 5.9.2007
- /71/ Skotlannin valvontalaitteisto, <http://www.scot-rail.co.uk/page/WheelChex>, viitattu 2.8.2007
- /72/ Australialainen mittalaite Teknis, <http://www.teknis.net/WMSOver/WCM.htm>, viitattu 2.8.2007
- /73/ Gotchan anturivalmistajan kotisivut, <http://www.coenecoop.nl/>, viitattu 3.8.2007
- /74/ Gotcha-pyörävikatunnistimen kotisivut, <http://www.gotchamonitoringsystems.com/>, viitattu 3.8.2007
- /75/ ÖBB:n kehittämä laitteisto, <http://www.argos-systems.eu/>, viitattu 8.8.2007
- /76/ Ruotsin rautateiden kehittämä laite, <http://www.amtab.se>, viitattu 10.8.2007

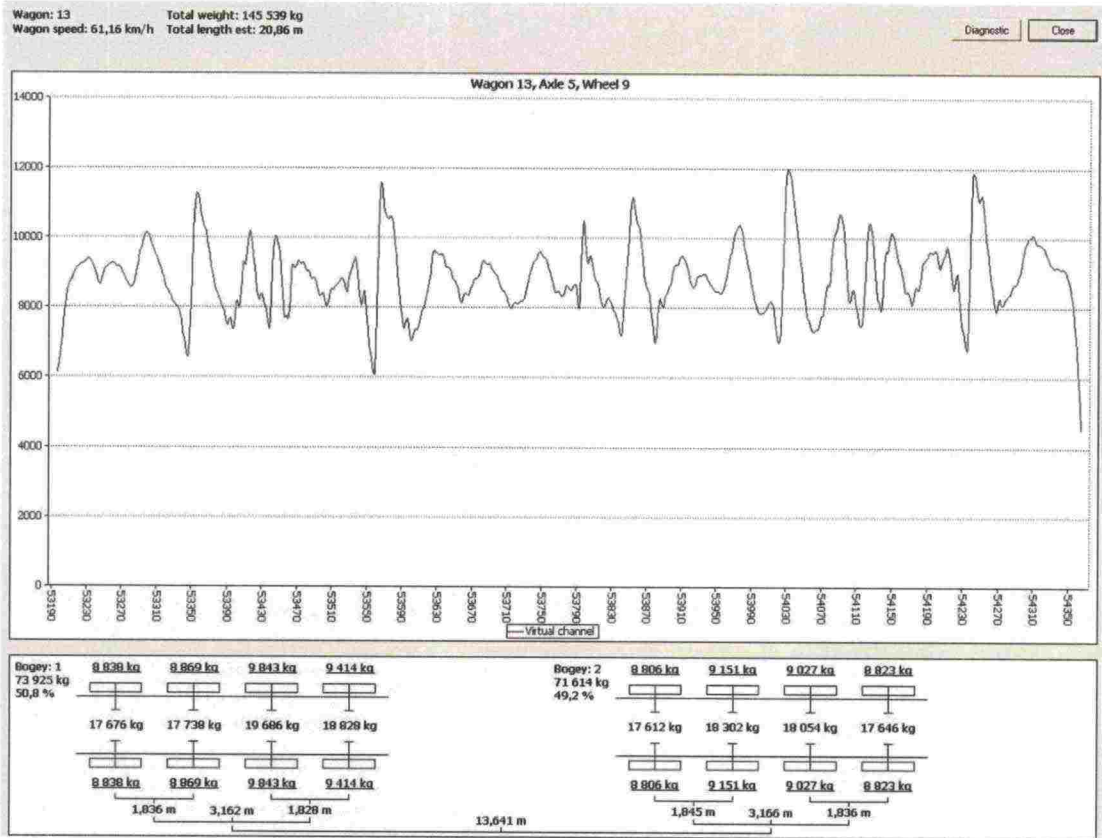
## Kilpilahteen 12.11. saapuneen junan pyörävikojen kuvia ja voimakuvaajia

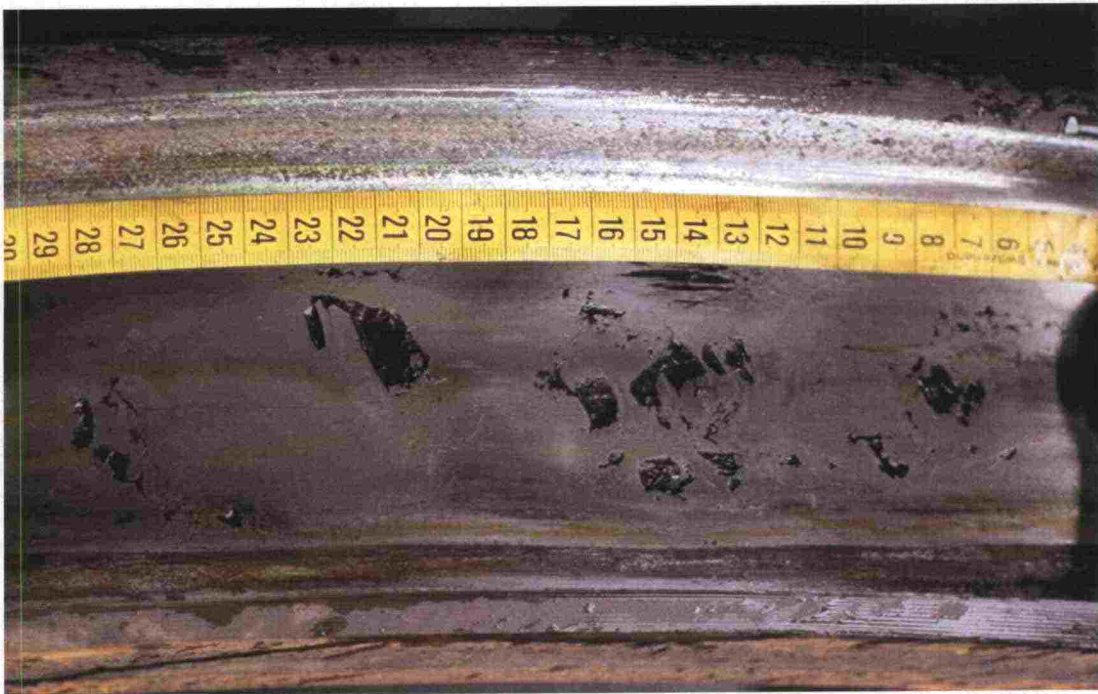
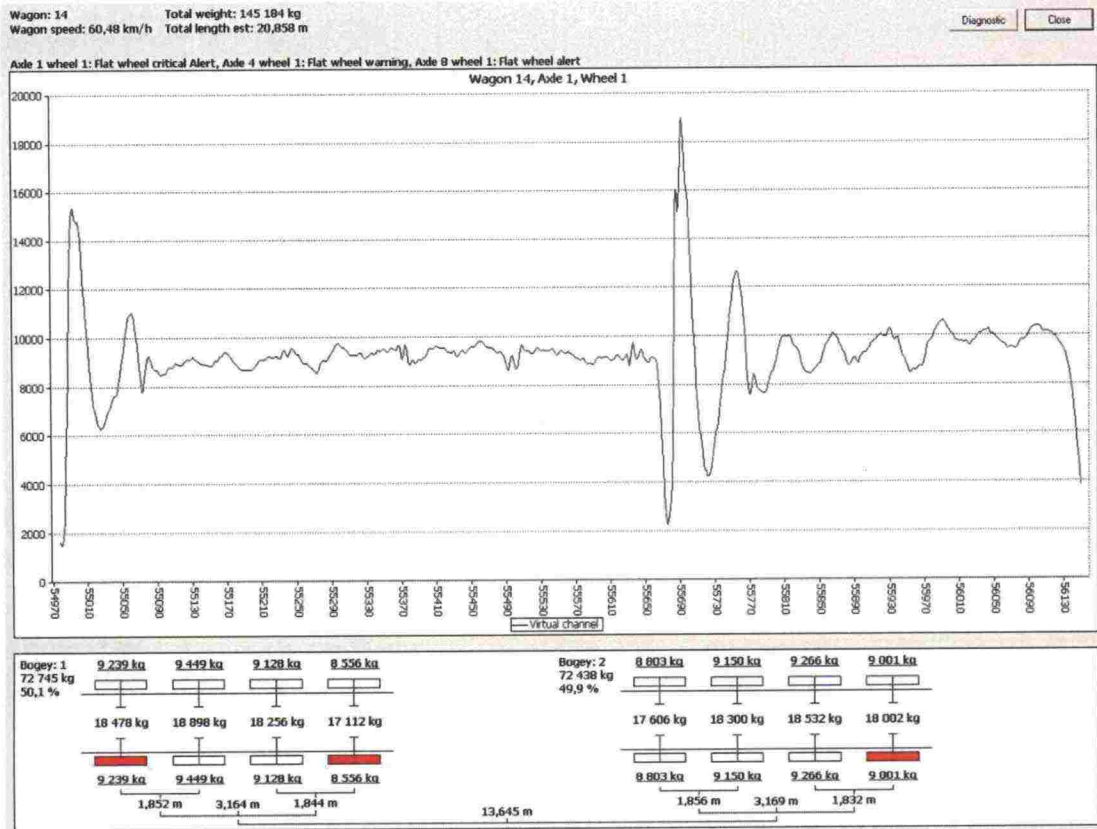
Tässä liitteessä on kuvia 12.11. Venäjältä Kilpilahteen saapuneen junan pyörävioista sekä näiden pyörien Utissa mitatut voimakuvaajat. Ensin tulee akselin voimakuvaaja. Voima-arvot ovat puolet akselivoiman arvoista, jolloin ne kuvaavat pyörävoimia. Tämän jälkeen esitetään kuvat niistä vioista, joita akselilta löydettiin. Keltainen sävy, joka näkyy joissakin kuvissa, on peräisin valokuvaajan huomioliiveistä.



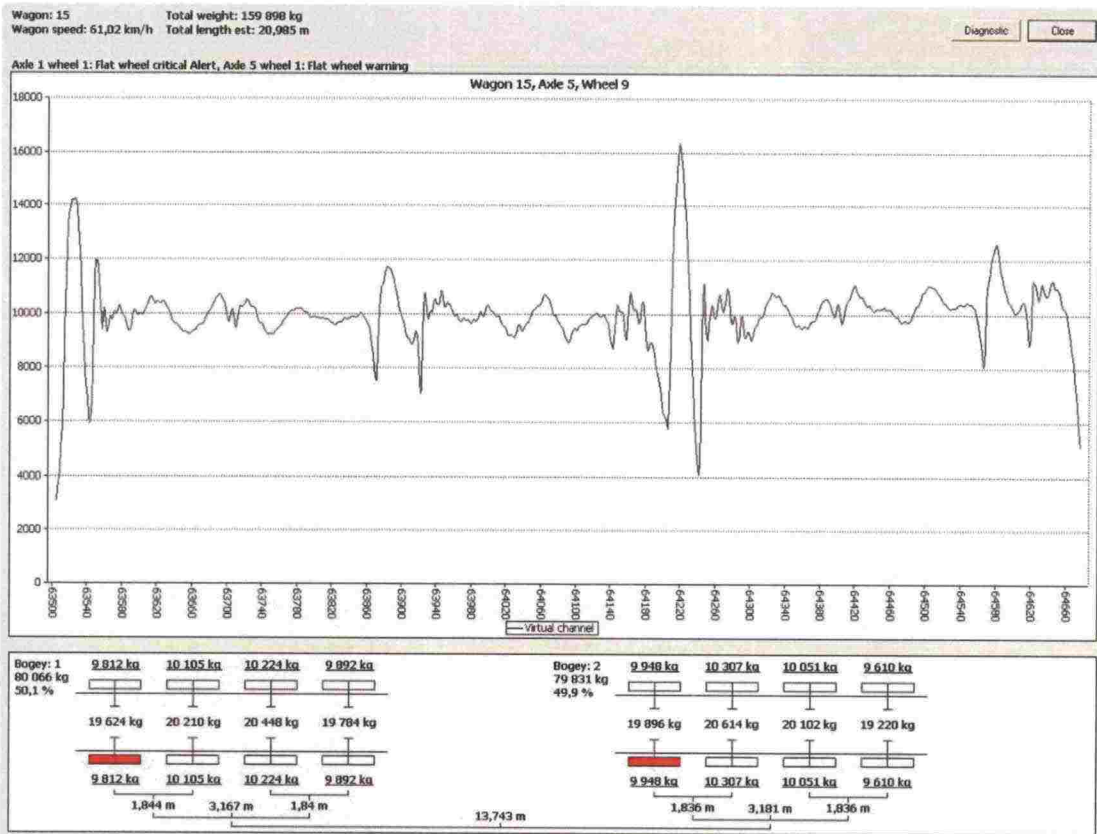


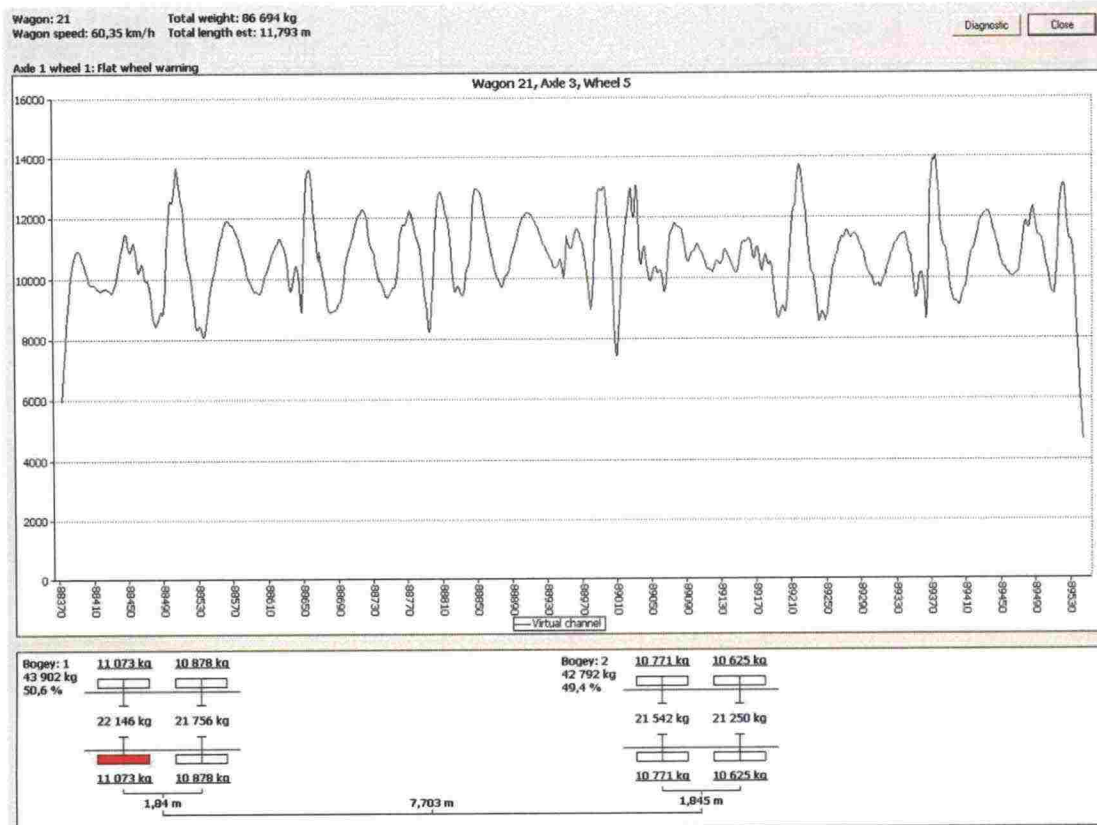


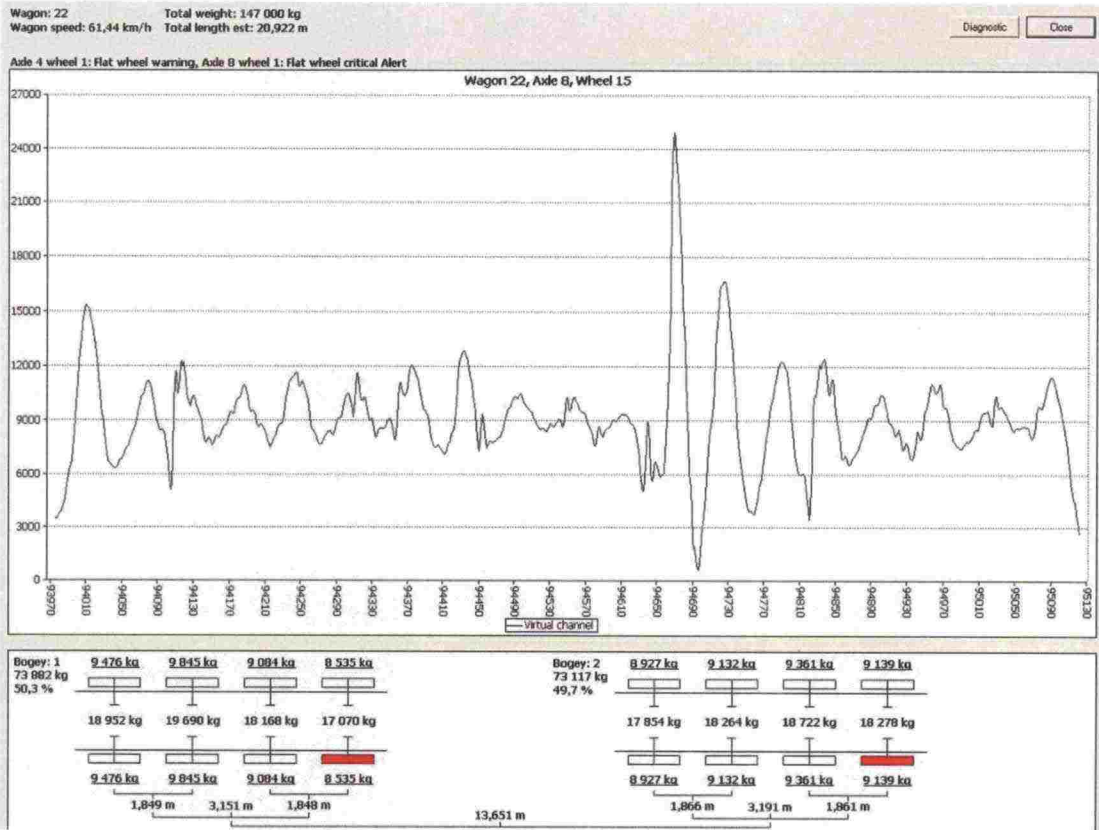




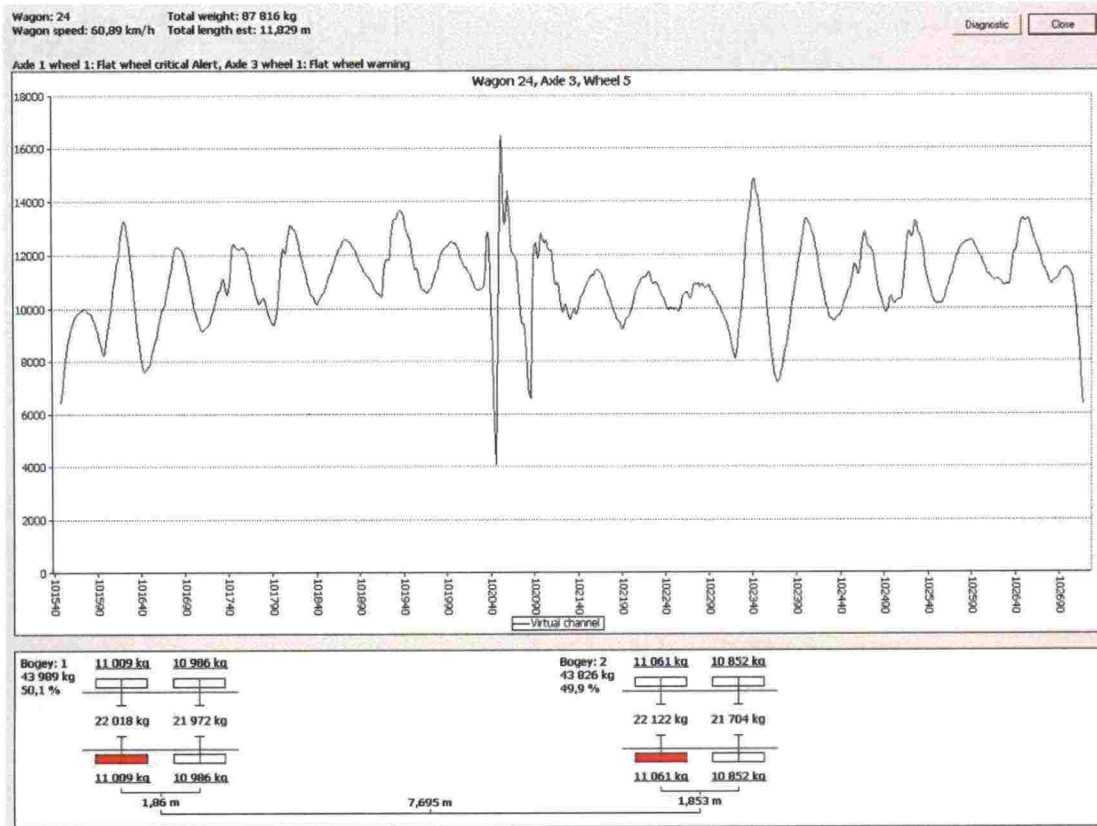




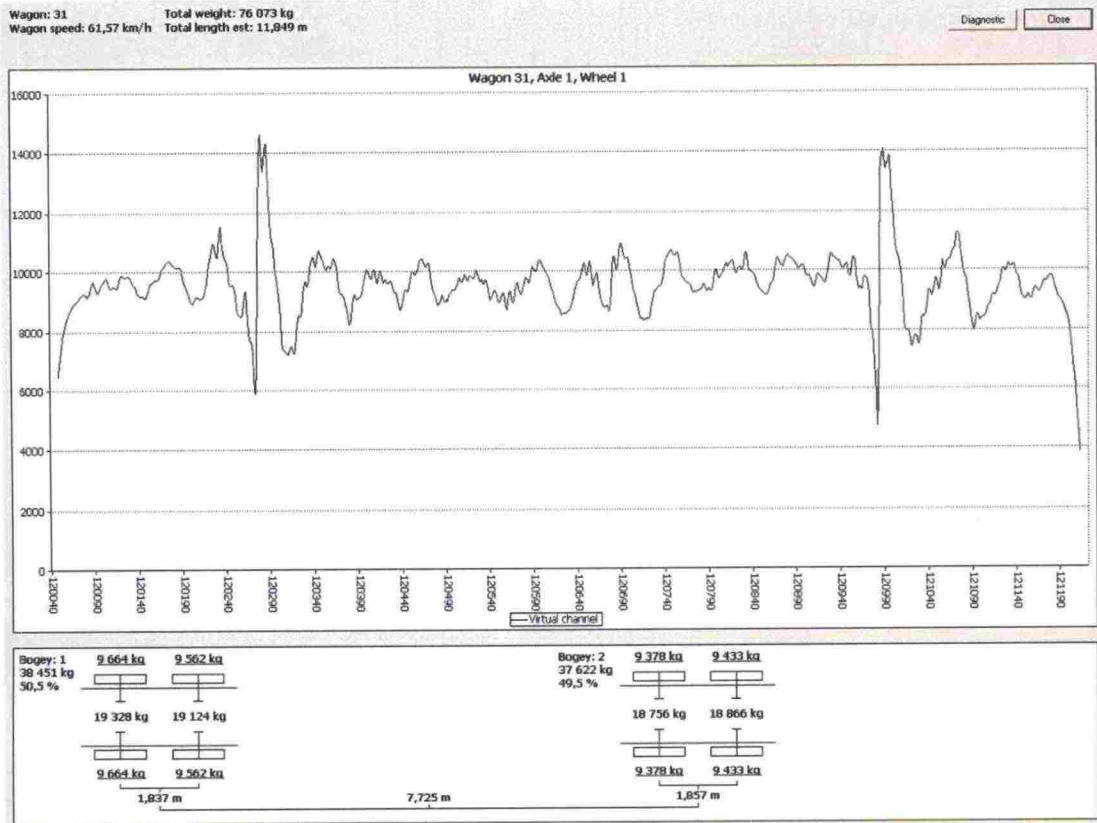




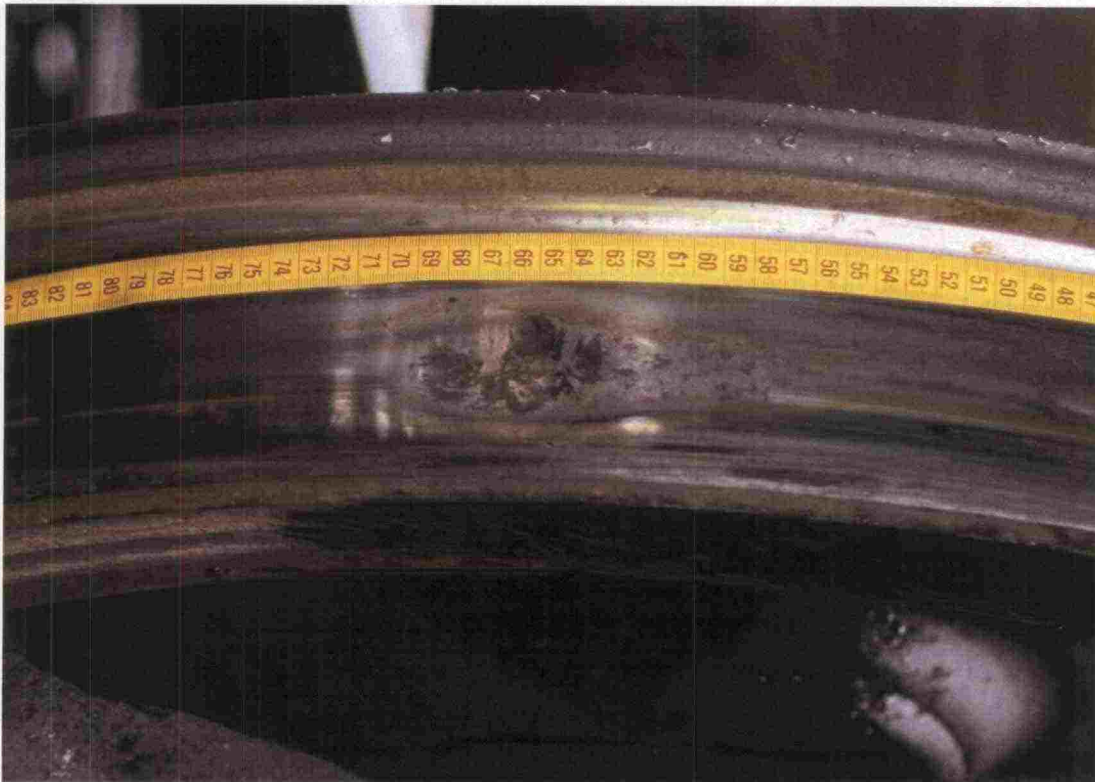
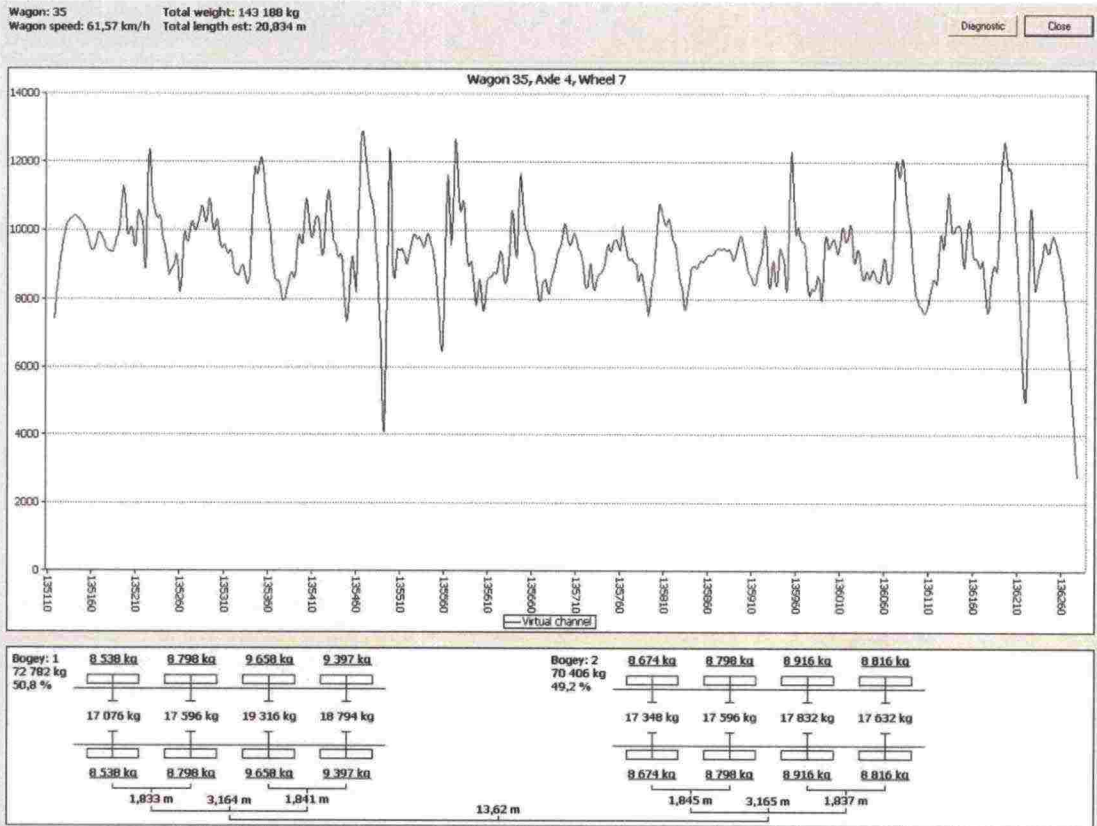


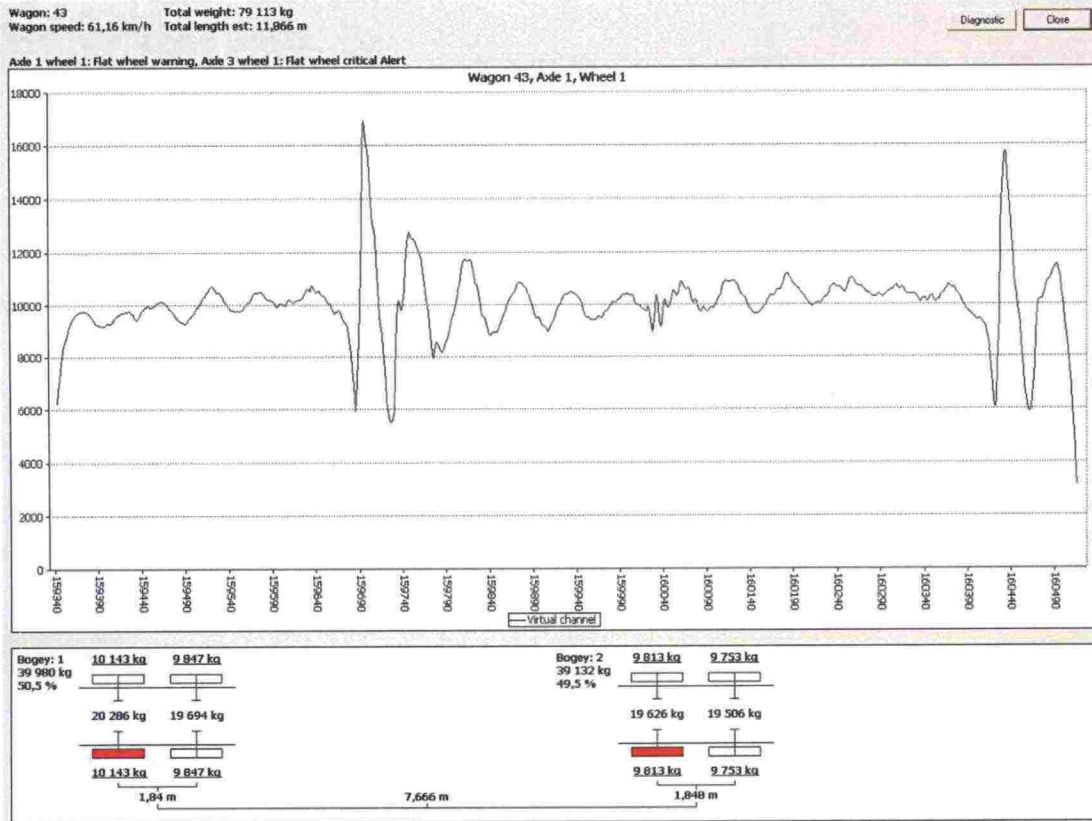






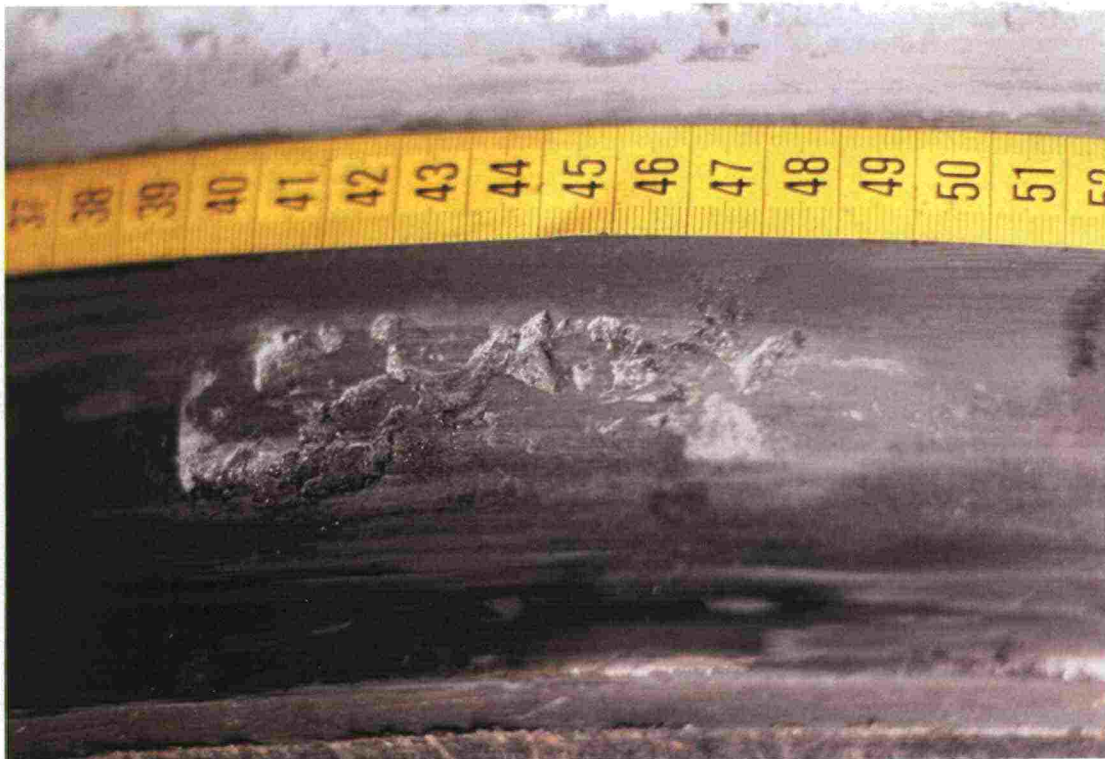










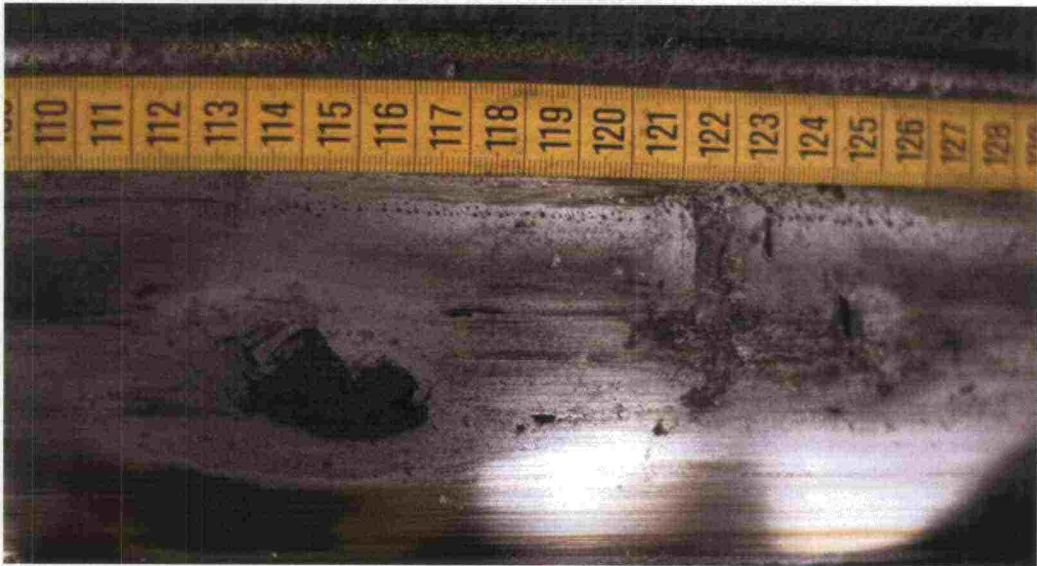








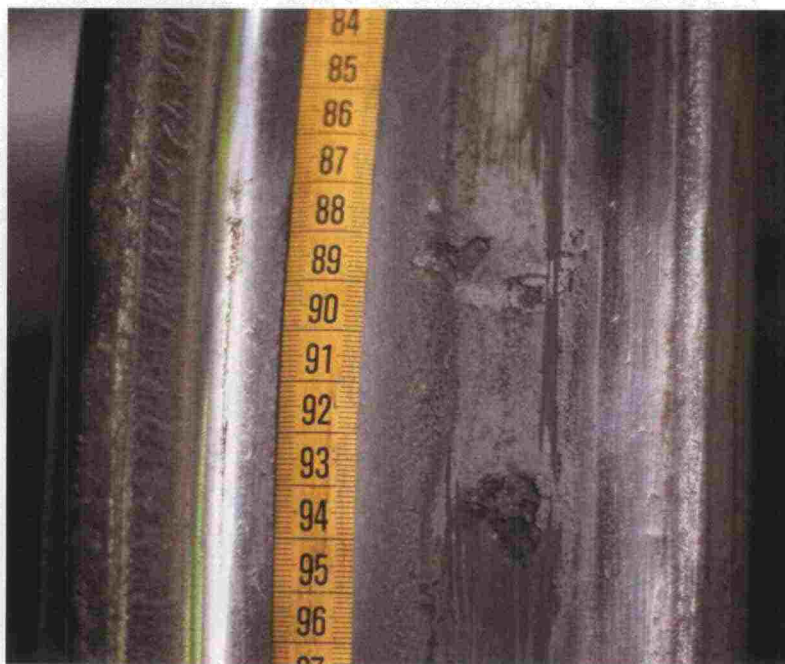
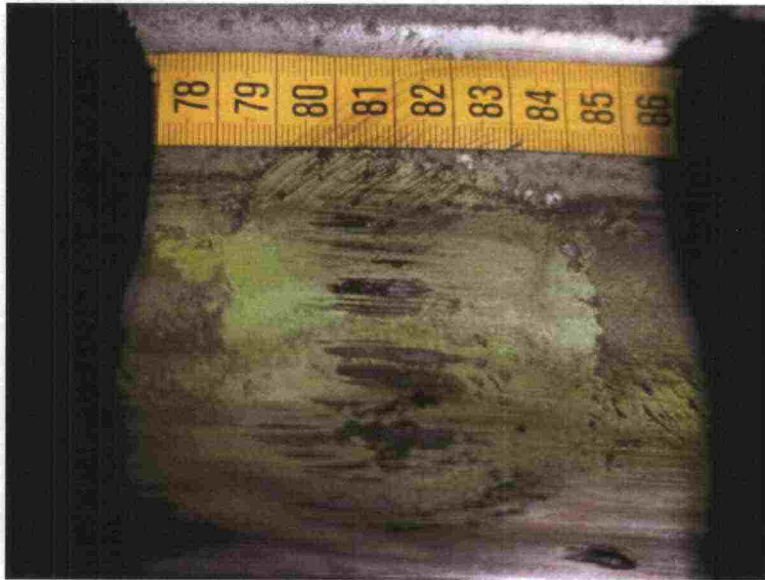




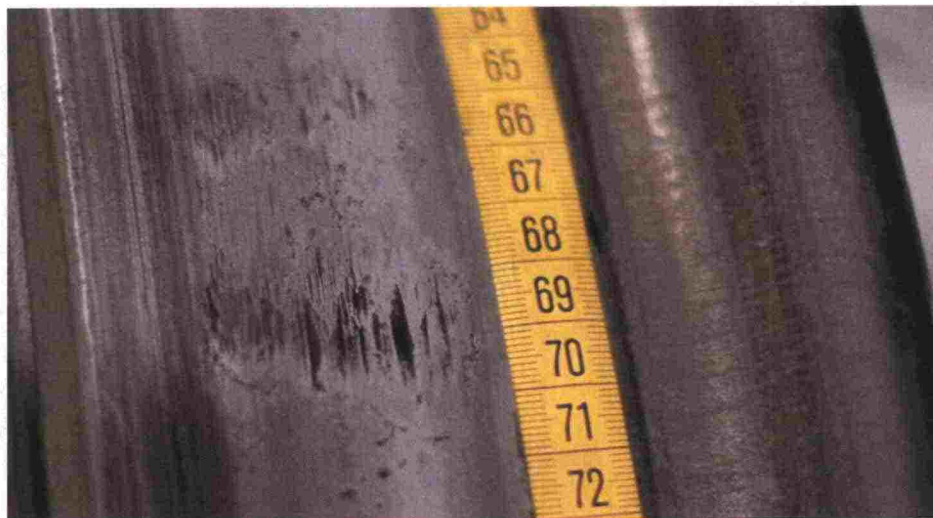
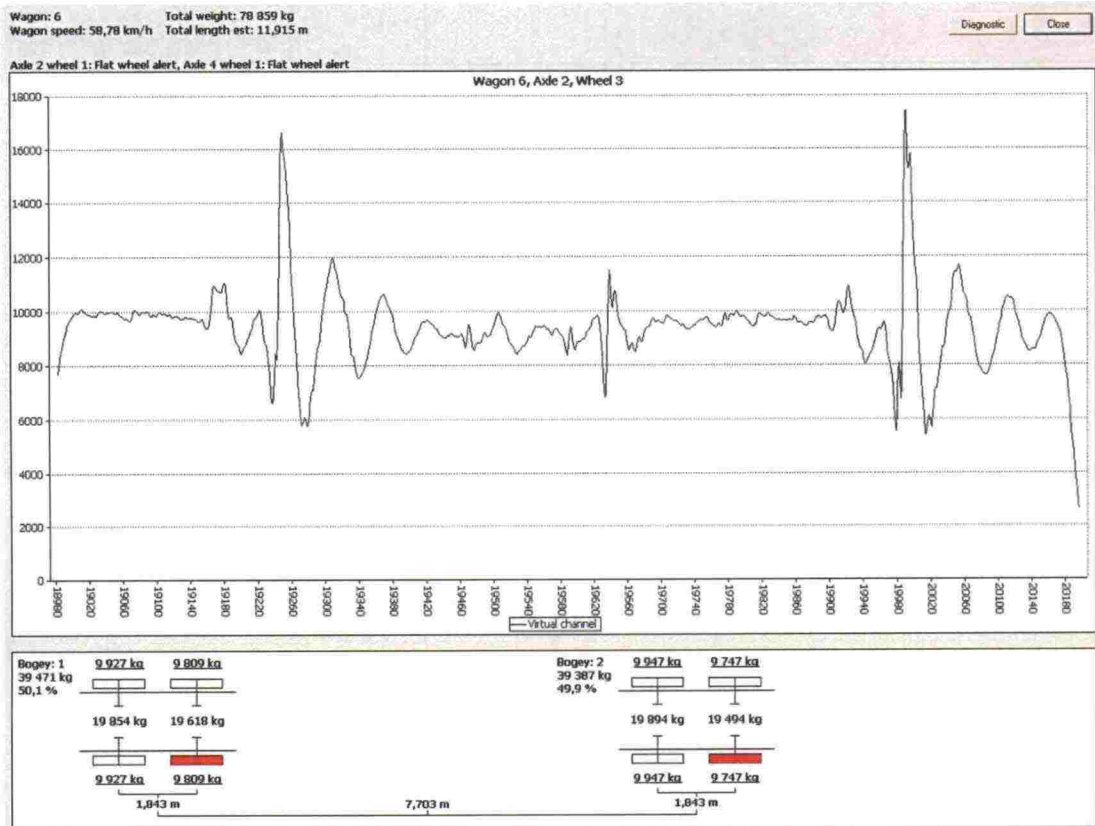
Kohta 150 cm, mittaa siirretty

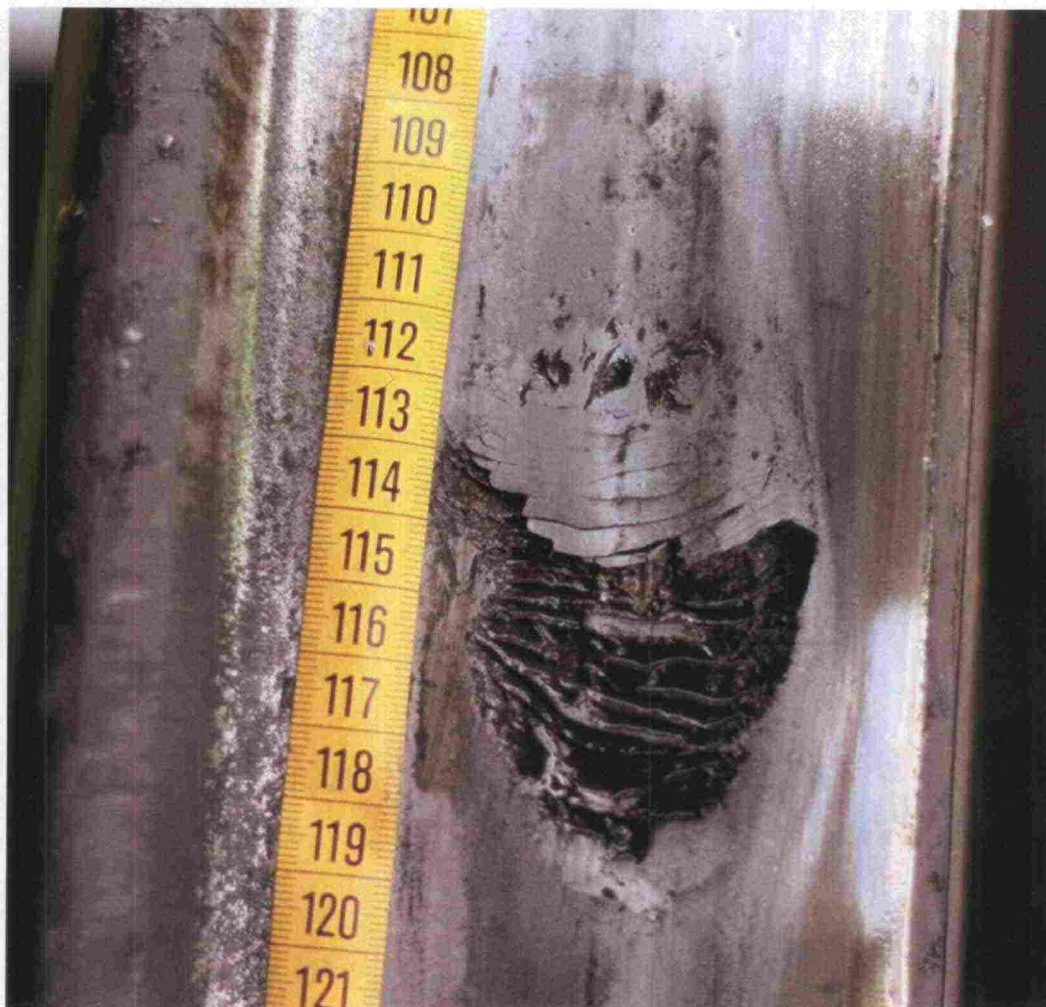
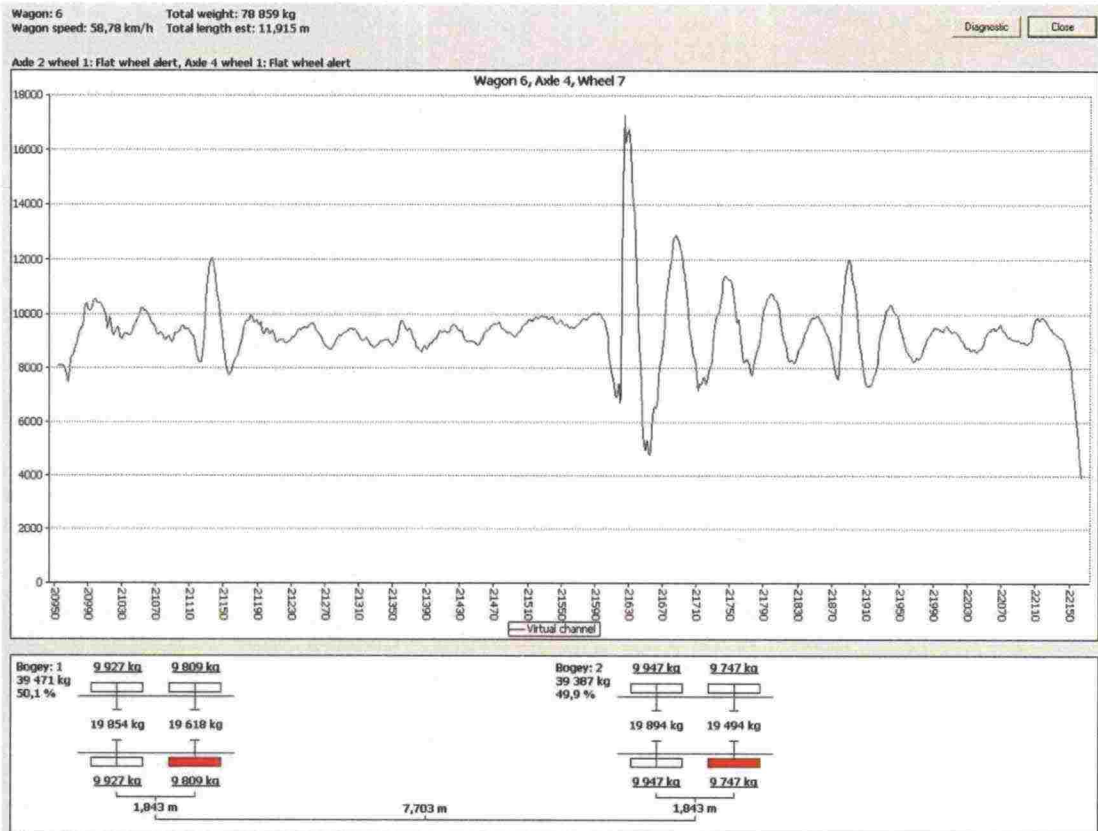




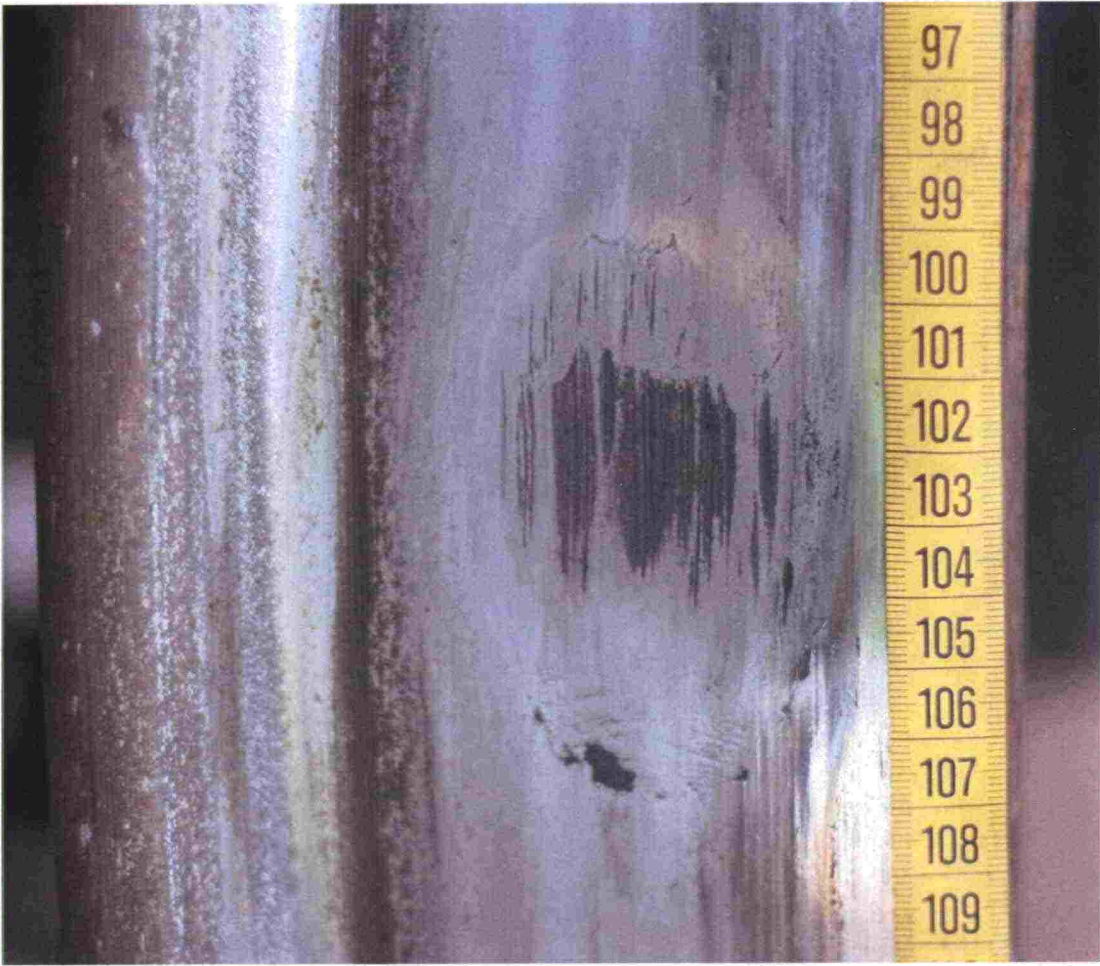
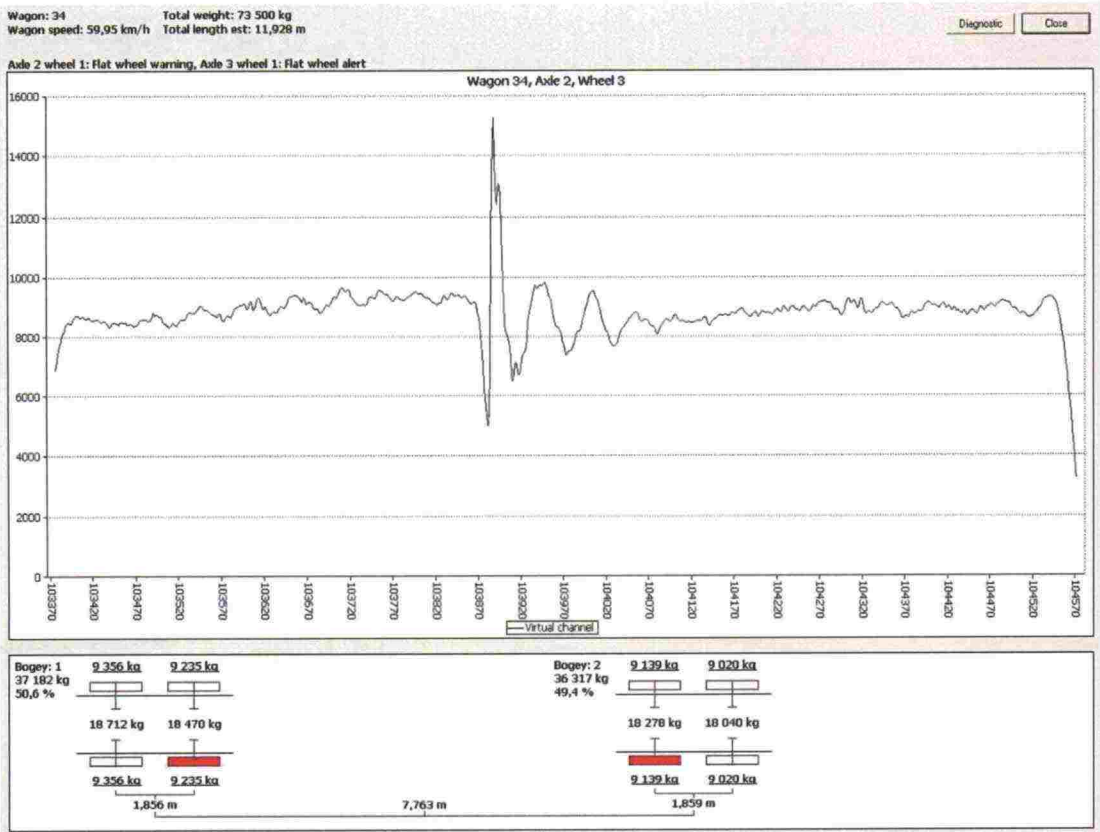














## RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
- 4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
- 5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
- 6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
- 7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
- 8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
- 9/2006 Ratarakenteissa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
- 10/2006 Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet  
Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
- 11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
- 12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartoitus ja toimenpideohjelma
- 1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki–Imatra-rataosuudelle
- 2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997–2005
- 3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2005
- 4/2007 Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiliteettitarkasteluihin
- 5/2007 Pohjois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 6/2007 Suomen rataverkon tärinäselvitys  
Kirjallisuuskatsaus ja tärinäkohteet vuosina 2000–2006
- 7/2007 Luvattomien radanylitysten välttäminen
- 8/2007 Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa
- 9/2007 Markkinoilletulo ja rautatiemarkkinoiden muutos kotimaisen tavaraliikenteen avautuessa kilpailulle Suomessa
- 10/2007 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman liikenne-ennusteet
- 11/2007 Logistiikkakeskusten tie- ja ratayhteydet
- 1/2008 Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys
- 2/2008 Rautatieliikenteen simuloinnin merkitys ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisessa
- 3/2008 Rautateiden liikkuvan kaluston kunnon valvonta runkoverkolla
- 4/2008 Raakapuukuljetusten tulevaisuuden haasteet
- 5/2008 Perussolmura- tai pihojen merkitys ja näkymät osana kuljetusjärjestelmää
- 6/2008 Tasoristeysten kansirakenteet
- 7/2008 Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys
- 8/2008 Kolarin seudun kaivos Hankkeet
- 9/2008 Rataverkon pohjavesialueiden riskienhallinnan kehittäminen
- 10/2008 Rautatieliikenteen pitkän aikavälin suunnitteluprosessin kehittäminen
- 11/2008 Rautatieliikenteen häiriöiden analysoinnin kehittäminen



**RATAHALLINTOKESKUS  
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:  
Ratahallintokeskus  
Kaivokatu 8, PL 185, 00101 Helsinki  
puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100  
[www.rhk.fi](http://www.rhk.fi)

ISSN 1455-2604  
ISBN 978-952-445-243-4