



Hannu Salmela, Sirra Toivonen & Petri Pekkala

Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siperian radalla

Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siperian radalla

Hannu Salmela, Sirra Toivonen & Petri Pekkala

ISBN 978-951-38-7211-3 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7212-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2008

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Tekniikankatu 1, PL 1300, 33101 TAMPERE
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 3499

VTT, Teknikvägen 1, PB 1300, 33101 TAMMERFORS
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 3499

VTT Technical Research Centre of Finland, Tekniikankatu 1, P.O. Box 1300, FI-33101 TAMPERE, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 3499

Kansikuvat: Liikenne- ja viestintäministeriö sekä Vostochniy Stevedoring Company; ks. lähteet [1] ja [5].
Muokannut Sisko Mäensivu.

Toimitus Anni Repo

Edita Prima Oy, Helsinki 2008

Salmela, Hannu, Toivonen, Sirra & Pekkala, Petri. Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siberian radalla [A case study of transport stresses on Trans-Siberian railway]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2435. 59 s.

Avainsanat transport stress, Trans-Siberian railway, logistics risk management, transport risk

Tiivistelmä

Kaukoidän ja Euroopan välisten toimitusten merkitys on selvästi kasvanut viime vuosi-na. Merikuljetusten ohella Trans-Siberian rata (TSR) on potentiaalinen reitti tuotteiden tuontiin Suomeen ja Suomesta Venäjälle sekä tuotteiden vientiin idän markkinoille. Siperian radan reitin aiheuttamista fyysisistä rasituksista on kuitenkin vähän tietoa. Tutkimuksen tavoitteena olikin luoda uutta ymmärrystä tuotteisiin kohdistuvista ilmastollisista ja mekaanisista rasituksista ja riskeistä Siperian radalla ja siihen liittyvässä toimitusketjussa.

Tutkimuksessa toteutettiin käytännön mittaus, jossa seurattiin rasituksia yhden case-toimituksen aikana touko-kesäkuussa 2007. Tulosten analysoinnissa hyödynnettiin rautatiekuljetusten ja junavaunujen törmäyskokeiden tuloksia Suomessa ja Länsi-Euroopassa.

Tulosten perusteella kuljetukset ja käsittelyt Siperian radalla ovat kansainvälisesti sovitujen standardien mukaisia eivätkä muodosta erityistä riskiä tuotteille. Tarpeenmukainen tuotekohtainen suojaus on kuitenkin huomioitava radalla. Merikuljetuksiin verrattuna Siperian radan etuja ovat nopeus ja pienempi tuotteille kohdistuva korroosioriski. Toisaalta TSR:n kylmä talvi-ilmastosta ja lämpötilavaihtelujen asettamat vaatimukset tulee huomioida tuotteiden pakkaussuunnittelussa ja suojauksessa.

Siperian radan mekaaniset rasitukset eivät poikkea huomattavasti Suomessa (ja Länsi-Euroopassa) tapahtuvista rautatiekuljetuksista. Tuotteisiin kohdistuneet iskut ja kiihtyvyydet ovat suunnilleen samalla tasolla kuin Suomessa VR:n ja VTT:n suorittamissa tarkasteluissa. Iskut syntyivät pääasiassa nostoista ja junavaunujen järjestelyistä ratapihoilla ja asemilla. Iskujen lisäksi koko kuljetuksen aikana mitattiin toistuvaa tärinää. Tulosten perusteella radan mekaaniset rasitukset eivät muodosta tuotteille huomattavasti suurempaa riskiä merikuljetuksiin ja satamakäsittelyihin verrattuna.

Salmela, Hannu, Toivonen, Sirra & Pekkala, Petri. Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siberian radalla [A case study of transport stresses on Trans-Siberian railway]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2435. 59 p.

Keywords transport stress, Trans-Siberian railway, logistics risk management, transport risk

Abstract

The importance of supply chains between Far East and Europe has increased significantly in the last years. Besides sea routes across the Indian Ocean and the Suez canal, the Trans-Siberian railway (TSR) is an alternative route to import or transit products to Finland and Russia and to export products to the eastern markets. However, there is only little information of physical stresses of the TSR. The objective of this study was to bring understanding of climatic and mechanical stresses that the products undergo during transport along the TSR.

The study consisted of a practical measurement with a case shipment from Finland to South Korea in May/June 2007. The analysis was supported with stress data from railway shipments and railcar collision tests in Finland and Western Europe.

According to the results, transportation and handling stages on the railway are in line with internationally agreed standards and do not pose special risk for the products. Proper protection of the products is as in railway shipments generally. Compared to the competing sea routes, advantages in speed and corrosion-free environment of the Trans-Siberian railway have to be judged with protection requirements against cold winter climate and temperature gradients.

Mechanical stresses during the TSR are in the same level as stresses during typical railway shipments in Finland (and in Western Europe). Maximum shocks witnessed by the products are in line with tests made with VR Cargo and VTT Technical Research Centre of Finland in Finland. Typically the maximum shocks were generated during lifting and shunting work in railway yards and stations. Continual vibration was also recorded during the whole 2 week transportation. However, mechanical stresses on the railway do not pose significantly higher threat to products than normal sea transport and harbour activities.

Alkusanat

Tekijät haluavat kiittää seuraavia yrityksiä ja henkilöitä, jotka mahdollistivat tutkimuksen toteuttamisen tai edesauttoivat merkittävästi tulosten tarkasteluja:

TurvaTH-yritysryhmä:

Finnlines Oyj

Patria Weapon Systems Oy

TNT Suomi Oy

Helsingin satama

Tksoft Oy

VR Cargo

Marecap Trans Oy

PP-logistiikka Oy

Tuotekehitys Oy Tamlink

Olli Parikka, Steveco Oy

Tuija Mononen, Steveco Oy

Petteri Lautamies, Steveco Oy

Erkki Oikarinen, UPM

Jouni Karhunen, VR

Esko Korpinen, VR

Kari Raittila, VR

Juha Tammisto, VR

Reijo Suomalainen, VR

Sirkka-Leena Holmberg, VR

Matti Andersson, VR

Sven-Olof Olsson, Mobitron Ab

Hannu Aarrelampi, Hantekno Oy

Jani Ojala, Amptech Oy

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	8
2. Tavoite.....	9
3. Taustaa.....	10
3.1 Trans-Siperian rata (TSR).....	10
3.2 Kuljetusreitin valinta.....	14
3.3 Raidekuljetuksen kuljetusrasitukset.....	17
3.3.1 Rautatiekuljetusten mekaaniset rasitukset.....	18
3.3.2 Rautatiestandardit.....	19
3.4 Kuljetusten aikaisten rasitusten mittaus.....	21
3.5 Aikaisemmat mittaukset Siperian radalla ja rautateillä – taustatietona tutkimuksen suunnitteluun.....	22
3.5.1 VTT:n ja VR:n törmäystestit 2006.....	22
3.5.2 VR:n törmäystestit 2001.....	23
3.5.3 VR:n törmäystesti venäläisvaunuilla.....	23
3.5.4 VR:n kuljetusmittaukset Suomessa.....	24
3.5.5 Paperirullien kuljetusrasitustutkimus Länsi-Euroopan rautateillä.....	24
3.5.6 TSR-mittaus keväällä 2006.....	25
4. Menetelmät.....	27
4.1 Case-toimitus.....	27
4.2 Käytetyt mittalaitteet.....	28
4.3 Asetusarvojen valinta TSR-mittaukseen.....	30
4.4 Mittalaitteiden sijoittelu.....	33
5. Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	35
5.1 Junakuljetuksen aikainen lämpötila ja kosteus.....	36
5.2 Junakuljetuksen aikaisten kiihtyvyydet.....	39
5.2.1 Päiväkohtaiset maksimi-arvot junakuljetuksen aikana.....	40
5.2.2 Junakuljetuksen aikaisten maksimikiihtyvyyksien aaltomuodot ja kestot.....	45
5.2.3 Kiihtyvyyksien lukumäärä ja jakauma junakuljetuksen aikana.....	48
5.3 Vostochny–Busan merikuljetuksen aikaisten rasitukset.....	51

6. Päätelmät ja suositukset	54
6.1 Siperian radan ilmastorasitukset.....	54
6.2 Siperian radan mekaaniset rasitukset.....	54
6.3 Mittausjärjestelyn arviointi.....	55
7. Yhteenveto	57
Lähdeluettelo	58

1. Johdanto

Kaukoidän ja Euroopan (ja Suomen) välisten toimitusten merkitys on kasvanut viime vuosina selvästi. Siperian läpi kulkeva toimitusketju tarjoaa potentiaalisen reitin tavaroiden tuomiseen Suomeen ja Suomen kautta mm. Venäjälle sekä tavaroiden viemiseen itäisille markkinoille Kiinaan, Koreaan ja Japaniin. Tällä hetkellä merikuljetukset hallitsevat selvästi näiden materiaalivirtojen määrässä. Trans-Siperian rataa (TSR)¹ käyttämällä voidaan parhaimmillaan saavuttaa merkittäviä aikataulullisia säästöjä ja myös osittain pienentää tuotteisiin kohdistuvia ilmastollisia rasituksia merikuljetukseen verrattuna. Toisaalta Siperian radan on yleisesti arveltu aiheuttavan tuotteelle merikuljetusta suurempia mekaanisia rasituksia.

Siperian radan aiheuttamista fyysisistä rasituksista on vähän tietoa. Tutkimuksen lähtökohdaksi olikin luoda uutta ymmärrystä toimituksessa tuotteisiin kohdistuvista ilmastollisista ja mekaanisista rasituksista ja riskeistä Siperian radalla ja siihen liittyvässä toimitusketjussa.

Tutkimus tehtiin tapaustutkimuksena eli toimitusketjussa toteutettiin käytännön mittaus osana yhden tuotteen toimitusta Suomesta Koreaan. Toimitusta seurattiin useilla eri mittalaitteilla, dataloggereilla, jotka tallensivat olosuhteet ja mekaaniset rasitukset muistiinsa. Tämän lisäksi tehtiin tulosten analysointia tukevia mittauksia ja tarkasteluja. Julkaisussa keskitytään Siperian radan osuuteen toimitusketjussa.

Tutkimus oli osa Turvallisuuskriittisten toimitusten hallinta -yritysryhmähanketta (TurvaTH, 2005–2008), ja se tehtiin yhteistyössä VR:n, Steveco Oy:n ja UPM Kymmeneen kanssa.

¹ Tässä julkaisussa käytetään rinnakkain suomenkielisiä termiä Siperian rata ja englanninkielistä käännöstä Trans-Siperian rata (TSR). Radan pääreitti on Moskovasta Vladivostokiin. Siperian radalla tarkoitetaan julkaisussa laajemmin Suomesta Venäjän halki Tyynellemerelle kulkevaa raideliikenteen kuljetusreittiä.

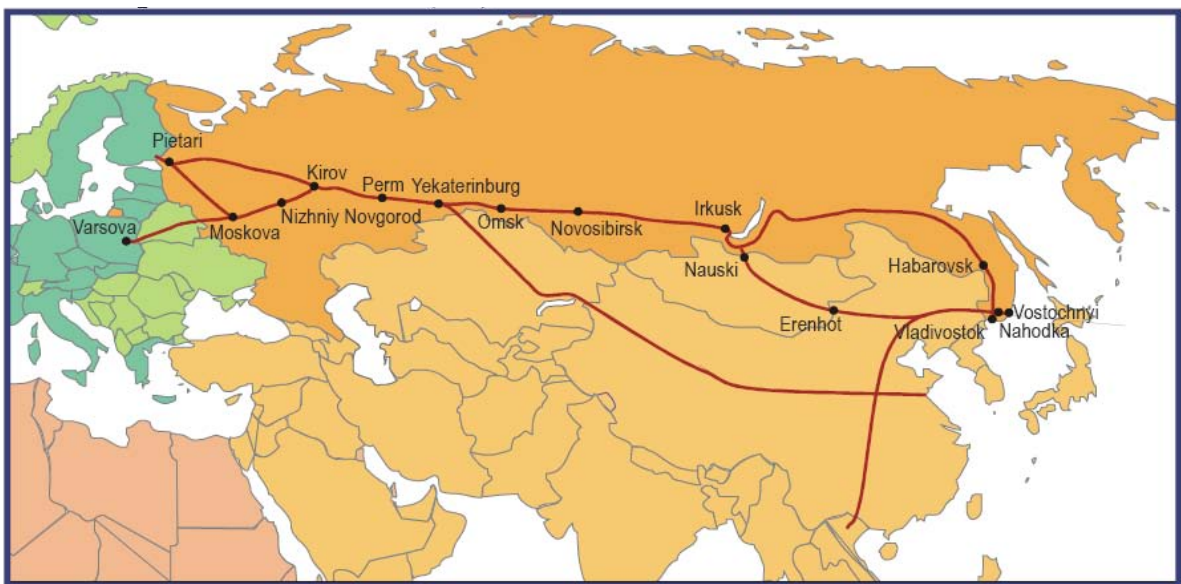
2. Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli saada luotettavaa tietoa Trans-Siperian radan kuljetuksen aikaisista rasituksista ja tunnistaa rautatiekuljetuksessa tuotteisiin kohdistuvien rasitusten kriittiset kohdat. Näitä tuloksia voidaan hyödyntää rautatiekuljetusten pakkaus- ja logistiikkasuunnittelussa sekä laajemmin logistiikkajärjestelmän riskienhallintamallien kehittämisessä.

3. Taustaa

3.1 Trans-Siperian rata (TSR)

Siperian rata on merkittävä raideliikenteen kuljetuskäytävä ja osa kansainvälistä liikenneverkostoa. Rata kulkee Euroopasta Venäjän halki Tyynen valtameren rannikolle ja on merkittävä osa maitse kulkevasta toimitusketjusta Euroopan ja Aasian välillä (kuva 1). Siperian rata yhtyy Suomen rataverkkoon Moskovan ja Pietarin kautta sekä idässä Vostochnyn tai Vladivostokin laivayhteyksien kautta Pohjois-Aasian merkittäviin satamakaupunkeihin, kuten Busaniin, Shanghaihin ja Kobeen.



Kuva 1. Trans-Siperian rata [1].

Vuosina 1891–1916 rakennettu Siperian rata on maailman pisin rautatie. Alkuperäinen Moskovasta Vladivostokiin kulkeva reitti on pituudeltaan lähes 9300 km. Kiinan ja Mongolian alueilla radassa on useita risteyskohtia, joita käytetään lähinnä Siperian raaka-aineiden vientiin.

Siperian rata on koko matkaltaan kaksiraiteinen (poikkeuksena Amur-joen ylitys) ja sähköistetty (valmistunut vuonna 2002, 25 kV). Kuten muidenkin Venäjän ratojen, myös Siperian radan raideleveys on yhteneväinen Suomen raideleveyden kanssa (Venäjä 1520 mm, Suomi 1524 mm). Sallittu akselipaino radalla on 22 500–23 000 kN. Radalla kulkevien tavarajunien pituudet ovat 59–71 vaunua, ja junan suurin sallittu nopeus on 80 km/h. Erikoiskonttijunien nopeusrajoitus on tavarajunia korkeampi eli 100 km/h, ja niiden etenemisnopeus on vuorokaudessa 1200 km. Koko TSR:n pituudella on valokaapeli tietoliikenneyhteyksiä varten. [2]

Siperian rata on Venäjän rautatieyhtiön RZD:n hallinnassa, mutta radalla toimii myös kymmenkunta muuta rautatieyhtiötä [3]. Rataa käytetään sekä Venäjän kotimaan kuljetuksiin että vienti- ja transitokuljetuksiin. Suomella on sijaintinsa ja pitkäaikaisten kauppasuhteidensa vuoksi merkittävä rooli transitokuljetuksissa. Transitokuljetuksissa käytetään pääasiassa konttijunia.

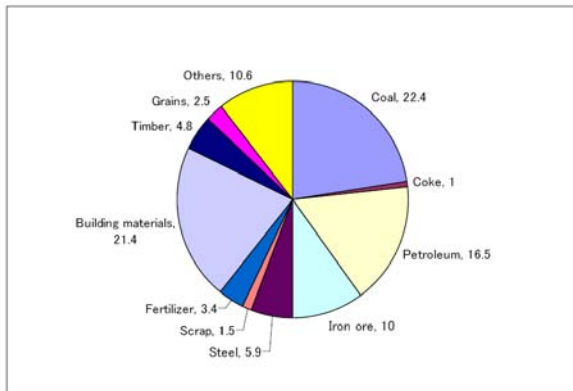
Siperian radalle voidaan jaotella kolme käytössä olevaa kuljetuskäytävää (corridors):

1. **Reitit Eurooppaan**, joista Suomen reitti on tärkeä varsinkin transitokuljetuksissa. Kuljetus Vostochnysta Suomen rajalle kestää 11 päivästä kahteen viikkoon [4]. Reitit kilpailevat Aasian merikuljetusten kanssa.
2. **Keski-Aasian kuljetukset**: bilateraalikuljetukset Kiinaan, Kazakstaniin ja Uzbekistaniin. Kilpailijana reitillä on TCR (Trans China Railway). Käytävää käytetään lähinnä maiden välisiin raaka-ainekuljetuksiin.
3. **Venäjän kotimaan kuljetukset** (bilateraali).

Kuljetuskäytävät ovat osaltaan myös toistensa kilpailijoita, koska ne vievät kapasiteettia toisiltaan.

Kuvassa 2 jaotellaan Venäjän rautateillä tapahtuvat kuljetukset painon mukaisesti v. 2002. Raaka-aineiden kuljetukset, erityisesti vientimarkkinoille, muodostavat yli puolet kokonaisuudesta.

Product composition of railway cargo in terms of weight (% , 2002)

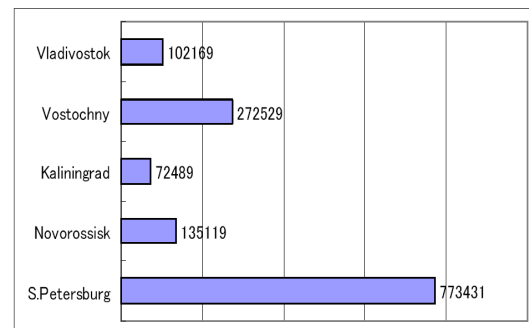


Kuva 2. Venäjän rautateillä kuljetetun tavaran jakautuminen painon mukaan vuonna 2002 [4], [5].

Siperian radan päätesatamista merkittävimmät ovat Vladivostok ja Vostochny. Vostochnyn satamasta on säännölliset liikennöintiyhteydet useisiin Aasian kaupunkeihin. Kuukausittain laivayhteyksiä on noin 30. Viime vuosina erityisesti yhteydet Kiinan eri kaupunkeihin ovat parantuneet, ja esimerkiksi Shanghaista on yhteys Vostochnyyn kahdeksan kertaa kuukaudessa. (Ks. kuva 3.)

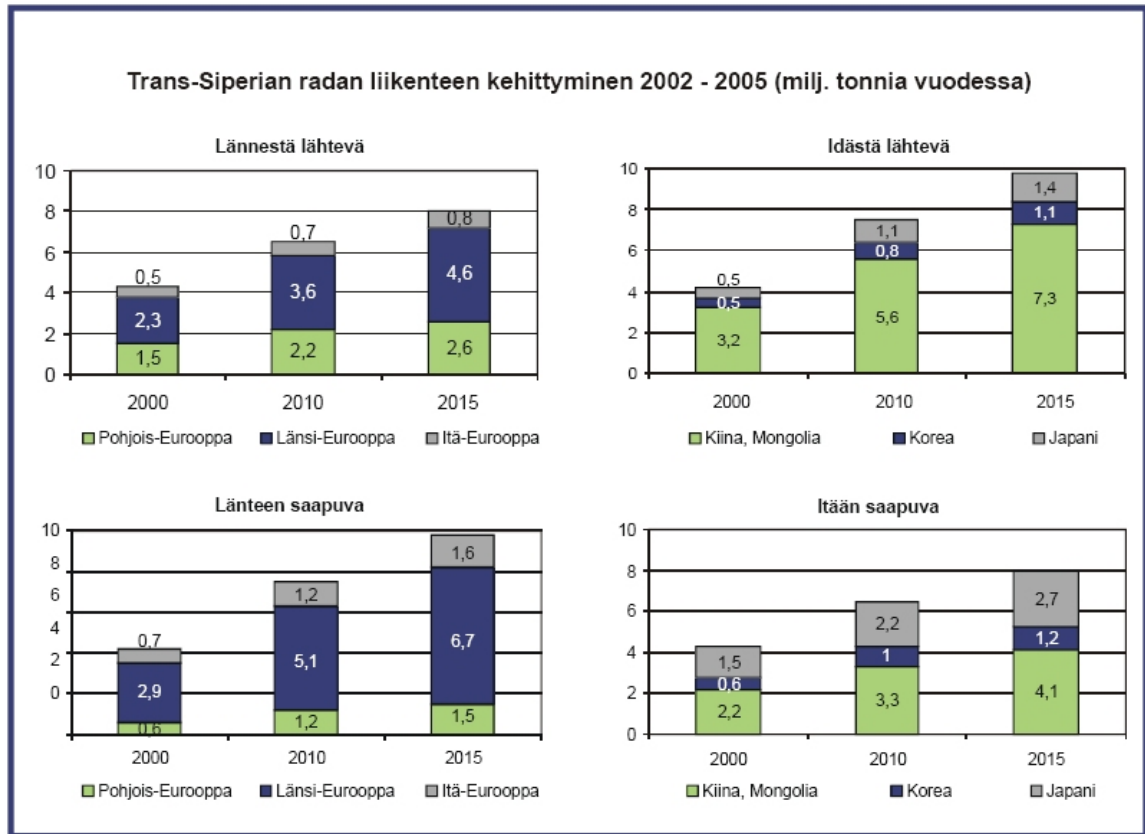


Container handling volumes in major ports (TEU, 2004)

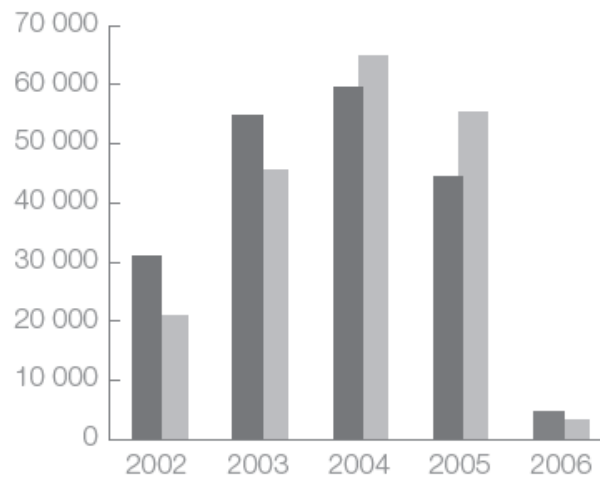


Kuva 3. Vostochnyn satama on Venäjän toiseksi suurin satama [4], [5].

Kuva 4 esittää Trans-Siperian radan liikenteen arvioitua kehittymistä vuosina 2002–2015 [1]. Rautateitse tapahtuville idän ja lännen välisille kuljetuksille on nähty suuria kasvumahdollisuuksia. 2000-luvun alussa ennustettu kasvu ei ole kuitenkaan toteutunut, vaan erityisesti transitokuljetusten volyymit idän ja lännen välillä ovat pudonneet merkittävästi vuoden 2005 jälkeen. Esimerkiksi transitokonttiliikenne Suomesta Siperian radalle romahti vuonna 2006 (kuva 5). Tähän vaikuttivat sekä Venäjän tariffipolitiikka (hinnankorotukset) että säännöllisen liikennöinnin pienentyminen ja sen aiheuttamat aikatauluongelmat [3], [6]. Vuonna 2007 konttiliikenne Suomesta Siperian radalle ei ollut palautunut, vaan sen osuus oli vain 2500 TEU [7].



Kuva 4. Ennustettu TSR-liikenteen kehittyminen 2002–2015 [1].



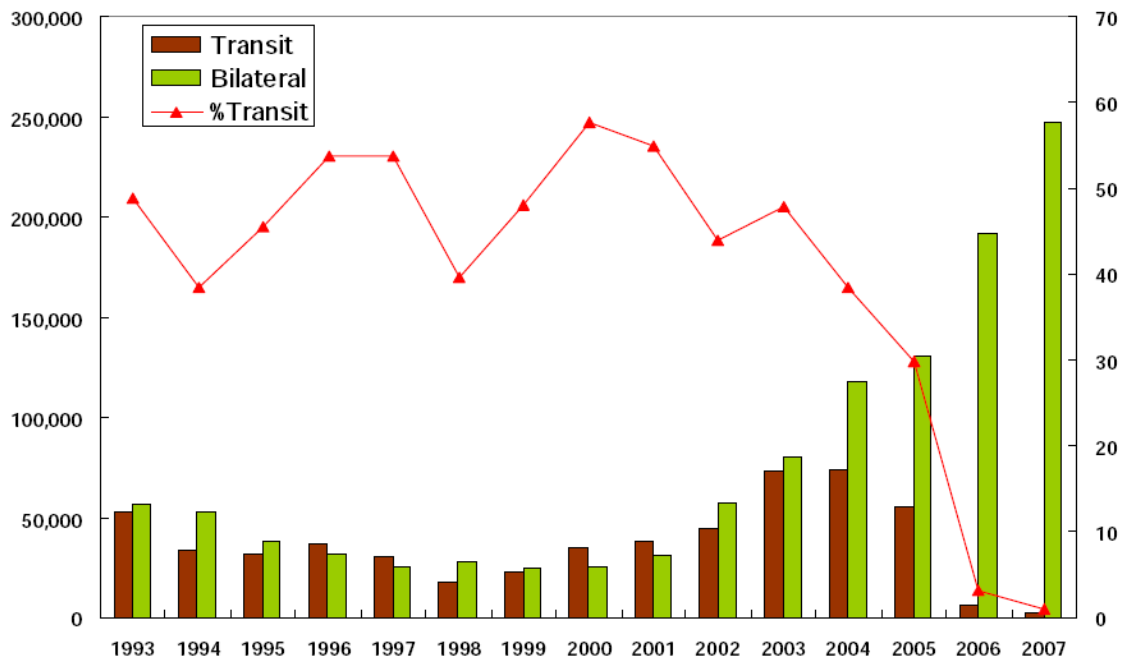
Kaukoidän konttiliikenne

TEU = 20 jalan kontti

- Tuonti
- Vienti

Kuva 5. Kaukoidän konttiliikenteen kehitys VR:n tilastojen perusteella [8].

Kuva 6 esittää Vostochnyn satamassa käsiteltyjen konttien jakautumisen transito- ja bilateraalkuljetuksiin [9]. V. 2005 jälkeen kuljetukset Siperian radalla ovat olleet valtaosin bilateraalkuljetuksia (sisältää Venäjän sisäiset kuljetukset). Transitokuljetusten osuus on pudonnut murto-osaan vuosituhannenvaihteen määristä.



Kuva 6. Vostochnyn satamassa käsiteltyjen konttien jakautuminen transito- ja bilateraalkuljetuksiin [9].

Erään arvion mukaan Venäjällä vallitsee tällä hetkellä ankara pula konttivaunuista. Rautatieoperaattorit saavat parhaan tuoton käyttämällä vaunuja vilkkaimmin liikennöidyillä väleillä, kuten Moskova–Vostochny-osuudella. Venäjän rautateille konttikuljetukset ovat hyvä keino kompensoida yksityisille operaattoreille menetettyjä markkinaosuuksia [6]. Suomen asema ei ole tässä vahva, minkä takia liikenne esim. Kiinasta Suomeen on ollut vähäistä. Lisäksi v. 2006 tariffimuutoksen jälkeen reitti Moskovasta Suomeen muuttui liian kalliiksi venäläisille tuontiyrityksille. [10]

Vuonna 2008 Siperian radalla ollaan aloittamassa japanilaisautojen kuljetuksia erikoisjunilla Tyynenmeren rannikolta Moskovaan Venäjän markkinoille. Tämän arvioidaan vähentävän meriteitse ja Suomen kautta kulkevia kuljetuksia. [11]

3.2 Kuljetusreitin valinta

Valittaessa kuljetusmuotoa ja -reittiä on pohdittava kulloisenkin lähetysten, tuotteen tai yrityksen näkökulmasta tarkoituksenmukaisinta vaihtoehtoa. Kuljetusreitin valintaan vaikuttavista tekijöistä tutkimusten mukaan merkittävimpiä ovat toimitusketjuun kuluva aika

ja kustannukset. Erityisesti jos tavara on arvokasta ja sitoo paljon pääomaa, toimitusajan merkitys kasvaa. Toimitusaika sisältää sekä kuljetukseen kuluvaan ajan että erilaisiin käsittelyihin ja rajanylityksiin kuluvaan ajan. Toimitusajan lisäksi myös reitin täsmällisyys eli toimitusajan ennustettavuus vaikuttaa reitin valintaan. Reitin hinta muodostuu kuljetuskustannuksista, käsittely- ja huolintakustannuksista sekä varastointikustannuksista. Joillakin tuotteilla kustannukset voivat olla hyvinkin tärkeä kriteeri reittipäätöstä tehtäessä, kun taas arvokkaan tavaran kohdalla kustannustekijä menettää merkitystään. Taulukossa 1 esitetään reitin ja kuljetusmuodon valintaan vaikuttavia tekijöitä. [2], [12]

Taulukko 1. Reitin ja kuljetusmuodon valintaan vaikuttavia tekijöitä [2].

Tekijä	Tarkennus	Tekijä	Tarkennus
Aika	<ul style="list-style-type: none"> • Toimitusaika • Toimitusajan ennustettavuus 	Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> • Reitin kokonaishinta • Tullit, verot
Palvelut	<ul style="list-style-type: none"> • Varastointimahdollisuudet • Lisäarvopalvelut • Ostamisen helppous (reitin kokonaispalvelu) • Joustavuus 	Turvallisuus	<ul style="list-style-type: none"> • Tavaravahingot/katoamiset • Varkaudet/katoamiset
Tavara	<ul style="list-style-type: none"> • Tavarán laatu • Tavarán arvo • Tavarán määrä 	Infrastruktuuuri	<ul style="list-style-type: none"> • Liikenneverkosto • Liikenneverkoston kunto • Linjaliikenteen tiheys • Terminaalien toimivuus • Tiedonkulun sujuvuus
Kalusto	<ul style="list-style-type: none"> • Kuljetuskaluston kunto • Kuljetuskaluston saatavuus • Käsittelykaluston kunto • Käsittelykaluston saatavuus 	Työvoima	<ul style="list-style-type: none"> • Osaaminen • Saatavuus • Järjestäytyneisyys • Luotettavuus
Yhteiskunta	<ul style="list-style-type: none"> • Lainsäädäntö • Lainsäädännön toimeenpano • Kansainväliset investoinnit 	Muut tekijät	<ul style="list-style-type: none"> • Rajanylityksen sujuvuus • Ympäristövaikutukset • Markkinointi

Siperian radan käytön hyödyt ja rajoitteet

Siperian radan käytöllä nähdään olevan useita hyötyjä merikuljetukseen verrattuna. Seuraavassa luetellaan joitakin Siperian ratakäytävän hyötyjä:

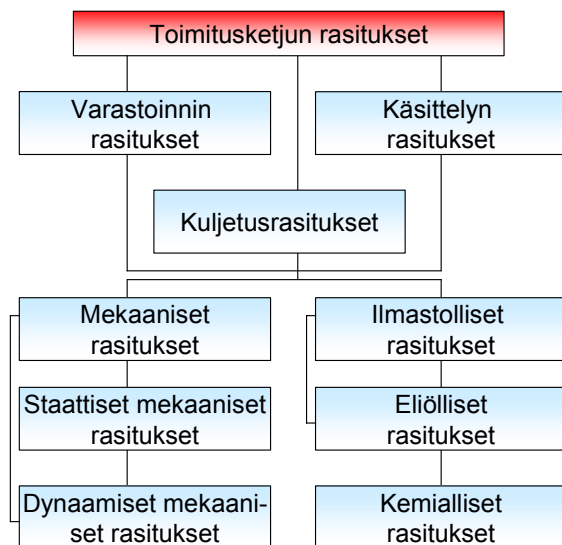
- Suurin hyöty Siperian radan reitillä on nopeus. Toimiessaan annettujen aikataulujen mukaisesti se on merireittiä nopeampi erityisesti Koreaan (Busaniin) tai Pohjois-Kiinaan, kuten Shanghaihin. Jos ratakuljetus ja siihen liittyvät käsittelyt toimivat jouhevasti, aikahyöty on varsinkin pohjoisempiin Aasian kaupunkeihin selvä. Kuljetus aikataulut Haminasta TSR:ää pitkin Aasian eri kaupunkeihin ovat erään lähteen mukaan Busaniin Etelä-Koreaan 18–22 päivää, Kobeen Japaniin noin 24 päivää ja Shanghaihin Kiinaan noin 26 päivää. Merikuljetusreitillä kuljetusajat ovat vastaavasti kaikkiin kaupunkeihin noin 35 päivää. [4]
- Siperian radalla tuotteisiin kohdistuvat ilmastolliset rasitukset ovat usein pienempiä kuin merikuljetuksessa erityisesti kosteuden, suolan ja korkeiden lämpötilojen osalta. Tämä puoltaa erityisesti korroosioherkkien tuotteiden kuljettamista.
- Siperian radalla toimituksen etenemisestä on mahdollista saada paikkakuntatieto säännöllisesti.
- Suomessa on hyvä infrastruktuuri hoitaa Siperian radalla kulkevaa transitoliikennettä.

Siperian radan reitin hyödyistä huolimatta transitokuljetukset Suomesta ovat pudonneet murto-osaan kaikkein vilkkaimmista vuosista. Syinä tähän ovat olleet ainakin kustannusten kasvu, aikataulujen ennustettavuuden huonontuminen ja tietyltä osin tarjonnan puute. Kustannuksiltaan Siperian rata on tällä hetkellä merikuljetusta kalliimpi, eivätkä kuljetusreitien aikataulut ole välttämättä luotettavia. Vähentyneen liikenteen johdosta aikataulut ovat pidentyneet ja nopeushyöty reitillä on pienentynyt.

Kuljetusreitien tulevaisuuteen vaikuttavat monet seikat, kuten infrastruktuurin puutteet (vaunuja ei ole aina riittävästi lähtöpisteissä), toiminta kilpailevilla reiteillä (esim. merikuljetukset), raidekuljetusten hinnan nousu ja rautateiden kuljetuskapasiteetin riittävyys (esim. öljyn vienti Kiinaan lisääntyisi). Yritykset olisivat edelleen kiinnostuneita siirtymään käyttämään Siperian rataa, mutta tällä hetkellä säännöllinen operointi reitille ei ole palautunut 2000-luvun puolivälin tasolle.

3.3 Raidekuljetuksen kuljetusrasitukset

Pitkien toimitusketjujen aikana tuotteisiin kohdistuu erilaisia rasituksia käytetyn kuljetusmuodon, ilmastovyöhykkeen, käsittelyvaiheiden ja pakkaustavan perusteella. Kuvassa 7 esitetään yksi tapa jaotella kuljetuksen aikaisia rasituksia. Kuljetusketjun aikana rasituksia aiheuttavat itse kuljettamisen lisäksi erilaiset käsittelyt ja varastoinnit. Pitkien ketjujen aikana näitä kaikkia voi kohdistua tuotteeseen tai kuljetettavaan yksikköön paljon. Kuljetettavan tuotteen tai yksikön ominaisuudet määrittävät, mille rasituksille tuote on herkkä. Yleisimmin ongelmia aiheuttavat mekaaniset tai ilmastolliset rasitukset.



Kuva 7. Toimitusketjun rasitusten yleinen määrittely [12].

Ilmastollisia rasituksia ovat mm. korkea tai matala lämpötila, kosteus ja sade. Lämpötilan tai kosteuden nopea vaihtelu voi itsessään olla riski tuotteelle tai se voi aiheuttaa kosteuden tiivistymistä, joka yhdessä suolasumun tai ilmansaasteiden kanssa luo edellytykset korroosion kehittymiselle. Eliöllisiä rasituksia voivat aiheuttaa mm. sienet, bakteerit, hyönteiset tai jyrsijät.

Esimerkki staattisesta mekaanisesta rasituksesta on pinoamisen johdosta tuotteeseen kohdistuva paine. Dynaamisia mekaanisia rasituksia ovat mm. kiihtyvyys, iskut ja värinä. Iskut ja suuret kiihtyvyydet liittyvät usein lastin käsittelyvaiheisiin, kuten siirtoihin ja nostoihin. Värinä on kestoaltaan pidempiaikaista, ja sitä esiintyy tyypillisesti kuljetuksen aikana.

Usein monien em. rasitusten yhteisvaikutus saa aikaan kuljetusvaurion ja usein yhden vaikutuksen ilmeneminen lisää toisen todennäköisyyttä.

Raidekuljetuksiin, kuten kaikkiin kuljetusmuotoihin, sisältyy tyypillisiä vain tälle kuljetustyyppille ominaisia rasituksia. Näistä erityisesti mekaaniset rasitukset ovat ominaisia. Seuraavassa alaluvussa käsitellään lyhyesti raidekuljetuksen mekaanisia rasituksia.

3.3.1 Rautatiekuljetusten mekaaniset rasitukset

Raidekuljetuksiin sisältyy säännöllinen värinä (taajuudeltaan esim. 16 Hz), mutta tyypillisesti suurimmat iskut ja kiihtyvyydet syntyvät ratapihalla vaunujen kytkemisen ja vaihtojen yhteydessä [12]. Mekaaniset rasitukset ilmoitetaan usein kiihtyvyyden (m/s^2) tai painovoiman ($g = 9,81 m/s^2$) mukaan.

Vaunujen järjestelyn yhteydessä iskut syntyvät, kun yksittäisiä tai useampia junan vaunuja yhdistetään työntämällä tai laskemalla yhteen. Näitä järjestelyihin liittyviä rasituksia on pyritty pienentämään teknisin ratkaisuin, kuten käyttämällä puskimia tai muita joustolaitteita, erilaisia junatyyppejä tai ohjeistamalla toimintatapoja.

Vaunujen järjestelyssä nopeudet pidetään yleisesti sovittujen rajanopeuksien alapuolella. Suomen ratapihoilla enimmäisnopeus, jolla laskumäestä laskeva vaunu saa törmätä toiseen vaunuun, on 5 km/h. Junia muodostettaessa enimmäisnopeus Suomen ratapihoilla on 50 km/h, kun liikutaan veturin vetämänä. Vaunuja työntäessä nopeus saa olla 35 km/h. Nopeuteen vaikuttaa myös ilmajarrujen käyttö. Vaunuja voidaan joskus myös ”potkaista” järjestelyraiteille, jolloin junan pysähtyessä raiteen päätepuskuriin hidastuvuus voi nousta korkeaksi.

Kuljetusten aikana kiihtyvyyksiä aiheuttavat junan jarrutukset, radan vaihteet, epätasaisuus ja kaarteet sekä kiskojen liitoskohdat. Normaalisti itse junan kulun aikana tuotteeseen kohdistuvat kiihtyvyydet eivät ole suurin riski kiihtyvyyksien alhaisten tasojen vuoksi.

Rautatiekuljetuksissa vaunun pyörän ja raiteen välinen kontakti aiheuttaa korkeataajuisia värinää. Uusissa vaunuissa, joissa alustan kiinnitystä on parannettu, värinän vaikutus on pienempi, mutta suurimmalle osalle vaunuista tämä on ongelma. Värinä voi aiheuttaa tuotteen hidasta siirtymistä, ellei sen kiinnitys tai alustan ja tuotteen välinen kitka ole riittävä. Esim. kulkusuuntaan poikittainen harmoninen heilahtelu voi kääntää paperirullia pystyakseliensa ympäri ja aiheuttaa rulliin hiertymiä. [13]

Iskujen ja värinän aiheuttamia rasituksia arvioidaan niiden amplitudin, keston ja muodon perusteella [12]. Suurempi amplitudi ja pidempi kesto lisäävät iskun aiheuttamaa vaurioitumisriskiä. Värinän aiheuttamaan riskiin vaikuttaa sen amplitudi, kesto ja taajuus verrattuna tuotteen ominaistajuuteen (resonanssitaajuuteen). Kiihtyvyyksien amplitudiin vaikuttaa merkittävästi tarkasteltavan tuotteen paino. Myös voimakkaat lyhytkestoiset iskut ja kiihtyvyydet voivat olla kriittinen kuormitustekijä kuljetusten aikana.

Kiihtyvyydspulssin muodosta ja kehosta riippuen jo pienetkin arvot voivat vaurioittaa tuotetta. Pitkään jatkuva värinä voi olla potentiaalinen riskitekijä tuotteiden kiinnitykselle ja värinälle herkille tuotteille, kuten elektroniikka- tai sähkölaitteille tai raskaille tarkkuustuotteille. Esimerkkinä tästä ovat elektroniikkalaitteiden (painavat) passiivikomponentit, joiden

kiinnitys piirikortilla voi pahimmillaan irrota tärinän vaikutuksesta. Toisaalta amplitudiltaan suurten mutta lyhytkestoisten (ms) kiihtyvyyksien aiheuttama kuormitus voi olla tuotteen kannalta merkityksetön esim. tarkoituksenmukaisen pakkaussuojan ansiosta.

Yleisesti ottaen venäläiset junat ja junavaunut ovat suomalaista kalustoa raskaampia. Venäläisvaunuissa on keskipuskimia tai automaattikytkimiä, jotka ovat jäykempiä ja vaativat lukkiutuakseen ratapihajärjestelyissä suurempia nopeuksia. Venäläisten automaattikytkimien välitys voi aiheuttaa pitkittäissuuntaista (vaunun menosuunnassa eteen- ja taaksepäin suuntautuvaa) ”soutamista” varsinkin TSR-junassa, joka on suomalaisia junia pidempi. Nämä seikat voivat aiheuttaa teräviäkin iskuja junamatkalla esim. jarrutusten yhteydessä. [3]

VR on ohjeistanut itäliikenteen lastin sitomisen erityisohjeella [14]. Ohje kiinnittää huomiota mm. pitkittäissuuntaisiin (vaunun kulkusuunnassa eteen- tai taaksepäin vaikuttaviin) voimiin sekä vaunun päiden ja keskiosien tuentaan.

3.3.2 Rautatiestandardit

Rautatiestandardit määrittävät junavaunujen ja konttien kestävyysvaatimukset kiihtyvyyden perusteella. UIC on Länsi-Euroopan (myös Suomen) rautatieliikenteessä käytetty standardikokoelma.

UIC 518 -normi määrittää enimmäisarvot kulun aikana (junan liikkeessa) vaunun runkoon kohdistuville kiihtyvyyksille. Tavaravaunuille rajat ovat 3 m/s^2 (n. 0,3 g) sivuttaissuuntaan ja 5 m/s^2 (n. 0,5 g) pystysuuntaan.

Tavaravaunuille tehdään täysimittaiset törmäyskokeet sekä tyhjänä että kuormassa ennen vaunutyypin käyttöönottoa. Suomessa LIMO eli Liikkuvan kaluston määräykset määrittävät raja-arvot, jotka tavaravaunujen pitää kestää [15]. Määräykset perustuvat UIC-standardin määrelehteen nro 577 [16]. Kiihtyvyyssmittauksessa käytetään UIC-standardin mukaisia rajataajuuksia.

Törmäyskoevaatimukset tyhjänä:

- Nopeus enintään 15 km/h
- Kiihtyvyys enintään 5 g
- Puskinvoima alle 1500 kN eli vaunun kannalta 3000 kN (vaunussa 2 puskin).

Törmäyskoevaatimukset kuormassa:

- Nopeus enintään 12 km/h
- Kiihtyvyys riippuu kuormasta: kuitenkin enintään 5 g, konttikuormille enintään 2 g
- Puskinvoima alle 1500 kN eli vaunun kannalta 3000 kN (vaunussa 2 puskin).

Venäläiset käyttävät rautatiekuljetuksissa omaa GOST-standardikokoelmaa. GOST asettaa tavaravaunujen kestävyysvaatimukseksi 4 g [3].

CTU on kansainvälisten organisaatioiden (IMO, ILO ja UN ECE) yhteistyössä laatima kuljetusyksikköjen pakkausohje, joka määrittää rasiutusten raja-arvot maa-, raide- ja merikuljetuksille. Rautatiekuljetuksille ohje määrittää mekaanisten rasiutusten raja-arvot oheisen taulukon mukaisesti (taulukko 2).

Taulukko 2. Raidekuljetuksessa junavaunuun kohdistuvat kiihtyvyydet ja voimat [17].

Rautatiekuljetus	Eteenpäin vaikuttavat voimat	Taaksepäin vaikuttavat voimat	Poikittais-suunnassa vaikuttavat voimat
Junavaunu, johon kohdistuu vaunujen yhdistämiseen ja käsittelyyn liittyviä voimia*	4,0 g	4,0 g	0,5 g (a)
Yhdistetty kuljetus**	1,0 g	1,0 g	0,5 g (a)
Yllä oleviin arvoihin lisätään alaspäin suuntautuva staattinen painovoima (1,0 g) ja pystysuunnassa vaikuttavat dynaamiset voimat $a = \pm 0,3$ g.			
*Vaunuja ei ole merkitty varovaista käsittelyä vaativiksi. Erityiskaluston ja -ohjeiden käyttö on suositeltavaa (tehokkaat joustoelementit, ratapihakäsittelyn rajoitukset).			
**Yhdistettyjä kuljetuksia ovat junavaunut, joihin on liitetty kontteja, vaihtokoreja tai puoliperävaunuja, sekä junat, joille ei tehdä välikäsittelyä (block trains).			

Konttikuljetuksille ja erityisesti niissä kuljetettaville lasteille CTU:n eteen- ja taaksepäin asettama enimmäiskiihtyvyys (4,0 g) on liian korkea. Joustolaitteilla nämä kiihtyvyydet on mahdollista puolittaa (kuva 8). Onkin esitetty, että Euroopan liikenteessä raidekuljetuksen rasiutuksiksi voitaisiin yleisesti ottaa CTU:n yhdistetyn kuljetuksen rasiutusten ylärajat. [12]



Kuva 8. Joustoelementeillä (puskimilla) varustetut vaunut [12].

Ohjetta ja esitettyjä rajoja voisi periaatteessa soveltaa myös Siperian radalla, edellyttäen että junan kokoaminen tehdään varovaista käsittelyä noudattaen. Siperian radan transito-kuljetuksessa juna kulkee tyypillisesti yhtenä kokonaisuutena koko radan mitan. Juna kootaan valmiiksi lähtöpaikassa, ja vain junan veturi vaihtuu matkan aikana. Tämä vähentää vaunujen liittämistä ja uudelleenjärjestelyistä lastille aiheutuvia mekaanisia rasituksia, koska itse vaunuja järjestellään vain reitin alku- ja loppupisteessä.

3.4 Kuljetusten aikaisten rasitusten mittaus

Logistiikan muuttuminen pelkästä tavaran toimittamisesta enenevässä määrin lisäarvopalveluksi on aiheuttanut tarpeita ja vaatimuksia lisätä tietoa siitä, mitä kuljetusten aikana tapahtuu. Tämä koskee niin tavaroiden ja tuotteiden valmistajia, toimittajia kuin logistiikkapalveluja tarjoavia yrityksiä.

Kuljetusten aikaisten rasitusten mittaaminen ja analysointi antavat pohjan kuljetusten riskienhallinnalle. Informaatio palvelee pakkaussuunnittelua, reittivalintoja ja kuljetusmuotojen valintaa. Tutkimukset parantavat kuljetusketjussa toimivien tahojen yhteistyötä ja ketjun läpinäkyvyyttä ja vastaavat kysymyksiin siitä, mitkä ovat kuljetuksen kriittisiä kohtia ja miten näitä kohtia voidaan kehittää.

Kokonaiskiihtyvyyden määrittämiseksi kiihtyvyyttä mitataan samanaikaisesti kolmeen toisiinsa nähden kohtisuoraan suuntaan. Mittaukseen vaikuttavat mittalaitteen kiihtyvyyssanturin taajuuskaista ja laitteen näytteistystaajuus. Mittauksessa alipäästösuodatuksen rajataajuutta korkeammat taajuudet vaimentuvat tai suodattuvat kokonaan pois. Korkeamman rajataajuuden omaavat laitteet rekisteröivät herkemmin lyhyitä, muutaman millisekunnin kestäviä ”kiihtyvyyssiikkejä”. Esimerkki tästä on kevyen paketin putoaminen lattialle muutaman kymmenen senttimetrin korkeudelta.

Rautatiekuljetuksissa mittauskohteet ovat tyypillisesti raskaita, usean tonnin painoisia. Tässä ympäristössä korostuvat pidempikestoisten, vähintään kymmeniä millisekunteja kestävien iskujen aiheuttamat kuormitukset. UIC-standardin mukaisissa kiihtyvyyssmittauksissa alipäästösuodatuksen rajataajuus onkin alhainen, tyypillisesti 10–20 Hz. Rajataajuuteen vaikuttaa se, missä osassa vaunua mittausta tehdään ja mitä suuntaa mitataan. [18]

Yleisesti kiihtyvyyden mittaustuloksiin vaikuttavat merkittävästi myös kiihtyvyyssanturin kiinnitys ja rakenne sekä signaalin jatkokäsittely (lisäsuodatus).

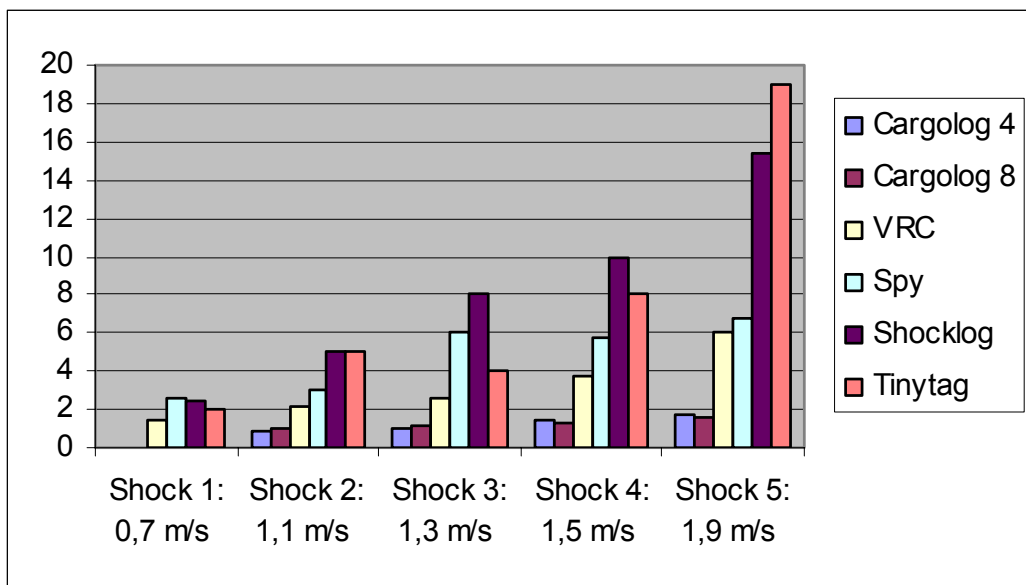
3.5 Aikaisemmat mittaukset Siperian radalla ja rautateillä – taustatietona tutkimuksen suunnitteluun

Tässä kohdassa käydään lyhyesti läpi aikaisempia mittauksia ja testejä, joita hyödynnettiin Siperian radan mittausten suunnittelussa ja tulosten analysoinnissa. Mittauksissa käytetyt laitteet esitellään kohdassa 4.2.

3.5.1 VTT:n ja VR:n törmäystestit 2006

VTT ja VR suorittivat junavaunujen törmäystestejä VR:n tavaravaunukorjaamon raiteistolla Tampereella syyskuussa 2006. Tavoitteena oli saada taustatietoa TSR-mittausta varten, verrata mittalaitteiden suorituskykyä ratapihakäsittelyä vastaavassa tilanteessa ja arvioida eri laitteille sopivia asetusarvoja. Mittalaitteet kiinnitettiin kuormattomaan 2-akseliseen 14,6 t Gbln-sarjan vaunuun. Vaunu törmäytettiin päin toista vaunua, joka oli pysähtynyt ja kuormaton. Törmäysnopeus, joka mitattiin tutkalla, vaihteli välillä 0,7–1,9 m/s (2,5–6,8 km/h). Vaunussa oli lastina 1000 kg kolli, johon testissä sijoitettiin yksi Cargolog-laitteisto (4) ja Tinytag-laitteisto. Muut laitteistot ruuvattiin vaunun lattiaan.

Kuvassa 9 esitetään laitteistojen mitaamat kokonaiskiihtyvyydet. Laitteet rekisteröivät iskut pääasiassa törmäyssuunnassa (pitkittäissuunta). Poikkeuksena tästä oli Shocklog-laitte, joka rekisteröi voimakkaita pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä.



Kuva 9. Törmäystestissä 2006 mitatut kokonaiskiihtyvyydet (g).

Testi osoitti selvästi erot mittalaitteiden ominaisuuksissa. 300–500 Hz rajataajuuden omaavat mittalaitteet (Tinytag ja Shocklog) rekisteröivät lähes dekadin suuremman kiihtyvyyden

verrattuna matalamman rajataajuuden (10–100 Hz) ja erillisen suodatuksen omaaviin laitteisiin. Erityisesti rautatieympäristöön suunniteltu VRC-laitteisto tallensi törmäyksistä oleellisimman tiedon ja aaltomuodon. 0,5 g liipaisurajalla VRC-laitteisto tallensi n. 2–3 km/h (0,5–0,8 m/s) nopeudella tapahtuneet törmäykset.

3.5.2 VR:n törmäystestit 2001

VR selvitti junavaunuun ja lastiin kohdistuvia kiihtyvyyksiä törmäystesteillä v. 2001. Testeissä käytettiin VRC-laitteistoa, joka kiinnitettiin 15–25 t painoisiin 2- tai 4-akselisiin vaunuihin. Vaunut olivat joko tyhjiä tai niissä oli 25–30 t kuorma. VRC kiinnitettiin törmäävään tai törmäyksen kohteena olleeseen vaunuun.

Tuloksista voidaan päätellä, että

- törmäävään vaunuun kohdistuu törmäyksen kohteena olevaa vaunua suurempi kiihtyvyys (varsinkin pystysuunnassa).
- törmäävällä kuormatulla vaunulla törmäyssuuntainen isku oli vallitseva alle 5 km/h nopeuksilla. Iskujen suuruudet olivat 1–2 g. Tyhjään vaunuun kohdistuu kuormattua vaunua suurempi kiihtyvyys (varsinkin pystysuunnassa).
- nopeuden noustessa yli 5 km:iin/h törmäävä vaunu ”hyppää” iskun voimasta, jolloin pystysuuntainen kiihtyvyys kohoaa lähes yhtä suureksi kuin törmäyksen suuntainen kiihtyvyys. Tällöin kiinnittämättömät 1–3 t painavat tuotteet alkoivat siirtyä vaunun alumiinilattialla. Tuotteen ja lattian välissä oli lisäkitkaa antavat päätytuet.
- 2-akseliseen vaunuun kohdistuvat kiihtyvyydet ovat suurempia kuin 4-akselisen vaunun.
- törmäyksen kohteena olevan vaunuletkan pituus ja järjestys vaikuttavat mitattuun kiihtyvyyteen. Painavampi vastevaunu lisää törmäävään vaunuun kohdistuvaa kiihtyvyyttä.

3.5.3 VR:n törmäystesti venäläisvaunuilla

VR suoritti törmäystestejä venäläisille puutavaravaunuille v. 2003. Vaunuissa oli venäläiset SA-3-automaattikytkimet. Kytkimen joustolaite on tyypillisesti jäykempi verrattuna suomalaisvaunujen joustoelementteihin (esim. Gbln-vaunun kaksi kumipuskinta). Testattu päädytön vaunu painoi kuormassa 64 800 kg.

Testin perusteella venäläisen automaattikytkimen iskunpituus käytettiin täysin, kun nopeudet olivat kuormatulla vaunulla 7 km/h tai yli. Tällöin myös vaunuun kohdistuvat kiihtyvyydet nousivat GOST-standardin raja-arvon 4 g tasolle. Kiihtyvyyksmittauksen rajataajuus oli 20 Hz.

3.5.4 VR:n kuljetusmittaukset Suomessa

VR on tehnyt kuljetusmittauksia VRC-laitteistolla myös todellisissa kuljetuksissa Suomessa. Laajan data-aineiston ja kokemuksen perusteella iskut ovat lähes poikkeuksetta tapahtuneet ratapihoilla. Kuljetuksen aikana iskuja on ollut vain vähäinen määrä.

Ratapihan laskumäessä isku ensimmäiseen vaunuun on suurin. Jo kahden vaunun puskimet vaimentavat iskuja siten, että VRC ei tallenna tapahtumia (4-akselisten vaunujen tasot ovat alle 0,5 g). Lisäksi vaunujen paino ja akselien määrä vaikuttavat mitattuihin kiihtyvyyksiin.

Kulun aikana pitkittäisiä kiihtyvyyksiä voi aiheutua junan lähtiessä liikkeelle. Poikittaisliike voi aiheutua vaunun ”vatkauksesta” esim. kaarteessa. VR:n mittauksissa tasot ovat olleet alle 0,5 g (4-akselisilla vaunuilla) eikä niitä ole rekisteröity VRC-laitteella.

3.5.5 Paperirullien kuljetusrasitustutkimus Länsi-Euroopan rautateillä

Ruotsalaisessa BREAKAGE-projektissa (Transport quality on railway regarding breakage) tutkittiin yhtenä osiona paperirullille tapahtuvia rasituksia rautatiekuljetuksessa. Projektissa tehtiin lastauksineen ja purkamisineen viikon kestänyt kuljetusmittaus Piteån ja Wienin välillä. Kiihtyvyyksiä mitattiin Cargolog-mittalaitteella, jota käytettiin myös tässä TSR-tutkimuksessa. Eroina olivat laitteen rajataajuus, joka BREAKAGE-tutkimuksessa oli pitkittäissuuntaan 20 Hz ja poikittais- ja pystysuuntaan 10 Hz, sekä liipaisurajat, joiksi BREAKAGE-tutkimuksessa oli valittu pysty- ja poikittaissuuntaan 0,5 g ja pitkittäissuuntaan 0,9 g. Cargolog-laitteita käytettiin mittauksessa 5 kpl ja ne sijoitettiin paperirullien päälle. Eurooppalaiset vaunutyytit erosivat TSR-kuljetuksen vaunuista mm. siten, että vaunut olivat katettuja ja osa 2-akselisia. Vaunujen pohjaa oli myös osassa testiä käsitelty polyuretaanilla kitkakertoimen lisäämiseksi. Tutkimuksessa 1–3 t painoisille rullille kohdistuneet maksimikihtyvyydet olivat 1–1,5 g pitkittäissuuntaan ja n. 1 g poikittais- ja pystysuuntaan. (Ks. taulukko 3.) Lattiamateriaalista, vaunusta ja rullan tuennasta riippuen rullat siirtyivät 0–30 cm. Osassa rullista oli hiertymävaurioita. [19]

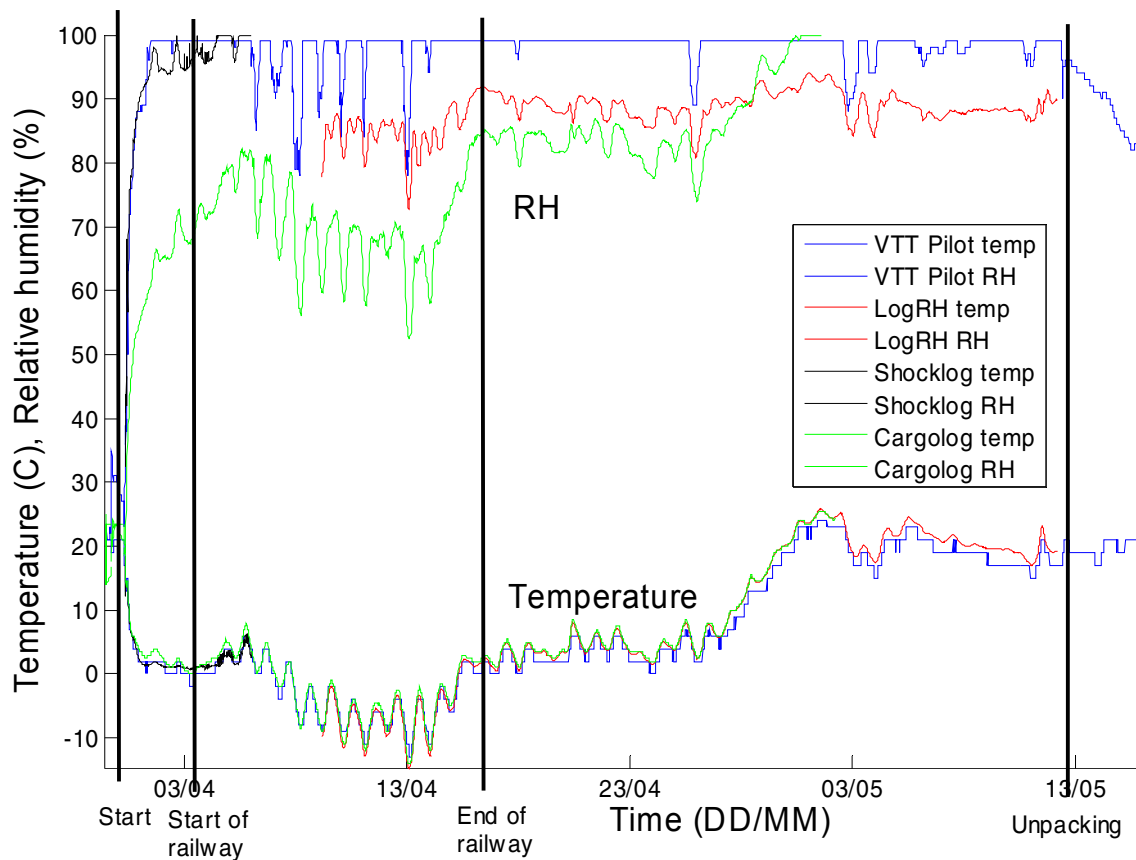
Taulukko 3. Paperirulliin kohdistuneet maksimikihtyvyydet eri vaunutyypeillä [19].

Wagon type	Maximum acceleration		
	X <i>Longitudinal</i>	Y <i>Transverse</i>	Z <i>Vertical</i>
Hiqqrs	1,5	0,9	0,8
Hbbins	1,4	0,8	1,1
Habbins	-	0,6	0,8
Hirrs	1	1,1	1,2
Hbins	1,1	1,2	1,1

3.5.6 TSR-mittaus keväällä 2006

VTT toteutti Siperian radan case-mittauksen huhtikuussa 2006. Reittinä oli tällöin junakuljetus Suomesta Nahodka-Vostochnyyyn ja edelleen merikuljetus Kiinaan. Mittalaitteet kiinnitettiin konepajateollisuuden tuotteen kuljetuslavaan pakkauksen sisälle. Tuote sijoitettiin lämmittämättömään junakonttiin. Mittauksessa käytettiin Shocklog-, Cargolog- ja LogRH-laitteita. (Ks. kuva 10.)

Taulukko 4 esittää mittauksen keskeisimmät tulokset.



Kuva 10. Lämpötila- ja kosteustulokset v. 2006 TSR-mittauksesta. Kuvaajaan on yhdistetty eri mittalaitteiden rekisteröimät tulokset.

Taulukko 4. Yhteenveto v. 2006 TSR-mittauksesta eriteltyinä koko kuljetuksen osalta ja pelkän Siperian radan osuudelta.

	Koko kuljetus Suomesta Kiinaan	Siperian rata
Lämpötila max.	25 °C	8 °C
Lämpötila min.	-14 °C	-14 °C
Kosteus max.	100 %	100 %
Kosteus min.	25 %	52 %
Lämpötila, keskiarvo	7 °C	-1 °C
Kosteus, keskiarvo	~90 %	~90 %
Lämpötila max. vuorokausimuutos	13 °C	12 °C
Kosteus max. vuo-rokausimuutos	34 %	22 %
Kosteanaoloaika (kosteus >80 %, lämpötila >0 °C)	26 vrk	3 vrk

Mittauksen perusteella ilmasto-olosuhteet Siperian radalla olivat vaativat myös keväällä. Lämpötila pakkauksen sisällä oli lähes koko ajan alle 0 °C. Se laski tasaisesti rataa pitkin edetessä ja oli alhaisimmillaan -14 °C. Tämän perusteella jäätymiselle herkäät tuotteet tarvitsevat lämmitetyn kuljetusyksikön myös keväällä. Ilman korkea kosteuspitoisuus, pakkauksen sisälle pakkausvaiheessa jäänyt kosteus ja matkan loppuvaiheessa kohonnut lämpötila loivat edellytyksiä korroosion kehittymiselle.

Voimakas lämpötilavaihtelu voi olla riski esim. tuotteiden erikoispinnoitteille. Suurin lämpötilan ja kosteuden muutos yhden vuorokauden aikana oli Siperian radalla 12 °C ja 22 % RH, mikä oli hieman suurempi kuin merikuljetuksen aikana mitatut arvot (8 °C ja 12 % RH). Suurin muutos koko kuljetuksen aikana tapahtui kuitenkin, kun tuote siirrettiin lastauksen yhteydessä ulos valmistajan tehtaasta.

Kiihtyvyytulokset jäivät tässä mittauksessa puutteellisiksi, mikä oli osaltaan syynä jatkomittaukselle.

4. Menetelmät

4.1 Case-toimitus

Tarkasteltava toimitus oli yhdistetty rautatie- ja merikuljetus Haminasta Busaniin, Koreaan. Kuljetus toteutettiin touko-kesäkuussa 2007 hyödyntäen Trans-Siperian rataa.

Konttikuljetuksen rahtina oli 1–2 t painoisia UPM:n vanerikolleja, jotka asetettiin 40 jalan konttiin. Kontin lastaus tapahtui Haminan satamassa, jossa mittalaitteistot asennettiin kontin etuosaan ennen vanerikollien lastausta.

Kontti asetettiin venäläiselle VOF/VOFA-konttialustalle (kuva 11). Alustalle mahtuu 2–3 konttia, mutta case-toimituksessa siihen lastattiin vain yksi 40 jalan kontti. 4-akselisen alustan pituus on puskimineen 19,6 m, paino 22 t ja kantavuus 66 t. Konttialustan joustoelementtinä on yksi SA-3-automaattikytkin. Kytkin on samaa tyyppiä kuin kohdassa 3.5.3 esitetyssä taustatutkimuksessa. [20]



Kuva 11. VOF/VOFA-konttialusta [20].

Kuljetuksen kokonaispaino muodostui kontin, konttialustan ja lastin painoista (taulukko 5). Kokonaispaino 47 tonnia saatiin VR:n järjestelmästä.

Taulukko 5. Kuljetuksen paino.

<i>Lasti</i>	<i>20–22,5 t</i>
<i>Kontti</i>	<i>3,8–4,2 t</i>
<i>VOF/VOFA-konttialusta</i>	<i>21–22 t</i>
<i>Yhteensä</i>	<i>47 t</i>

VR:n tietojen mukaan kahdeksan peräkkäistä vaunua jatkoi letkassa Suomesta aina Nakhodkaan saakka. Mittalaitteet sisältänyt vaunu oli letkassa kolmantena, minkä johdosta mittalaitteivaunun ympärillä oli koko kuljetuksen ajan todennäköisesti vähintään kaksi vaunua.

Kuva 12 esittää case-kuljetuksessa tutkittua reittiä. Kontti lähti Haminasta rautateitse Vainikkalaan ja siitä edelleen Trans-Siperian rataa pitkin Vostochnyyin. Kuljetus jatkui Vostochnyistä laivalla päätepisteeseen Busaniin. Laitteistojen asennus ja rahdin lastaus tapahtuivat 16.5.2007. Kuljetus lähti Haminasta 29.5. VR:n RailTrace-kuljetusseurannan mukaan kuljetus ylitti rajan Vainikkalassa 1.6., oli 2.6. Buslovskayassa ja 15.6. Nakhodka-Vostochnyssa. Busanissa kuljetus oli 26.6.2007. Kuljetuksen kokonaiskesto oli 26 päivää, josta Trans-Siperian radan osuus oli 15 päivää.



Kuva 12. Kuljetusreitti Hamina–Busan. (Kuvaa muokannut Sisko Mäensivu.)

4.2 Käytetyt mittalaitteet

Mittauksessa käytettiin yhteensä kahdeksaa erityisesti logistiikkamittauksiin suunniteltua tiedonkeruulaitetta, ”dataloggeria”. Laitteet olivat joko kaupallisia tai VTT:n kehittämiä. Laitteet rekisteröivät mitattaviksi määritellyt suureet ja tallensivat arvot tai erityistapahtumat ja niiden ajankohdat muistiinsa. Asetukset ohjelmoitiin työaseman laitekohtaisilla sovelluksilla ennen mittauksen aloitusta ja vastaavasti tiedot purettiin työasemalle mittauksen päätyttyä. Taulukko 6 esittää case-mittauksessa käytetyt laitteet ja niiden tekniset tiedot.

Päähuomio mittauksissa oli kontin alustaan kohdistuvissa kiihtyvyyksissä (iskut, värinä), jotka kuvaavat kuljetettavaan tuotteeseen kohdistuvia enimmäisrasituksia. Kontti oli tukevasti kiinnitetty konttialustavaunuun, joten konttiin ja vaunun runkoon kohdistuivat käytännössä samansuuruiset kiihtyvyydet. Kiihtyvyyksien lisäksi seurattiin kuljetuksen aikaista lämpötilaa ja kosteutta.

Taulukko 6. Mittalaitteiden tekniset tiedot.

Mittalaite	Suure	Mittausalue	Muisti- kapasiteetti	Kiihtyvyy- mittauksen taajuuskaista
<i>Cargolog</i>	Lämpötila [°C]	-40+80	38 800 arvoa	~1-30 Hz
	Kosteus [%]	10-90		
	Kiihtyvyys [g]	0-10		
<i>Shocklog</i>	Lämpötila [°C]	-40+80	1,92 Mt	0,3-300 Hz
	Kosteus [%]	10-90		
	Kiihtyvyys [g]	0-30		
<i>LogRH</i>	Lämpötila [°C]	-30+60	16 Mbit	1-150 Hz
	Kosteus [%]	10-100		
	Kiihtyvyys [g]	0-50		
<i>VRC</i>	Kiihtyvyys [g]	0-5	1000 arvoa	0-100 Hz
<i>Tinytag</i>	Lämpötila [°C]	-30+50	16 000 arvoa	Optimoitu 50-500 Hz
	Kosteus [%]	0-100		
	Kiihtyvyys [g]	0-100		
<i>Spy</i>	Kiihtyvyys [g]	0-8	5000 arvoa	0-100 Hz

Mittalaitteet tallentavat arvot joko tietyin väliajoin (lämpötila, kosteus) tai raja-arvon ylittyä (kiihtyvyys). Kaikki laitteet Tinytagia lukuun ottamatta mittaavat kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan.

Seuraavassa esitetään mittalaitteiden yksityiskohtaiset ominaisuudet.

VRC

VRC on VR:n toimeksiantona kehitetty mittalaite, joka on suunniteltu erityisesti rautatie-kuljetusten mekaanisten rasitustietojen keruuseen. Laite tallentaa pitkittäis-, poikittais- ja pystysuuntaisen kiihtyvyyden aaltomuodon 250 ms ajalta ja laskee näistä kokonaiskiihtyvyyden (resultantin) aaltomuodon.

Cargolog

Cargolog on ruotsalaisen Mobitronin suunnittelema ja kehittämä kuljetusten aikaisten rasi-
tusten seurantaan tarkoitettu mittalaite. Laitteessa on lämpötilan, kosteuden ja kiihtyvyyden
lisäksi mahdollisuus tallentaa paikkatieto (GPS) ja kallistuskulma.

Shocklog

Shocklog RD 298 on kiihtyvyyden- ja värinämittauksiin suunniteltu laite, johon voidaan lisäksi
liittää lämpötila- ja kosteusanturi. Laitteella voidaan tallentaa kiihtyvyyden aaltomuoto
usean sekunnin ajalta. Laite tallentaa maksimikiihtyvyyden tietyin väliajoin, mikä on hyö-
dyllinen toiminto arvioitaessa keskimääräistä kiihtyvyyttä ja värinää.

LogRH

LogRH on VTT:n ja Amptech Oy:n kehittämä laitteisto, jolla mitataan lämpötilaa, kosteutta
ja kiihtyvyyttä. Lisäksi laite detektoi staattisen sähköpurkauksia, ja siinä on liityntä Pura-
filin Inc:n valmistamaan OnGuard-korroosiolähettimeen. Laitteeseen on integroitu logistii-
kan ilmastollisten, mekaanisten ja sähköisten riskien kannalta tärkeät mittaukset. Laittee-
seen voidaan kiinnittää enimmillään neljä lämpötila- ja kosteusanturia, ja sen ohjelmisto
laskee myös kastepisteen, absoluuttisen kosteuden ja kosteanaoloajan.

Tinytag

Tinytag Plus on Geminin valmistama pienikokoinen tiedonkeruulaite [21]. Laitteita on eri
mitattaville suureille. Yleensä yksi laite mittaa yhtä tai kahta suurta. Esimerkkejä ovat
lämpötilaa ja kosteutta mittaava laite ja toisaalta kiihtyvyyttä mittaava laite. Mittauksessa
käytettiin kiihtyvyyttä vain yhteen suuntaan mittaavaa Tinytag-laitetta.

Spy

Spy on VTT:n ja Auramon kehittämä paperirullien rasi- ja värinämittaamiseen tarkoitettu laite.
Laitteella saadaan maksimissaan 8 g:n kiihtyvyyden aaltomuodot.

4.3 Asetusarvojen valinta TSR-mittaukseen

Mittalaitteiden asetukset perustuivat kokemuksiin kohdassa 3.5 esitetyistä testeistä sekä
muista kuljetus- ja laboratoriomittauksista, joita on toteutettu VTT:n koordinoimissa logis-
tiikkaprojekteissa.

Laitteiden asetuksissa haettiin ensisijaisesti sopiva yhdistelmä kiihtyvyyden ja värinän sekä
niiden suuntien mittaamiseksi. Lämpötilan ja kosteuden mittaaminen valittiin siten, että laitteiden
kapasiteetti riitti varmasti kiihtyvyyden tallentamiseen. Asetusten määrittämisessä
huomioitiin ensisijaisesti VRC:n sekä Shocklog- ja Spy-laitteiden ominaisuudet. Muiden

laitteiden asetukset määritettiin täydentämään edellisiä laitteita. Kaikissa mittalaitteissa käytettiin kapasiteetiltaan suuria litiumparistoja.

Taulukko 7 esittää Trans-Siperian radan mittaukseen valitut asetusarvot.

Taulukko 7. Mittalaitteiden asetusarvot.

Mittalaite	Suure	Asetusarvot	Mittaussuunta	Lisätiedot
<i>Cargolog</i>	Lämpötila [°C]	30 min välein		
	Kosteus [%]	30 min välein		
	Kiihtyvyys [g] (tallennusarvo)	x = 0,6 y = 0,6 z = 0,8	Pitkittäissuunta X Poikittaissuunta Y Pystysuunta Z	Ei herätysarvoa
<i>Shocklog</i>	Lämpötila [°C]	30 min välein		
	Kosteus [%]	30 min välein		
	Kiihtyvyys [g] (tallennusarvo)	Maksimi 2 min välein	Pitkittäissuunta X Poikittaissuunta Y Pystysuunta Z	200 kpl yli 4 g:n näytettä aaltomuotoineen. Herätysarvo 3,8 g
<i>LogRH</i>	Lämpötila [°C]	30 min välein	Pitkittäissuunta Y	
	Kosteus [%]	30 min välein	Poikittaissuunta X	
	Kiihtyvyys [g]	2 g	Pystysuunta Z	Ei herätysarvoa
<i>VRC</i>	Kiihtyvyys [g] (tallennusarvo)	x = 1,0 g	Pitkittäissuunta Y	Herätysarvo 0,8 g
		y = 1,0 g	Poikittaissuunta X	
		z = 1,2 g	Pystysuunta Z	
<i>Tinytag</i>	Lämpötila [°C]	5 min välein	Pystysuunta Z	
	Kosteus [%]	5 min välein		
	Kiihtyvyys [g] (tallennusarvo)	Maksimi 6 min välein		
<i>Spy</i>	Kiihtyvyys [g] (tallennusarvo)	2 g	Pitkittäissuunta Y	Herätys 1,9 g
			Poikittaissuunta X	
			Pystysuunta Z	

Aikaisemmissa testeissä VRC, Shocklog, Spy ja Tinytag olivat toimineet luotettavimmin. Niistä kolme ensimmäistä tallentaa myös kiihtyvyyden aaltomuodon. Tinytag, Shocklog ja LogRH tallentavat herkästi nopeat kiihtyvyyssiikit, minkä vuoksi niiden liipaisuraja nos-

tettiin korkeammaksi ottaen samalla huomioon niiden tallennuskapasiteetin. Cargologin kiihtyvyytulokset olivat olleet alhaisempia, minkä vuoksi sen asetusarvot valittiin matalliksi myös TSR-mittauksessa. Seuraavassa esitetään asetusarvojen tarkemmat perustelut kunkin mittalaitteen osalta.

VRC

VRC on suunniteltu siten, että raja-arvona laitteen tallentamalle tapahtumalle on n. 5 km/h tapahtuva törmäys. Törmäystestien ja todellisten kuljetustestien perusteella tätä voidaan pitää lastin eheyden ja paikoillaan pysymisen raja-arvona. Tallennustasoissa vaunutyypä on otettu huomioon siten, että 4-akseliselle vaunulle liipaisurajana on 0,5 g ja 2-akseliselle vaunulle 1,0 g. Laitteella haluttiin tarkastella erityisesti voimakkaimpia vaunuun kohdistuvia iskuja, minkä takia alle 10 ms kestoiset iskut suodatettiin pois muistikapasiteetin säästämiseksi.

TSR-mittauksessa tallennusrajaksi valittiin meno- ja poikittaissuuntaan 1 g ja pystysuuntaan 1,2 g. Asetuksissa painotettiin pitkittäissuuntaista kiihtyvyyttä, minkä takia pystysuuntainen raja-arvo valittiin korkeammaksi.

Cargolog

Edellisten testien pohjalta Mobitron räätälöi Cargologista erityisen version, jonka paristokapasiteettia oli lisätty ja jonka kiihtyvyyden rajataajuus oli 30 Hz.

Kiihtyvyydsarvojen tallennusrajoja laskettiin 0,6–0,8 g:hen. Paperirullien kuljetusmittauksessa [19] rekisteröitiin vähän pitkittäissuuntaisia kiihtyvyyksiä, minkä takia raja-arvo valittiin TSR-mittauksessa alhaisemmaksi. Pystysuuntainen raja-arvo oli korkeampi samasta syystä kuin VRC-laitteella. Myös lämpötilaa ja kosteutta mitattiin (30 min välein), koska niiden vaatima muistikapasiteetti ei vaarantanut kiihtyvyydsmittausta.

Shocklog

Shocklogin asetusarvojen valinnassa käytettiin apuna edellä mainittujen testien lisäksi aiemmin suoritettua Australian merikuljetusta. Useita kuukausia kestäneessä merikuljetustestissä Shocklog tallensi maksimiarvon ennalta määritetyin väliajoin. [22]

Shocklogin kiihtyvyydsperiodiksi valittiin 2 min. Periodinen kiihtyvyydsmittaus antaa tietoja TSR-reitin keskimääräisestä kiihtyvyydestä ja tärinästä. Jotta laitteen muisti- ja paristokapasiteetti ei ylittyisi, aaltomuodon tallennuksen liipaisuraja korotettiin 4 g tasolle.

LogRH

LogRH-laitteiston asetusarvot perustuivat aikaisempaan TSR-mittaukseen sekä VTT:n suorittamiin kuljetusmittauksiin ja laboratoriotesteihin. Laitteen alin mahdollinen kiihtyvyydsraja on n. 1,5 g. Kiihtyvyydsliipaisuksi valittiin 2,0 g. 30 min lämpötila- ja kosteusmittaus vei vain vähän muistikapasiteettia.

Tinytag

Testiin valittiin kaksi lämpötilaa ja kosteutta mittaavaa laitetta sekä yksi kiihtyvyyttä mittaava laite. Kiihtyvyyttä yhteen suuntaan mittaava laite kiinnitettiin tallentamaan pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä ja tärinän huippuarvoja. Laite ohjelmoitiin tallentamaan kiihtyvyyden maksimiarvo mahdollisimman usein (6 minuutin välein) kapasiteetin rajoissa.

Lämpötila ja kosteus mitattiin vuorotellen kahdella laitteella siten, että arvot saatiin 5 min välein.

Spv

Asetusarvoissa tukeuduttiin VRC-laitteen asetusarvoihin, koska molemmat laitteet perustuvat samaan Auramon tekniikkaan. Spyn kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi mittaa lepotilassa 1,0 g:n arvon. Spyn 2,0 g liipaisuarvo vastasi siis samaa tasoa kuin VRC-laitteen 1,0 g.

4.4 Mittalaitteiden sijoittelu

Ennen testin aloittamista laitteet ruuvattiin kiinni erilliseen vanerilaatikkoon (kuva 13). Laatikko piti laitteistot tukevasti ja jäykästi paikoillaan ja antoi mahdollisimman vertailukelpoiset tulokset kaikilta mittalaitteilta. Laatikko myös suojasi mittalaitteistoja kuljetuksen aikana mahdollisilta lastin siirtymisiltä ja toimi laitteiden palautuspakkauksena.



Kuva 13. Mittalaitteet kuljetuslaatikossa.

Laatikko kiinnitettiin ruuveilla poikittain kontin etuosaan (kuva 14). Laitteistot sijoitettiin laatikkoon siten, että tuloksista pystyttiin selvittämään pitkittäissuuntaan, poikittaissuuntaan ja pystysuuntaan tapahtuneet kiihtyvyydet. Menettelyllä pyrittiin mittaamaan mahdollisimman tarkasti lastille kohdistuvat rasitukset.



Kuva 14. Kuljetuslaatikko kontissa.

Vanerilevykollit olivat ympäripakattuja. Lastin kiinnitys poikkesi normaalista merikuljetuksesta sitomisvöiden osalta. Kollit kiinnitettiin poikkeavasti ”rekkavöillä” normaalin kertavyön sijaan. Rekkavyöt pitävät lastin paremmin paikoillaan kuin perinteinen kertavyö.

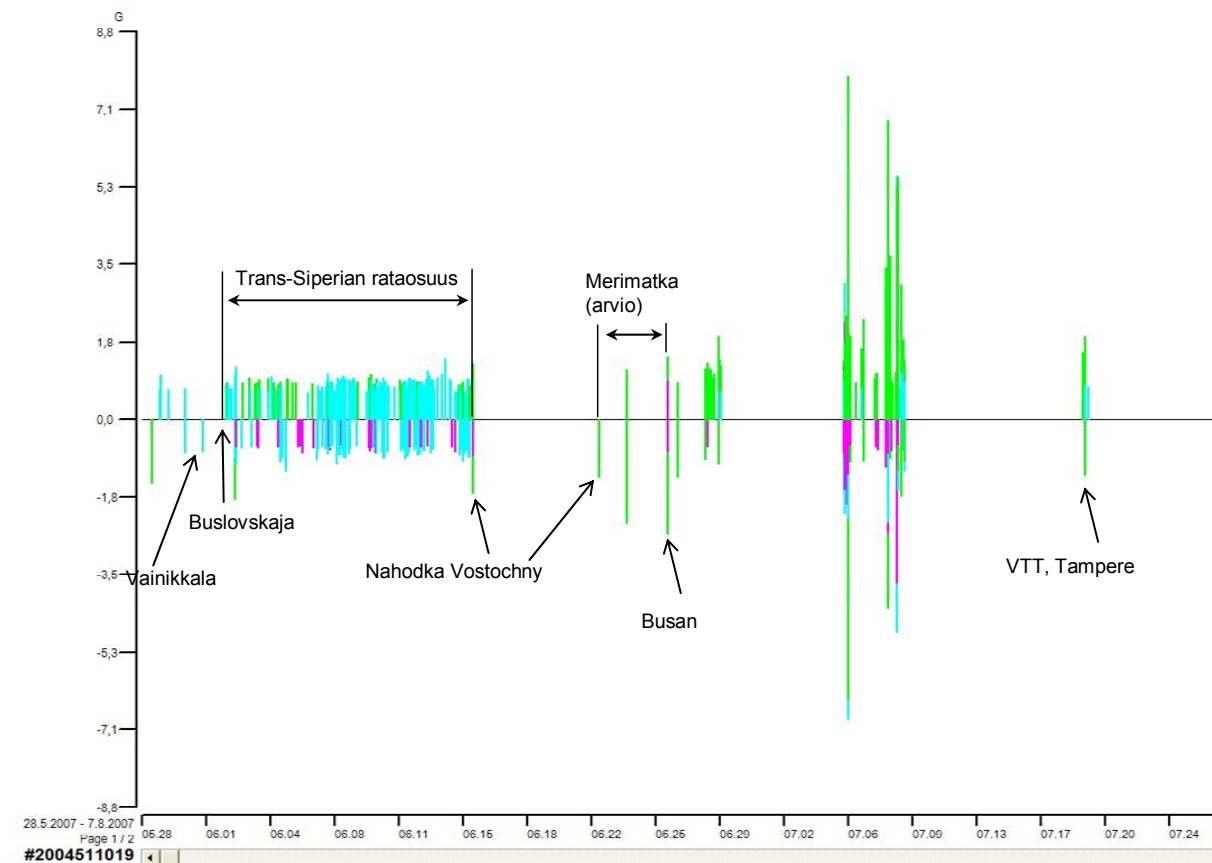
5. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Trans-Siperian radan mittauksessa hyödynnettiin kahdeksaa mittalaitteistoa, jotka kaikki toimivat moitteetta. Niistä neljä mittasi lämpötilaa ja kosteutta ja kuusi laitetta kiihtyvyyttä. Kaikki edellä mainitut suureet vaikuttavat tuotteen toiminnan luotettavuuteen määränpäässä.

Lämpötilan ja kosteuden tarkasteluissa kiinnitettiin huomiota ääriarvoihin, keskimääräisiin olosuhteisiin, kondensoitumiseen sekä suureiden suuriin ja nopeisiin vaihteluihin, jotka vaikuttavat tuotteen korrodoitumiseen. Mekaanisten rasitusten tarkasteluissa pääpaino oli voimakkaimmissa tapahtumissa (iskut) ja radan keskimääräisessä rasituksessa (täriä). Pääpaino tarkasteluissa oli tuotteeseen kohdistuvissa mekaanisissa rasituksissa.

Tulokset on jaettu TSR:n osalta kahteen alalukuun. Ensimmäisessä alaluvussa esitetään lämpötila- ja kosteusarvot ja toisessa alaluvussa kiihtyvyyksien päiväkohtaiset maksimiarvot, kumulatiiviset kiihtyvyytkuvaajat ja aaltomuodot suurimpien kiihtyvyytapahtumien osalta. Kolmas alaluku käsittelee merikuljetuksen aikaisia rasituksia.

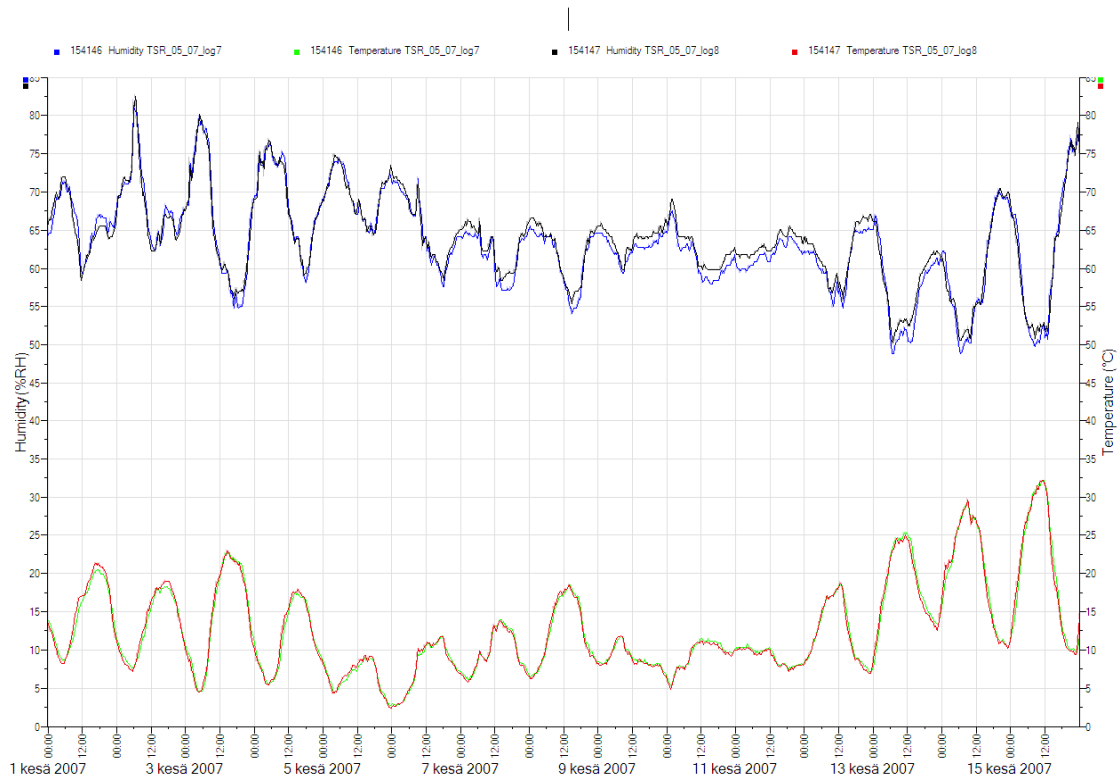
Kuljetus toteutui suunnitellun aikataulun mukaan. Kokonaiskesto oli 26 päivää, josta Trans-Siperian radan osuus oli 15 päivää. VR:n RailTrace-seurannan mukaan Siperian radan osuus mittauksessa sijoittuu ajalle 1.6.2007–15.6.2007. Kontin ja lastin kunto määränpäässä oli erinomainen, ja kontin alkuperäiset sinetit olivat paikoillaan. Kuva 15 esittää koko kuljetusmittauksen Haminasta Busaniin ja laitteiden palautuksen Suomeen Cargolog-laitteen kiihtyvyyksimittauksen osalta.



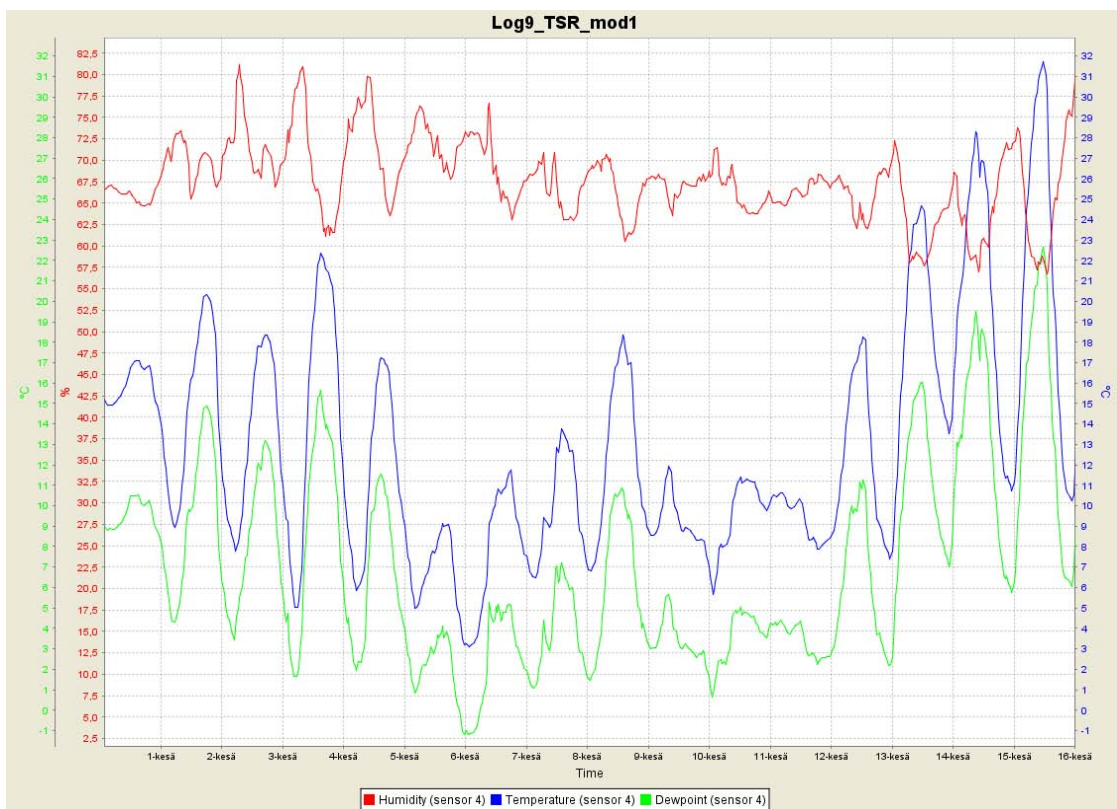
Kuva 15. Case-mittaus Hamina–Buslovskaja–Vostochny–Busan ja laitteiden palautus Tampereelle.

5.1 Junakuljetuksen aikainen lämpötila ja kosteus

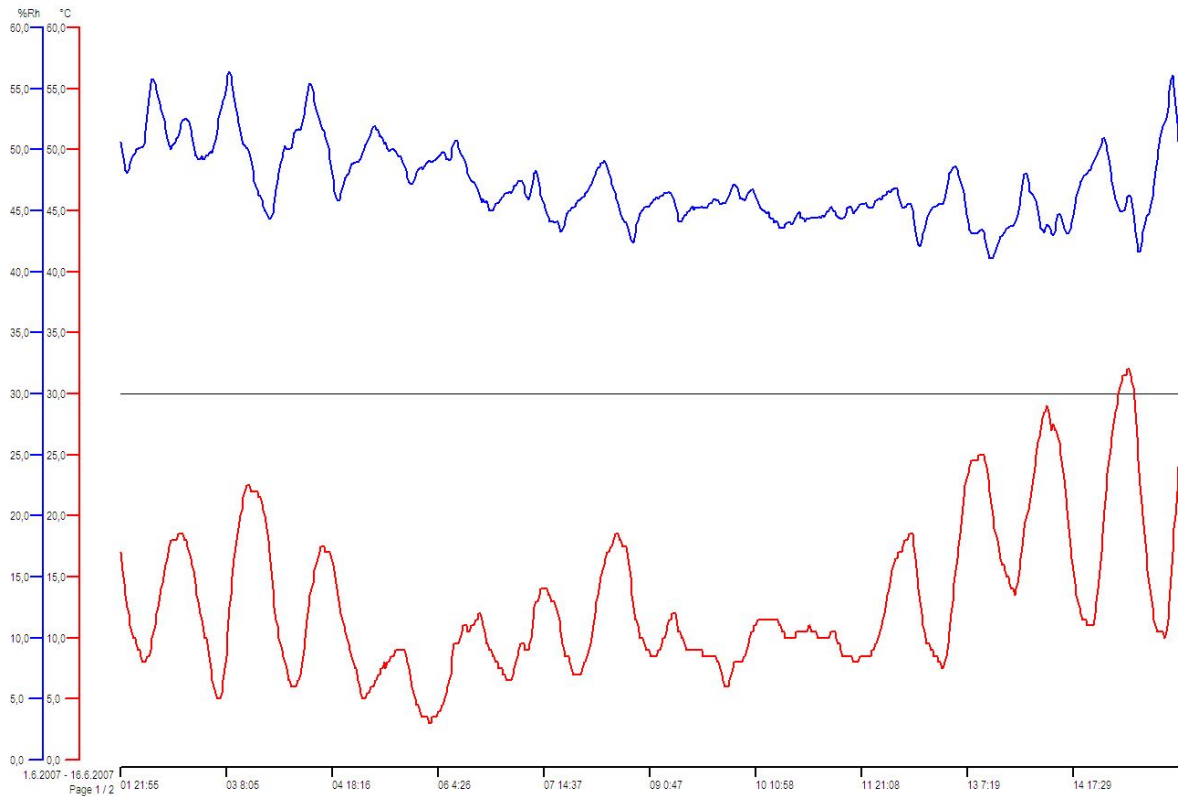
Kuvissa 16–18 esitetään junamatkan aikaiset ilmasto-olosuhteet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta neljän eri mittalaitteen antamien tulosten pohjalta. Esitetyt arvot ovat kahdelta Tinytag-mittalaitteelta sekä Cargolog- ja LogRH-laitteilta.



Kuva 16. Lämpötila ja kosteus Siperian radalla, Tinytag-mittalaitteet.



Kuva 17. Lämpötila, kosteus ja kastepiste Siperian radalla, LogRH-laite.



Kuva 18. Lämpötila ja kosteus Siperian radalla, Cargolog-laite.

Siperian radalla lämpötilan ja kosteuden vuorokausivaihtelut ovat olleet merkittäviä erityisesti kuljetuksen loppuaikana. Vaihtelut sekä lämpötilan että kosteuden suhteen ovat tapahtuneet n. 6–7 tunnin sisällä. Kaikki mittalaitteet ovat mitanneet lämpötilan osalta suurimmillaan n. 20 °C:n vuorokausivaihtelut. Kosteuden vaihtelu on ollut enimmillään n. 30 %.

Lämpötila on kuljetuksen keskivaiheilla lähentynyt hetkellisesti nollaa ja loppuvaiheessa ylittänyt hetkellisesti 30 °C. Suhteellinen kosteus kontin sisällä on pysynyt käytännössä koko ajan alle 80 %:ssa. LogRH-laitteen laskema kastepiste on ollut kuutena kuljetuksen aamuna vain 3–4 asteen päässä. Tämän perusteella kosteuden tiivistyminen on ollut hetimitään mahdollista. Kostearnaoloaika on ollut enintään muutamia tunteja.

Taulukko 8 esittää yhteenvedon kuljetuksen aikaisista lämpötilan ja kosteuden maksimi- ja minimiarvoista, keskiarvoista sekä suurimmat vuorokausivaihtelut. Eri mittalaitteiden antamat tulokset lämpötilan osalta ovat olleet sekä minimi- ja maksimi- että keskiarvoiltaan vertailukelpoisia. Erot kosteustuloksissa selittyvät laitteiden anturien herkkyydellä ja koteloinnilla. Tinytag-laitteiden kosteusanturi on rakenteeltaan avoin ja reagoi muutoksiin herkimmin.

Taulukko 8. Yhteenveto junakuljetuksen aikaisista ilmasto-olosuhteista.

	Tinytag 1	Tinytag 2	LogRH	Cargolog
Lämpötila max.	32,2 °C	32,2 °C	32 °C	32 °C
Lämpötila min.	2,6 °C	2,3 °C	3,1 °C	3 °C
Kosteus max.	82,2 %	82,7 %	81 %	56,4 %
Kosteus min.	48,9 %	50,2 %	36 %	41,1 %
Lämpötila, keskiarvo	12,7 °C	12,7 °C	14 °C	12,9 °C
Kosteus, keskiarvo	63,5 %	64,0 %	65 %	47,3 %
Lämpötila max. vuorokausimuutos	23 °C	23 °C	20 °C	~20 °C
Kosteus max. vuorokausimuutos	30 %	30 %	23 %	15 %

Yleisesti kuljetuksen lämpötila- ja kosteusrasitukset ovat olleet alhaiset verrattuna edelliseen, keväällä 2006 toteutettuun TSR-mittaukseen ja varsinkin kylmien talviolosuhteiden aiheuttamiin lämpötilarasituksiin Siperian radalla.

5.2 Junakuljetuksen aikaiset kiihtyvyydet

Kiihtyvyyksien osalta tuloksissa on analysoitu kiihtyvyyksien maksimiarvoja, suurimpien kiihtyvyyttapahtumien aaltomuotoja ja niiden kestoja sekä kiihtyvyyksien lukumäärää ja niiden suuntien suhteellisia osuuksia.

Tuloksiin vaikuttavat laitteen ominaisuudet ja asetusarvot. Mittalaitteiden antamia tuloksia ei myöskään suodatettu datan analysointivaiheessa. UIC-rautatiestandardien [16], [18] mukaisten kiihtyvyyksimittauksien rajataajuus on tyypillisesti 10–20 Hz, joka on alhaisempi kuin tässä tutkimuksessa käytettyjen mittalaitteiden rajataajuudet (30–300 Hz). Tämän johdosta tässä tutkimuksessa käytetyt laitteet mittasivat käytännössä UIC-standardin mukaisia laitteita suurempia kiihtyvyyksiarvoja.

Osa laitteista (Tinytag ja Shocklog) tallensi kiihtyvyyden maksimiarvon ennalta määritetyin väliajoin. Näiden laitteiden antamien tapahtumien lukumäärä oli siten suurempi kuin erillisellä liipaisurajalla varustettujen laitteiden (VRC, Cargolog, Spy ja LogRH).

Osa laitteista tallensi eri suuntien (pitkittäin, poikittain, pysty) kiihtyvyyksistä myös polariiteetin (positiivinen ja negatiivinen suunta). Tyypillisesti iskut värähtelivät sisältäen molempia polariteetteja, minkä takia tässä analyysissä ei tehdä eroa kiihtyvyyksien negatiivisen ja positiivisen suunnan välillä.

5.2.1 Päiväkohtaiset maksimiarvot junakuljetuksen aikana

Kaikki laitteet tallensivat yksittäisiä iskuja suhteellisen tasaisesti eri päivinä junakuljetuksen aikana. Osaltaan tähän saattoivat vaikuttaa toistuvat veturien vaihdot (rautatietyhtiön vaihtuessa) kuljetuksen aikana ja mahdolliset vaunujen uudelleenjärjestelyt.

VRC:n ja Spyn ohjelmistojen vuoksi kiihtyvyyksiä voitiin tarkastella vain kokonaiskiihtyvyyksien maksimiarvoina tietyltä ajanjaksolta (kesäkuu) ja yksittäisten kiihtyvyyksien aaltomuotoina. Muiden laitteiden ohjelmistoista data voitiin siirtää tekstimuotoisena. Näiden laitteistojen tulokset on esitetty Excel-kuvaajina.

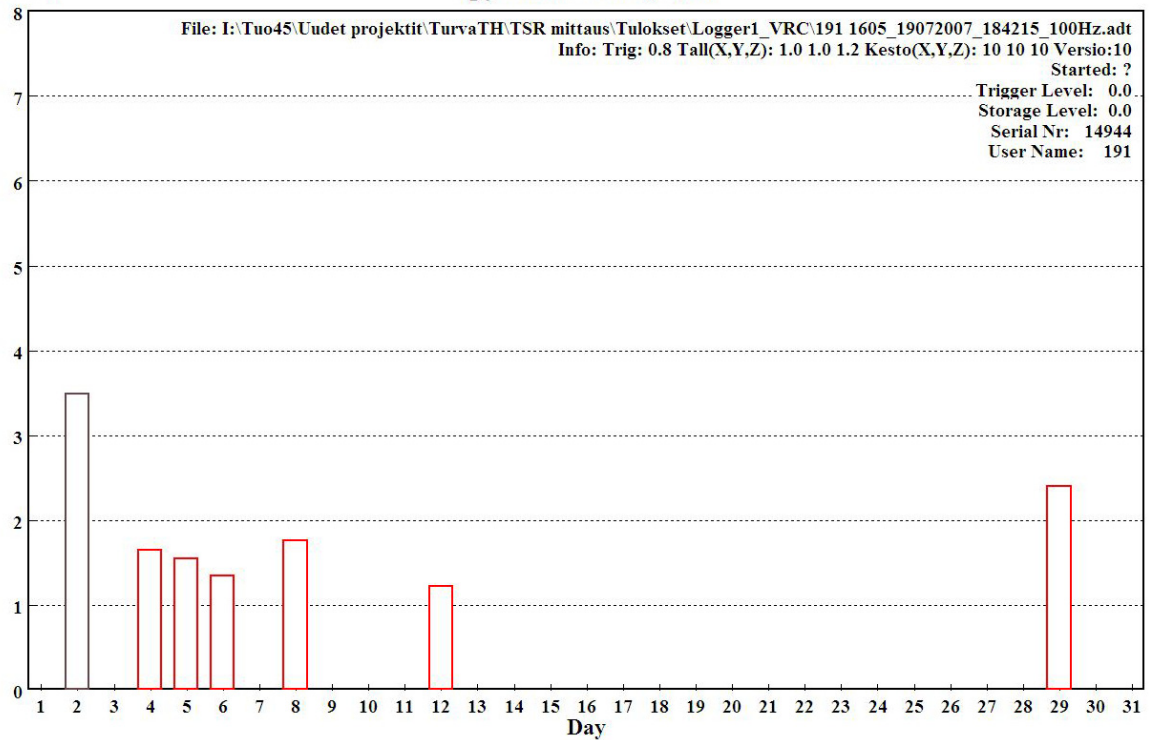
Suurimmat iskut mitattiin 2. ja 15. kesäkuuta, jolloin RailTrace-seurannan perustella juna on ollut todennäköisesti Buslovskajan ja Nakhodka-Vostochnyn asemilla. Laitteet ovat tallentaneet molempina päivinä suuria pystysuuntaisia arvoja. Buslovskajassa on mahdollisesti tehty vaunujen järjestelyjä, joiden yhteydessä mittalaitevaunu on ”hypännyt” ylöspäin raiteella vaunujen törmäyksen seurauksena. Vostochnyssa kontti on mahdollisesti nostettu satamassa konttialustalta odottamaan merikuljetusta.

VRC ja Spy

VRC-laite tallensi suurimmat, yli 10 ms kestäneet iskut (10 tapahtumaa) (kuva 19). Tulokset ovat yhteneviä kohdassa 3.5 esitettyihin törmäys- ja kuljetustesteihin. Näiden perusteella VRC:n pitkittäissuunnassa mittaama 1,5–2 g kiihtyvyys vastaa nopeudeltaan n. 5 km/h vaunun törmäystä ratapihalla. Tämän suuruisia kiihtyvyyksiä VRC tallensi Siperian radalla neljä kappaletta. 2.6. Buslovskajassa tapahtunut törmäys oli kiihtyvyydeltään näitä suurempi (kokonaiskiihtyvyys 3,5 g).

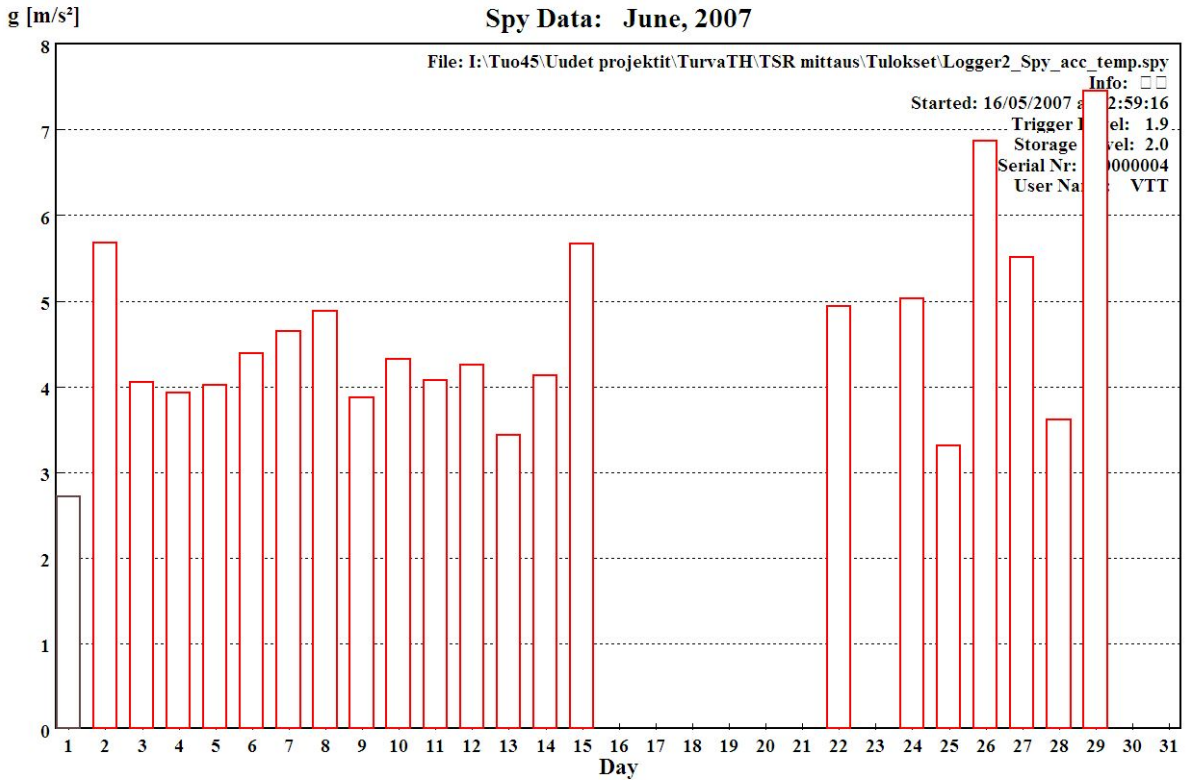
g [m/s²]

Spy Data: June, 2007



Kuva 19. Kokonaiskiihtyvyys Siperian radalla (1.–15.6.2007), VRC-laitte.

Spyn kuvaajasta on nähtävissä, että laite rekisteröi kiihtyvyyksiä junamatkan joka vaiheessa (kuva 20). Spy tallensi VRC-laitetta huomattavasti enemmän kiihtyvyyksiä, yhteensä n. 1600 tapahtumaa. Suurin osa näistä tapahtumista oli n. 1,0 g pystysuuntaisia (dynaamisia) kiihtyvyyksiä. Suurimmat yksittäiset arvot (lähes 6 g) Spy rekisteröi 2. ja 15. kesäkuuta. Junakuljetuksen muiden päivien osalta enimmäiskiihtyvyydet ovat noin 4 g:n luokkaa. Karkeasti laskien Spy mittasi yli 1,0 g kiihtyvyyden keskimäärin 15 min välein.



Kuva 20. Kokonaiskiihtyvyys Siperian radalla (1.–15.6.2007), Spy-laite.

VRC- ja Spy-laitteiden tuloksista voidaan päätellä, että valtaosa radalla tapahtuneista kiihtyvyyksistä oli nopeita, alle 10 ms kestäneitä iskuja tai tärinää. Laitteiden kiihtyvyyssmittaus asetuksineen ja rajataajuuksineen oli yhteneväinen sillä poikkeuksella, että VRC suodattaa alle 10 ms kestävät arvot pois.

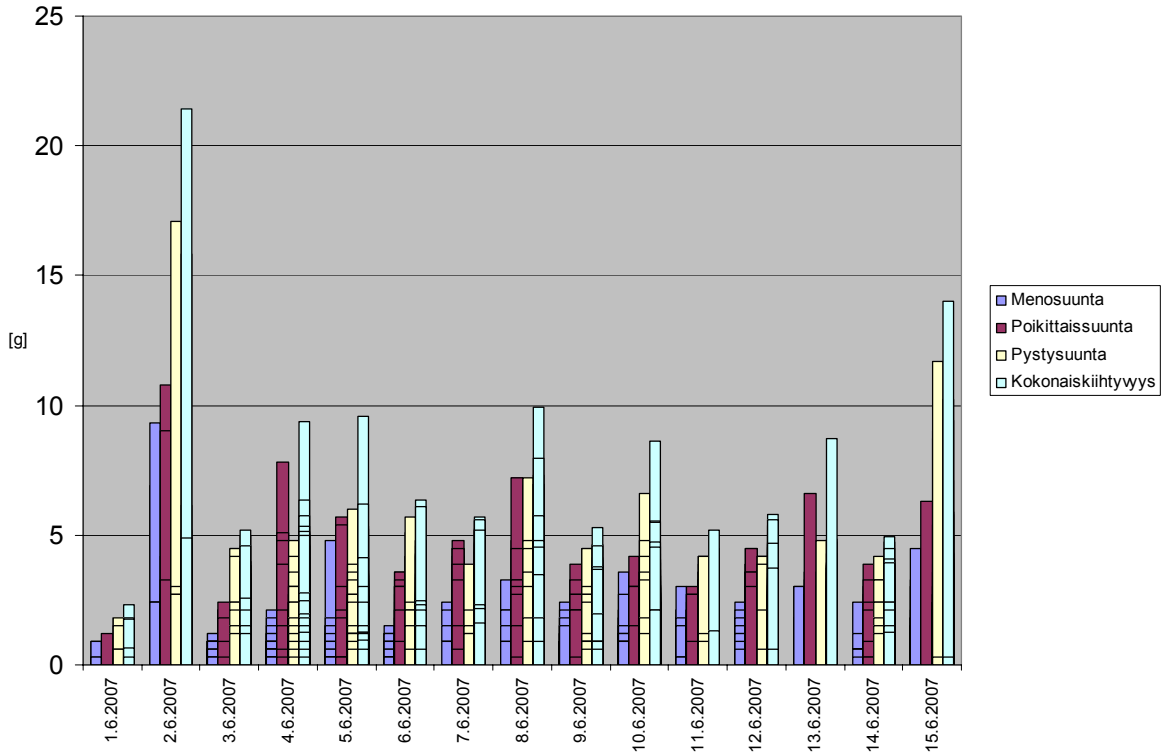
Shocklog, Cargolog ja LogRH

Kuva 21 – kuva 23 esittävät Shocklogin, Cargologin ja LogRH-laitteen tallentamat suurimmat päiväkohtaiset kiihtyvyyssarvot Siperian radan osalta. Kuvista on huomioitava, että pitkittäis-, poikittais- tai pystysuuntaan rekisteröidyt suurimmat kiihtyvyydet ovat voineet tapahtua eri ajanhetkinä yhden päivän aikana. Kokonaiskiihtyvyys on tietynä ajanhetkenä tapahtuneen yksittäisen iskun resultantti.

Shocklogin tuloksissa eri suuntiin tallennetut arvot ovat itseisarvoja, kun taas Cargologin ja LogRH-laitteen tuloksissa kiihtyvyydet on tallennettu polariteetin mukaan (positiivinen tai negatiivinen suunta). Kaikki kolme laitetta ovat antaneet suurimmat yksittäiset arvot 2.6. ja 15.6. Pystysuuntainen kiihtyvyys on ollut molemmissa tapahtumissa suurin.

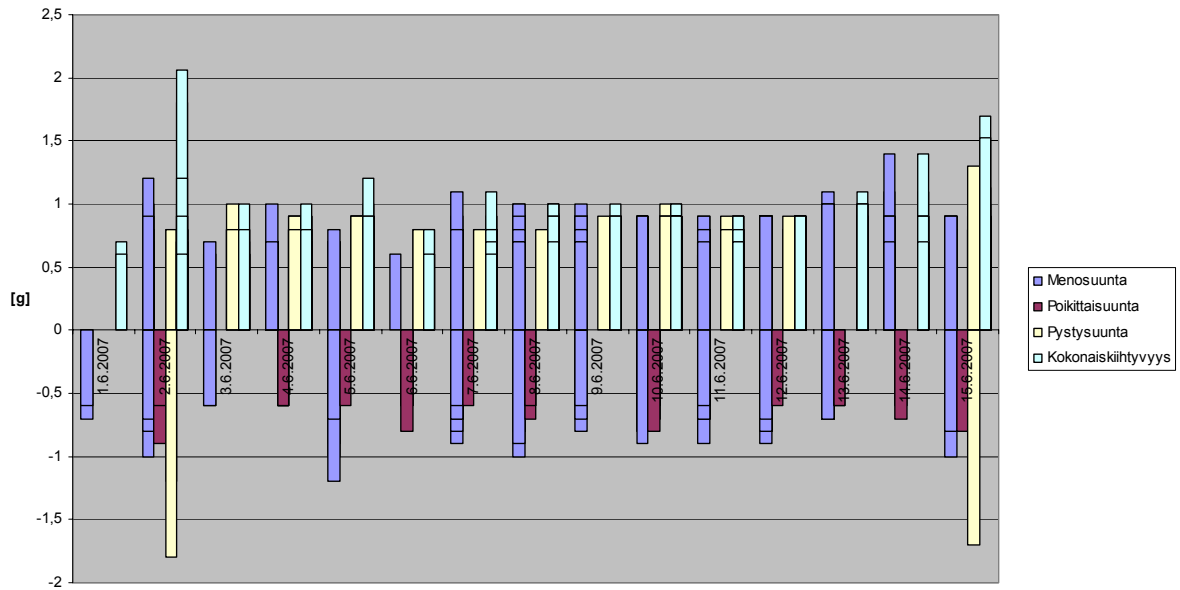
Shocklogin tuloksissa pysty- ja yllättäen poikittaissuuntaan tulleet päiväkohtaiset iskut ovat arvoiltaan suurimmat (kuva 21). Pitkittäissuuntaan (kuvassa menosuunta) tallennetut arvot ovat olleet pienempiä. Shocklog tallettaa nopeat, vain millisekunteja kestävät pysty-

suuntaiset kiihtyvyyksiä, minkä takia pitkittäissuuntainen kiihtyvyys on pienempi, vaikka se olisi kestoltaan pidempi ja kuormittavampi. Kokonaiskiihtyvyyden arvot ovat olleet keskimäärin n. 9 g.



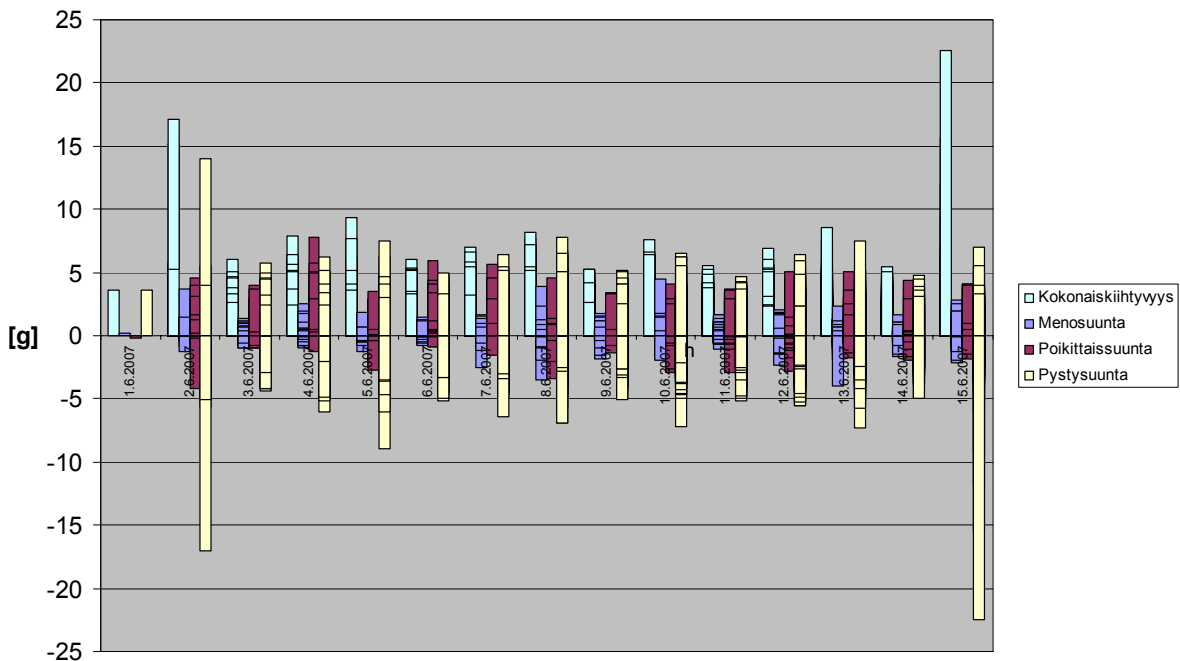
Kuva 21. Kiihtyvyys Siperian radalla, Shocklog-laite.

Cargolog on rekisteröinyt suurimmat iskut 2.6. ja 15.6. pystysuunnassa (kuva 22). Nämä iskut ovat hieman suurempia kuin kohdassa 3.5.5 esitetyt Länsi-Euroopan rautatiemittauksessa samalla mittalaitteella tallennetut arvot. [19] Muuten pitkittäissuuntaan tulleet kiihtyvyydet ovat olleet vallitsevia. Pitkittäissuuntaisia kiihtyvyyksiä on tullut sekä vaunun menettä vastakkaiseen suuntaan. Yllättävää tuloksissa ovat poikittaissuuntaan tulleet arvot, jotka ovat kaikki samaa polariteettia. Pystysuuntaiset arvot ovat voineet tulla vaihteista tai radan liitoskohdista, jolloin myös ne kohdistuvat samaan suuntaan. Poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet ovat olleet suuruudeltaan pienimpiä.



Kuva 22. Kiihtyvyys Siperian radalla, Cargolog-laite.

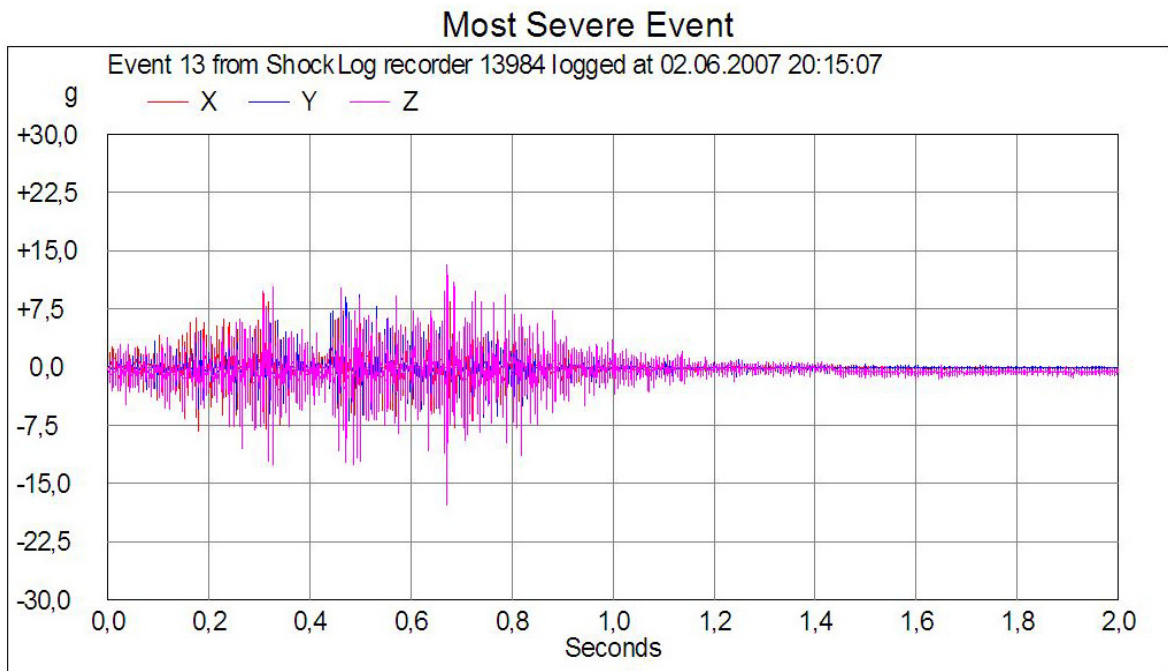
LogRH-laitteen tuloksissa suurimmat kiihtyvyydet ovat tulleet pystysuuntaan (kuva 23). Pitkittäissuuntaiset arvot ovat olleet pienimpiä. Kiihtyvyyksiä on tallentunut jokaisessa suunnassa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja.



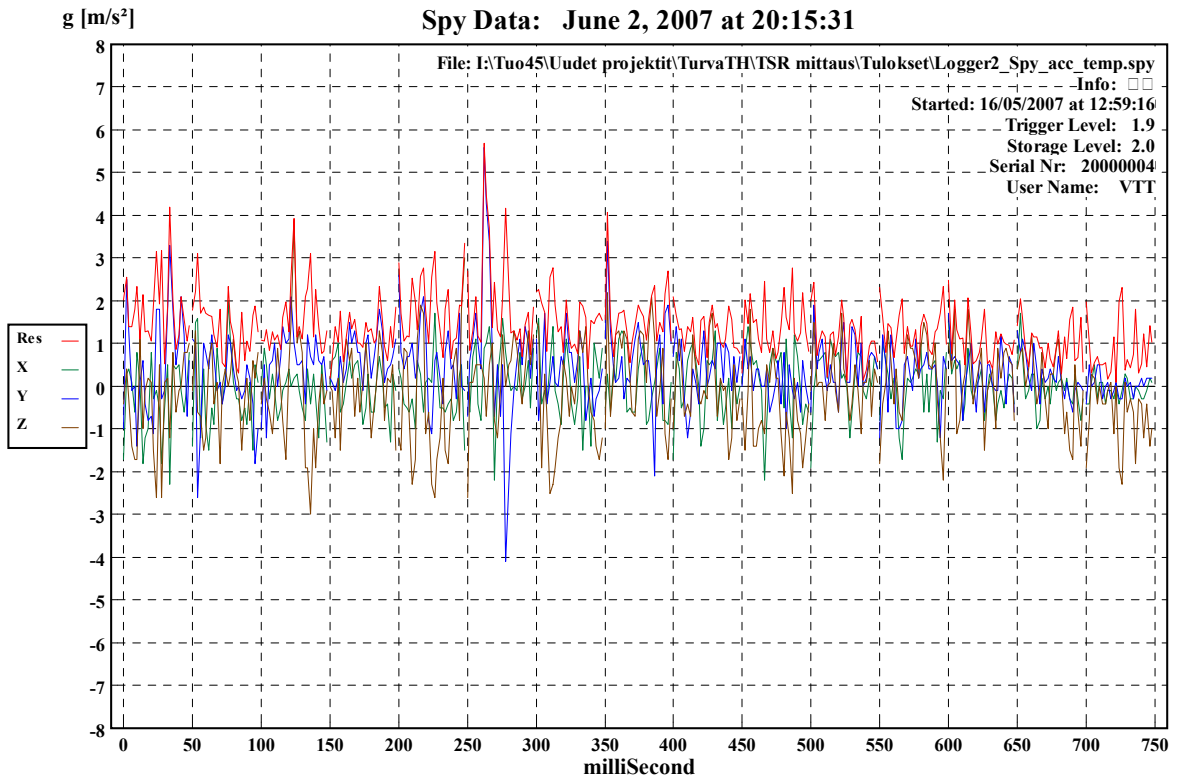
Kuva 23. Kiihtyvyys Siperian radalla, LogRH-laite.

5.2.2 Junakuljetuksen aikaisten maksimikihtyvyyksien aaltomuodot ja kestot

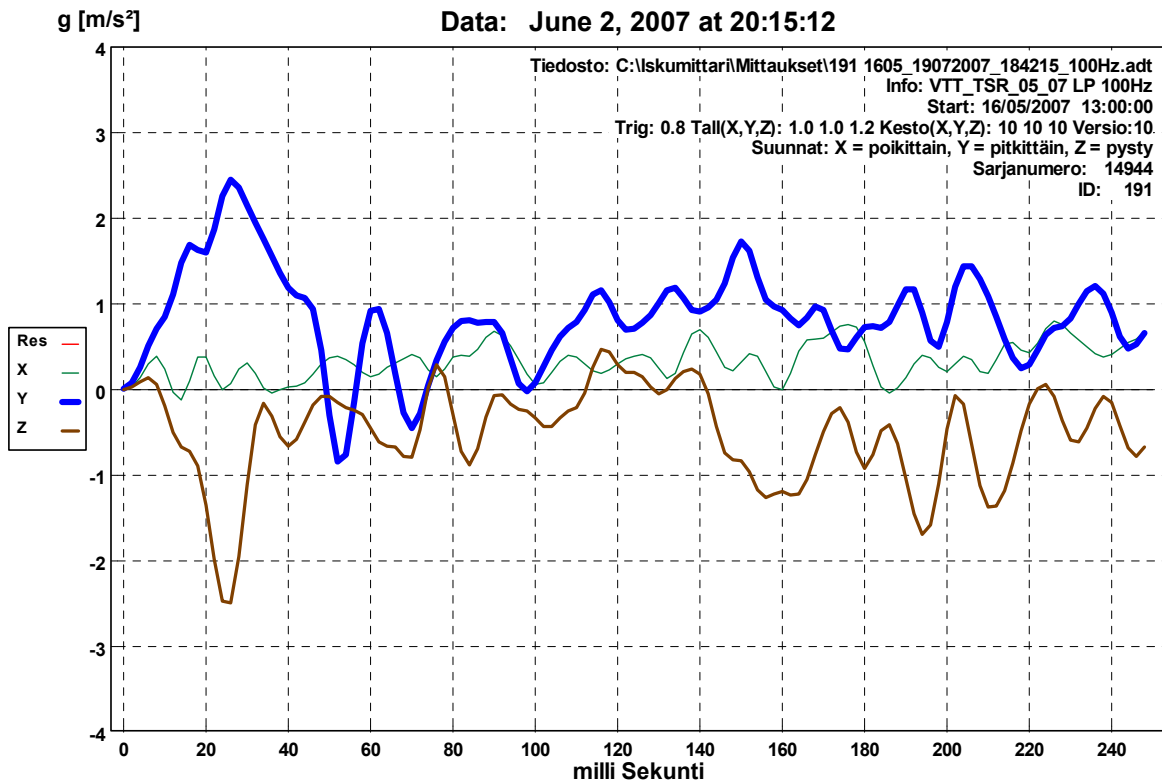
Kuvat 24–26 esittävät rautatiekuljetuksen aikaisen suurimman kiihtyvyyden aaltomuodon Shocklogin, Spyn ja VRC:n tallentamana. Kaikkien kolmen laitteen osalta suurin isku on tapahtunut 2. kesäkuuta klo 20.15 Buslovskajan aseman lähellä.



Kuva 24. Suurin Shoclog-laitteella mitattu kiihtyvyys Siperian radalla.



Kuva 25. Suurin Spy-laitteella mitattu kiihtyvyys Siperian radalla.

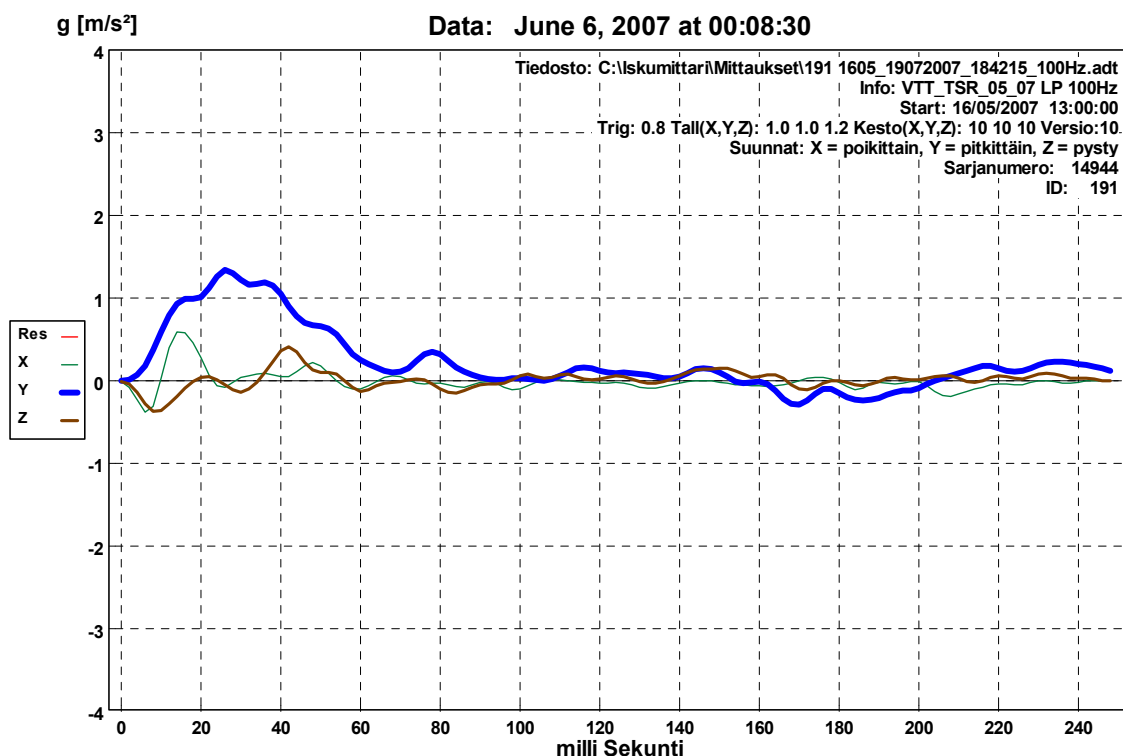


Kuva 26. Suurin VRC-laitteella mitattu kiihtyvyys Siperian radalla.

VRC-laitteen suurimman iskun aaltomuoto poikkesi muista laitteen rekisteröimistä iskuista. Sen pystysuuntainen (z) kiihtyvyys oli yhtä suuri kuin pitkittäissuuntainen (y) kiihtyvyys. Kohdan 3.5 tutkimuksissa vastaavia aaltomuotoja rekisteröitiin VRC-laitteella, kun laite sijaitsi vaunussa, joka törmäsi paikallaan olevaan vaunuun ja törmäyksen seurauksena ”hypäsi” ylöspäin raiteella. Pitkittäis- ja pystysuunnassa mitattu kiihtyvyys (2,4 g) ja kokonaiskiihtyvyys (3,5 g) ylittävät UIC-standardin konttikuormille asettaman raja-arvon 2,0 g sekä CTU:n yhdistetyille kuljetuksille asettaman raja-arvon 1,0 g. Kiihtyvyyden perusteella mittalaitteevaunun nopeus törmäyshetkellä on ollut n. 7 km/h, joka ylittää myös Suomen ratapihoilla vaunujen kytkemisessä sallitun enimmäisnopeuden 5 km/h.

Kuvien 24–26 aaltomuodoista on hyvin havaittavissa mittalaitteiden erot. Shocklogin korkeampitaajuisen ja suodattamaton aaltomuoto muistuttaa piikkeineen kohinasignaalia, kun taas VRC-laitteen matalataajuisempi ja suodatettu signaali on Shocklogin ja Spyn signaaleja rauhallisempi ja amplitudiltaan pienempi. Spyllä iskujen kestot vaihtelivat 50 ms:ta 750 ms:iin ja Shocklogilla enimmillään 1 s:iin saakka. VRC:n tallentamista iskuista yksikään ei ollut kestoltaan yli 250 ms.

Kuva 27 on tyypillinen esimerkki muista VRC:n Siperian radalla rekisteröimistä iskuista. Aaltomuoto on yhteneväinen kohdassa 3.5 VRC-laitteella tehtyihin tutkimuksiin: pitkittäissuuntainen (y) kiihtyvyys on arvoltaan suurin, ja iskujen suuruusluokka on 1–2 g. Vastaavia aaltomuotoja on tallennettu Suomessa, kun paikallaan olevaan mittalaitteevaunuun on törmäytetty muita vaunuja.



Kuva 27. Esimerkki VRC-laitteen tallentamasta kiihtyvyyssäyrästä Siperian radalla.

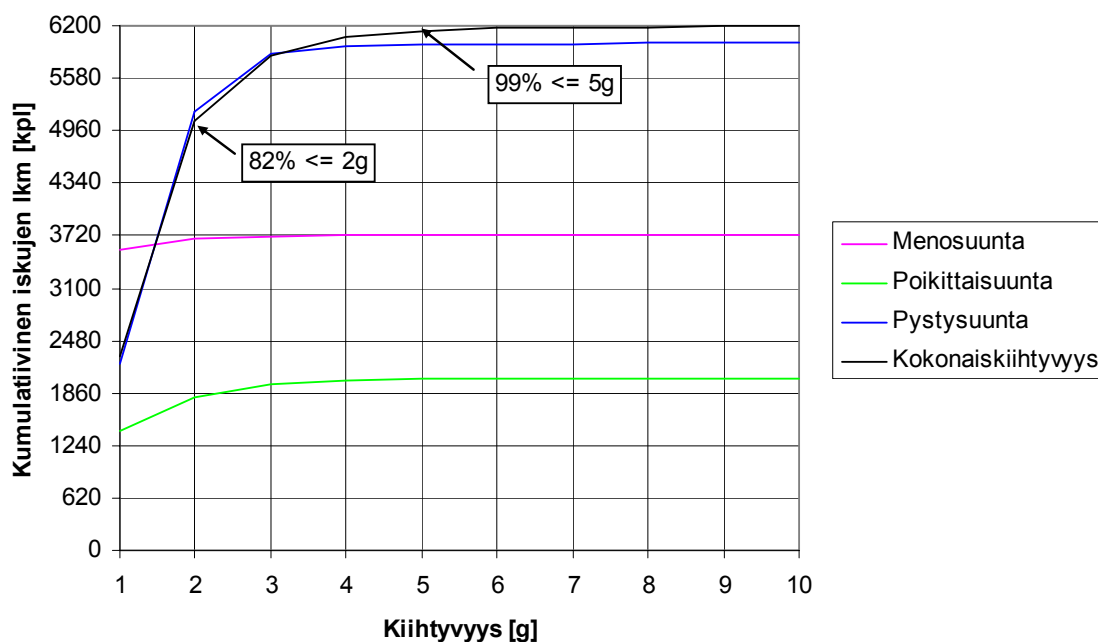
On mahdollista, että Suomesta lähteneitä kahdeksaa peräkkäistä vaunua ei ole erotettu toisistaan ratapihaviaiheiden aikana. Tällöin VRC-laitteen mittaamat kiihtyvyydet voivat olla peräisin hyvin rajuista iskuista, joita mittalaittevaunun ympärillä olleet vaunut ovat tehokkaasti vaimentaneet. Skenaario vaatisi todistukseksi tarkempia tietoja junan rakenteesta kuljetuksen eri vaiheissa, mutta tietoja ei valitettavasti ollut saatavissa.

5.2.3 Kiihtyvyyksien lukumäärä ja jakauma junakuljetuksen aikana

Kumulatiiviset kiihtyvyydjakaumat esittävät kokonaiskiihtyvyyksien prosentuaaliset osuudet ja niiden lukumäärät eri kiihtyvyyssarvoilla. Lisäksi ne esittävät eri kiihtyvyyssuuntien lukumäärät ja suhteelliset osuudet. Mitä tasaisempi vaakasuunnassa kertymäkäyrä on, sitä enemmän laite on tallentanut pieniä kiihtyvyyssarvoja. Kuvaajista ei voi päätellä yksittäisten kiihtyvyyksien arvoja.

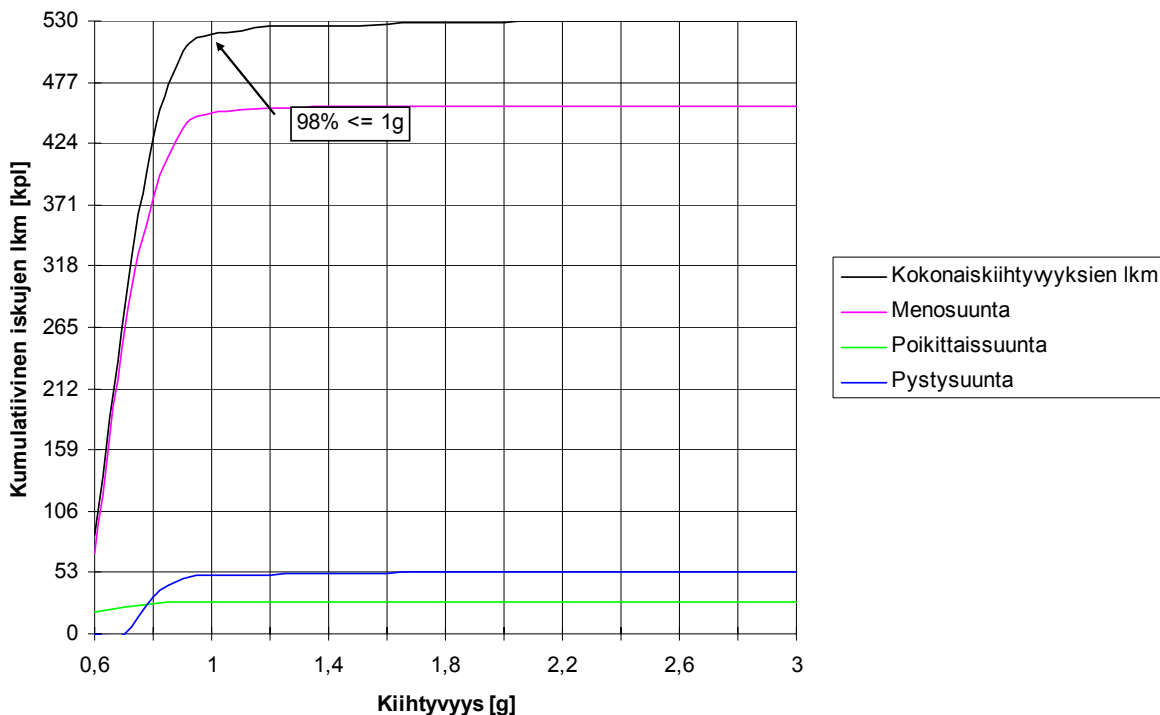
Tutkimuksessa mukana olleista laitteistoista Shocklog tallensi eniten arvoja (lähes 6200 kpl). Tämä johtui siitä, että laitteella ei ollut erillistä liipaisurajaa vaan laite tallensi 2 min välein suurimman arvon. Tämän takia tuloksissa on runsaasti pieniä alle 0,5 g:n arvoja. Niiden lisäksi Shocklog tallensi 200 kpl yli 4 g:n kiihtyvyyssarvoja.

Shocklogin kumulatiivisesta kuvaajasta nähdään, että suurin osa (82 %) kokonaiskiihtyvyyksistä on alle 2 g ja lähes kaikki alle 5 g (kuva 28). Pitkittäissuuntaan (kuvassa menosuunta) kiihtyvyyssarvot ovat olleet suurimmalta osin alle 1 g, kun taas pystysuuntaan suurin osa arvoista on ollut alle 3 g ja alle 1 g:n arvoja on ollut hieman yli kolmasosa. Laitteen resoluutio tässä mittauksessa oli 0,3 g.



Kuva 28. Kumulatiivinen kiihtyvyydjakauma, Siperian radan osuus, Shocklog-laite.

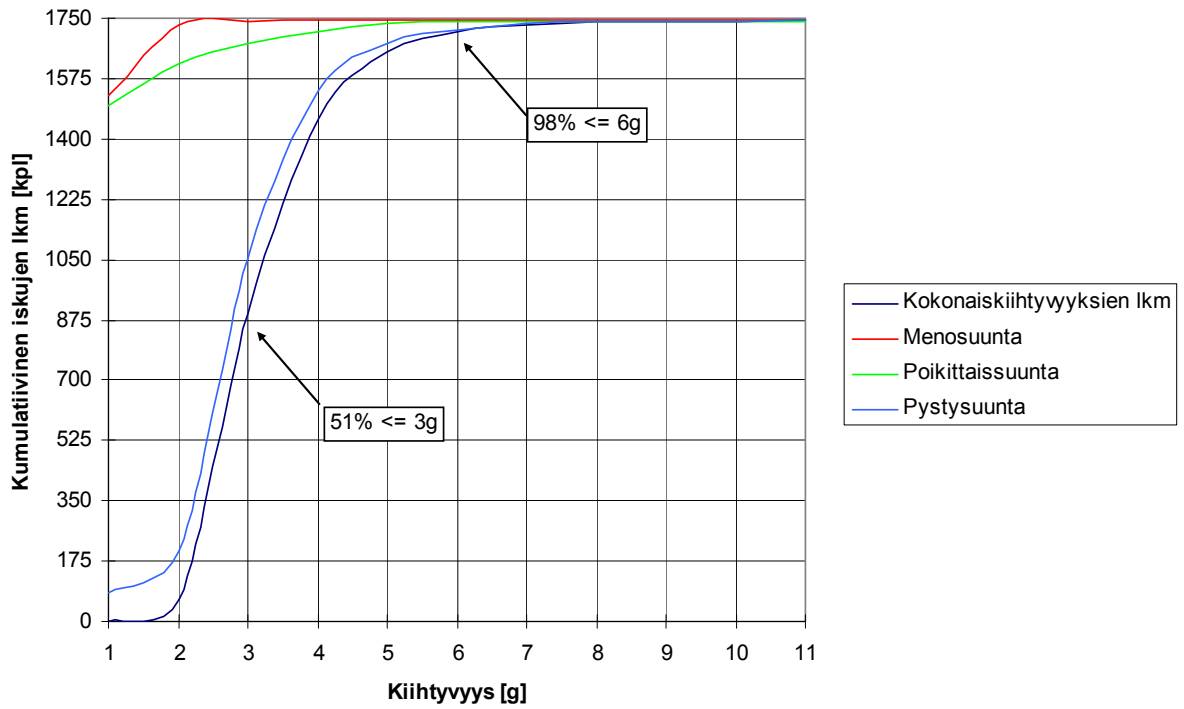
Cargologin tallennuksen resoluutio on 0,1 g. Liipaisurajana oli 0,6 g, paitsi pystysuuntaan 0,8 g. Kokonaiskiihtyvyyksiä tallentui yhteensä 530 kpl. Laitteen tallentamissa kiihtyvyyssarvoissa poikittaissuuntaisia arvoja on tallentunut huomattavan vähän, ja ne ovat lähes kaikki alle 1 g. Kokonaiskiihtyvyydet muodostuvat suurimmilta osin pitkittäissuuntaisista kiihtyvyyssarvoista (kuva 29).



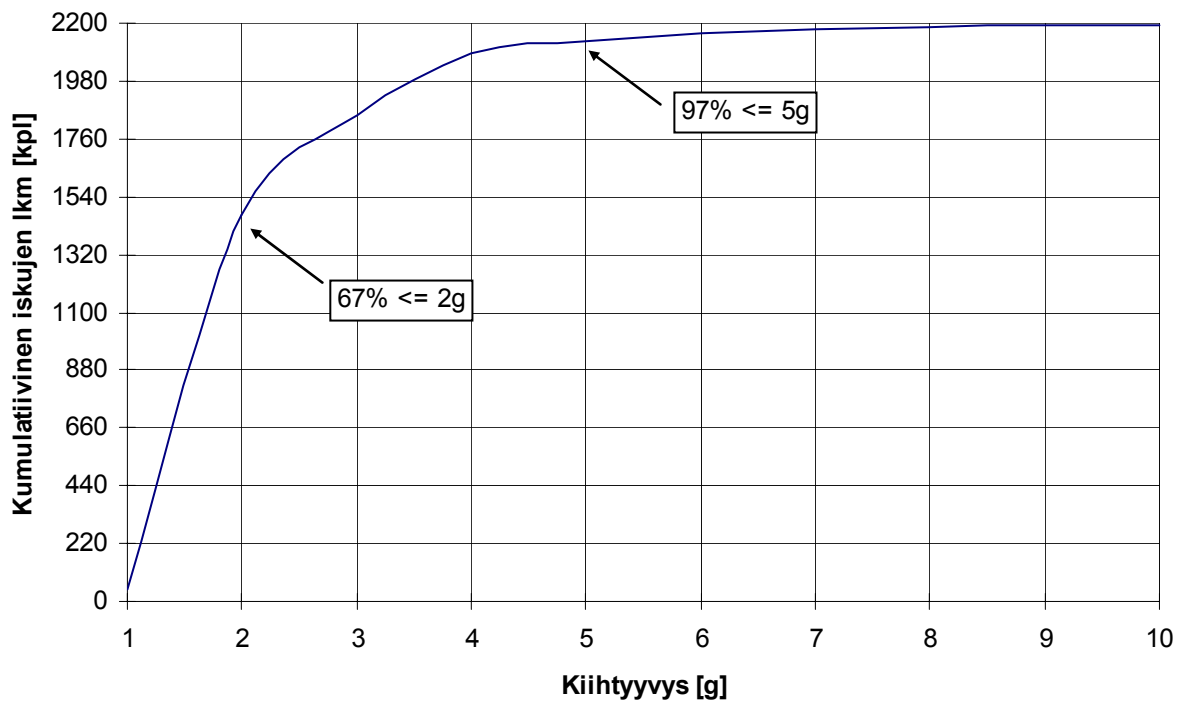
Kuva 29. Kumulatiivinen kiihtyvyyden jakauma, Siperian radan osuus, Cargolog-laite.

LogRH-mittalaitteen kumulatiivinen kuvaaja (kuva 30) poikkeaa Cargologin ja Shocklogin tuloksista siltä osin, että pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset arvot ovat olleet alhaisia ja kokonaiskiihtyvyyden käyrä on muodostunut lähes kokonaan pystysuuntaisten kiihtyvyyksien arvoista. Laitteen liipaisuarvo kiihtyvyydelle oli 2 g. Yli 2 g:n kiihtyvyydestapahtuman tallentuessa laite on tallentanut myös muut suunnat, vaikka niiden arvot eivät ylittäisi herätysarvoa. Tämän vuoksi tuloksissa on huomattavan paljon pieniä arvoja pitkittäis- ja poikittaissuunnassa.

Tinytagin kumulatiivisesta kuvaajasta (kuva 31) nähdään, että suuri osa (67 %) pystysuuntaisista kiihtyvyyksistä on alle 2 g ja lähes kaikki (97 %) alle 5 g.



Kuva 30. Kumulaatiivinen kiihtyvyyssjakauma, Siperian radan osuus, LogRH-laite.



Kuva 31. Kumulaatiivinen kiihtyvyyssjakauma, Siperian radan osuus, Tinytag-laite (pystysuunta).

Taulukko 9 kokoa Siperian radan junakuljetuksen aikana tallennettujen kiihtyvyyksien lukumäärät jaoteltuna alle 1 g:n, 1–3 g:n ja yli 3 g:n luokkiin.

Taulukko 9. Kiihtyvyyksien lukumäärät alle 1 g, 1–3 g ja yli 3 g.

		Cargolog	LogRH	Shocklog	Tinytag	VRC
< 1 g	Pitkittäissuunta	450	1526	3556	-	-
	Poikittäissuunta	27	1496	1410	-	-
	Pystysuunta	50	84	2206	48	-
	Kokonaiskiihtyvyys	519	0	2291	48	-
1–3 g	Pitkittäissuunta	6	214	161	-	10
	Poikittäissuunta	0	182	550	-	0
	Pystysuunta	4	967	3667	1799	2
	Kokonaiskiihtyvyys	11	892	3558	1799	9
> 3 g	Pitkittäissuunta	0	5	7	-	0
	Poikittäissuunta	0	62	73	-	0
	Pystysuunta	0	696	123	344	0
	Kokonaiskiihtyvyys	0	855	349	344	1

Yhteenvetotaulukon ja edellä esitettyjen kiihtyvyyksien (Spy, Shocklog, LogRH ja Tinytag) perusteella Trans-Siperian radalla esiintyy koko matkan ajan lyhytkestoisia (<10 ms) kiihtyvyyksiä tai tärinää varsinkin pysty- ja poikittäissuunnissa. Pitkään jatkuvat toistuvat kiihtyvyydet voivat olla potentiaalinen riskitekijä tärinälle herkille tuotteille, kuten elektroniikka- tai sähkölaitteille. Vähintään kaksi viikkoa kestävä junakuljetuksen pituus ja kohdullinen keskimääräinen tärinä tulisi ottaa huomioon tuotteiden kiinnityksessä ja pakkaus suunnittelussa. Toisaalta mitattujen kiihtyvyyksien taso ei anna ymmärtää, että tärinästä aiheutuva riski olisi poikkeuksellisen suuri Siperian radalla verrattuna Suomen (ja Länsi-Euroopan) rautateihin. TSR:llä mitatun tärinätason ja sen keston todellista vaikutusta tulisi vielä analysoida tarkemmin vertailumittauksilla Suomen rautateillä.

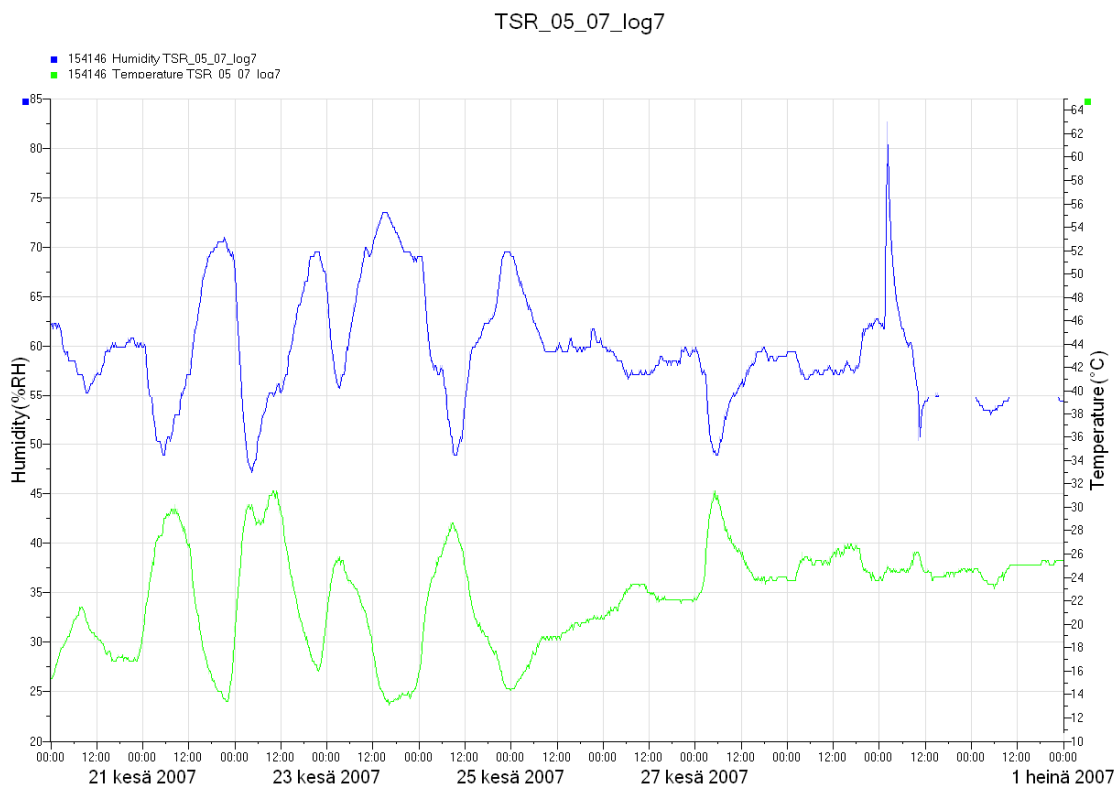
5.3 Vostochny–Busan merikuljetuksen aikaiset rasitukset

Juna saapui 15.6. Vostochnyyn, missä kontti lastattiin jatkoyhteyttä varten Winland Dalian-konttialukseen (kuva 32) [23]. Merikuljetus alkoi Vostochnysta 22.6. ja oli perillä Busanissa neljän päivän kuluttua 26.6. Mittalaitteet irrotettiin Busanissa 29.6.



Kuva 32. Merikuljetuksessa käytetty konttialus [23].

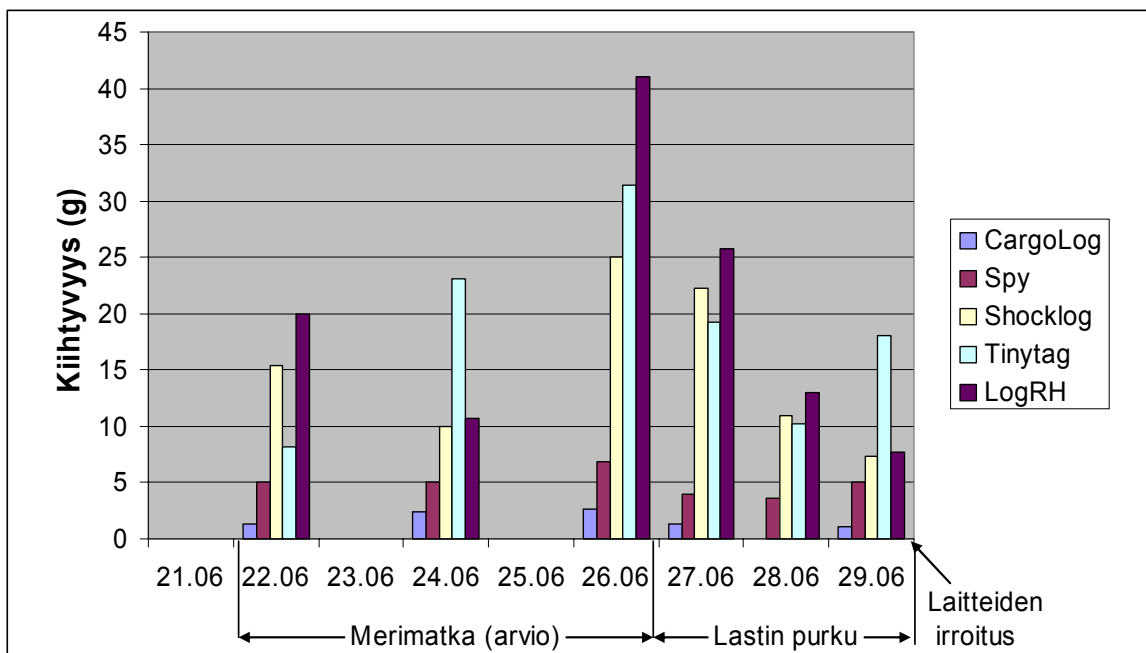
Ilmastorasitukset merikuljetuksen aikana olivat varsin lievät. Kontin lämpötilavaihtelu satama-alueella ja laivassa on ollut enimmillään n. 20 °C (10–30 °C). Suhteellinen ilmankosteus on ollut keskimäärin 60 % RH ja merelläkin koko ajan alle 80 % RH. (Kuva 33.)



Kuva 33. Esimerkki merikuljetuksen aikana mitatusta lämpötilasta ja kosteudesta.

Kuva 34 esittää kunakin päivänä mitatut suurimmat kokonaiskiihtyvyydet. Voimakkaimmat iskut mitattiin pystysuunnassa, kun kontteja tai lastia on nostettu tai muuten käsitelty satamissa. Laivaa on lastattu 22.6. ja todennäköisesti alettu purkaa 26.6. Myös merimatkan aikana 24.6. on rekisteröity yllättävän voimakas isku – tämä voi selittyä kovalla merenkäynnillä, jolloin kontit tai niiden sisältö ovat päässeet hieman liikkumaan laivan ruumassa. 26.–29.6. laitteet ovat rekisteröineet kontin käsittelystä ja siirroista sekä vanerilastin (trukilla) purkamisesta aiheutuneita kiihtyvyyksiä.

Osa suurimmista toimitukseen kohdistuneista iskuista mitattiin nimenomaan merikuljetuksen aikana. Voimakkain isku mitattiin 26.6. Busanin satamassa, ja sen amplitudi oli mittalaitteesta riippuen 2,6–41 g (kuva 34). Tämä on laitteesta riippuen 1–18 g suurempi kuin suurin Siperian radalla mitattu arvo. Merikuljetuksen aikana mitatut iskut olivat lyhytkestoisia (<10 ms), mikä toisaalta vähensi niiden aiheuttamaa kuormaa lastille. Kuten rataosuudellakin, mittalaitteiden ominaisuudet vaikuttivat tuloksiin voimakkaasti.



Kuva 34. Merikuljetuksen aikana mitatut enimmäiskiihtyvyydet.

6. Päätelmät ja suositukset

Case-tutkimuksen perusteella kuljetukset ja käsittelyt Trans-Siperian radalla ovat kansainvälisesti sovittujen standardien mukaisia eivätkä muodosta erityistä riskiä tuotteille. Tarpeenmukainen tuotekohtainen suojaus on kuitenkin huomioitava radalla iskuja, tärinää, lämpötilaa ja myös korroosiota vastaan. Kuljetuksen kesto on varsin pitkä, ja ilmasto-olosuhteet ovat erityisesti talvella vaativat. Vaunujen törmäyksistä ja nostoista aiheutuvat iskut saattavat vaurioittaa tuotetta, mikäli sidonta ja lastin suojaus eivät ole asianmukaiset.

6.1 Siperian radan ilmastorasitukset

Suurimmat ilmastoriskit ovat alhaiset lämpötilat (pakkanen) ja merikuljetuksiin verrattuna suuremmat ja nopeammat lämpötilavaihtelut. Joului-tammikuussa keskimääräinen lämpötila vaihtelee Siperian radalla -10 ja -30 °C:n välillä ja laskee hetkittäin jopa alle -40 °C:n. Loppusyksyllä, talvella ja alkukeväästä alhaisia lämpötiloja tai jäätymistä ei voida estää pelkästään pakkausteknisin ratkaisuin. Näille rasituksille herkäät tuotteet tulisi siten kuljettaa lämmitetyssä kuljetusyksikössä tai käyttää vaihtoehtoista merikuljetusreittiä. Mekaaninen rasitus yhdistettynä erittäin kylmiin olosuhteisiin talvella lisää vaurioitumisriskiä.

Case-toimituksen ajankohdan takia ilmasto-olosuhteet eivät olleet vaativat. Päivävaihtelut lämpötilan ja kosteuden suhteen olivat kuitenkin varsin suuria (20 °C ja 30 % RH). Keväällä ja syksyllä kosteuden tiivistyminen tuotteen pinnalle on todennäköistä, mikä lisää korroosioriskiä. Merikuljetuksessa korroosioriski on kuitenkin selvästi suurempi johtuen meri-ilmastosta suolapitoisuudesta, pidemmästä kuljetusajasta sekä eteläisemmällä reitillä keskimäärin vallitsevasta korkeammasta lämpötilasta ja kosteudesta.

6.2 Siperian radan mekaaniset rasitukset

Mekaaniset rasitukset eivät poikkea huomattavasti Suomessa (ja Länsi-Euroopassa) tapahtuvista rautatiekuljetuksista. Tuotteisiin kohdistuvat enimmäisrasitukset (iskut) ovat suunnilleen samalla tasolla kuin Suomessa tutkimusta pohjustaneissa kuljetus- ja törmäysolosuhteissa. Kontin ja lastin kunto määränpäässä oli muuttumaton lähetetystä.

Case-tutkimuksessa mittaustulosten analysoinnissa painotettiin VRC-laitteella mitattuja tuloksia, koska niille saatiin parhaiten vertailudataa aikaisemmista törmäyskokeista ja kuljetusmittauksista. Case-toimituksessa konttiin kohdistui Siperian ratamatkan aikana kymmenkunta voimakasta 1–2 g:n iskua. Iskut ovat todennäköisesti ratapihoilla ja asemilla tapahtuneita vaunujen käsittelyjä, kuten vaihtoja, lisäyksiä tai nostoja. Tutkimusta edeltävien testien perusteella vaunujen nopeudeksi törmäyshetkellä arvioitiin n. 5 km/h, joka on myös suurin sallittu vaunujen törmäysnopeus Suomen ratapihoilla. Venäläisten vaunujen

suomalaisia vaunuja suurempi massa lisää osaltaan törmäyksen aiheuttamaa räsitusta. Suurin kiihtyvyys Siperian radan osuudella (2,4 g) mitattiin Buslovskajan raja-aseman lähellä. Kiihtyvyys ylittää UIC-rautatiestandardin konttikuorman kohdistuvan raja-arvon (2,0 g). Isku on tapahtunut todennäköisesti junavaunujen törmäyksessä. Vaunun nopeudeksi törmäyshetkellä arvioitiin 7 km/h. Pitkittäissuuntaisen iskun lisäksi vaunu on ”hypännyt” ylöspäin raiteella. Venäläisvaunun automaattikytkimen iskunpituutta ei kuitenkaan ole käytetty loppuun, minkä seurauksena isku on vielä varsin maltillinen.

Mittalaitteet rekisteröivät lisäksi toisen voimakkaan iskun radan päätepisteessä Vostochnyssa. Suuri pystysuuntainen kiihtyvyys on mahdollisesti tapahtunut nostettaessa konttia laivakuljetusta varten. Molemmat edellä mainitut iskut ovat hieman suurempia kuin esim. Länsi-Euroopan rautatiekuljetuksessa [19] mitatut kiihtyvyydet. VR onkin ohjeistanut itäliikenteen lastin sitomisen erityisohjeella. Case-mittauksessa kollit kiinnitettiin normaalin kertavyön sijaan rekkavöillä, jotka pitävät lastin paremmin paikoillaan. Ilman asianmukaista sitomista tuotteet olisivat todennäköisesti joko siirtyneet tai niiden alusta olisi voinut vaurioitua.

Iskujen lisäksi mitattiin toistuvia lyhytkestoisia (<10 ms) kiihtyvyyksiä varsinkin pysty- ja poikittaissuunnissa koko kaksi viikkoa kestäneen junakuljetuksen ajan. Pitkäkestoinen ja kohtuullinen keskimääräinen tärinä tulee huomioida tuotteiden kiinnityksessä ja pakkaus suunnittelussa. Tutkimuksessa mitattujen kiihtyvyyksien taso ei kuitenkaan anna ymmärtää, että tärinästä aiheutuva riski olisi Siperian radalla poikkeuksellisen suuri muihin rautatiekuljetuksiin verrattuna. Siperian radan aiheuttaman tärinän vaikutusta tuotteisiin tulisi vielä analysoida tarkemmilla vertailumittauksilla Suomen rautateillä.

Huomioitavaa on, että amplitudiltaan koko toimituksen suurimmat kiihtyvyydet mitattiin satamassa laivan lastauksen ja purkamisen yhteydessä. Vaikka iskut olivat lyhytkestoisempia kuin junavaunujen järjestelyistä aiheutuneet iskut, ne voivat olla tuotteen kannalta yhtä merkittäviä. Esimerkki kuvaa tilannetta, jossa merikuljetusten käsittelyyn liittyvät mekaaniset räsitukset voivat olla rautatiekuljetuksiin verrattuna samansuuruisia tai jopa suurempia.

6.3 Mittausjärjestelyn arviointi

Käytetyt mittalaitteet toimivat moitteetta, ja niiden asetusarvot onnistuivat hyvin. Kuitenkin laitteissa on merkittäviä rajoitteita tehonkulutuksen, muistikapasiteetin ja tarkkuuden suhteen. Esimerkiksi tarkkojen tärinänäytteiden mittaamisen tulisi tapahtua henkilökohtaisesti paikan päällä tarkoitukseen erityisesti suunnitellulla mittausjärjestelyllä.

Mittauksessa ei hyödynnetty paikkatietoa (GPS) osin lupakäytäntöjen ja tutkimukseen osallistuneiden tahojen toiveesta. Paikkatiedon yhdistäminen mitattuihin, varsinkin toimintusetjun suurimpiin räsituksiin tuo selvästi lisäarvoa tulosten analysointiin.

Kiihtyvyyksien analysoinnissa painotettiin VRC-laitteella mitattuja tuloksia, koska laite soveltui parhaiten pitkäkestoisten iskujen ja niiden aaltomuotojen mittaamiseen raskaalle kohteelle. Näiden rasitusten merkitys korostuu rautatieliikenteessä. Laitteella oli myös kerätty eniten vertailudataa. Voimakkaita ja lyhytkestoisia iskuja ja niiden aaltomuotoja voitiin parhaiten mitata Shocklog-laitteella. Kaikki käytetyt laitteet soveltuivat lämpötilan mittaukseen. Kosteuden mittaamiseen soveltuivat parhaiten Tinytag-, Shocklog- ja LogRH-laite.

Tarkastelu tehtiin vain yhdelle kuljetukselle, joten satunnaistekijät, kuten välivaunujen vaikutus mittalaittevaunuun kohdistuvien iskujen suuruuteen, ovat hyvin mahdollisia. Lisäksi vaunun ominaisuudet ja paikka junassa vaikuttivat mittaustuloksiin. Tulokset ovatkin täysin tulkittavissa vain tarkastellulle vaunulle. Satunnaistekijöiden vähentämiseksi mittaus tulisi toistaa useita kertoja. Tätä varten laitteita voitaisiin asentaa eri vaunuihin kiinteästi. Parhaassa tapauksessa laitteiden asetusarvot ja datan purkaminen voitaisiin tehdä etänä langattomasti.

7. Yhteenveto

Tutkimuksessa tarkasteltiin Siperian radalla ja siihen liittyvässä toimitusketjussa tuotteeseen kohdistuvia ilmastollisia ja fyysisiä kuljetusrasituksia. Tutkimus suoritettiin tapaus-tutkimuksena eli radalla tehtiin käytännön mittaus, jossa seurattiin tuotteeseen kuljetuksen aikana kohdistuvia rasituksia yhden toimituksen aikana. Tämän lisäksi tehtiin mittauksen ja tutkimuksen suunnittelua ja tulosten analysointia tukeneita tarkasteluja ja lisätutkimuksia.

Tulosten perusteella kuljetukset ja käsittelyt Siperian radalla vastaavat kansainvälisesti sovittuja standardeja eivätkä muodosta erityistä riskiä tuotteille. Tarpeenmukainen tuote-kohtainen suojaus on kuitenkin huomioitava radalla iskuja, tärinää, lämpötilaa, lämpötilanvaihtelua ja myös korroosiota vastaan.

Ilmastorasitusten osalta Siperian radan suurimmat riskit ovat alhaiset lämpötilat sekä suuremmat ja nopeammat lämpötilanvaihtelut verrattuna merikuljetuksiin. Kosteuden, suolan ja korkeiden lämpötilojen osalta rasitukset ovat merikuljetusta pienempiä, mikä puoltaa korrosioherkkien tuotteiden kuljettamista Siperian radalla. Case-toimituksessa ilmasto-olosuhteet eivät olleet vaativat, mikä johtui mittauksen ajankohdasta (touko-kesäkuu).

Siperian radan mekaaniset rasitukset eivät poikkea huomattavasti Suomessa (ja Länsi-Euroopassa) tapahtuvista rautatiekuljetuksista. Tuotteisiin kohdistuneet enimmäisrasitukset ovat suunnilleen samalla tasolla kuin Suomessa VR:n ja VTT:n suorittamissa mittauksissa. Case-toimituksessa tarkasteltuun konttiin kohdistui kymmenkunta voimakasta iskua. Iskut syntyivät todennäköisesti nostoista ja junavaunujen törmäyksistä ratapihajärjestelyjen aikana.

Toimituksen yksi merkittävimmistä kuljetusriskeistä liittyi satamakäsittelyihin, joissa rekisteröitiin amplitudiltaan koko toimituksen suurimmat kiihtyvyydet. Esimerkki osoittaa, että merikuljetusten käsittelyyn liittyvät mekaaniset rasitukset voivat olla samansuuruisia tai jopa suurempia rautatiekuljetuksiin verrattuna. Loppujen lopuksi tuotteen kannalta kuljetusketjun kokonaisuus vaikuttaa tuotteelle aiheutettuun rasitukseen. Kuljetettaessa ilmastorasitusten tai mekaanisten rasitusten kannalta erityisen herkkiä tuotteita on kuljetusketjun kokonaisuutenaan oltava tunnettu ja optimoitu. Usein lähettäjän mahdollisuutena on vaihtoehtoisten kuljetusreittien ohella pakkaussuunnittelu tuotteen suojaamiseksi kuljetusketjun rasituksilta. Nämä ovat potentiaalisimmat keinot myös muiden vaara- ja uhkatekijöiden torjuntaan.

Lähdeluettelo

- [1] Lautso, K. et al. EU:n ja Venäjän välisten liikenneyhteyksien nykytila ja kehitysnäkymät. Julkaisuja 4/2005. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki, 2005. <http://www.lvm.fi/web/fi/julkaisu/view/12791>, luettu 8.5.2008.
- [2] Märkälä, M. & Jumpponen, J. TRAKET – transitoketjun kilpailukyky. Publication 42. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2007. http://www.lut.fi/nordifin/julkaisut/2007/42_TRAKET_Transitoketjun_kilpailukyky.pdf, luettu 8.5.2008. ISBN 978-952-214-405-8.
- [3] Keskustelut ja yhteydenotot VR:n henkilöstön kanssa 6.9.2007 ja 17.–28.8.2007.
- [4] Tsuji, H. Logistics in Russia and International Utilization of the Trans-Siberian Railway. Economic Research Institute for Northeast Asia, April 2005. http://www.koti.re.kr/inc/board_download.asp?board_code=news_seminar&board_file=271, luettu 8.5.2008.
- [5] VCS, Vostochniy Stevedoring Company. Sähköposti 12.5.2008.
- [6] Pakkanen, S. Siperian hinnat romuttavat VR:n kuljetukset. Tekniikka ja Talous, 5.10.2006. <http://www.tekniikkatalous.fi/rakennus/article37044.ece>, luettu 8.5.2008.
- [7] VR. Vuosikertomus 2007. http://www.vr-konserni.fi/attachments/5gppd2hrk/5wTKXYp2i/Files/CurrentFile/VR_VSK_2007_FI.pdf, luettu 8.5.2008.
- [8] VR. Vuosikertomus 2006. http://www.vr-konserni.fi/attachments/5gppd2hrk/5wTKXYp2i/Files/CurrentFile/VR_VSK_2007_FI.pdf, luettu 8.5.2008.
- [9] Tsuji, H. Data on TSR Intermodal Transport from Published and Unpublished Sources. Economic Research Institute for Northeast Asia, Workshop on statistics of Asian traffic and transportation, March 10, 2008. http://www.kokudokeikaku.go.jp/wat/11_tsuji.pdf, luettu 8.5.2008.
- [10] Kervinen, J.-P. Siperian rata ei yllä enää Suomeen. Talouselämä, 21.4.2008. http://www.talouselama.fi/docview.do?f_id=1344520&s=r, luettu 8.5.2008.
- [11] Schönberg, K. Siperian-rata syö rekkajonot Suomesta. Taloussanomat, 11.12.2007. <http://www.taloussanomat.fi/liikenne-ja-kuljetus/2007/12/11/siperian-rata-syo-rekkajonot-suomesta/200731424/139>, luettu 20.5.2008.
- [12] Container HandBook. 2.3.5 Mechanical stresses in the rail transport. <http://www.containerhandbuch.de>, luettu 8.5.2008.

- [13] Nordström, R. et al. Cost efficient Intermodal Road-Rail Transport through Developed Cargo Securing. TFK – Transport Research Institute, 2006.
- [14] VR 4777. Määräykset SNTL:n ja Suomen välisessä suorassa rautatieyhdyksliikenteessä kuljetettavien tavaroiden kuormaamisesta ja kiinnittämisestä. VR, Helsinki. [http://www.finlex.fi/data/normit/28200-Suomen ja Venajan rautatieyhdyksliikenteen kuormaamaaraykset.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/28200-Suomen_ja_Venajan_rautatieyhdyksliikenteen_kuormaamaaraykset.pdf), luettu 8.5.2008.
- [15] Ratahallintokeskus. LIMO Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet (LIMO). Osa 5 Tavaravaunut. http://www.finlex.fi/data/normit/26039-LIMO_5-notifioitava_versio.pdf, luettu 8.5.2008.
- [16] UIC 577. Wagon stresses. 4th edition. Translation, Union Internationale des Chenains de Fer, December 2005.
- [17] IMO/ILO/UN ECE guidelines for packing of cargo transport units (CTUs). IMO, 1997.
- [18] UIC 518. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality. 2nd edition. Translation, Union Internationale des Chenains de Fer, April 2003.
- [19] Andersson, P. et al. Transport quality on railway regarding breakage. Mariterm AB, 2006.
- [20] VR Cargo. www-sivut: <http://www.vrcargo.fi/vaunukuvasto/vofvofa.shtml>, luettu 8.5.2008.
- [21] Gemini. TinyTag Data logger manufacturer. www.geminidataloggers.com, luettu 8.5.2008.
- [22] Pekkala, P. et al. ESD- ja korroosiosuojajärjestelmän kehittäminen ja laadunvarmistus elektroniikkaa sisältävien tuotteiden pakkaustarpeisiin. VTT Automaatio, Tampere, 2001. 55 s. + liitt. 37 s.
- [23] Details for the ship Winland Dalian. <http://www.vesseltracker.com/de/ShipPhotos/67577-Winland-Dalian-9119488.html>, luettu 20.5.2008.

Tekijä(t) Salmela, Hannu, Toivonen, Sirra & Pekkala, Petri		
Nimeke Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siperian radalla		
Tiivistelmä <p>Kaukoidän ja Euroopan välisten toimitusten merkitys on selvästi kasvanut viime vuosina. Merikuljetusten ohella Trans-Siperian rata (TSR) on potentiaalinen reitti tuotteiden tuontiin Suomeen ja Suomesta Venäjälle sekä tuotteiden vientiin idän markkinoille. Siperian radan reitin aiheuttamista fyysisistä rasituksista on kuitenkin vähän tietoa. Tutkimuksen tavoitteena olikin luoda uutta ymmärrystä tuotteisiin kohdistuvista ilmastollisista ja mekaanisista rasituksista ja riskeistä Siperian radalla ja siihen liittyvässä toimitusketjussa.</p> <p>Tutkimuksessa toteutettiin käytännön mittaus, jossa seurattiin rasituksia yhden case-toimituksen aikana touko-kesäkuussa 2007. Tulosten analysoinnissa hyödynnettiin rautatiekuljetusten ja junavaunujen törmäyskokeiden tuloksia Suomessa ja Länsi-Euroopassa.</p> <p>Tulosten perusteella kuljetukset ja käsittelyt Siperian radalla ovat kansainvälisesti sovittujen standardien mukaisia eivätkä muodosta erityistä riskiä tuotteille. Tarpeenmukainen tuotekohtainen suojaus on kuitenkin huomioitava radalla. Merikuljetuksiin verrattuna Siperian radan etuja ovat nopeus ja pienempi tuotteille kohdistuva korroosioriski. Toisaalta TSR:n kylmä talvi-ilmasto ja lämpötilavaihtelujen asettamat vaatimukset tulee huomioida tuotteiden pakkaussuunnittelussa ja suojauksessa.</p> <p>Siperian radan mekaaniset rasitukset eivät poikkea huomattavasti Suomessa (ja Länsi-Euroopassa) tapahtuvista rautatiekuljetuksista. Tuotteisiin kohdistuneet iskut ja kiihtyvyydet ovat suunnilleen samalla tasolla kuin Suomessa VR:n ja VTT:n suorittamissa tarkasteluissa. Iskut syntyivät pääasiassa nostoista ja junavaunujen järjestelyistä ratapihoilla ja asemilla. Iskujen lisäksi koko kuljetuksen aikana mitattiin toistuvaa tärinää. Tulosten perusteella radan mekaaniset rasitukset eivät muodosta tuotteille huomattavasti suurempaa riskiä merikuljetuksiin ja satamakäsittelyihin verrattuna.</p>		
ISBN 978-951-38-7211-3 (nid.) 978-951-38-7212-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 837
Julkaisuaika Toukokuu 2008	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 59 s.
Projektin nimi TurvaTH – Turvallisuuskritiisten toimitusten hallinta		Toimeksiantaja(t) Tamlink
Avainsanat transport stress, Trans-Siberian railway, logistics risk management, transport risk		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

Author(s) Salmela, Hannu, Toivonen, Sirra & Pekkala, Petri		
Title A case study of transport stresses on Trans-Siberian railway		
Abstract <p>The importance of supply chains between Far East and Europe has increased significantly in the last years. Besides sea routes across the Indian Ocean and the Suez canal, the Trans-Siberian railway (TSR) is an alternative route to import or transit products to Finland and Russia and to export products to the eastern markets. However, there is only little information of physical stresses of the TSR. The objective of this study was to bring understanding of climatic and mechanical stresses that the products undergo during transport along the TSR.</p> <p>The study consisted of a practical measurement with a case shipment from Finland to South Korea in May/June 2007. The analysis was supported with stress data from railway shipments and railcar collision tests in Finland and Western Europe.</p> <p>According to the results, transportation and handling stages on the railway are in line with internationally agreed standards and do not pose special risk for the products. Proper protection of the products is as in railway shipments generally. Compared to the competing sea routes, advantages in speed and corrosion-free environment of the Trans-Siberian railway have to be judged with protection requirements against cold winter climate and temperature gradients.</p> <p>Mechanical stresses during the TSR are in the same level as stresses during typical railway shipments in Finland (and in Western Europe). Maximum shocks witnessed by the products are in line with tests made with VR Cargo and VTT Technical Research Centre of Finland in Finland. Typically the maximum shocks were generated during lifting and shunting work in railway yards and stations. Continual vibration was also recorded during the whole 2 week transportation. However, mechanical stresses on the railway do not pose significantly higher threat to products than normal sea transport and harbour activities.</p>		
ISBN 978-951-38-7211-3 (soft back ed.) 978-951-38-7212-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 837
Date May 2008	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 59 p.
Name of project TurvaTH		Commissioned by Tamlink
Keywords transport stress, Trans-Siberian railway, logistics risk management, transport risk		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2412 Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista. von Weymarn, Niklas (toim.). 2007. 44 s.
- 2413 Pietiläinen, Jorma, Kauppinen, Timo, Kovanen, Keijo, Nykänen, Veijo, Nyman, Mikko, Paiho, Satu, Peltonen, Janne, Pihala, Hannu, Kalema, Timo & Keränen, Hannu. ToVa-käsikirja. Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energia-tehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. 2007. 173 s. + liitt. 56 s.
- 2415 Hietaniemi, Jukka. Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus. 2007. 227 s. + liitt. 144 s.
- 2416 Vesanto, Petri, Hiltunen, Matti, Moilanen, Antero, Kaartinen, Tommi, Laine-Ylijoki, Jutta, Sipilä, Kai & Wilén, Carl. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. 2007. 55 s. + liitt. 4 s.
- 2417 Leinonen, Arvo. Wood chip production technology and costs for fuel in Namibia. 2007. 66 p. + app. 21 p.
- 2418 Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset. 2007. 45 s.
- 2419 Martikainen, Antti, Pykälä, Marja-Leena & Farin, Juho. Recognizing climate change in electricity network design and construction. 2007. 106 p. + app. 29 p.
- 2420 Leviäkangas, Pekka, Hautala, Raine, Räsänen, Jukka, Öörni, Risto, Sonninen, Sanna, Hekkanen, Martti, Ohlström, Mikael, Venäläinen, Ari & Saku, Seppo. Benefits of meteorological services in Croatia. 2007. 71 p. + app. 2 p.
- 2421 Hostikka, Simo, Korhonen, Timo, Paloposki, Tuomas, Rinne, Tuomo, Matikainen, Katri & Heliövaara, Simo. Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations. Project summary report. 2007. 64 p.
- 2422 Vestola, Elina & Mroueh, Ulla-Maija. Sulfaatinpelkistykseen hyödyntäminen happamien kaivosvesien käsittelyssä. Opas louhoskäsittelyn hallintaan. 2008. 58 s. + liitt. 13 s.
- 2424 Ilomäki, Sanna-Kaisa, Simons, Magnus & Liukko Timo. Kohti yritysten vuoro-vaikutteista kehitystoimintaa. 2008. 45 s.
- 2425 Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. 2008. 95 s. + liitt. 69 s.
- 2426 Nylund, Nils-Olof, Aakko-Saksa, Päivi & Sipilä, Kai. Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles. 2008. 161 p. + app. 6 p.
- 2427 Paiho, Satu, Ahlqvist, Toni, Piira, Kalevi, Porkka, Janne, Siltanen, Pekka & Tuomaala, Pekka. Tieto- ja viestintäteknologiaa hyödyntävän rakennetun ympäristön kehitysnäkymät. 2008. 60 s. + liitt. 34 s.
- 2430 Rinne, Tuomo, Tillander, Kati, Vaari, Jukka, Belloni, Kaisa & Paloposki, Tuomas. Asuntosprinklaus Suomessa. Vaikuttavuuden arviointi. 2008. 84 s.
- 2431 Nikkola, Juha, Mahlberg, Riitta, Siivinen, Jarmo, Pahkala, Anne, Lahtinen, Reima & Mahiout, Amar. Alumiinin pintaominaisuudet ja pintakäsittelyt. 2008. 49 s.
- 2434 McKeough, Paterson & Kurkela, Esa. Process evaluations and design studies in the UCG project 2004–2007. 2008. 45 p.
- 2435 Salmela, Hannu, Toivonen, Sirra & Pekkala, Petri. Tapaustutkimus kuljetusrasituksista Trans-Siperian radalla. 2008. 59 s.

 Julkaisu on saatavana

 VTT
 PL 1000
 02044 VTT
 Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

Publikationen distribueras av

 VTT
 PB 1000
 02044 VTT
 Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

This publication is available from

 VTT
 P.O. Box 1000
 FI-02044 VTT, Finland
 Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>