



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**POHJAINEN TOIMINTA JA
KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET SUOMEN
RATAVERKOLLA**

Erno Oikarinen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Pohjainten toiminta ja käyttömahdollisuudet Suomen rataverkolla

Erno Oikarinen

Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 77 s. + 3 liitettä

Työn ohjaajat Oulun yliopistolla: Mauri Koskinen ja Veikko Pekkala

Tässä diplomityössä tarkastellaan pohjainten toimintaa ja niiden käyttömahdollisuuksia Suomen rataverkolla. Pohjaimet kasvattavat tukikerroksen ja ratapölkyn välistä kontaktipinta-alaa ja lisäävät raiteen joustavuutta liikennekuorman alla, mikä pienentää radan pystysuuntaista liikettä junan kulkiessa radalla. Työn tavoitteena oli selvittää pohjainten käytön vaikutusta radan tärinään, meluun, geometrian muutoksiin ja siitä johtuvaan kunnossapitotarpeeseen, sekä pohjainmateriaalin ja -paksuuden vaikutuksia näihin.

Tutkimus koostui kirjallisuuskatsauksesta pohjaimista tehtyihin tutkimuksiin, Pori-Mäntyluoto-radon päällysrakenteen uusimisurakan työmaaseurannasta, aiemmin Suomeen rakennettujen pohjaimellisten rataosuuksien geometriamittausten tutkimusten tulosten tulkinnasta ja suomalaisten pohjainasiantuntijoiden haastatteluista.

Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että pohjaimilla voidaan saavuttaa positiivisia vaikutuksia rataliikenteen aiheuttamaan tärinään ja ratarakenteen, erityisesti tukikerrospelelin, käyttöikään ja sen avulla huomattavia kustannussäästöjä vähäisemmän kunnossapitotarpeen kautta. Pohjainten tyyppi vaikuttaa kuitenkin huomattavasti sen vaikutuksiin, joten pohjainten käyttöä suunniteltaessa on tärkeää tietää mihin tarkalleen halutaan vaikuttaa ja miten erilaiset pohjaimet toimivat erityyppisissä ratarakenteissa ja liikennekuormilla. Tämän vuoksi Suomessa tulee tehdä vielä huomattavasti jatkotutkimuksia erilaisten pohjainten toiminnasta erilaisilla radoilla ennen kuin niiden käyttöä voidaan alkaa merkittävästi kasvattamaan.

Asiasanat: ratakunnossapito, ratapölkkyt, rautatiet, tukikerros, tärinä.

ABSTRACT

Effect of under sleeper pads and their potential uses on Finnish railways

Erno Oikarinen

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2022, 77 pp. + 3 Appendixes

Supervisors at the University of Oulu: Mauri Koskinen and Veikko Pekkala

The thesis focuses on effects of under sleeper pads (USPs) and their potential uses on Finnish railways. USPs increases effective contact surface of ballast and sleepers, which increases the flexibility of track structure, which in turn reduces vertical movement of the structure. The aim of the thesis was to find out how different types of USPs affect vibration, noise, changes in the geometry of track structure and effect on track maintenance.

The research consists of literature overview on studies and tests done with USPs, overview of USPs at Pori-Mäntyluoto track renewal, study of previously built track sections with USPs in Finland to determine how USPs affected consolidation of track structure over time and interviews of Finnish USP experts.

Based on the research, use of USPs can lead to many positive changes in how track operates over time mainly in vibration and consolidation and wear of ballast, and its effect on track maintenance. Type of USP greatly affects its effect on track and as such it is necessary to know the properties of the USPs and the track it is going to be used on as well the wanted effects on the track before their application. Studies done on USPs in Finland are still scarce and as such more research must be done with different kinds of track and USPs before their general implementation as a part of Finnish railways.

Keywords: ballast, railways, sleepers, track maintenance, vibration.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Väyläviraston tilauksesta Sweco Infra & Rail Oy:llä. Diplomityön tavoitteena oli tutkia eri tyyppisten pohjainten vaikutuksia ja niiden käyttömahdollisuuksia Suomen rataverkolla. Suuret kiitokset Niko Tunniselle, joka ideoi työn aiheen ja sai Väyläviraston lähtemään mukaan projektiin, sekä toimi työn ohjaajana Sweco Infra & Rail Oy:n puolelta.

Kiitokset myös Oulun yliopiston puolelta työn ohjanneille Mauri Koskiselle ja Veikko Pekkälälle. Haluan kiittää myös haastattelemani asiantuntijoita Heikki Luomalaa, Riku Varista ja Tuija Myllymäkeä, joilta sain paljon tietoa pohjainten toiminnasta, nykyisestä käytöstä Suomessa sekä tärkeitä vinkkejä ulkomaisiin tutkimuksiin. Kiitos myös pohjain- ja pölkkytoimittajien henkilöille, joilta sain laajasti tietoa projekteista, joilla pohjaimia on tähän mennessä käytetty Suomessa.

Lopuksi kiitokset vielä opiskelukavereilleni, ystävilleni ja perheelleni tuesta opiskeluaikana, sekä unohtumattomista muistoista opiskeluvuosilta.

Oulu, 15.3.2022

Erno Oikarinen

Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT, LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

1 JOHDANTO.....	9
1.1 Junaradan rakenne ja toiminta	11
1.2 Tärinä ja melu raideliikenteessä.....	13
2 POHJAINTEEN TOIMINTA.....	16
2.1 Pohjainten teoreettinen toiminta	17
2.2 Vaikutus radan liikkeeseen ja kunnossapitotarpeeseen	24
2.3 Vaikutus tärinään ja runkomeluun	38
2.4 Kustannusvaikutukset.....	44
3 POHJAIMET SUOMEN RATAVERKOLLA.....	47
3.1 Asiantuntijahaastattelut	47
3.2 Pitkäaikaiset muutokset pohjaimilla varustettujen ratojen toiminnassa	50
4 PORI-MÄNTYLUOTO PÄÄLLYSRAKENNETYÖT	58
4.1 Tutkitut pohjaintyyppit.....	60
4.2 Pohjainten asennuksen vaikutus päällysrakennetöihin	61
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	65
5.1 Pohjainten vaikutus ratarakenteisiin.....	65
5.2 Pohjainten vaikutus tärinään.....	66
5.3 Pohjainten vaikutus asennustöihin	68
5.4 Pohjainten vaikutus kustannuksiin	68
5.5 Pohjaintyyppien erot	69
5.6 Suositukset pohjaintyyppien käyttöön jatkossa	69
6 YHTEENVETO.....	71
LÄHDELUETTELO.....	72
LIITTEET	

MERKINNÄT, LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

C_{dyn}	Dynaaminen alustaluku [N/mm ³]
C_{stat}	Staattinen alustaluku [N/mm ³]
dBA	A-painotettu desibeli
Hz	Hertsi [1/s]
JKV	Junien kulunvalvontajärjestelmä
K_v	Radan korkeusviiva
Ratak _{m+m}	Ratakilometri+metri. Tarkoittaa rataa pitkin laskettua etäisyyttä Helsingin päärautatieasemalta
USP	Under sleeper pad, pohjain
Dynaaminen kuormitus	Kuormitus, jonka suuruus ja suunta vaihtelevat
Eristyskerros	Välikerroksen alapuolinen rakennekerros. Osa alusrakennetta
Ilmamelu	Ilmaa pitkin siirtyvä tärinä, joka on aistittavissa äänenä
Iskuvoima	Lyhyellä aikavälillä tapahtuva eli suuren impulssin kuormitus
Kenttäkoe	Luonnollisissa olosuhteissa, kuten käytössä olevalla radalla suoritettu tutkimus

Kokonaisjäykkyys	Suure, joka kuvaa radan kykyä vastustaa kuormituksen aiheuttamia pystysuuntaisia muutoksia
Kontaktipinta-ala	Pinta-ala, jolla kaksi rakenneosaa koskettavat toisiaan
Korrugaatio	Kiskon kulkupinnassa esiintyvä suhteellisen jaksoittainen aaltoisuus
Läpäisyvaimennus	Tärinän absoluuttinen vaimeneminen sen läpäistessä rakenteen
Palautuva painuma	Kuormituksen aiheuttama pystysuuntainen rakenteen siirtymä, joka palautuu alkuperäiseen asentoon kuormituksen päätyttyä
Pengertäyttö	Alusrakenteen ja pohjamaan välinen maakerros
Pohjain	Ratapölkyn pohjaan kiinnitettävä kumista tai polyuretaanista valmistettu joustava elementti
Pohjamaa	Ratapenkereen alapuolinen maa
Pysyvä painuma	Toistuvien kuormitusten aiheuttama pystysuuntainen rakenteen siirtymä, joka ei palaudu alkuperäiseen asentoonsa kuormituksen päätyttyä
Siirtymärakenne/-alue	Ratarakenteen alue, jossa rakenne muuttuu merkittävästi esimerkiksi siirryttäessä pehmeältä pohjamaalta kalliopohjalle tai ratapenkereeltä sillalle
Suodatinkerros	Eristyskerroksen alapuolinen rakennekerros. Osa alusrakennetta

Tukikerros	Radan ylin kiviaineskerros, jonka päällä pölkyt lepäävät. Osa päällysrakennetta
Tärinä	Rakenneosien toistuvan liikkeen aiheuttama partikkelien värähtely
Töyssynmuodostus	Ilmiö, jossa erityisesti ratapenkereen ja sillan kannen yhtymäkohdassa ratapenkereen päättymiskohta painuu kuormituksen alaisena huomattavasti jäykempää siltarakennetta nopeammin, jolloin niiden väliin muodostuu merkittävä korkeusero
Transmissibiliteetti	Rakenteen läpäisseen tärinän voimakkuuden suhde rakenteeseen säteilleen tärinän voimakkuuteen
Välikerros	Tukikerroksen alapuolinen rakennekerros. Osa alusrakennetta
Raide	Pölkkyistä, kiskoista ja niiden kiinnikkeistä koostuva radan rakenneosa
Ratakisko	Teräksinen kisko, jonka päällä junien pyörät liikkuvat, radan ylin rakenneosa, jakaa junan kuormat pölkkyille
Ratapölkky	Pölkky, jonka varassa ratakiskot lepäävät. Ottaa vastaan kiskoilta tulevat kuormat ja jakaa ne alapuolisille rakennekerroksille
Reseptanssi	Siirtymä suhteessa kuormittavaan voimaan, kun rakennetta kuormitetaan jaksoittaisesti vakiovoimalla (engl. receptance)
Runkomelu	Rakennusten sisällä aistittava ääni, joka siirtyy maaperästä rakennukseen sen pohjarakenteiden ja rungon välityksellä

1 JOHDANTO

Pohjaimet ovat Suomessa vielä vähän tutkittu keino parantaa junaradan geometrian pysyvyyttä ja vähentää tärinää. Maailmalla pohjainten vaikutuksia on tutkittu aktiivisesti useampia vuosikymmeniä ja useissa Keski-Euroopan valtioissa ne ovat mm. silloilla ja vaihteissa vakiokomponentti. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa on aiemmin tutkittu vain yksittäisten pohjaintyyppien toimintaa lyhyillä rataosuuksilla tai parin vaihteen alueilla, mutta vuosina 2020–2022 Pori-Mäntyluodon rataosuudella päällysrakenteen vaihtourakassa rakennettiin yli kymmenen kilometriä testirataa erilaisilla pohjaimilla sisältäen useita vaihteita. Tästä tutkimuksesta tullaan saamaan lisätietoa pohjaimen paksuuden ja jäykkyyden vaikutuksesta pohjainten toimintaan, sekä pohjainten toiminnasta pidemmällä aikavälillä.

Pohjainten pääasiallinen käyttökohde Suomessa on ollut elastisten vaihteiden komponenttina hidastamaan pysyvää painumaa eli ratarakenteen geometrian muutosta. Kaikki raiteet painuvat ajan kanssa johtuen pohjamaan tiivistymisestä ja tukikerroksen sepelin jauhautumisesta pölkkyjä vasten, joten tämän hidastamisella on merkittävä vaikutus ratarakenteiden kunnossapitotarpeeseen. Pohjaimet ovat yksi mahdollinen ratkaisu tämän hidastamiseksi, sillä ne tuovat kovaan pölkky–sepeli-rajapintaan joustavan materiaalin, joka jakaa kuormituksen tasaisemmin ja pienentää siten yksittäisiin sepelirakeisiin kohdistuvia dynaamisia voimia hidastaen sepelin jauhautumista ja painumaa. Lisäksi pohjaimia on käytetty muutamissa kohteissa sepelitukikerroksen ohentamiseksi tilanteissa, joissa sitä ei ole ollut mahdollista rakentaa vaaditun paksuiseksi, kuten esimerkiksi tunneleissa ja ylikulkusiltojen kohdalla.

Pohjainten käyttöä tärinän ja runkomelun vaimentamisessa on tutkittu meillä vielä vähän, mutta ulkomailla tehdyissä tutkimuksissa on saatu viitteitä niiden olevan toimiva ratkaisu molempiin ongelmiin. Aiemmin pohjainten ajateltiin vaikuttavan näihin ongelmiin vain kontaktipinta-alan kasvun tuoman vähentyneen ratarakenteen liikkeen kautta, mutta Pori-Mäntyluodossa 2020 tehdyissä tutkimuksissa pohjainten todettiin myös vaimentavan tiettyjä tärinän taajuuksia. Käytetyn kovan ja ohuen pohjaintyyppin ei olisi pitänyt ennakkotietojen mukaan vaikuttaa merkittävästi tärinään, joten 2021 rakennetulla

testiradalla kokeiltiin erilaisten pohjaintyyppien ominaisuuksien vaikutusta tärinän ja runkomelun vaimennukseen.

Pohjaimet kasvattavat ratapölkyn hinnan karkeasti puolitoistakertaiseksi, sillä pohjaimen lisääminen ratapölkyn pohjaan maksaa useita kymmeniä euroja. Tämä tarkoittaa ratarakenteesta ja tehtävistä töistä riippuen joidenkin prosenttien suuruisia lisäkustannuksia, joten pohjainten käytöllä on saavutettava suuria hyötyjä, jotta niiden asentaminen kannattaa. Kalliimmissa ratarakenteissa kuten vaihteissa, silloissa tai tunneleissa suhteellinen osuus hinnasta jää huomattavasti pienemmäksi kuin linjaraitteilla, joten näissä rakenteissa pohjainten käyttö on yleensä helpommin perusteltavissa. Lisäksi nämä radan erikoisrakenteet ovat yleensä vaikeampia kunnossapitotuennan kannalta, minkä tarvetta pohjaimien pitäisi vähentää. Riippuen pohjaimilla saavutettavasta kunnossapidon tuentasyklin pidentymisestä niiden käyttö myös linjalla olisi perusteltua, eli mikäli pohjaimet kasvattavat tukemiskertojen väliä useammilla vuosilla, rakentamiskustannuksien kasvu saataisiin kompensoitua kunnossapitokustannusten pienentymisellä.

Tässä työssä tutkittiin pohjainten käyttömahdollisuuksia Suomen rataverkolla Suomessa ja muualla Euroopassa tehtyjen tutkimusten ja kokemusten perusteella. Tutkimus voidaan tiivistää kysymykseen 'Minkälaisissa olosuhteissa ja minkä tyyppisellä radalla minkäkin tyyppinen pohjain kannattaa asentaa?' Työn ydinosa on kirjallisuuskatsaus Suomessa ja Euroopassa tehtyihin tutkimuksiin ja käyttökokemusten raportteihin. Näitä raportteja vertailemalla selvitettiin pohjainten toimintaperiaatteet ja tämänhetkisen käytön perustelut erilaisilla rataosuuksilla ja -rakenteilla Suomessa ja muualla maailmalla. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi haastateltiin suomalaisia pohjainasiantuntijoita pohjainten toiminnasta, nykyisestä käytöstä ja pohjainten tulevaisuudesta, sekä perehdyttiin pohjaimilla varustettujen rataosuuksien geometrian muutosdataan ennen pohjainten asennusta ja sen jälkeen, mistä saatiin karkeaa dataa pohjainten käyttäytymisestä pidemmällä aikavälillä. Kolmas tutkittava kokonaisuus oli Pori-Mäntyluoto ratavälillä tehdyn päällysrakenteen- ja vaihteidenvaihtourakan seuranta. Projektin taustatiedoista saatiin myös tietoa pohjainten asennuspäätökseen vaikuttaneista seikoista, eli miksi ne on päätetty asentaa juuri tälle rataosuudelle, ja testiradan sijainnin ja pohjaintyyppien valinnasta, kuten maaperä- ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta.

1.1 Junaradan rakenne ja toiminta

Junarata koostuu päällyys- ja alusrakenteesta, joiden materiaalit ja rakennekerrospaksuudet riippuvat radan käyttötarkoituksesta, liikennekuormasta ja radan pohjaolosuhteista. Päällysrakenteeseen kuuluvat rataakiskot, ratapölkkyt ja tukikerros, joiden tehtävänä on ottaa vastaan junaliikenteen kuormat ja jakaa ne tasaisesti alemmille rakenteille. Radalla liikkuvan junan kuorma välittyy pyöriltä kiskoille, jotka jakavat kuormat pölkkyille, joista kuormat jälleen jakaantuvat tukikerroksen sepelille. Kiskoja valmistetaan teräksestä eri kokoisina, mutta nykyään uusien ja uusittavien pääraiteiden kiskoina käytetään lähtökohtaisesti 60E1-kiskoa, mikä tarkoittaa kiskon painavan 60 kg/m. Pölkkyjä on betonisia ja puisia, mutta puupölkkyjä käytetään nykyään yleensä vain matalanopeuksisilla sivuraiteilla liikennepaikoilla, kuten kuormausalueilla. Kaikkien rakennekerrosten, eli kiviaineksesta rakennettavien radan osien, tehtävä on muodostaa tasainen ja kantava alusta ylemmille radan osille sekä siirtää ja jakaa liikenteestä aiheutuvat kuormat alemmille kerroksille. Tukikerros rakennetaan yleensä raidesepeleistä, mutta matalanopeuksisilla raiteilla voidaan käyttää myös soraa. Päällysrakenteen alapuolisia rakennekerroksia kutsutaan alusrakenteeksi, joka pitää sisällään väli-, eristys- ja suodatinkerroksen. Välikerroksen tehtävä on aiemmin mainittujen lisäksi estää tukikerrosateriaalin sekoittuminen alempien rakennekerrosten materiaalien kanssa. Eristyskerroksen tehtävä on aiemmin mainittujen lisäksi estää tai vähentää alapuolisten rakennekerrosten routimista. Suodatinkerroksen tehtävä on aiemmin mainittujen lisäksi estää eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittuminen. Päällyys- ja alusrakenne lepäävät pengertäytön tai pohjamaan päällä, johon liikenteen kuormat lopulta siirtyvät. (Liikennevirasto 2018, s. 6–7.)

Ratarakenteessa päällysrakenne ottaa siis liikenteen kuormat ensimmäisenä vastaan, joten pistemäiset kuormat ovat yleisesti päällysrakenteessa suurempia kuin alusrakenteessa. Tämän takia radan liikennöitävyyteen vaikuttavat ongelmat ilmenevät yleensä kiskoissa, pölkkyissä ja tukikerroksessa, joten myös radan kunnossapitoa tehdään yleensä vain päällysrakenteelle. Kunnossapidossa tehtäviä toimenpiteitä ovat mm. kiskojen ja pölkkyjen vaihdot, raiteen tukeminen, kasvillisuuden poisto, lumen ja jään poisto, sekä rumpujen puhdistus. (Kuula et al. 2017, s. 11)

Radoilla yleisin ongelma liikennöinnin kannalta ovat radan geometriavirheet eli raiteen aseman poikkeama suunnitellusta, mikä johtuu yleensä joko kiskon kulumisesta tai rakennekerrosten painumasta ja jauhautumisesta. Toistuva liikennekuormitus aiheuttaa ratasepelirakeiden siirtymistä ja hienontumista niiden hangatessa toisiaan ja pölkyn alapintaa vasten, mikä pienentää sepelin ja ratapölkkyjen välistä kontaktipinta-alaa ja siten kasvattaa yksittäisille sepelirakenteille tulevaa kuormaa. Radan ja rataliikenteen kuormat aiheuttavat myös painumaa radan rakennekerroksissa, kun niiden aiheuttama paine tiivistää pohjamaata sen painaessa maa-aineksen rakeet lähemmäksi toisiaan. Rata painuu käytön myötä jatkuvasti optimaalisissakin pohjaolosuhteissa ja oikein rakennettuna, mutta ilmiö on huomattavasti nopeampaa pehmeikköalueilla ja virheellisesti suunnitelluilla tai rakennetuilla radoilla.

Ratarakenne ja pohjaolosuhteet eivät myöskään ole ikinä täysin homogeeniset, minkä vuoksi liikenteen aiheuttama kuormitus jakaantuu rakenteisiin epätasaisesti. Pistemäisissä tai lyhyissä huonommin kantavissa kohdissa sepelin jauhautuminen ja painuma tapahtuvat ympäröiviä rakenteita nopeammin, mikä aiheuttaa ongelmakohtissa kantavuuden edelleen nopeampaa heikkenemistä. Sepelin jauhautuminen on heikommin kantavien kohtien lisäksi nopeampaa pölkkyjen päissä ja ratarakenteen pystysuuntaisen jäykkyyden epäjatkuvuuskohdissa, kuten siltojen tai tunneleiden päädyissä ja vaihteissa. Rakennekerrosten geometrian muuttuminen muuttaa myös kiskojen asemaa, mikä muuttaa pyörä-kiskokontaktia suunnitellusta. Tämä nopeuttaa kiskojen kulumista erityisesti kaarteissa, joten tukikerroksen kunnon heikkeneminen myös nopeuttaa kiskojen kulumista. Pienet geometriaongelmat korjataan kunnossapidon yhteydessä tukemalla, joka tarkoittaa radan nostamista takaisin suunniteltuun korkeuteen erityisellä tukemiskoneella. Tuettaessa raide nostetaan oikeaan korkeuteen ja pölkkyjen alle lisätään sepeliä, jotta se saadaan pysymään halutussa korkeudessa. Kunnossapitotuentaa tehdään yleensä muutamien vuosien syklillä kaikilla jatkuvasti liikennöidyillä rataosuuksilla, mutta liikennemäärä ja radan kunto vaikuttavat huomattavasti tukikerroksen kulumiseen ja siten tuennan tarpeeseen. (Kuula et al. 2017, s. 11, 15–22) Toisaalta Ratahallintokeskuksen ohjeen *RAMO 15 Radan kunnossapito* (s. 14) mukaan tuenta myös hienontaa ratasepeliä, joten tarpeetonta tuentaa tulee välttää.

1.2 Tärinä ja melu raideliikenteessä

Raideliikenne, kuten muukin raskas liikenne, aiheuttaa aina tärinää ja melua ympäröivään maaperään ja ilmaan. Yksinkertaistettuna raiteilla liikkuva junan painaa ratarakennetta pyörien kohdalta alas ja rakenne palautuu aiempaan asemaansa junan siirryttyä eteenpäin. Tämä radan osien edestakainen liike aiheuttaa ympäristöön värähtelyä, mikä voidaan kokea tärinä ja meluna. Tärinällä tarkoitetaan maaperään välittyvää aaltoliikettä, jonka taajuus raideliikenteessä vaihtelee yleensä välillä 0–80 Hz keskittyen Pauliina Sutelan (2016, s. 14, Xia et al. 2013, s. 14 mukaan) mukaan 3–30 Hz:n alueelle, mikä on huomattavasti matalampi muihin yleisiin tärinälähteisiin verrattuna. Raskaampien junien, kuten tavarakuljetusten, aiheuttaman tärinän taajuus on yleensä matalampaa kuin kevyempien, kuten henkilöliikenteen. Asko Taljan tutkimuksen (2004, s. 13) mukaan ihmisen kokeman värähtelyn merkittävimmät taajuusalueet pehmeällä maaperällä ovat välillä 5–15 Hz ja kovalla maalla 10–25 Hz, joten raideliikenteen aiheuttama värähtely koetaan helposti epämiellyttäväksi. Raideliikenteen aiheuttamaa tärinää ja melua ei kuitenkaan yleensä koeta ongelmaksi, sillä suuri osa rataverkosta sijaitsee riittävän kaukana asutuksesta, jottei värähtely kantaudu ihmisten koettavaksi. Ratojen läheisyyteen rakentaminen on kuitenkin yleistynyt huomattavasti viime vuosikymmeninä asumisen keskittyessä suuriin kaupunkeihin, mikä aiheuttaa myös raideliikenteestä aiheuttamien tärinä- ja meluhaittojen yleistymistä. Pehmeässä maaperässä tärinä myös kantautuu huomattavasti kauemmaksi, jolloin tärinähaittoja voi ilmetä myös radan välittömän läheisyyden ulkopuolella. Sutelan (2016, s. 14) mukaan raideliikenteen aiheuttama tärinä ja melu ei ole jatkuvaa, mutta on kuitenkin usein säännöllisesti toistuvaa, koska junat kulkevat yleensä säännöllisten aikataulujen mukaan. Lisäksi erityisesti pitkien junien aiheuttama tärinä voi olla riittävän pitkäkestoista aiheuttamaan resonanssia ja rakennevaurioita.

Melun ja maaperän tärinän lisäksi rataliikenne voi aiheuttaa runkomelua. Runkomelulla tarkoitetaan Taljan & Saarisen (2009, s. 14) esiselvityksen 'Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi' mukaan maaperästä rakennuksiin pohjarakenteiden ja rungon kautta siirtyvää tärinää, joka muuttuu aistittavaksi ääneksi rakennuksen sisällä. Runkomeluksi ei lasketa tärinästä johtuvaa esineiden liikkumisesta syntyvää ääntä. Lähteestä riippuen rataliikenteen aiheuttaman runkomelun merkittävimminä

taajuusalueina pidetään mm. 4–80 Hz:ä (Peltokangas et al. 2013, s. 50, Schmid 2010 mukaan), 4–50 Hz:ä (Varis 2018, s. 45, Lewis & Olofsson 2009 mukaan) tai 16–100 Hz:ä (Talja & Saarinen 2009, s. 15), mutta häiritseviä äänitasoja voi esiintyä korkeammillakin taajuusalueilla. Runkomelusta aiheutuva häiritsevä ääni on ilmiönä suhteellisen harvinainen, mutta yleisintä se on rakennuksen pohjarakenteiden ja tärinän lähteen ollessa lähekkäin ja yhteydessä samaan kovaan maapintaan, kuten peruskallioon (Talja & Saarinen 2009, s. 15). Taljan & Saarisen selvityksessä raideliikenteen aiheuttamalle runkomelulle annetaan suositusraja-arvoiksi tunneliradoilla 25–30 dB erityistä hiljaisuutta vaativissa tiloissa, 30 dB kun melu ei saa häiritä nukkumista, ja 35 dB kun melu ei saa häiritä työskentelyä, sekä avoradoilla tapauksesta riippuen 5 dB lievemmit. Samaisen selvityksen (Talja & Saarinen 2009) sivulla 25 annetaan myös suositukset rakennusten minimietäisyyksille erityyppisistä väylistä pehmeällä maalla, kovalla maalla, kalliolla ja tunneleissa, jotka on esitetty taulukossa 1.

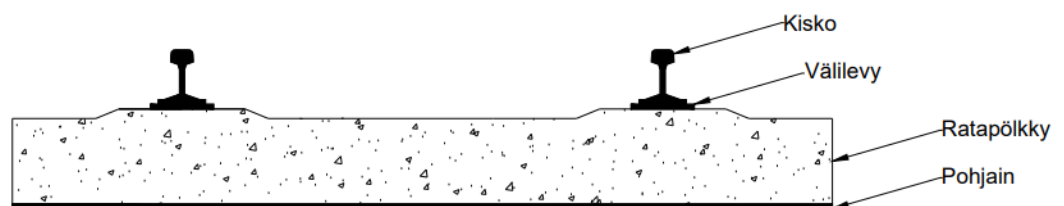
Taulukko 1. Rakennusten suositusetäisyydet eri liikennetyypeistä runkomelun ehkäisyksi (Talja, A. & Saarinen, A. 2009, s. 25)

Liikennetyyppi	Pehmeä maa, pintaväylä, 35 dB	Kova maa, pintaväylä, 35 dB	Kallio, tunneli, 30 dB	Kallio, pintaväylä, 35 dB
Tieliikenne, 50 km/h	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m
Tieliikenne, 100 km/h	< 5 m	< 5 m	< 5 m	5 m
Raitiovaunu, 40 km/h	< 5 m	15 m	50 m	120 m
Metro tai lähijuna, 80 km/h	< 5 m	30 m	90 m	160 m
Lähijuna, 160 km/h	10 m	60 m	130 m	200 m
Sähkömoottorijuna, 220 km/h	15 m	70 m	150 m	> 200 m
InterCity-juna, 160 km/h	40 m	130 m	200 m	> 200 m
Tavarajuna, 100 km/h	60 m	160 m	> 200 m	> 200 m

Maaperään säteilevän värinän lisäksi juna aiheuttaa ilmamelua eli ympäröivään ilmaan säteilevää värähtelyä, joka koetaan äänenä. Ilmamelun taajuusalueeksi kerrotaan Peltonkankaan et al. (2013, s. 50) selvityksessä 100–5000 Hz:ä perustuen Schmidin (2010) kirjaan. Valtioneuvoston päätöksessä melutason ohjearvoista (993/1992) annetaan ohjeeksi olemassa olevilla asumiseen käytettävillä alueilla, virkistysalueilla taajamissa ja hoito- tai oppilaitosalueilla korkeimmaksi sallituksi melutasoksi ulkona päivällä 55 dB ja yöllä 50 dB, uusilla alueilla yöllä 45 dB, sekä loma-asumiseen käytettävillä alueilla, taajamien ulkopuolisilla virkistysalueilla ja luonnonsuojelualueilla päivällä 45 dB ja yöllä 40 dB. Ilmamelu vaimentuu nopeasti etäisyyden kasvaessa, joten Suomessa junaradat aiheuttavat meluongelmia yleensä vain asutuskeskusten läheisyydessä aivan junaradan varteen rakennetuilla alueilla. Meluongelmat keskittyvät siis suhteellisen pienille alueille, joten ne on mahdollista ratkaista melueristyksen avulla, mutta tämä on yleensä kallis ratkaisu.

2 POHJAINTEN TOIMINTA

Pohjain, engl. Under Sleeper Pad (USP), on ratapölkyn pohjaan koko pölkyn pituudelle kiinnitettävä joustava matto, jolla saadaan aikaan joustava kerros ratapölkyn ja välikerroksen väliin. Pohjaimet koostuvat joustavasta kerroksesta, joka valmistetaan yleensä synteettisistä materiaaleista kuten polyuretaanielastomeereistä tai kumista, sekä yleensä joustavaa materiaalia suojaavasta kerroksesta, joka valmistetaan yleensä geotekstiileistä. Pohjaimet kiinnitetään uusiin ratapölkkyihin yleensä pölkyn valun yhteydessä, mutta ne voidaan kiinnittää myös valmiisiin ratapölkkyihin liimaamalla. Pohjainten käytöllä voidaan saavuttaa etuja verrattuna tavanomaiseen radan päällysrakenteeseen mm. rataliikenteen ympäristöön aiheuttaman tärinän ja melun vaimentamisessa, radan käyttöiässä ja rakennus- sekä huoltokustannuksissa. (Johansson et al. 2008) Kuvassa 1 on esitetty pohjaimen sijainti ratarakenteessa Liikenneviraston julkaisun *Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen* mukaan piirrettyinä.



Kuva 1. Periaatekuva pohjaimen sijainnista ratarakenteessa. (Oikarinen 2021 mukailien Peltokangas et al. 2013, s. 23)

Pohjaimia on käytetty Keski-Euroopan radoilla kohtuullisen paljon, mutta Suomessa niistä on vielä suhteellisen vähän kokemusta ja tutkimustietoa. Peltokankaan et al. (2013, s. 23) selvityksessä kerrotaan pohjaimia käytetyn International Union of Railwaysin tutkimuksen mukaan Suomen ulkopuolella

- tasoittamaan jäykkyyseroja siirtymäalueilla kuten silloilla,
- ohentamaan tukikerrosta,
- vähentämään kiskon ja ratapölkyn jännityksiä,
- vähentämään tärinää ja runkomelua,
- vähentämään korrugaatiota pienisäteisissä kaarteissa sekä

- vähentämään kunnossapitotarvetta, erityisesti tukemistarvetta.

Väyläviraston ohjeessa Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11 Radan päällysrakenne (2021, s. 26–27) sallitaan Suomessa pohjaimia käytettävän vain Väyläviraston kanssa erikseen sovittuna

- raiteen geometrian pysyvyyden parantamiseen,
- radan jäykkyyserojen tasoittamiseen siirtymäalueilla, kuten rumpujen kohdalla,
- tukikerroksen paksuuden madaltamiseen haastavissa kohteissa sekä
- kiskojen korrugaation tai tärinän vähentämiseen.

Käyttökohteet Suomessa ovat siis valtaosin samoja kuin ulkomailla, mutta käyttö on vielä huomattavan vähäistä verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan tai muihin Pohjoismaihin. Muun muassa Saksan (DB AG), Ranskan (SNCF) ja Itävallan (ÖBB) kansalliset rautatieyhtiöt ovat Journal of Rail and Rapid Transit -lehden artikkelin *In situ performance of a ballasted railway track with under sleeper pads* (Nielsen et al. 2010) mukaan käyttäneet pohjaimia erityiskohteissa jo 1990-luvulla ja käyttö alkoi yleistyä 2000-luvulla. Itävallassa pohjaimet otettiin vuonna 2005 vakiokomponentiksi pääraitojen vaihteissa ja A-luokan, eli eniten liikennöidyillä, linjaraiteilla, sekä alle 500 m kaarresäteen kaarteissa. Rudolf Schilderin vuonna 2013 julkaistussa pohjaintutkimuksessa löytämä ensimmäinen dokumentoitu pohjainten käyttökohde on ollut vuonna 1986 Zimmerbergin tunnelissa, jossa pohjaimia käytettiin puupölkkyissä vähentämään tärinää. Euroopan lisäksi pohjaimia on viimeisen viidentoista vuoden aikana ainakin tutkittu tai koekäytetty myös mm. Australiassa, Koreassa ja Kiinassa (Zhang et al. 2007; Kaewunruen & Remennikov 2015).

2.1 Pohjainten teoreettinen toiminta

Pohjaimen toimintaan vaikuttavat sen paksuus ja jäykkyys. Erityisesti pohjaimen jäykkyys on merkittävä tekijä valitessa käytettävää pohjaintyyppiä riippuen käyttökohteesta ja tavoiteltavasta vaikutuksesta. Peltokankaan et al. (2013, s. 24) mukaan pohjaimen jäykkyyttä kuvataan staattisella alustaluvulla C_{stat} (engl. static bedding modulus), jota kuvataan yhtälöllä:

$$C_{stat} = \frac{P}{y} = \frac{F}{Ay}, \quad (1)$$

missä

C_{stat}	on staattinen alustaluku [N/mm^2],
p	on pohjaimen pintapaine [N/mm^2],
y	on pohjaimen taipuma [N/mm^2],
F	on pohjaimeen vaikuttava voima [N] ja
A	on pohjaimen pinta-ala [mm^2].

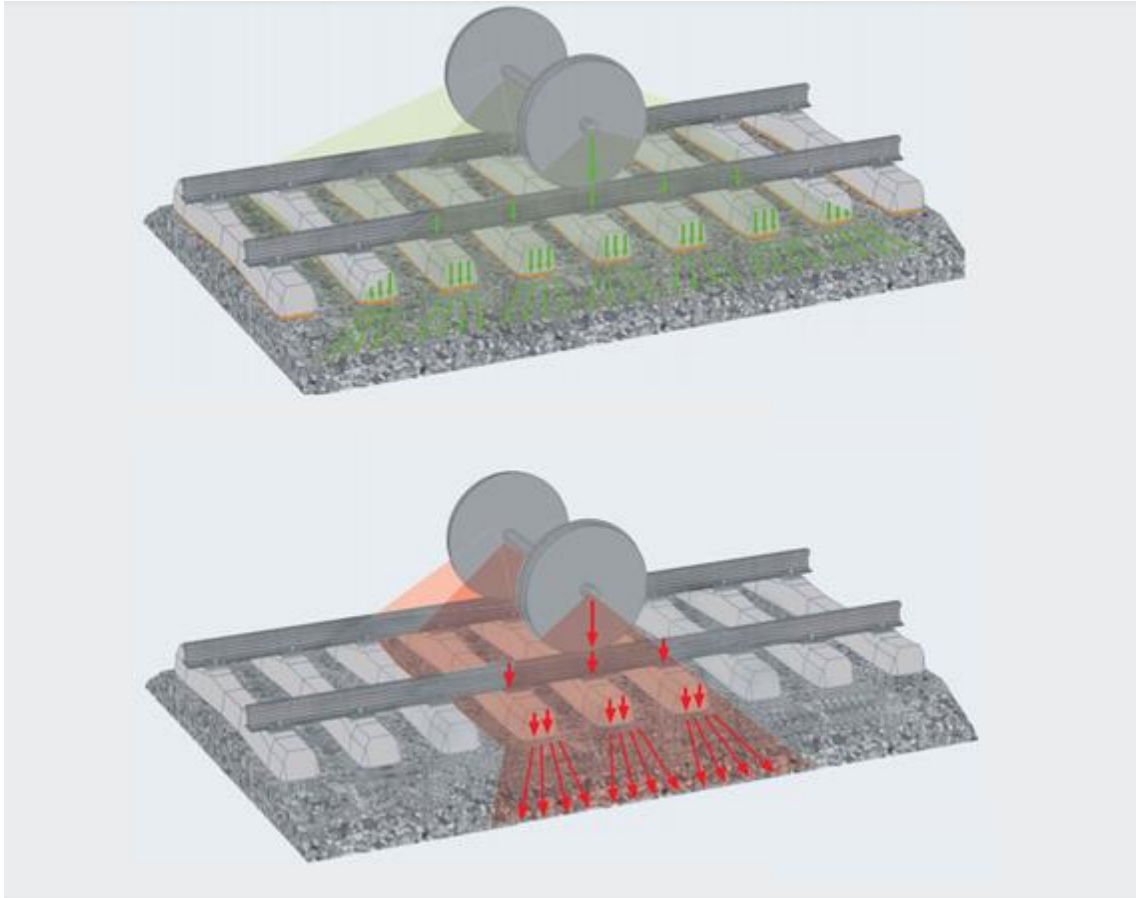
Alustaluku kuvaa siis kuinka suurella paineella pohjainta tulee painaa, jotta se taipuu yhden millimetrin. Staattisen alustaluvun lisäksi pohjainta voidaan kuvata myös dynaamisen alustaluvun C_{dyn} kautta. Dynaaminen alustaluku kertoo kuinka paljon pohjain taipuu tietyllä toistuvalla kuormalla tietyllä kuormituksen taajuudella, eli C_{dyn} muuttuu kuormituksen taajuuden muuttuessa (Zbiciak et al. 2020). Pohjaimet luokitellaan yleensä staattisen alustaluvun mukaan. Väyläviraston ohjeessa *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11 Radan päällysrakenne* (2021a, s. 27) pohjaimet on jaoteltu staattisen alustaluvun mukaan taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 2. Pohjainten luokittelu alustaluvun mukaan.

Pohjaintyyppi	Alustaluku
Jäykkä	$0,25 \text{ N}/\text{mm}^3 < C_{stat} < 0,35 \text{ N}/\text{mm}^3$
Normaali	$0,15 \text{ N}/\text{mm}^3 < C_{stat} < 0,25 \text{ N}/\text{mm}^3$
Pehmeä	$0,10 \text{ N}/\text{mm}^3 < C_{stat} < 0,15 \text{ N}/\text{mm}^3$
Erittäin pehmeä	$C_{stat} < 0,10 \text{ N}/\text{mm}^3$

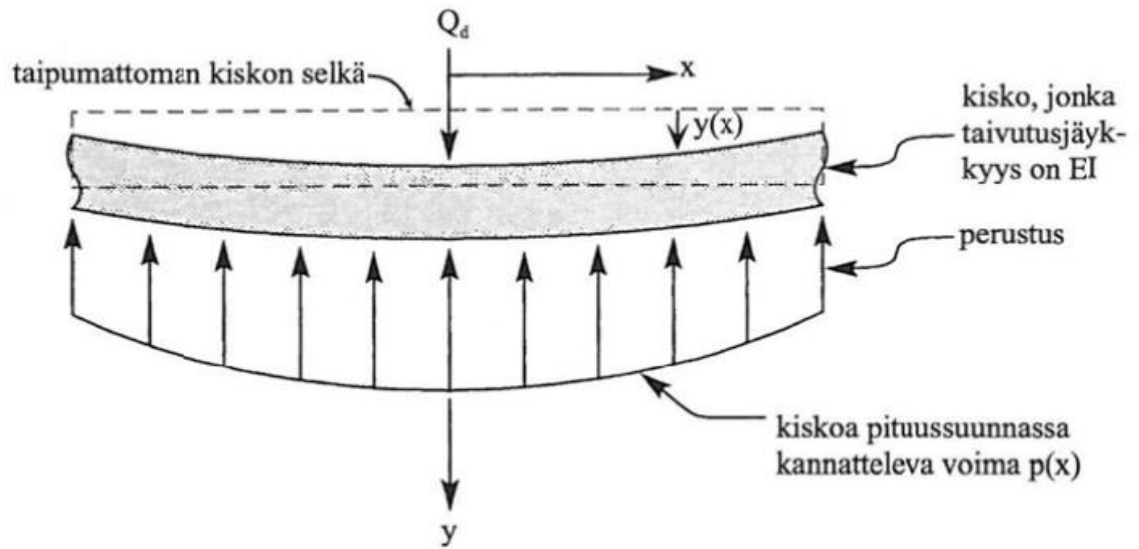
RATO 11:a sivun 28 mukaan jäykät ja normaalijäykkyyksiset pohjaimet soveltuvat raiteen geometrian pysyvyyden parantamiseen, radan jäykkyyserojen tasoittamiseen, tukikerrospaksuuden ohentamiseen ja kiskojen korrugaation vähentämiseen, kun taas pehmeät ja joissain määrin myös normaalijäykkyyksiset soveltuvat runkomelun ja tärinän alentamiseen.

Pohjainten vaikutus ratarakenteen toimintaa tulee kahden eri ilmiön kautta, jotka ovat kontaktipinta-alan ja radan kokonaisjäykkyyden muutokset. Pohjaimet luovat ratapölkkyjen ja välikerroksen väliin pehmeän kerroksen, johon sepeli voi upota kiinni. Tämä kasvattaa sepelin ja pölkkyjen välistä kontaktipinta-alaa, mikä tasoittaa kuormia ratarakenteessa, jakaa niitä laajemmalle alueelle ja saa pölkkyt liikkumaan tasaisemmin kuormituksen alla (Loy 2012). Ratateknisten ohjeiden osan 11 (Väylävirasto 2021, s. 10–11) mukaan hyväkuntoisilla tavanomaisilla 60E1-kiskilla rakennetulla radalla pystykuorman otaksutaan jakautuvan siten, että 42 % kuormasta tulee pyörän alapuoliselle pölkylle, 20 % sen molemmilla puolilla oleville pölkylle, 7 % niistä seuraaville ja 2 % niistä seuraaville. Alhaisempi kiskon taivutusjäykkyys ja ratarakenteen kokonaisjäykkyys kaventavat jakaumaa, mikä kasvattaa yksittäisen pölkyn kohdalle tulevaa kuormaa. Liikenneviraston julkaisun 'Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi' (Varis 2018, s. 9) mukaan pohjaimella varustetun pölkyn ja sepelin välinen kontaktipinta-ala voi olla jopa 35 %, kun tavanomaisessa rakenteessa se on 5–9 % luokkaa. Loyn mukaan tasaisempi pölkkyjen liike myös kasvattaa rakenteen vakautta, vähentää rakennekerrosten painumia ja hidastaa ratamateriaalien kulumista sekä radan siirtymistä. Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva kuormien jakautumisesta pohjaimilla varustetulla radalla verrattuna tavanomaiseen rataaan lainattuna Getznerin julkaisusta 'Under Sleeper Pads for Ballasted Track'. Pohjaimellinen rakenne on esitetty kuvassa ylempänä ja tavanomainen alempana.



Kuva 2. Akselikuorman jakautuminen pohjaimilla varustetulla junaradalla ja tavanomaisella junaradalla. (Getzner 2019)

Suuremman kontaktipinta-alan lisäksi pohjaimilla voidaan vaikuttaa ratarakenteen jäykkyyteen ja siten tasata jäykkyyseroista syntyviä ongelmia. Peltokankaan et al. (2013, s. 10–12) mukaan ratarakenne vastustaa kuormituksen alaisena pystysuuntaista liikettä riippuen radan pystysuuntaisesta kokonaisjäykkyydestä K (engl. track stiffness, global vertical track stiffness). Pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä kuvataan ratamoduulilla u (engl. track modulus), joka kuvaa kiskon liikettä vastustavan voiman suuruutta radan pituussuuntaista millimetriä kohden kiskon taipuessa yhden millimetrin. Skoglundin (2002, s. 9–10) mukaan BOEF-mallissa (Beam On Elastic Foundation) raide oletetaan äärettömän pitkäksi Euler-Bernoullin palkiksi jatkuvalla pituussuuntaisella tuella Winklerin alustalta, joka voidaan ajatella äärettömän pitkänä jonona kimmoisia toisiinsa kytkemättömiä jousia. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva BOEF-mallista (Peltokangas et al. 2013, s. 12). Kuvan termi Q_d kuvaa junan pyöräkuormaa.



Kuva 3. BOEF-mallin periaatekuva. (Peltokangas et al. 2013, s. 12).

Seligin ja Lin (1994) mukaan radan pystysuuntaista jäykkyyttä voidaan kuvata yhtälöllä:

$$K = \frac{Q}{y_{max}}, \quad (2)$$

missä

- K on radan pystysuuntainen jäykkyys [N/mm],
- Q on pyöräkuorma [N] ja
- y_{max} on kiskon maksimitaipuma pyörän alla [mm].

Skoglundin mukaan BOEF-mallissa Winklerin alustaa voidaan kuvata yhtälöllä:

$$p(x) = -u \times y(x), \quad (3)$$

missä

- $p(x)$ on kiskoa kannatteleva viivakuorma kohdassa x [N/mm],
- x on kiskon suuntainen pituuskoordinaatti [mm],
- u on ratamoduuli [N/mm/mm] ja

$y(x)$ on kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x [mm].

Tämä yhtälö (3) voidaan johtaa muotoon

$$u = -\frac{p(x)}{y(x)}. \quad (4)$$

Kuvan 3 malli voidaan Seligin ja Lin mukaan esittää differentiaaliyhtälönä:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + uy = 0, \quad (5)$$

missä

E on kiskoteräksen kimmomoduuli [N/mm²],

I on kiskon jäyhyysmomentti [mm⁴] ja näiden tulo

EI on kiskon taivutusjäykkyys [Nmm²].

Differentiaaliyhtälön (4) ratkaisusta saadaan yhtälö maksimitaipumalle y_{\max} :

$$y_{\max} = \frac{Q\beta}{2u}, \quad (6)$$

missä

$$\beta = \left(\frac{u}{4EI}\right)^{1/4}. \quad (7)$$

Sijoittamalla yhtälöt (1) ja (7) yhtälöön (5), saadaan yhteys ratamoduulin u ja radan jäykkyyden K välille:

$$u = \frac{K^{\frac{4}{3}}}{(64EI)^{\frac{1}{3}}} = \sqrt[3]{\frac{K^4}{64EI}} \quad (8)$$

ja esitettyä K :n suhteen:

$$K = \sqrt[4]{64EIu^3}. \quad (9)$$

Ero ratamoduulin ja radan jäykkyyden välillä on kokonaisjäykkyyden sisältämä kiskon taiputusjäykkyys EI, kun ratamoduuli edustaa vain kiskon alapuolisia radan rakenteita (Peltokangas et al., s. 14). Tarkemmin BOEF-mallin toiminnasta ja hyödyntämisestä ratatekniikassa on käsitelty kattavasti mm. edellä mainituissa tutkimuksissa.

Yhtälöstä (2) nähdään ratarakenteen jäykkyyden käyttäytyvän jousen kaltaisesti eli radan kokonaisjäykkyyttä voidaan käsitellä radan jousivakiona. Jos kaikkien radan rakenneosien jäykkyydet tunnetaan, radan kokonaisjäykkyys voidaan laskea kuten osat olisivat sarjaan asennettuja jousia. Radan ja sen rakenneosien taipuma on myös suoraan riippuvainen niiden jäykkyyksistä, joten elastisten muodonmuutosten jakaumasta voidaan arvioida kuinka paljon kukin rakenneosa vaikuttaa radan kokonaisjäykkyyteen. Pohjaimettomassa tavanomaisessa ratarakenteessa jakauma on keskimäärin seuraavanlainen: kisko 0,2 %, aluslevy 34 %, betonipölkky 0,8 %, tukikerros 22 % ja alusrakenne 43 %. Tästä nähdään joustavan aluslevyn ja sepelirakennekerrosten vaikuttavan eniten ratarakenteen jäykkyyteen. (Lichtberger 2005, Sainio 2008, s. 8–9 mukaan)

Samankaltaisia tuloksia on saatu Peltokankaan et al. (s. 38) mukaan maailmalla tehdyissä tutkimuksissa, joissa todetaan kaikkien radan rakenneosien vaikuttavan kokonaisjäykkyyteen, mutta suurin merkitys on pohjamaan laadulla ja paksuudella, sekä joustavilla rakenneosilla jäykkien rakenteiden välissä kuten joustavilla välilevyillä tai pohjaimilla. Jäykät rakenneosat kuten ratakiskot ja -pölkkyt eivät muuta merkittävästi muotoaan junakuorman alaisena eivätkä siten juurikaan tuo rakenteeseen joustoa. Radan osista Seligin ja Lin (1994) mukaan ehdottomasti suurin vaikutus on pohjamaan ominaisuuksilla. Toisaalta pohjamaahan on radan sijainnin valinnan jälkeen mahdotonta vaikuttaa, joten välilevyjen ja pohjainten ominaisuudet voisivat olla helpoin tapa vaikuttaa radan kokonaisjäykkyyteen. Johansson et al. (2008) tutkimuksessa simuloitiin välilevyjen ja pohjainten jäykkyyksien yhteisvaikutuksia ratarakenteisiin ja todettiin eri yhdistelmillä olevan huomattavan erilaisia vaikutuksia mm. kiskon taipumaan, kiskokiinnikkeen rasitukseen, pölkyn rasitukseen ja pölkyn sekä tukikerroksen välisiin voimiin. Esimerkiksi pehmeän välilevyn ja pehmeän pohjaimen yhdistelmä aiheutti

huomattavia kiskon taipumia ja rasiuksia pölkkyyn, sekä jäykän välilevyn ja pehmeän pohjaimen yhdistelmä voimakkaampaa pölkyn tärinää.

Peltokankaan et al. (s. 51) mukaan kokonaisjäykkyys on potentiaalinen työkalu radan kunnan arviointiin, jota on tutkittu raportin julkaisuaikana maailmalla enenevässä määrin mutta Suomessa vain hyvin vähän. Suuri kokonaisjäykkyys korreloi radalla mm. kiskojen pintavikojen ja niistä johtuvan melun, sekä suurien yksittäisiin pölkkyihin ja tukikerrokseen kohdistuvien voimien kanssa. Toisaalta suuri kokonaisjäykkyys korreloi myös pienten kiskojen taivutusrasitusten, vähintään kohtuullisen ratapölkkyjen tukeutumistilan, vähäisten alusrakennekerrosten taipumien, pienen pohjamaan taipuman ja kohtuullisen jäykän pohjamaan kanssa. Pieni kokonaisjäykkyys taas korreloi suurten kiskojen taivutusrasitusten, tukikerroksen suuren taipuman ja sen aiheuttaman sepelin hienonemisen, suurien alusrakennekerrosten taipumien ja niistä johtuvien ratapenkereen muodonmuutosten, suuren pohjamaan pinnan taipuman ja pehmeän pohjamaan, sekä siitä johtuvan tärinän leviämisen kanssa. Ainoa pienen kokonaisjäykkyyden positiivinen korrelaatio on tasaisempi kuormitus ratapölkkyille ja sen myötä rakennekerroksille, mutta tällöinkin tyhjätilojen kohdilla voi esiintyä dynaamisia iskuvoimia kuten aina. Radan pituussuunnassa vaihteleva kokonaisjäykkyys taas korreloi epäjatkuvuuskohdissa kiskojen pintavikojen, kiskojen taivutusrasitusten, suurten ratapölkkyihin kohdistuvien voimien, suurten tukikerroksen dynaamisten kuormitusten, alusrakennekerrosten ja pohjamaan heterogeenisyyden, sekä dynaamisten kuormitusten aiheuttaman tärinän kanssa. Liian jäykällä radalla voi siis ilmetä jouston puutteesta johtuvia dynaamisia kuormituksia, kun taas liian joustavalla radalla rakenteiden taipumat voivat kasvaa haitallisen suuriksi. Pituussuunnassa vaihteleva jäykkyys taas voi aiheuttaa muutoskohdissa suuria dynaamisia kuormituksia ja iskuvoimia, joten kokonaisjäykkyyden olisi toivottavaa olla radan pituussuunnassa mahdollisimman tasainen, eikä liian suuri tai pieni.

2.2 Vaikutus radan liikkeeseen ja kunnossapitotarpeeseen

Variksen (2018, s. 9) mukaan tavanomaisen radan päällysrakenne on hyvin jäykkä kokonaisuus, koska melkein kaikissa kontaktipinnoissa on kaksi kovaa ja jäykkää materiaalia vastakkain. Kiskoja ja kiskojen sekä pölkkyjen välissä olevia välilevyjä

lukuun ottamatta rakenteet eivät juurikaan jousta kuormituksen alla. Erityisesti ratasepelin ja pölkkyjen välisissä kontaktipinnoissa sepeliin kohdistuu huomattavia rasituksia, sillä vain pieni osa sepelirakeiden pinnasta on kosketuksissa pölkkyjen pohjien kanssa. Näiden yksittäisille sepelirakeille tulevien dynaamisten kuormitusten takia ne alkavat jauhautua pienemmiksi rakeiksi, mikä heikentää tukikerroksen kantavuutta pitkällä aikavälillä. Suomen radoilla raidesepelin tulee täyttää standardin SFS-EN 13450 vaatimukset, jossa uusilla pääradoilla sepelin raekoon tulee olla d/D 31,5/63 mm, rakeisuuden luokan F mukainen, hienoaineksen määrän 1 %, muotoarvon luokan SI₂₀ mukainen, iskunkestävyyden Los Angeles -iskunkestävyysmittauksen luokan LA_{RB}12 mukainen ja kulutuskestävyyden luokan M_{DERB} 11 mukainen. LA_{RB}12-luokan ratasepelin käyttöiän on junaliikenteen tonneissa mitattuna 350 Mbrt, mikä raskaimmin liikennöityjen ratojen liikennemäärällä (>9 Mbrt/v) tarkoittaisi vajaan 40 vuoden käyttöikä (Kuula et al. 2017, s. 16). Raidesepelin kuntoa seurataan mittaamalla otetuista näytteistä 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosentit. Näiden yhteenlasketun läpäisyprosentin ylittäessä raja-arvon 90, sepeli on vaihdettava tai seulottava. (Ratahallintokeskus 2002, s. 14) Raidesepelin kuntoa tarkastellaan siis sepelin jauhautumisen kautta ja rakeisuuden ollessa riittävän pientä sepeli tulee seuloa, eli poistaa hienontunut kiviaines ja korvata se uudella, tai vaihtaa, jolloin raide rakennetaan kokonaan uudestaan uudella sepelillä.

Pohjainten vaikutusta ratapenkereen sepeliin on tutkittu kohtuullisen paljon sekä simuloimalla, laboratoriokokeilla että koekäytöllä ympäri maailmaa mm. UIC 2009, Lakusic et al. 2010, Nielsen et al. 2010, Marschnig & Veit 2011, Auer et al. 2013, Jayasuriya et al. 2019 sekä Kaewunruen & Ngamkhanong 2020. Useat julkaisut ovat saatavilla vain Saksaksi tai Ranskaksi, mutta näiden tutkimusten tuloksia on käännetty kansainvälisissä pohjainselvityksissä, mm. Stahl 2005, Loy 2008, UIC 2009 sekä Nielsen et al. 2010. Tutkimuksissa usein toistuvia pohjainten käytön etuja ovat mm. pohjainten tuoman jouston ja suuremman kontaktipinta-alan kautta saavutettava kuormien jakautuminen pidemmälle alueelle, mikä hidastaa sepelin kulumista ja vähentää ratarakenteen liikettä, pysyvän painuman pienentyminen useiden vuosien aikavälillä, dynaamisten iskuvoimien pienentyminen tasaisemman kantavuuden myötä ja tukeutumattomien pölkkyjen vähentyminen. Nämä kaikki edesauttavat raiteen käyttöiän pitenemistä ja vähentävät kunnossapitotarvetta tukikerroksen kuluessa ja liikkuessa

vähemmän, minkä ansiosta se kantaa yläpuolisia rakenteita paremmin pidempään. Tukikerroksen parempi toiminta mahdollistaa myös tukikerroksen ohentamisen n. 5–10 cm ilman merkittäviä haittoja radan toimintaan (Loy 2008, Schilder 2013). Ohuempi tukikerros säästäisi normaalilla avoimella radalla huomattavasti sepelin määrässä, mutta vielä merkittävämpi vaikutus tällä olisi tunneleissa ja silloilla. Tunneleiden louhiminen on erittäin kallista, joten pienetkin säästöt tunnelin korkeudessa toisivat huomattavia vaikutuksia. Myös siltojen kansien korkeudessa voitaisiin säästää, jos ohuempi tukikerros riittäisi varmistamaan radan toimivuuden.

Pohjaimia ja muita tärinän eristystuotteita valmistavan yrityksen Getzner Werkstoffien kehityspäällikön Dipl-Ing Dr Harald Loyn artikkelin *Mitigating vibration using under-sleeper pads* mukaan tavanomaisessa ratarakenteessa pölkkyjen päädyt kantavat valtaosan liikennekuormasta, minkä vuoksi ne liikkuvat pölkyn keskiosaa enemmän pystysuunnassa liikenteen aiheuttaman rasituksen alla. Tämä liike jauhaa erityisesti pölkkyjen päiden alapuolisia sepelirakeita pienemmiksi heikentäen sepelin kantavuutta ja ajan kuluessa synnyttää pölkkyjen päätyjen alle onttoja kohtia, mikä edelleen heikentää pölkky-sepeliäkontaktia ja kuormituksen alaisena aiheuttaa ratapölkkyjen iskeytymistä sepeliin kuluttaen näillä kohdilla sepeliä muuta tukikerrosta nopeammin. Southwest Jiaotong Universityssä tehdyn tukeutumattomien ratapölkkyjen toiminnan tutkimuksen (Zhang et al. 2008) mukaan nämä tyhjätilat kasvavat toistuvan kuormituksen alla ja niiden kasvaessa riittävän suuriksi pölkky ei ole enää lainkaan kosketuksissa ratasepelin kanssa, vaan roikkuu ilmassa kiskojen varassa. Tukeutumattomat ratapölkkyt eivät tukeudu ratasepeliin lainkaan ennen kuin junan pyörä liikkuu niiden päältä, mistä johtuen pölkky ja junan pyörä liikkuvat pyörän ylittäessä pölkyn huomattavasti enemmän ja nopeammin alaspäin kuin hyvin sepeliin tukeutuvat pölkkyt. Tällöin pölkky iskeytyy voimakkaasti alapuoliseen sepeliin, mikä aiheuttaa sepelirakeisiin tavanomaista suurempia voimia edesauttaen niiden painumaa ja jauhautumista. Lisäksi pyörän siirtyessä tukeutumattomalta pölkyltä seuraavalle pölkylle se on liikkeessä alaspäin, mikä aiheuttaa tavanomaista suurempia dynaamisia kuormia tälle pölkylle. Tyhjätilat ja erityisesti tukeutumattomat pölkkyt aiheuttavat siis pyörissä, pölkkyissä ja sepelissä hyvin tuettuja huomattavasti suurempaa pystysuuntaista liikettä kuin hyvin tuetuilla pölkkyillä, mikä aiheuttaa iskuvoimien kasvun takia viereisiin pölkkyihin ja erityisesti tukikerrossepeliin suurempia rasituksia ja kulumista, sekä lisää tärinää. Loyn (2008) ja Schilderin (2013)

mukaan ÖBB:n (Itävallan kansallinen rautatieyhtiö) tutkimuksissa pohjaimilla voidaan vähentää huomattavasti tai joissain tilanteissa estää kokonaan tyhjätilojen muodostuminen pölkkyjen päätyjen alle ja siten parantaa ratasepelin kantavuuden ja geometrian säilymistä, sekä vähentää tärinää pölkkyjen liikkeen vähentyessä. Huomattavasti vähäisempää tukikerroksen jauhautumista pohjaimilla varustetulla radalla havaittiin puolen vuoden aikana myös Wollogongin yliopiston tutkimuksessa Australiassa (Kaewunruen & Remennikov 2015).

Chalmers University of Technologyn tutkimuksessa (Nielsen et al. 2010) SBB:n (Sveitsin kansallinen rautatieyhtiö) radalla Kiesenissä tutkittiin viiden jäykän pohjaimen ($C_{stat} = 0,3 \text{ N/mm}^3$), jotka tilattiin eri pohjainvalmistajilta, vaikutusta radan toimintaan. Paikan päällä mitattuna pohjainten alustaluvuissa oli eroja, sillä pohjaimen 3 C_{stat} mitattiin $0,35 \text{ N/mm}^3$ ja pohjaimen 5 $0,25 \text{ N/mm}^3$, eli nämä poikkesivat valmistajan ilmoittamista. Vuonna 2005 keväällä jokaisella pohjaimella rakennettiin 216 m pitkä osuus radasta 60E1-kiskoilla, Vossloh Sk11-kiskonkiinnikkeillä, jäykillä EVA-välilevyillä ja B91 betonipölkkyillä. Rataosuudella InterCityjunat kulkivat noin 160 km/h nopeudella ja tavarajunat noin 100 km/h nopeudella korkeintaan 22,5 tonnin akselikuormalla. Tutkimuksen tekoaikaan radan liikennekuorma oli noin 70 000 tonnia päivässä. Radan geometriaa oli seurattu ennen päällysrakenteen uusimista jo 2002 maaliskuusta asti ja seuranta jatkettiin 2007 syyskuuhun saakka ilman, että raidetta tuettiin muulloin kuin päällysrakenteen uusimisen yhteydessä. Ennen päällysrakenteen uusimista radan pystygeometria (laskettuna pystygeometriavirheiden mittausten neliöllisenä keskiarvona 60 m matkalta jokaisen osuuden keskeltä) oli huonontunut tasaisesti kaikilla rataosuuksilla, mutta niiden pohjaolosuhteiden erojen takia osassa kohteissa heikkeneminen oli ollut huomattavasti nopeampaa. Päällysrakenteen uusimisen jälkeen pohjaimeton referenssiosuus käyttäytyi kuten vanha rata, eli pystygeometriavirheet kasvoivat suunnilleen yhtä nopeasti kuin aiemmin, kun taas pohjainta 2 lukuun ottamatta pohjainpölkkyillä rakennetut kohteet käyttäytyivät huomattavasti aiempaa paremmin. Pohjaimilla 1 ja 3–5 rakennetuissa kohteissa geometriavirheiden neliöllinen keskiarvo pieneni tasaisesti mitatun 50 kuukauden aikana, mutta pohjaimella 2 rakennetun kohteen geometria huononi samankaltaisesti kuin ennen päällysrakenteen uusimista. Pohjaolosuhteiden erojen vuoksi kohteet eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään,

mutta valtaosin pohjaimilla oli erittäin positiivinen vaikutus radan pystygeometriaan pitkällä aikavälillä.

Suomessa yleisin pohjainten käyttökohde on ollut elastiset vaihteet, joissa pohjaimia käytetään pienentämään vaihteen ratarakenteen jäykkyyttä yhdessä kiskon ja pölkyn väliin asennettavien elastisten välilevyjen kanssa. Ensimmäiset elastiset vaihteet asennettiin syksyllä 2014 Kouvolan ratapihalle ja sittemmin niitä on asennettu mm. kesällä 2015 Asolaan kehäradalle ja kesällä 2016 Oulun Nokelaan, mutta myös muutamiin muihin kohteisiin. Näiden elastisten vaihteiden toimintaa seurattiin Väyläviraston tutkimuksissa *Kouvolan elastisten vaihteiden monitorointi* (Varis & Luomala 2017), *Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi* (Varis 2018) ja *Oulun elastisten vaihteiden seurantamittaukset* (Varis & Luomala 2019).

Variksen ja Luomalan (2019, s. 8) mukaan tavanomainen jäykkä vaihderakenne aiheuttaa huomattavan suuria rasituksia tukikerrokseen, vaihderakenteeseen sekä erityisesti vaihteen raideruuveihin. Jäykkyys aiheuttaa suuren dynaamisen kuormituksen radan tukikerrokseen, mikä nopeuttaa sepelin hienontumista ja heikentää sen tukemiskykyä. Kehäradan tutkimuksessa (2018, s. 37) kerrotaan vaihderakenteessa käytettävien erilaisten pölkkyjen ja niiden tukemishaasteista johtuvien jäykkyyden epäjatkuvuuskohtien aiheuttavan myös suuria rasitusvaihteluita rakenteessa erityisesti risteyskärjen kohdalla. Tällaiset pistemäiset kuormitusvaihtelut aiheuttavat tukikerroksen sepelin epätasaista kulumista, mikä edelleen nopeuttaa radan kantavuuden heikkenemistä näillä kohdilla. Vaihderakenteissa on siis useita tekijöitä, joiden takia ne ovat erityisen alttiita raidegeometrian vaihteluille, kuten Variksen ja Luomalan (2019, s. 82) tutkimuksessa todetaan.

Kaikissa kolmessa elastisten vaihteiden mittauksissa päästiin samankaltaisiin tuloksiin: elastiset vaihteet, erityisesti pohjaimilla varustetut, vähentävät huomattavasti ratarakenteen pysyviä pystysuuntaisia painumia tutkimusten noin kahden vuoden ajanjaksoilla. Pohjainten vaikutuksen ajatellaan yleisesti olevan merkittävämpi tavanomaiseen rakenteeseen verrattuna vielä tätäkin pidemmällä käyttöajoilla, joten pidemmät mittaukset olisivat tuoneet tähän varmistusta. Tutkimustuloksissa ei raporttien mukaan havaittu mitään, mikä viittaisi pohjaimellisen radan käyttäytyvän painumien

suhteen normaalia rataa huonommin pidemmällä aikaväleillä. Vaihteiden asennuksen jälkeisinä kuukausina pohjaimelliset vaihteet painuivat kaikissa kohteissa tavanomaisia vaihteita huomattavasti enemmän, mikä oli odotettu tulos. Tämä johtuu sepelin ja pohjainten välisestä pehmeästä kontaktipinnasta, joissa sepelirakeet painuvat pohjainmateriaalin sisään pohjainpölkkyjen hakiessa paikkaansa tukikerroksen päällä. (Varis & Luomala 2017, s. 52–53; Varis 2018, s. 47–49; Varis & Luomala 2019, s. 82–83)

Kouvolassa (Varis 2018, s. 52) ja Asolassa (Varis & Luomala 2018, s. 47) pohjaimellisissa vaihteissa palautuva painuma käyttäytyi pysyvän painuman kaltaisesti, eli rakenteen elinkaaren alkupäässä palautuvat painumat olivat huomattavasti suurempia kuin tavanomaisissa vaihteissa, mutta tämä johtuu pohjaimen paikoilleen asettumisesta ja pysähtyy pohjainpölkyn löydettyä paikkansa sepeliä vasten. Pohjaimet myös jakavat pystysuuntaisesta liikkeestä syntyvät kuormat tasaisemmin alapuoliselle tukikerrokselle, joten tästä johtuvat rasitukset sepelille ovat huomattavasti pienemmät kuin pohjaimettomien pölkkyjen liikkeen aiheuttamat. Oulussa (Varis & Luomala 2019, s. 30–31, 82–83) palautuvat painumat olivat alusta asti kohtuullisen pieniä, eivätkä lähteneet merkittävästi kasvamaan mittausjakson aikana. Toisessa Oulun vaihteista havaittiin tukikiskoissa ja vaihteen kielissä huomattavasti tavanomaista enemmän sivukulumista raskaiden junien ajaessa vaihteen kannasta järkeen päin kiskojen joutuessa laippakontaktiin junan pyörien kanssa. Vaihteen elastisuuden tuoma painuma ei itsessään aiheuttanut tätä laippakontaktia, mutta pyörän joutuessa laippakontaktiin elastisuus korosti tätä tukikiskon ja kielen välistä painumaongelmaa. 2021 luonnosvaiheessa olleen tutkimuksen (Varis & Luomala 2021) mukaan kulumisongelma on myös sittemmin helpottanut osin vaihteeseen asennetun kiskonvoitelulaitteen ansiosta, mutta osin selittämättömistä syistä, mikä viittaisi kulumisongelman johtuneen muista seikoista kuin itse vaihderakenteesta.

Variksen (2018, s. 11–12) tutkimuksessa jäykällä pohjaimilla ($C_{\text{stat}} = 0,3 \text{ N/mm}^3$) on laskettu saavutettavan huomattavia eroja radan pystysuuntaiseen jäykkyyteen verrattuna Peltokankaan et al. (2013) mittauksiin elastisen, normaalin ja jäykän radan vaihdealueilla. Elastisella radalla pohjainten vaikutus jäykkyyteen on vähäisempää, sillä radan jäykkyys ilman pohjaimiakin on kohtuullisen pieni, mutta niissäkin jäykkyys voi pienentyä jopa n.

puoleen 15 % kontaktipinta-alalla. Normaalijäykkyyksillä ja jäykillä radoilla vaikutukset voivat olla huomattavasti dramaattisempia, jopa n. 80 % ja 95 % pystysuuntaisen jäykkyyden pienentymillä 15 % kontaktipinta-alalla. Suuremmalla kontaktipinta-alalla vaikutus jäykkyyden muutokseen on vähäisempää. Jäykillä rataosuuksilla, esimerkiksi tunneleissa tai silloilla, sekä normaalijäykkyyksillä rataosuuksilla pohjaimilla voidaan siis saavuttaa merkittäviä vaikutuksia radan joustoon.

Maailmalla pohjainten käyttöä vaihteissa ovat tutkineet mm. Loy (2009) ja Le Pen et al. (2017). Le Pen et al. tutkivat pohjainten toimintaa vaihteissa 250 m pitkällä kaksiraiteisella koeosuudella, jossa sijaitsi kaksi vaihdeparia. Ensimmäisen vaihdeparin vaihteet olivat 1:13 ja toisen 1:21 vaihteita. Raiteen kiskot olivat CEN56E1-kiskoa ja linjalla ratapölkkyt olivat tyyppiä G44 ja vaihdepölkkyt tyyppiä 001 sekä 001E. Alueen eteläpäässä raiteet kulkivat alikäytävän yli ennen ensimmäistä vaihdeparia ja toisen vaihdeparin jälkeen radan ylitti tasoristeys. Eteläpäässä ratapenkan korkeus oli 4,0–4,5 metriä ja korkeus laski 2,0–2,5 metriin pohjoispäähän mennessä. Eteläisen vaihdeparin päällysrakenne uusittiin joulukuussa 2012, jolloin vaihdealueille asennettiin pohjaimellisia pölkkyjä kahdella eri 10 mm pohjaintyyppillä: 0,22 N/mm³ ja 0,15 N/mm³ alustaluvun pohjaimilla, ja pohjoisen vaihdeparin joulukuussa 2013 ilman pohjaimia. Normaalijäykkyyksillä pohjaimilla varustettuja pölkkyjä asennettiin ensimmäisen vaihdeparin molempien vaihteiden etujatkoksilla olevan onton pölkyn jälkeen 29 kpl etujatkos- ja ristikkoalueille, sekä takajatkoksien neljä viimeistä pölkkyä. Pehmeillä pohjaimilla varustettuja pölkkyjä asennettiin normaalijäykkyyksisten väliin 24 kpl molemmille vaihteille. Pölkkyjen siirtymämittaukset suoritettiin pölkkyjen päihin asennetuilla geofoneilla helmikuussa 2014, joulukuussa 2014, huhtikuussa 2015 ja maaliskuussa 2016. Ensimmäisellä vaihteella, eli etelästä tulevan raiteen vaihteelle, geofonit asennettiin 15 pölkkyyn alkaen ennen etujatkosta kuudenneksi viimeiseen normaalijäykkyyksillä pohjaimella varustettuun pölkkyyn ja 7 pölkkyyn pehmeillä pohjaimilla varustetun alueen keskelle. Saman vaihdeparin toiseen vaihteeseen geofonit asennettiin kuuteen pölkkyyn pehmeillä varustetun alueen keskelle. Lisäksi geofonit asennettiin yhteen koko vaihdeparin läpi menevistä pitkistä pölkkyistä. Pohjoisemmalla vaihdeparilla vain etelästä tulevan raiteen vaihteen taka- ja etujatkosalueille asennettiin geofonit 7 ja 8 pölkkyyn. Mittausten aikana raiteet ylittävät junat ajoivat vaihteista vain suoraan ja suurinta raiteiden sallittua nopeutta 177 km/h tai hyvin lähellä sitä. Näiden

mittausten lisäksi etelästä tulevan raiteen geometria mitattiin heinäkuussa 2012, joulukuussa 2012, marraskuussa 2013, helmikuussa 2014, marraskuussa 2014 ja maaliskuussa 2016. Mittausten perusteella tutkimuksessa todetaan pehmeiden pohjainten kasvattavan pölkkyjen pystysuuntaista liikettä yli 40 % verrattuna pohjaimettomiin pölkkyihin ja normaalijäykkyyksisillä pohjaimilla varustettujen pölkkyjen liikkuvan samankaltaisesti pohjaimettomien kanssa, mutta koealueiden erojen alikäytävän, taseisteyksen, muuttuvan pengerkorkeuden ja eri vaihdekuilmiin takia mittaukset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Pohjaimilla varustettujen pölkkyjen liikkeen havaittiin olevan keskenään verrattuna tasaisempaa, eli yksittäisten pohjainpölkkyjen liikkeessä oli vähemmän variaatioita kuin tavanomaisissa, minkä pitäisi vähentää dynaamisia kuormituksia vierekkäisten pölkkyjen liikkeessä samankaltaisesti. Pehmeillä pohjaimilla varustettujen molempien raiteiden mittaisissa vaihdepölkkyissä havaittiin kallistua junan ylittäessä ne kohti raidetta, jolla juna liikkui, ja jäävän levossakin kallelleen sitä kohti. Radan geometrian todettiin pysyvän paremmin suunnitellussa päällysrakenteen uusimisen jälkeen ja 2,5 vuotta päällysrakenteen uusimisen jälkeen tehtyjen mittausten myötä radalla ei pitäisi lähitulevaisuudessa joutua tekemään kunnossapitotöitä. Radan geometrian mittaustulosten käyrissä on havaittavissa hieman pienempiä vaihteluita normaalijäykkyyksisten pohjainten kohdalla, mutta vuodenajasta johtuva vaihtelu on todennäköisesti vaikuttanut jonkin verran mittaustuloksiin, joten pohjaimilla ei vaikuta saavutetun merkittävää eroa geometrian muutosnopeuteen.

Loyne Railway Technical Reviewissä julkaistussa artikkelissa 'Under Sleeper Pads in Turnouts (Loy 2009) perehdytään pohjainten jäykkyyden optimointiin vaihdealueella elementtimenetelmäsimulaatioilla. Artikkelin mukaan vaihdealueella on useita kohtia, joissa rakenteen kokonaisjäykkyys muuttuu huomattavasti lyhyellä matkalla, kuten tultaessa tavallisilta ratapölkkyiltä vaihdepölkkyille, asetinlaitteen kohdalla, kielten matkalla, ristikon pitkien pölkkyjen kohdalla ja näiltä jälleen lyhyille pölkkyille tultaessa. Nämä epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat paikallisesti huomattavia eroja rakenteen kantavuudessa ja siten muiden rakenneosien kuormituksissa. Loyne tutkimuksessa (2009) mallinnettiin elementtimenetelmäpohjaisesti kokonainen oikeakätinen vaihde, jonka käyttäytymistä voitiin sitten simuloida useiden eri parametrien kautta, mm. erilaisilla pohjaintyypeillä ja näiden yhdistelmillä. Ennen simulaatioita pohjainten kanssa vaihderakenne simuloitiin muuttamalla ratapenkereen ja pohjamaan alustalukua ja

laskettiin kiskon siirtymän maksimit 220 kN akselikuormalla 3 m akseliväleillä. Kiskon siirtymän kuvaajista $0,5 \text{ N/mm}^3$ alustaluvusta pykälittäin $0,05 \text{ N/mm}^3$ alustalukuun nähdään siirtymien kasvavan huomattavasti kokonaisjäykkyyden pienentyessä, sekä havaitaan huomattavia muutoksia siirtymien suuruuksissa tietyissä kohdissa vaihdetta, kuten ensimmäisen vaihdepölkyn kohdalla, välikiskojen molemmissa päissä, vastakiskojen päissä ja viimeisen pitkän pölkyn jälkeen. Vähäisimpiä siirtymät ovat välikiskojen kohdalla, koska se on jäykin osa vaihderakennetta. Vertailtaessa kiskon siirtymiä $0,2 \text{ N/mm}^3$ alustaluvun rakennekerroksilla tavanomaisessa vaihderakenteessa, kohtuullisen jäykällä ($C_{\text{stat}} = 0,2 \text{ N/mm}^3$) pohjaimilla ja optimoiduilla pohjainten jäykkyyksillä nähdään yhtä pohjaintyyppiä käytettäessä siirtymien kasvavan n. 0,5 mm koko vaihdealueen ja linjaraiteiden alueilla. Optimoiduilla pohjaimilla siirtymät ovat vielä tätä suurempia, mutta käyrä on huomattavasti tasaisempi, eli äkkinäiset muutokset rakenteen kokonaisjäykkyydessä ja sen ansiosta raiteen siirtymissä ovat tasoittuneet huomattavasti. Täytyy myös muistaa, että vaikka kiskon siirtymät ovat yhtä pohjaintyyppiä käytettäessä suurempia kuin ilman pohjaimia, pohjaimilla saavutetaan tasaisempi kuormien jakautuminen alempiin rakenteisiin, minkä pitäisi vähentää niiden rasituksia ja hidastaa pystygeometrian heikkenemistä pitkällä aikavälillä.

Vaihteiden lisäksi potentiaalinen pohjainten käyttökohde ovat sillat ja tunnelit, joissa rata lepää jäykällä betoni- tai kalliopohjalla. Silloilla ja tunneleissa radan alapuolella ei ole joustavaa pohjamaata ja rakennekerrokset ovat huomattavasti penkereelle rakennettavaa rataa ohuempia, sillä betonisilla silloilla ja tunneleissa raide rakennetaan yleensä kokonaan ilman alusrakennekerroksia eli pölkyt lepäävät pelkän 550 mm tukikerroksen varassa (Väylävirasto 2019, s. 16; Väylävirasto 2018, s. 15). Näissä rakenteissa välilevyt ovat siis ainoa huomattavasti joustoa tuova rakenneosia, joten elastisten välilevyjen lisäksi pohjaimia voitaisiin käyttää lisäämään rakenteen joustoa. Siirtymäkohdat penkereeltä sillalle tai tunneliin ovat myös ongelmallisia niiden ja ratapenkereen suuren jäykkyyseron vuoksi, mikä kuten aiemmin kappaleessa 2 mainittu voi aiheuttaa suuria dynaamisia kuormituksia ja iskuvoimia, jotka johtavat rakenteiden rasittumiseen ja ratapenkereen painumaan siirtymäkohdassa, mikä taas entisestään korostaa ongelmaa. Tätä jäykkyyseroa ja erityisesti sen aiheuttamasta painumasta johtuvaa töyssynmuodostusta pyritään tasoittamaan siltojen päihin asennettavilla siirtymäläatoilla (Briaud 1997, s. 10). Suomessa uusilla ratasilloilla käytetään 5 m pitkää ja 30 cm paksua raudoitettua betonista

siirtymälaattaa (Liikennevirasto 2017). Siirtymäalueiden ongelmia on Paixão et al. (2015, s 1) tutkimusraportin ”On the use of under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: experimental field testing” mukaan tutkittu viimeisen parinkymmenen vuoden aikana kohtuullisen paljon (mm. Alves Ribeiro 2012; Cuéllar et al. 2009; ERRI-D230.1 Committee 1999; Kaynia et al. 2005; Nicks 2009; Plotkin & Davis 2008; Read & Li 2006; Zakeri & Ghorbani 2011) ja töyssynmuodostumisen ajatellaan johtuvan valtaosin epätasaisesta radan liikkeestä ja epätasaisesta pysyvästä painumasta, jotka aiheuttavat dynaamisia kuormia ratarakenteeseen junan ajaessa siirtymäalueen yli. Täyttä yksimielisyyttä syntymekanismista ei ole, mutta ratapenkereen ja sillan päädyn kokonaisjäykkyyseron ajatellaan olevan eniten vaikuttava tekijä.

Railway Gazette Internationalissa julkaistun artikkelin (Quirchmair & Loy 2015) mukaan siirtymäalueiden jäykkyyseroja ja töyssynmuodostumista voidaan tasoittaa asentamalla pohjainpölkkyt sillan tai tunnelin koko mitan lisäksi siirtymäkohdan yli asti. Pohjainten käyttöä silloilla ja sillan päätyjen siirtymäalueilla on viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana tutkittu jonkin verran kokeellisesti ja numeerisesti mallintamalla mm. Itävallassa, Espanjassa, Portugalissa ja Iranissa (UIC 2009; Lozano del Moral & Cuéllar 2009; Insa et al. 2012, Costa D’Aguiar et al. 2014; Paixão et al. 2015 ja 2018; Alves Ribeiro et al. 2015; sekä Mottahed et al. 2018 ja 2019). Paixão et al. (2015, s. 1–2) kenttäkokeen raportissa kerrotaan aiemmissä tutkimuksissa ja simulaatioissa pohjaimilla on huomattu olevan positiivinen vaikutus siirtymäalueen kokonaisjäykkyyseroon ja siitä johtuviin ongelmiin kuten töyssynmuodostukseen, mutta aiheesta tarvitaan lisätutkimuksia, jotta pohjaimen vaikutuksesta saataisiin lisää varmaa tietoa. Kenttätutkimuksia aiheesta ovat tehneet Paixão et al. lisäksi ainakin Mottahed et al. (2018 ja 2019).

Paixão et al. tutkimuksessa vertailtiin Alcácerin ohitusradalla Portugalissa sijaitsevien kahden samankaltaisen alikulkutunnelin yli kulkevien raiteiden kiskon muodonmuutoksia, välilevyjen muodonmuutoksia, kiskojen siirtymiä, pölkkyjen ja kiskojen suhteellisia siirtymiä ja pölkkyjen kiihtyvyyksiä junien ylittäessä ne. Alikäytävät olivat betonisia siipimuureilla varustettuja kehäalikulkuunneleita, joiden kansien pituudet olivat 6,1 m. Molemmilla alikäytävillä pengertäyttö kehän reunalta 3 m matkalta ulospäin oli sementillä sidottua maa-ainesta siirtymäalueiden jäykkyyserojen tasoittamiseksi ja siitä 17 m eteenpäin sitomatonta kitkamaata. Ensimmäisen alikäytävän

(AK1) ratapenkereen pengertäyttö vaihdettiin siltti-hiekka-savimaakerroksen vuoksi tältä 17 m matkalta 3,5 m syvyyteen asti sitomattomalla kitkamaalla, jotta siitä saatiin homogeeninen toisen alikäytävän (AK2) ratapenkereen kanssa. Raiteen kiskot olivat UIC60E1-kiskoa eurooppalaisella 1,453 m kiskovälillä ja pölkkyt 2,6 m pitkiä betoniratapölkkyjä 0,6 m pölkkyvälillä. Tukikerros oli 0,3 m paksu, välikerros 0,3 m \geq 120 MPa yläpinnan ratamoduulilla ja \geq 98 % proctor-kokeella mitatulla tiiveydellä, eristyskerros 0,2 m \geq 80 MPa yläpinnan ratamoduulilla ja \geq 97 % tiiveydellä, sekä pengertäyttö \geq 60 MPa yläpinnan ratamoduulilla ja 95 % tiiveydellä. Ensimmäisen alikäytävän ylittävälle raiteelle asennettiin 44 kpl pohjainpölkkyjä eli noin 13 m matkalle sillan keskipisteestä molempiin suuntiin. Käytetyt pohjaimet olivat 10 mm paksuja 0,155 N/mm³ staattisella alustaluvulla, eli normaalin jäykkyyden alarajalta. Ylittävän junan pyöräkuormat arvioitiin mittaamalla kiskon leikkausmuodonmuutokset ennen siltaa. Kiskon pystysiirtymät mitattiin neljästä kohdasta lasermittauksella 4,8 m; 11,4 m; 17,4 m ja 40 m päässä sillan keskipisteestä. Pölkkyjen kiihtyvyydet mitattiin 19 pölkystä kannen yläpuoliselta raiteelta noin 25 m päähän asti. Kiskojen ja pölkkyjen suhteellinen siirtymä laskettiin välilevyjen muodonmuutosten avulla, jotka mitattiin siirtymäalueen ulkopuolelta. Mittaukset suoritettiin molemmilla alikäytävillä alfa pendular-matkustajajunien ajaessa ylikäytävien yli neljä kertaa molempiin suuntiin noin 220 km/h nopeudella. Junissa oli kuusi matkustajavaunua, joiden keskimääräinen akselikuorma oli noin 132 kN. Junien lisäksi raiteilta mitattiin pölkkyjen palautuvia siirtymiä kevyellä pudotuskokeella 15 kN painolla 0,1 m halkaisijan laatalla ja raiteen tärinää reseptanssikokeilla. Reseptanssilla (engl. receptance) tarkoitetaan siirtymää suhteessa raiteeseen vaikuttavaan voimaan, kun raidetta kuormitetaan toistuvasti tietyllä voimalla ja taajuudella.

Vertailtaessa mittaustuloksia AK1:n ja AK2:n välillä tutkijat havaitsivat huomattavia eroja kiskojen ja pölkkyjen palautuvissa siirtymissä. Kiskojen palautuvat siirtymät olivat alikäytävien kesken hyvin samankaltaisia pohjainpölkkyosuuden alkuun asti, mutta pohjainosuuden alkupäässä kiskojen palautuvat siirtymät olivat keskimäärin 129 % suurempia kuin AK2:lla ja käytävän betonikehän vieressä keskimäärin 255 % suurempia. Tutkijat laskivat kahdella tapaa arvion raiteen pystysuuntaiselle kokonaisjäykkyydelle siltakehän loppumiskohdasta 40 m päähän absoluuttisista kiskon siirtymistä arvioidulla 66 kN tasaisella pyöräkuormalla ja käänteisestä reseptanssista 25 Hz taajuudella tehdyistä

raiteen reseptanssimittauksista. AK2:lla tulokseksi molemmilla tavoilla saatiin kohtuullisen tasaisesti kasvava kokonaisjäykkyys lähestyttäessä alikäytävää, mutta AK1:llä kokonaisjäykkyyden todettiin laskevan alle 40 m päässä alikäytävästä lasketun arvion siirryttäessä tavanomaisilta pölkyiltä pohjainpölkyille ja sen jälkeen raiteen siirtymästä lasketun tuloksen edelleen laskevan loivasti ja reseptanssista lasketun tuloksen kasvavan loivasti. Pölkyjen pystysuuntaiset maksimikihtyvyydet olivat keskimäärin suurempia AK1:llä kuin AK2:lla ja pohjaimellisella raiteella kiihtyvyyksien maksimi-arvot olivat huomattavasti suurempia (jopa 5 m/s^2) lähempänä alikäytävää kasvaen kohtuullisen tasaisesti lähestyttäessä kehän seinää laskien hieman kannen päällä. Junan kulkusuunnan ei huomattu vaikuttavan kiihtyvyyteen. Kiihtyvyyden huiput molemmilla alikäytävillä korreloivat samoilla resonanssitaajuuksilla 50 Hz:n asti, mutta pohjaimellisella raiteella kiihtyvyyden amplitudit olivat huomattavasti suurempia erityisesti resonanssitaajuuksilla ja yli 40 Hz taajuuksilla. Pudotuskokeissa pohjainpölkyjen palautuvien siirtymien havaittiin olevan 400–450 μm , kun tavanomaisilla pölkyillä koko matkalla alikäytävän keskipisteestä 26 m päähän tulokset olivat 100–150 μm . Siirryttäessä pohjainpölkyiltä tavanomaisille muutos tapahtui n. 5 m matkalla. Reseptanssisteissä pohjaimellisella alueella reseptanssifunktion huiput olivat huomattavasti pohjaimetonta suurempia ja ne sijoittuivat hieman matalammille taajuuksille ja pohjaimettomilla rataosuuksilla havaitut huiput olivat AK1:n raiteella hieman suurempia ja hieman matalammilla taajuuksilla.

Pohjaimet siis kasvattivat palautuvaa painumaa jopa nelinkertaiseksi pudotuskokeilla mitattuna, laskivat radan reseptanssin resonanssitaajuutta 18 % ja kasvattivat reseptanssin maksimi-arvoa 50 %, sekä laskivat kiskon resonanssitaajuutta 5 % ja kasvattivat reseptanssin maksimi-arvoa 14 %. Pohjainten oletettiin tasoittavan siirtymäalueen jäykkyyseroa penkereen ja alikäytävän välillä, mutta pohjaimet laskivat siirtymäalueen kokonaisjäykkyyttä noin 54 % 5,4 metrin matkalla, mikä oli huomattavasti arvioitua suurempi. Pohjaimettomalla alikäytävällä pelkällä sementillä sidotulla pengertäytöllä saavutettiin tasaisempi kokonaisjäykkyyden muutos siirtymäalueelle. Pohjaimet siis vaikuttivat huomattavasti radan kokonaisjäykkyyteen, joten niiden käytöllä on mahdollista optimoida ratarakennetta kokonaisjäykkyyden muutoskohdissa, mutta tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan tarvittavan lisätutkimuksia, jotta voidaan ymmärtää tarkasti pohjainten vaikutuksia erityisesti pidemmällä aikavälillä. Artikkelissa

ei kerrota kuinka pitkän ajan jälkeen pohjainpölkkyjen asentamisesta mittaukset suoritettiin, mutta suuret palautuvan painuman arvot viittaavat kohtuullisen pian suoritettuihin mittauksiin. Tämä ei välttämättä anna täysin tarkkaa kuvaa pohjainten toiminnasta, sillä niiden paikoilleen asettuminen vaatii aikaa ja junan ylityksiä, mutta tuloksista voidaan nähdä, ettei pohjaimilla välttämättä saada positiivisia vaikutuksia sillan siirtymäalueilla ilman tarkkaa tietoa käytetyn pohjaimen ominaisuuksista ja niiden vaikutusten arvioinnista siirtymäalueen kokonaisjäykkyyteen.

Mottahed, J. et al. tutkimuksessa, jonka tulokset on julkaistu kahdessa artikkelissa “Field and Numerical Investigation into the Effect of Under Sleeper Pads on Dynamic Behavior of Railway Bridges” (Mottahed et al. 2018) ja “A Field Investigation on the Effects of Using USPs in Transition Zone from Ballasted Track to Bridges” (Mottahed et al. 2019), tutkittiin kiskojen ja pölkkyjen kiihtyvyyttä, sekä 15,5 m pitkän kaksiaukkoisen betonisillan kannen kiihtyvyyttä ja siirtymää molempien aukkojen keskikohdalta. Ratakiskot painoivat 60 kg/m, betonipölkkyt 320 kg, pölkkyvälit olivat 0,6 m, tukikerroksen paksuus 0,3 m ja sillan kannen paksuus 0,65 m. Tutkimus tehtiin kolmessa vaiheessa: ensin tavanomaisella ratarakenteella, sitten kun sillan kannella olevan radan pölkkyt oli vaihdettu pohjainpölkkyihin katkaisematta kiskoa ja lopuksi kun pohjainpölkkyt oli vaihdettu myös siirtymäalueille 5 m matkalla sillan molemmista päädyistä. Kaikissa vaiheissa sillan yli ajettiin 80 t dieselveturilla kymmenellä eri nopeudella: 11, 19, 28, 34, 37, 47, 50, 56, 60, 65 ja 75 km/h. Tutkimuksessa käytetty pohjaintyyppi oli Getznerin toimittama 13 mm paksu 0,13 N/mm³ alustaluvun pohjain, eli kohtuullisen paksu ja pehmeä pohjain. Koejärjestely simuloitiin myös elementtimenetelmällä, jonka tulokset varmennettiin kenttäkokeen tuloksilla.

Asentamalla pohjainpölkkyt sillan kannen mitalle kiskon pystysuuntainen maksimikiihtyvyys ensimmäisen aukon keskikohdalla pieneni kaikkien nopeuksien tulosten keskiarvona 34 % ja siirtymäalueiden pohjainpölkkyjen kanssa 35 %. Pölkkyjen maksimikiihtyvyys pieneni vastaavasti 11 % ja 24 %. Sillan kannen maksimikiihtyvyys pieneni 32 % ja 66 % ja kannen siirtymä 19 % ja 20 %. Toisen aukon keskikohdalla tutkimuksessa ei ilmennyt selkeää kiihtyvyyksien pientymistä, paitsi kannen maksimikiihtyvyydessä, jossa pienenemät olivat 47 % ja 66 %. Lisäksi 40–60 km/h nopeuksilla tietyissä tilanteissa havaittiin kiihtyvyyksien jopa kasvavan pohjainten

asennuksen jälkeen. Simuloidut tulokset vastasivat sillan kannen osalta hyvin tuloksia, mutta kiskojen ja pölkkyjen kiihtyvyyksissä ei havaittu selkeää pienenemää, mikä toistui myös kokeen kolmannessa vaiheessa. Tuloksissa on huomattavaa heittelyä eri nopeuksilla, ja pelkällä dieselveturilla koeajaminen ei ole täysin verrattavissa pitkän junan vaikutukseen, mutta tutkimus kuitenkin osoittaa pohjaimilla voitavan saavuttaa huomattavia keskimääräisiä pienentymisiä radan liikkeessä sillalla. Lisäksi käytetyt pölkkyt, pölkkyväli ja tukikerros poikkesivat Suomessa käytettävistä, mutta tulosten voisi olettaa olevan saman suuntaisia suomalaisellakin ratasillalla. Erot siirtymäalueiden pölkkyjen vaihdon jälkeen tilanteeseen, jossa vain sillan kannen päällä olevat pölkkyt oli varustettu pohjaimilla olivat sillan kannen kiihtyvyyksiä vaille yhden prosenttiyksikön luokkaa. Sillan yläpuolisen raiteen tärinään siirtymäalueiden pohjaimilla ei siis ollut suurta vaikutusta, mutta olisi mielenkiintoista nähdä pysyvän ja palautuvan painuman kehitys ajan myötä verrattuna tavanomaiseen rakenteeseen.

Kuten aiemmin mainittu pohjaimilla voidaan vähentää myös kiskon korrugaatiota. Korrugaatiolla tarkoitetaan rataiskon pintaan muodostuvaa suhteellisen jaksottaista aaltomaista epätasaisuutta, joka muodostuu liikennöinnin aiheuttamien dynaamisten kuormien rasittaessa kiskoa ja aiheuttaa dynaamisten kuormitusten kasvua ja ratamelua. Korrugaatiota esiintyy erityisesti radan kaarteissa raiteiden kallistuksista johtuen. Korrugaatio, kuten muutkin epätasaisuudet kiskossa, voidaan poistaa hiomalla, mikä on kallis kunnossapitotoimenpide. (Kauppinen 2011, s. 48–50) Korrugaatio voidaan jakaa eri luokkiin aallonpituuden tai syntymekanismien mukaan. Näistä pohjaimilla voidaan vähentää erityisesti pitkäaaltoista korrugaatiota vähentyneiden tyhjätilojen ja pienentyneiden dynaamisten voimien ansiosta (Kuula et al. 2017, s. 88–89). Harold Loyn (2008) artikkelin mukaan Innsbruckin yliopiston vuonna 2001 tekemässä tutkimuksessa (Prager & Kopp 2001) pohjaimet vähensivät kiskon korrugaatiota kaarteissa 28 miljoonan bruttotonnin jälkeen noin puoleen pohjaimettomasta raiteesta, jossa korrugaatio oli keskimäärin 0,15–0,18 mm. Myös korrugaation keskimääräinen pituus oli lyhyempää pohjaimellisessa raiteessa. Kaarteissa yleisesti esiintyvän korrugaation vuoksi Itävallassa ja Saksassa pohjaimet ovat vakiovaruste tiukoissa eli alle 500 m säteisissä kaarteissa (Potocan & Dorfner 2013).

2.3 Vaikutus tärinään ja runkomeluun

Pohjainten vaikutusta tärinään on tutkittu useissa eri maissa, mm. Australiassa (Jayasuriya et al. 2017), Iranissa (Zakeri et al. 2014), Itävallassa (Loy 2008; UIC 2009; Loy 2012), Kroatiassa (Lakusic et al. 2010), Puolassa (Zbiciak et al. 2020), Ruotsissa (Johansson et al. 2008; Nielsen et al. 2010), Saksassa (Stahl 2005), Venäjällä (Kaewunruen & Remennikov 2015; Kaewunruen et al. 2017) ja myös Suomessa (Peltonen & Backholm 2009; Varis 2018; Väylävirasto 2021). Näissä tutkimuksissa tutkittiin pohjaimen vaikutusta ratatärinään simulaatioilla, laboratoriokokeilla ja koekäytöillä, mutta usein osana kokonaisvaltaisempaa pohjainten vaikutusten tutkimusta.

Staatinen ja dynaaminen alustaluku eli käytännössä pohjaimen jäykkyys ovat määräävät parametrit pohjaimen tärinänvaimennuskykyyn (Zbiciak et al. 2020). Mitä joustavampi pohjain on, sitä paremmin se vaimentaa maaperän tärinää, mutta erittäin joustavat pohjaimet yleensä kasvattavat kiskon ja pölkkyjen palautuvaa siirtymää verrattuna tavanomaiseen rataan, mikä voi aiheuttaa ilmamelua. Wollogongin yliopiston tutkimuksessa (Kaewunruen & Remennikov 2015) pohjainten havaittiin kasvattavan kiskon ja pölkyn tärinää, ja erityisesti suuret iskuvoimat voivat aiheuttaa korkeampia värinän amplitudeja kuin tavanomaisessa ratarakenteessa. Radan osien tärinä voi aiheuttaa maassa kulkevaa tärinää, joten erityisesti pehmeissä maissa pohjain saattaa jopa kasvattaa runkomelua. Kiskojen ja pölkkyjen tärinän lisääntyminen toistui useissa tutkimuksissa (mm. Nielsen et al. 2010), mutta tästä huolimatta pohjainten todettiin valtaosassa tapauksista vaimentavan maaperään säteilevää tärinää ja melua, kuten seuraavista tutkimuksista käy ilmi.

W. Stahlin Münchenin yliopistolle vuonna 2005 tekemässä tutkimuksessa (Stahl 2005) pehmeillä pohjaimilla saavutettiin huomattavasti pienempiä tärinän nopeuksia pohjainpölkkyjen alapuolisessa tukikerroksessa yli 16 Hz taajuuksilla, mutta hieman suurempia nopeuksia tätä pienemmillä taajuuksilla. University of Zagrebin (Lakusic et al. 2010) tutkimuksessa kahden pölkyn mittaisilla koeraiteilla saatiin pudotuskokeilla samankaltaisia tuloksia.

Chalmersin teknillisen yliopiston tutkimuksessa (Johansson et al. 2008) selvitettiin erityyppisten pohjainten vaikutusta pyörä-kisko vuorovaikutukseen DIFF- ja

GroundVib-simulaatioilla. DIFF-simulaatiolla laskettiin pyörien ja kiskojen välisiä voimia, kiskojen ja pölkkyjen siirtymiä, niiden värinän nopeuksia sekä kiihtyvyyksiä, kiskojen taipumia ja pölkkyihin välilevyistä ja tukikerroksesta kohdistuvia voimia. GroundVib-simulaatiolla laskettiin pölkkyjen siirtymiä ja niiden värinän nopeuksia sekä kiihtyvyyksiä. Simulaation pohjalta nähtiin, että jäykempi pohjaintyyppi pienentää kiskojen taipumia, kiskojen siirtymiä sekä siirtymänopeuksia ja pölkkyjen siirtymiä, nopeuksia sekä kiihtyvyyksiä, mutta kasvattaa pölkkyjen ja tukikerroksen välisiä kuormia verrattuna taipuisampaan pohjaimeen. Pohjainten jäykkyydellä ei ollut huomattavaa vaikutusta kiskojen ja pyörien välisiin voimiin, kiskojen kiihtyvyyksiin ja kiskojen kiinnikkeiden kuormiin. Lisäksi pohjaimet vaikuttivat pääasiassa alle 250 Hz:n taajuudella tapahtuvaan värinään.

Iran University of Science and Technologyn tutkimuksessa (Zakeri et al. 2014) tutkittiin kahden eri pohjaintyyppin, SLB 3007 ($C_{stat} = 0,3 \text{ N/mm}^3$) ja SLS 1308 ($C_{stat} = 0,13 \text{ N/mm}^3$), vaikutusta maan värinään kaksiraiteisella testiradalla Miandarrehin ja Abgarmin välillä. Toiselle raiteelle asennettiin 90 m matkalle 25 kpl SLB 3007-pohjaimilla varustettua pölkkyä, sitten 100 kpl SLS 1308-pohjaimilla varustettua pölkkyä ja viimeiset 25 pölkkyä jälleen SLB 3007-pohjaimilla. Raiteet olivat 60 E1-kiskoilla, betonipölkkyillä ja sepelipenkereellä tiivistyneen saven päälle rakennettuja. Värinämittaukset toteutettiin 12 geofonilla asennettuna pehmeillä pohjaimilla rakennetun osuuden keskikohdalle molemmilta raiteilta ulospäin 0, 3, 7, 11, 15 ja 19 metrin päähän kohtisuoraan rataa nähden samanlaisten matkustajajunien ajaessa raiteilla 80 km/h. Mittaustulosten tarkasteluun valittiin yhden junaparin tulokset. Ohituksen aikaisten mittausten värinän nopeuksien neliölliset keskiarvot laskettiin kullekin geofonille. Mittapisteidien maan värinän nopeus laski karkeasti suhteessa etäisyyden neliöön siirryttäessä pois päin raiteilta. Kaikkien mittapisteidien värinän nopeuksien neliöllisten keskiarvojen neliöllinen keskiarvo tarkasteltuna taajuusalueella 0,5–200 Hz oli pohjaimettomalla raiteella 2,90 mm/s ja pohjaimellisella 1,83 mm/s, eli keskimäärin pohjaimet toivat n. 1 mm/s vaimennuksen värinän nopeuteen. Lisäksi mittaustuloksista laskettiin läpäisyvaimennus kullakin mittapisteellä. Läpäisyvaimennukset ja prosentuaaliset vaimennukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tärinän nopeuden neliöllisen keskiarvon absoluuttinen ja prosentuaalinen vaimennus mittauspisteittäin.

Etäisyys [m]	Läpäisyvaimennus [dB]	Prosentuaalinen vaimennus [%]
0	1,75	18,25
3	7,82	59,34
7	5,69	48,09
11	4,38	39,61
15	4,59	41,05
19	0,74	8,22

Tehokkainta tärinänvaimennus oli siis 3 m päässä raiteesta 7,82 dB:n eli n. 59 %:n vaimennuksella. Tarkasteltaessa mittauspisteiden läpäisyvaimennusta eri taajuuksilla nähdään kuvaajien olevan hyvin samankaltaisia yli 30 Hz:n taajuuksilla, mutta tämän alapuolella 0 m ja 3 m tulokset heittelevät verrattuna muiden mittauspisteiden tuloksiin, eli etäisyys ei yli 3 m päässä vaikuttanut merkittävästi läpäisyvaimennuksen taajuuksiin. Merkittävimmät läpäisyvaimennuksetvaimennukset kaikilla mittauspisteillä sijoittuvat 40–80 Hz taajuuksille, mutta vaimentumista havaittiin raportin mukaan 200 Hz:in saakka. Mittapisteiden läpäisyvaimennuksien keskiarvo taajuusvälillä 40–200 Hz oli 4,4 dB. Kaikilla mittapisteillä läpäisyvaimennuksen maksimi, joiden keskiarvo oli 6,7 dB sijoittui 50 Hz:n kohdalle. Alle 40 Hz:n taajuuksilla havaittiin huomattavaa tärinän voimistumista.

Varsovan yliopiston laboratoriokokeissa (Zbiciak et al. 2020) tutkittiin kahta polyuretaanipohjaintyyppiä ja kahta kumipohjaintyyppiä. Pohjaimista selvitettiin staattinen ja dynaaminen alustaluku, joita käytettiin elementtimenetelmämallinnuksessa lähtötietoina. Elementtimenetelmälaskennalla kaikille pohjainmateriaaleille selvitettiin kolme ominaisuutta: pystysuuntaisen siirtymän magnitudi tietyllä taajuusalueella vasemman kiskon yläpinnassa, transmissibiliteetin funktio taajuuden suhteen ja läpäisyvaimennus. Transmissibiliteetillä tarkoitetaan rakenteen läpäisseen tärinän intensiteettiä suhteessa rakenteeseen säteilevään tärinään, eli kuinka paljon rakenne suhteellisesti vaimentaa tärinää. Elementtimenetelmäanalyysistä saatiin staattinen siirtymä referenssiradan ja pohjaimilla eristettyjen ratojen välillä, luokiteltua pohjaimet pehmeisiin, normaaleihin ja jäykkiin ja tärinäeristykseen suuruus. Erittäin pehmeä

polyuretaanipohjainen 13 mm paksu USP 018, joka oli tutkituista pohjaimista pehmein, kasvatti pystysuuntaista siirtymää 5,8 mm sekä vaimensi tärinää laajimmalla taajuusvälillä 12,4 Hz:stä ylöspäin. Jäykkä styreenibutadieenikumipohjainen 5 mm paksu USP 036, joka oli pohjaimista jäykin, kasvatti siirtymää 0,56 mm sekä vaimensi tärinää pienimmällä taajuusvälillä 18,6 Hz:stä ylöspäin. Pehmeä styreenibutadieenikumipohjainen 10 mm paksu USP 075 kasvatti siirtymää 2,17 mm ja vaimensi tärinää 15,9 Hz:stä ylöspäin. Normaali-jäykkyyksinen polyuretaanipohjainen 8 mm paksu USP 095 kasvatti siirtymää 1,29 mm ja vaimensi tärinää 16,7 Hz:stä ylöspäin. Tärinänvaimennuksen alkamistaajuuksien jälkeen kaikkien pohjainten läpäisyvaimennuksen kuvaajat olivat hyvin samankaltaisia, mutta pehmeämpien pohjainten läpäisyvaimennus oli huomattavasti tehokkaampaa kuin normaalijäykkyyksisellä ja jäykällä pohjaimella. USP 018:n läpäisyvaimennus oli korkeimmillaan n. kolminkertainen USP 075:en ja USP 095:en verrattuna. Huomattavat piikit läpäisyvaimennuksessa havaittiin kaikilla neljällä pohjaimintyyppillä n. 25 Hz ja 65 Hz taajuuksilla.

Pohjaimilla saavutettavan tärinänvaimennuksen lisäksi niiden käytöllä voi myös olla pitkällä aikavälillä positiivisia vaikutuksia tärinään. Kuten kappaleessa 2.1 on todettu ajan kanssa syntyvien pistemäisten geometriaongelmien ja tukeutumattomien pölkkyjen väheneminen pohjaimen käytön myötä vähentävät junan aiheuttamia iskuvoimia, jotka aiheuttavat huomattavaa tärinää ja melua ympäristöön. Nämä ovat erityisesti vanhemmilla radoilla huomattava tärinän ja melun aiheuttaja radan lähiympäristöön varsinkin lovipyörävaunujen liikkussa radalla, joten teoriassa pohjainten käytöllä pitäisi saavuttaa pitkällä aikavälillä positiivisia vaikutuksia ainakin radan lähiympäristön viihtyvyyteen. Tutkimuksia pohjaimen tärinävaikutuksesta riittävän pitkällä aikaväleillä ei kuitenkaan löytynyt, joten raidegeometrian hitaamman heikkenemisen vaikutuksesta tärinään ei ole tutkimustietoa.

Suomessa tehdyistä tutkimuksista Kouvolan ja Oulun elastisten vaihteiden tutkimuksissa runkomelua ja tärinää ei tarkasteltu erikseen, mutta elastisen vaihderakenteen tarkoitus ei ole tärinän vaimennus vaan dynaamisten kuormitusten vaimentaminen ja siten vaihteen geometrian pysyvyyden parantaminen. Tämän vuoksi niissä käytetään jäykkiä pohjaintyyppisiä, joiden ei pitäisi merkittävästi vaimentaa tärinää. Kehäradan elastisten

vaihteiden tutkimuksessa (Varis 2018, s. 21–22) mitattiin myös pohjainten vaikutusta tärinään asentamalla pysty- ja poikkisuuntaista kiihtyvyyttä mittaavat anturit molempiin raiteisiin suoralle pohjaimilla varustetulle osuudelle noin pölkyn alapinnan tasolle (kv - 30 cm) raiteiden keskilinjojen ja raiteiden puolivälin kohdalle. Näin saatiin aikaan mittausjärjestely, jossa voitiin mitata värähtelyä junan alta, 2 metrin päässä radasta ja 4,5 metrin päässä molempiin suuntiin ajettaessa. Mittaukset suoritettiin pääkaupunkiseudun lähiliikenteen Sm5-junan ylittäessä mittauspisteet (Varis 2018, s. 44)

Mittaustuloksista nähdään eteläisellä eli pohjaimilla varustetulla raiteella pystysuuntaisen kiihtyvyyden olleen hieman suurempaa, kuin pohjoisella pohjaimettomalla raiteella. Tarkasteltaessa kiihtyvyyden amplitudia suhteessa värähtelytaajuuteen nähdään, että taajuusalueella 0–70 Hz raiteiden välillä ei syntynyt merkittävää eroa, mutta taajuusalueella 70–120 Hz eteläisellä raiteella esiintyi melkein kolminkertaisesti suurempia amplitudeja kuin pohjoisella raiteella. Vertaillessa raiteiden keskilinjoilta mitattuja kiihtyvyyksiä raiteiden välistä mitattuihin huomataan pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvojen pienentyneen huomattavasti, mutta vaakasuuntaisen kiihtyvyyden pysyneen melkein yhtä suurena. Raiteiden keskilinjojen välisiä kiihtyvyyksiä vertailtaessa nähdään raidevälin matkalla värähtelyn vaimentuneen käytännössä kokonaan. (Varis 2018, s. 44–46)

Jäykkä pohjain siis aiheutti tässä mittauskohteessa huomattavaa suhteellista kasvua pystysuuntaisessa kiihtyvyydessä, mutta absoluuttiset kiihtyvyyden arvot olivat melko pieniä, sillä rakenne ja pohjamaa eivät olleet erityisen alttiita tärinälle. Kohteessa ei siis todennäköisesti synny runkomelua läheisissä rakenteissa, mutta tutkimuksessa todetaan, ettei kohteessa käytetty jäykkä ($0,3 \text{ N/mm}^3$) pohjain sovellu nopeiden värähtelyjen vaimentamiseen. (Varis 2018, s. 44–46)

Kehäradan tutkimuksen lisäksi pohjainten tärinänvaimennusta on tutkittu Suomessa keväällä ja kesällä 2009 Vantaan Myyrmäessä Akukon Oy:n suorittamissa tutkimuksissa (Peltonen & Backholm 2009). Tutkimuksessa Vantaankosken kaksoisraideradalla Myyrmäessä mitattiin ensin maaliskuussa 2009 junaliikenteen aiheuttamaa runkomelua radasta noin 12 m päässä sijaitsevassa kellaritilassa, 14,5–18 m sijaitsevassa autokatoksessa ja 41–64 m sijaitsevissa runkomelueristetyissä asunnoissa. Mittausten

aikana raiteella kulki pääasiassa Sm1-, Sm2- ja Sm4-junia. Näiden mittausten jälkeen läntiselle, eli lähempänä rakennuksia sijaitsevalle radalle, asennettiin pohjaimet 55 metrin osuudelle. Mittaukset toistettiin pohjainten asentamisen jälkeen kesäkuussa 2009 valtaosin samoista mittauspisteistä, mutta lisäksi runkomelua mitattiin 6,5 m päässä läntisestä raiteesta keskeltä pohjaimellista rataosuutta ja 5,5 m päässä hieman ennen pohjainosuuden alkua. Tutkimuksessa käytetty pohjaintyyppi oli 15 mm paksu Getzner Sylomer SLS 1010G, jonka alustaluku on $0,1 \text{ N/mm}^3$ eli se on hyvin pehmeä pohjaintyyppi.

Tutkimuksessa verrattiin läntisen ja itäisen raiteen A-painotettuja värähtelynopeustasoja pohjaimellisen osuuden keskikohdan länsipuolella sijaitsevan mittapisteen 3 kohdalla, sekä referenssinä ennen pohjaimellista osuutta radan länsipuolella sijaitsevan pisteen 9 kohdalla. Vertailussa käytettiin aina saman junarungon aiheuttamaa herätettä sen kulkiessa itäistä raidetta pohjoiseen ja läntistä etelään. Lisäksi verrattiin kellarissa, asunnoissa ja autokatoksessa syntynyttä A-painotettua runkomelua ennen pohjainten asennusta ja niiden jälkeen.

Pisteessä 3 eristetyn raiteen värähtelynopeustasot olivat kaikilla junatyypeillä keskimäärin 4 dBA pienempiä, kuin eristämättömän raiteen. Tasoerotuksessa ei huomioitu raiteiden välistä etäisyysvaimennusta, mikä kertoo pohjaimen eristäneen runkomelua radan lähellä mitattua enemmän, koska eristämättömästä raiteesta lähtevä runkomelu kulkee pidemmän matkan maassa ennen mittauspistettä. Radasta 12 m päässä sijaitsevassa kellaritilassa ei havaittu merkittävää eroa maaliskuun ja kesäkuun mittauksissa, mikä johtuu rakennuksen runkomelueristyksestä: pohjaimen eristävä vaikutus on huomattavasti pienempi, kuin rakennuksen runkomelueristykseen, joten pohjaimen lisäämisestä ei synny suurta vaikutusta. Kauempana radasta sijaitsevien rakennusten mittauksissa maaliskuun ja kesäkuun tulosten erot olivat vaihtelevia, sillä mittauspisteisiin kantautui niiden sijaintien vuoksi runkomelua laajemmalla rataosuudelta ja siten myös pohjaimellisen alueen ulkopuolelta.

Kiinnostavimmat tulokset ovatkin yksittäisten junarunkojen aiheuttamien runkomelutasojen erot pisteen 3 kohdalla mitattuina. Sm1-junalla pohjaimellisen ja pohjaimettoman raiteen ero oli jopa 7,5 dBA, mutta radalla liikennöi vain yksi Sm1-

junarunko, joten satunnaisvaikutus voi olla merkittävä. Sm2-junilla keskimääräinen tasoerotus oli 6,0 dBA ja mittausten aikana rataa käytti useita eri Sm2-junarunkoja. Sm4-junilla keskimääräinen tasoerotus oli vain 2,1 dBA. Peltosen ja Backholmin mukaan tämä yllättävän pieni vaimennus runkomelussa johtui junatyypin tuottamasta matalataajuudesta tärinäherätteestä, jota esiintyi myös pohjaimettomalla rataosuudella. Matalataajuinen heräte on voinut resonoida raiteiden pohjarakenteiden kanssa, mikä lisää runkomelua.

Eri junatyyppien taajuusjakaumien eristävyysien tarkasteluissa Sm1-junalla runkomelu oli vähäisempää pohjaimellisella rataosuudella taajuusalueella 50–200 Hz, mutta 40 Hz kohdalla hieman suurempaa. Tutkimuksessa todetaan tämän matalien taajuuksien tuloksen olevan epäluotettava, sillä mittauspisteisiin ei ollut kantautunut riittävästi signaalienergiaa. Sm2-junalla runkomelun eristystä esiintyi 40–200 Hz taajuusalueella ja eristykseen pientä heikkenemistä 30 Hz kohdalla, eli hieman matalammilla taajuuksilla kuin Sm1-junalla. Sm4-junalla eristystä esiintyi 63–200 Hz taajuusalueella, mutta matalilla taajuuksilla (noin 30–40 Hz) jopa yli 10 dB voimistumista.

Nykyään Sm1-junat on poistettu käytöstä ja Sm2-juniakin on vähennetty liikennöintikäytössä. Tutkimuksen tekoaikaan uusia Sm5-junia oltiin ottamassa käyttöön, joten Akukon teki niillä mitattuihin herätteisiin laskennallisen arvion vaimennuksesta erillisessä raportissaan 'Raideliikenteen runkomelun tutkimuksia. Sm5-junan tyyppimittaukset'. Raportin perusteella Peltonen & Backholm laskivat näillä pohjaimilla voitavan saavuttaa noin 5–6 dBA runkomelueristävyys tai vain noin 2–3 dBA eristävyys, jos käytetään Sm4-junalla mitattuja käyriä, mikä on raportin mukaan perusteltua, sillä myös Sm5-juna tuottaa huomattavia määriä matalataajuisia tärinää.

2.4 Kustannusvaikutukset

Pohjainten positiivisten vaikutusten avulla on mahdollista saavuttaa huomattavia säästöjä ratarakenteen elinkaaren aikana. Getznerin (Getzner 2016) mukaan Grazin teknillisen yliopiston tutkijoiden ja ÖBB:n yhteisissä tutkimuksissa (Auer & Schilder 2009, Veit & Marschnig 2009) laskettiin Itävallan radoilla käytettyjen SLB 3007G-pohjainten elinkaaren aikana saavutetut säästöt yli 1500 ratapoikkileikkauksen avulla. Tutkimuksen pohjalta LCC-ratakonsulttiyhtiö laati elinkaarikustannusmallin, jolla voitiin laskea

pohjainten kustannustehokkuutta. Tällä mallilla laskettuna 70 000 tonnin päivittäisellä liikennemäärällä radan elinkaaren aikaiset säästöt olisivat jopa kolmanneksen pienemmät. Pohjainten asennuskustannusten tuottoasteena tämä olisi 16 % tuotto laskettuna 24 € kustannuksilla per pohjain. Yli 5 % tuottoaste, jota ÖBB vaatii käyttöönotettavilta innovaatioilta, saavutetaan 15 € kustannuksilla jo alle 10 000 tonnin päivittäisellä liikennemäärällä. Säästöt koostuvat yli kaksinkertaisen tukemävälän, puolittuneiden ratatöiden aiheuttamien liikennehaittojen ja neljänneksellä pidentyneen radan eliniän tuomista säästöistä radan elinkaaren aikana.

Suomessa pohjainten hintana voidaan pitää karkeasti 30 € pölkkyä kohden, mikä on hieman korkeampi kuin Itävallan tutkimuksissa käytetyt ja siten tämän elinkaarilaskennan tuottoja ei voi pitää suoraan vertailukelpoisina Suomen olosuhteissa. Arvioimalla taulukosta 30 € kustannuksilla per pohjain 5 % tuottoaste voitaisiin saavuttaa suunnilleen 15 000 tonnin päivittäisellä liikennekuormalla eli noin 5,5 miljoonan tonnin vuosittaisella liikennekuormalla. Väyläviraston vuosittain julkaisemista rataosuuksien liikennemääristä (Väylävirasto 2020) nähdään vuonna 2019 yli 5,5 miljoonaa bruttotonnia liikkuneen mm. kaikilla Helsinki-Oulu pääradan, Oulu-Vartius-radana, Tampere-Jyväskylä-Iisalmi-radana, Riihimäki-Imatra-radana ja Tampere-Kokemäki-radana rataosuuksilla. Pohjaimilla saavutettavien kustannussäästöjen pitäisi olla Suomen poikkeavista rataolosuhteista huolimatta saman suuntaisia kuin Itävallassa. Pohjaimilla olisi teoriassa mahdollista saavuttaa huomattavia säästöjä ratojen ylläpidon tuomissa kustannuksissa erityisesti pääradoilla, joilla liikkuu valtaosa Suomen sisäisestä ja Venäjältä Itämerellä tulevasta tavaraliikenteestä. Pohjainten pitäisi kyetä tasaamaan lovipyörien aiheuttamia iskuvoimia ja siten pienentää merkittävästi huonokuntoisten raskaiden kuljetusten aiheuttamaa ratasepelin kulumista ja kiskojen korrugaatiota. Tämä on erittäin karkea arvio, joka pohjautuu erilaisissa olosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin, joten vastaavanlainen laajan mittakaavan kustannusvaikutusarvio tulisi tehdä Suomessa asiantuntijoiden toimesta.

Vaihteissa pohjainten tuoma lisäkustannus on häviävän pieni osa kokonaiskustannuksista, koska vaihteet ovat kalliita radan erikoisrakenteita. Esimerkiksi uuden lyhyen vaihteen kustannuksista, jotka ovat lähtökohtaisesti yli 100 000 €, pohjainten tuoma 2000–3000 € lisäkustannus olisi kahden prosentin luokkaa. Vaihteiden tuenta on myös haastavaa

tavallisia ratapölkkyjä pidempien vaihdepölkkyjen ja kahden raiteen yhdistymisen takia, mikä johtaa linjaraitteen tuentaa todennäköisemmin huonommin onnistuneeseen tuentaan. Tästä johtuen vaihteissa pohjaimilla saavutettavat vaikutukset geometrian pysyvyyteen voivat tuoda suuren vaikutuksen vaihteiden kunnossapitokustannuksiin. Muita pohjaimilla saavutettavia mahdollisia kustannussäästöjä ovat madalletun tukikerroksen tuomat sepelisäästöt, pienemmät louhintakustannukset tunneleissa ja pienemmät sillan kannen rakentamisen kustannukset matalampien reunapalkkien ansiosta, sekä säästöt tärinä- ja runkomelueristyksissä. Näistä ei ollut saatavilla tutkimustietoja pohjainten vaikutuksesta kustannuksiin, mutta kaikki nämä rakenteet ovat huomattavan kalliita osia rataverkkoa, joten myös potentiaaliset säästöt ovat suuria.

3 POHJAIMET SUOMEN RATAVERKOLLA

Pohjainten käyttö Suomen rataverkolla on tähän mennessä ollut hyvin vähäistä. Niitä on käytetty lähinnä elastisissa vaihteissa sekä muutamissa muissa kohteissa, mutta viime vuosina käyttö on hieman yleistynyt. Pohjainten käytön nykyistä tilannetta selvitettiin Suomessa tehtyjen tutkimusten kirjallisuuskatsauksella, joiden tuloksia on käyty läpi kappaleessa 2 ja haastatteleamalla kolmea suomalaista pohjainasiantuntijaa sekä pölkky- sekä pohjaintoimittajien edustajia. Haastatellut asiantuntijat olivat Väyläviraston radan päällysrakenteen asiantuntija Tuija Myllymäki, joka on ollut mukana elastisten vaihteiden kehitystyössä, sekä Tampereen yliopiston tutkijat Heikki Luomala ja Riku Varis, jotka ovat tehneet Väylävirastolle useita tutkimuksia, joissa pohjaimet ovat olleet osana tutkimusta. Pölkky- ja pohjaintoimittajien edustajilta hankittiin tietoa lähinnä kohteista, joihin pohjainpölkkyjä on toimitettu.

Vantaan Myyrmäen pohjainkokeilu oli todennäköisesti ensimmäinen pohjainten käyttökohde Suomessa. Ainakaan raportteja tätä aiemmista pohjainhankkeista ei ole saatavilla. Tämän jälkeen niitä on käytetty pääasiassa elastisissa vaihteissa, joissa ne ovat vakiovaruste. Asiantuntijoiden ja pölkkytoimittajien mukaan ensimmäiset elastiset vaihteet asennettiin Kouvolaan, minkä jälkeen niitä on asennettu ainakin Kauhavalle, Seinäjoelle, Kehäradalle Asolaan ja tunneliin, Oulun ratapihalle, Tampereen kansiareenan alle ja rataoppimiskeskukselle. Vaihteiden lisäksi pohjaimia on käytetty ainakin Jyväskylä-Äänekoski-radon perusparannuksessa vuonna 2016, Tampereen ratapihalla alikulun sepelitukikerroksen ohentamisen vaikutuksen pienentämiseksi 2010-luvun lopulla, Luumäki-Imatra-radalla runkomelun vaimentamiseen 2010-luvun lopulla, Pori-Mäntyluodon testiradalla vuonna 2020 tärinävaimennuskokeilussa ja 2021 laajemmalla testiradalla tärinävaimennuksen sekä pysyvän painuman ehkäisyn kokeilussa. (Peltokangas et al. 2013, s. 24; Salonen et al. 2017, s. 116; Väylävirasto 2021b; Luomala 2021; Myllymäki 2021; Varis 2021)

3.1 Asiantuntijahaastattelut

Kaikki haastatellut asiantuntijat ovat olleet pohjainten kanssa tekemisissä 2010-luvun alkupuolelta asti, jolloin niiden toimintaa alettiin selvittämään Suomessa laajemmin

elastisten vaihteiden suunnittelun myötä. Tässä vaiheessa pohjaimia oli kokeiltu vain parissa kohteessa ja suomalaista tutkimustietoa ei ollut siten saatavilla, vaan kaikki tieto perustui ulkomaisiin tutkimuksiin. Kouvolassa vertailtiin elastisen vaihteen toimintaa pohjaimilla ja ilman, minkä jälkeen pohjaimet otettiin vakiovarusteeksi elastisiin vaihteisiin. Ensimmäisten kokeilujen jälkeen lyhyitä elastisia vaihteita on käytetty liikenteen solmukohdissa, mutta ne eivät ole vielä vakioratkaisu eivätkä siten korvanneet kokonaan tavanomaisen vaihderakenteen käyttöä. Pitkistä vaihteista 1:15,5 kokeiltiin Oulun Nokelassa, mutta vaihteen toiminnassa ilmenneiden ongelmien vuoksi niitä ei ole käytetty sen jälkeen. Kokoonpanotehtaalla tapahtuneen väärinkäsityksen vuoksi kääntölaite asennettiin väärälle kohdalle ja kun tämä asennuksen jälkeen korjattiin, kääntölaitteiden kohtia ei saatu tuettua kunnolla. Lisäksi vaihteissa ilmeni tukikiskojen kulumista, mikä johtui ilmeisesti venäläisten vaunujen pyöristä ja on sittemmin vähentynyt huomattavasti. Vaihteissa ilmenneet ongelmat eivät siis johtuneet elastisesta rakenteesta ja siten myös näitä vaihteita pitäisi voida käyttää ongelmitta. Muita uutena hankittavia pitkiä vaihteita eli 1:11,1; 1:14; 1:18; 1:26 ja 1:28 vaihteita ei ole kokeiltu elastisena rakenteena vielä lainkaan. Myöskään eri jäykkyyksisten pohjainten käyttöä vaihdealueella ei ole Suomessa vielä kokeiltu.

Vaihteista saadut tulokset ovat olleet positiivisia, mutta vaikutukset eivät ole olleet kovin huomattavia. Toisaalta seuranta-ajat ovat olleet vain joidenkin vuosien mittaisia ja raiteita on tuettu mittausten aikana, joten pohjainten edut eivät ole päässeet täysin esiin. Huonoja puolia pohjainten käytöstä ei ole havaittu, joten pohjainten asentaminen vaihteissa on kannattavaa ja asiantuntijoiden mielestä elastisten vaihteiden käyttöä kannattaisi kasvattaa huomattavasti. Elastinen vaihde ei ole myöskään tavanomaista huomattavasti kalliimpi, sillä valtaosa elastiseen lisätyistä komponenteista korvaa tavanomaisessa olevia komponentteja, eikä siten nosta vaihteen kokonaishintaa kovin paljoa. Vaihteen uusiminen asennustöineen on myös aina huomattavan kallis ratkaisu, joten pohjaimien tuoma kustannusten kasvu on suhteessa kokonaiskustannukseen häviävän pieni.

Linjaraitteilla pohjaimia on asiantuntijoiden mukaan vain yksittäisissä kohteissa. Pohjaimen hinta linjalla on suhteessa kokonaiskustannuksiin suurempi kuin vaihteissa, eikä niiden vaikutuksista ei ole täysin varmaa tietoa, minkä takia pohjainten käyttöä on ollut vaikea perustella tavanomaisella linjaradalla. Pori-Mäntyluodossa pohjaimet otettiin

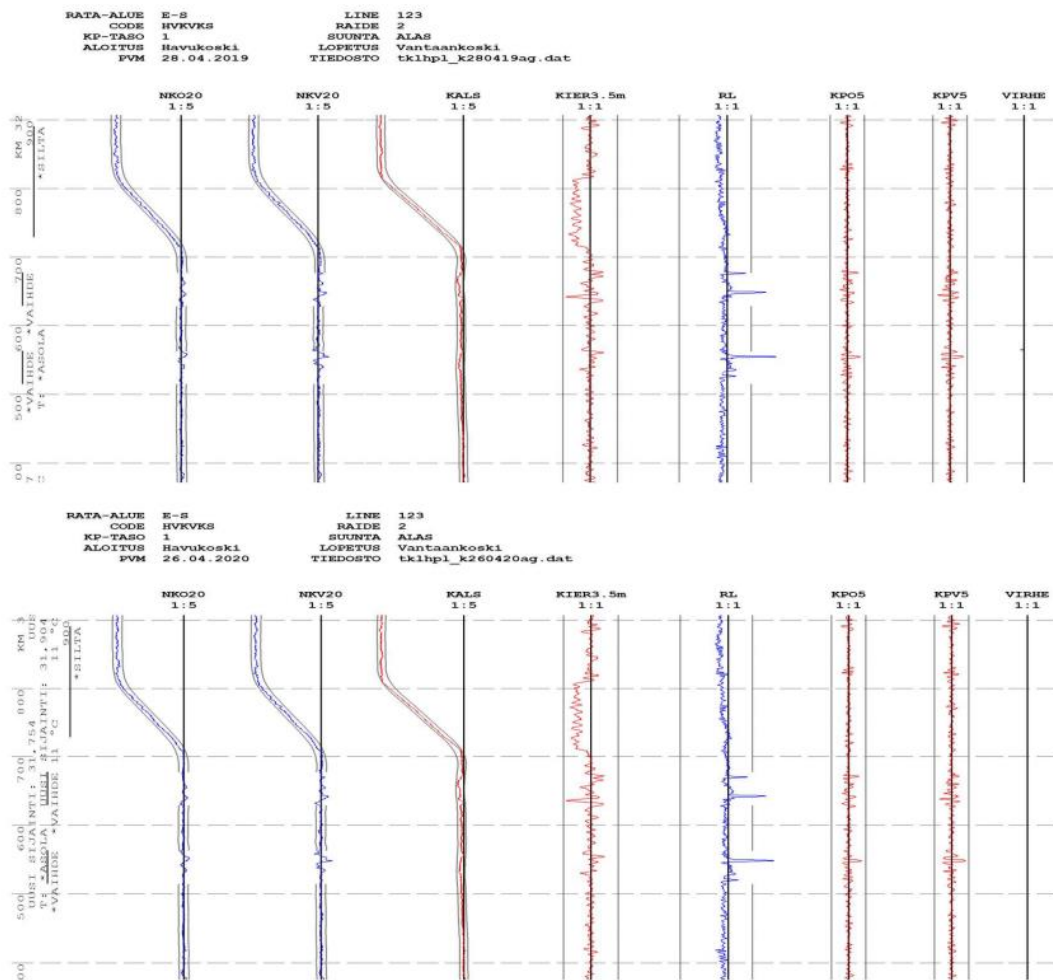
testattavaksi tärinäongelmien ratkaisuun yhdessä komposiittipölkkyjen kanssa. Käytetyt pohjaimet olivat kohtuullisen jäykkiä, minkä vuoksi niillä ei olisi pitänyt olla merkittävää vaikutusta tärinään, mutta yllättäen niillä saavutettiin huomattavaa vaimennusta. Näiden tulosten pohjalta päätettiin kokeilla useita eri pohjaintyyppisiä 2021 tehdyn päällysrakenneturakan yhteydessä, jotta saadaan lisää tietoa erilaisten pohjainten toiminnasta. Suomessa aiemmin tehdyissä kokeiluissa käytetyt pohjaimet ovat olleet jäykkiä pääasiassa niiden halvemman hinnan vuoksi, joten pehmeiden pohjainten toiminnasta ei ole suomalaista tutkimustietoa. Jos näiden jatkotutkimusten tuloksista pohjaimilla nähdään olevan merkittäviä vaikutuksia tärinän ja melun vaimennukseen, niiden käyttö tulee lisääntymään huomattavasti, sillä pohjaimet olisivat erittäin halpa ratkaisu tärinäongelmiin.

Pohjainten toimintaa silloissa ja tunneleissa ei ole asiantuntijoiden mukaan Suomessa tutkittu tai ainakaan julkaistu lainkaan, mutta niissä pohjainten tuoma jousto voisi tuoda huomattavia vaikutuksia johtuen näiden rakenteiden jäykkyydestä. Pohjainten käyttöä siirtymäalueilla voisi myös olla heidän mukaansa hyvä kokeilla, mutta yksi haastateltavista koki, ettei pohjaimilla pitäisi olla merkittävää vaikutusta siirtymäalueen ongelmiin, sillä pohjaimilla saavutettavat edut pysyvän painuman ehkäisyssä olisivat todennäköisesti liian pieniä auttamaan merkittävästi työssynmuodostukseen. Toisaalta vaikka pohjainten vaikutus painumaan olisi merkittävä, ne saattaisivat vain siirtää ongelmakohtaa eteenpäin poistamatta sitä kokonaan. Toisen asiantuntijan mukaan positiivisia vaikutuksia voitaisiin saavuttaa käyttämällä siirtymäalueilla vaihtuvaa pohjainten jäykkyyttä ja siten pitämällä siirtymäalueen jäykkyyden muutokset pieninä.

Haastatellut asiantuntijat ovat olleet mukana useissa Suomessa tehdyissä pohjaintutkimuksissa, erityisesti elastisten vaihteiden kehitystyössä ja kaikki myös Pori-Mäntyluodon testiradan suunnittelussa. Tehdessään pohjaintutkimuksia he ovat olleet yhteydessä Keski-Eurooppalaisiin ja Pohjoismaisiin pohjainasiantuntijoihin, mutta eivät ole olleet mukana ulkomaisissa tutkimuksissa. Joitain vuosia sitten Pohjoismaiden radanhaltijoiden virkamiesyhteistyöryhmissä pohjaimista on yhden haastateltavan mukaan ollut enemmänkin puhetta ja muut Pohjoismaat ovat tutkineet pohjaimia huomattavasti Suomea enemmän, mutta sittemmin kiinnostus pohjaimiin on hieman vähentynyt, eivätkä ne muissa Pohjoismaissa ole vakiovarusteena radoilla.

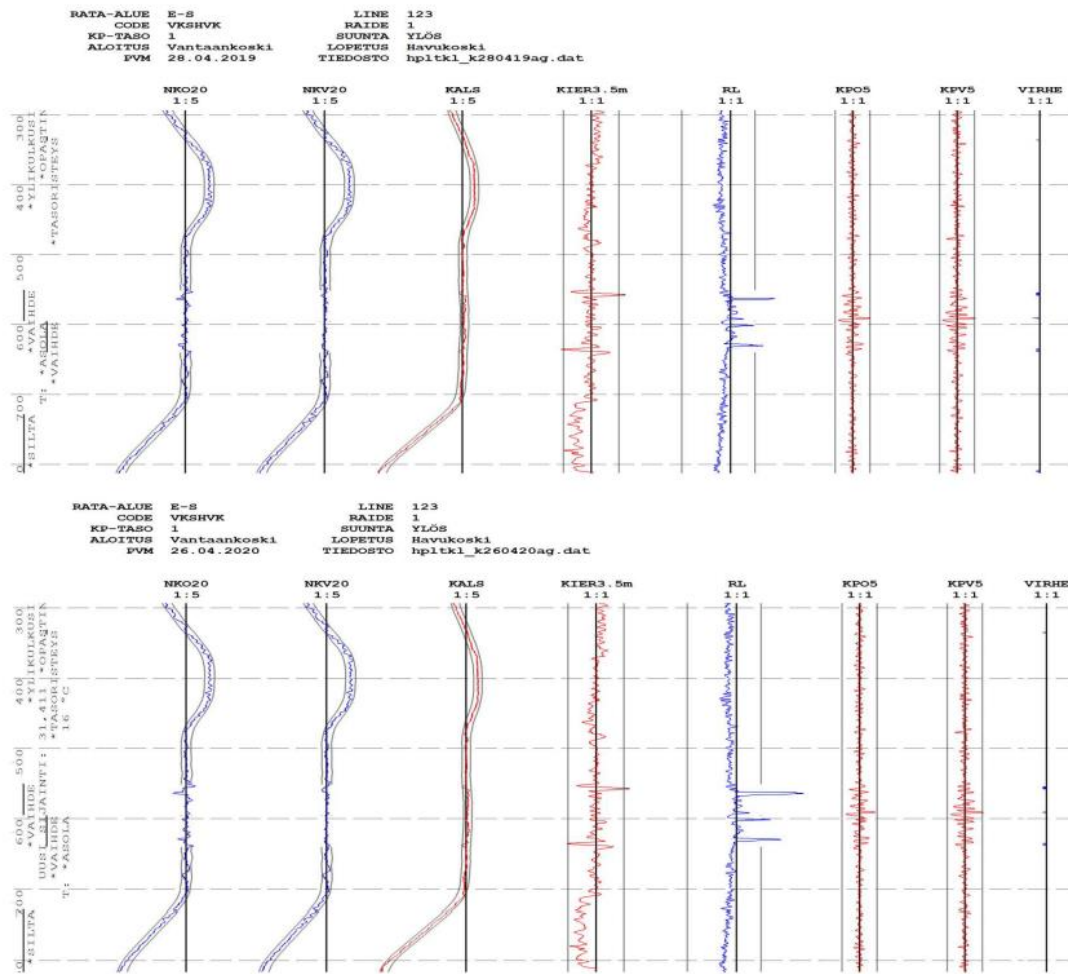
3.2 Pitkäaikaiset muutokset pohjaimilla varustettujen ratojen toiminnassa

Valtaosassa Suomen pohjainkohteista asennuksen jälkeen ei ole tehty radan käyttäytymisen systemaattista seuranta, minkä takia näiden muutaman esiin nostetun tutkimuksen lisäksi pohjainkohteiden toiminnasta painuman ja tärinävaimennuksen suhteen ei ole saatavilla raportteja. Lisäksi pohjaimellisia osuuksia on kohdeltu kuten muutakin rataa eli tuettu toistuvasti peruskunnossapidon mukana, joten pohjainten pitkäaikaisesta vaikutuksesta on vaikea saada dataa. Kehäradan ja Oulun elastisten vaihteiden pitempiä aikaista on analysoitu Variksen ja Luomalan vielä julkaisemattomassa tutkimuksessa (Varis & Luomala, 2021), joka saatiin käyttöön tätä diplomityötä varten. Tutkimuksen mukaan Oulun vaihteiden jatkomittauksissa keskityttiin kiskojen sivukulumisongelmiin, mutta Kehäradan vaihteiden geometrisen kunnan kehittymistä seurattiin alkuperäisen kesäkuusta 2015 toukokuuhun 2017 tarkastelujakson jälkeen huhtikuussa 2019 ja huhtikuussa 2020 suoritettujen EMMA-radantarkastusvaunumittausten sekä alkuperäisen tutkimuksen aikana kaikkiin vaihteisiin kahden pölkyn molempiin päihin asennettujen siirtymäantureiden mittausdatan perusteella huhtikuuhun 2020 asti. Radan käyttäytymistä seurattiin siis säännöllisen liikennöinnin alun jälkeen yhteensä vajaan viiden vuoden ajan, mutta raiteet on tuettu 2016 lokakuun lopussa ja jälleen elokuussa 2020, mikä on aiheuttanut pohjainten sepeliin asettumisen kehittymisen nollautumisen ja siten painumamittauksista ei saada tietoa, miten pohjaimellinen raide käyttäytyisi ilman tukemista tätä pidemmällä aikavälillä. Kolmen ja puolen vuoden tuentavälin mittauksissakin toisaalta pitäisi näkyä eroja, jos pohjaimella on merkittävää vaikutusta raiteen käyttäytymiseen. Raiteiden radantarkastusvaunun geometriamittauksien tulokset huhtikuulta 2019 ja 2020 on esitetty kuvissa 4 ja 5, sekä pölkkyjen pysyvän painuman mittauksien tulokset kesäkuusta 2015 lokakuuhun 2016 kuvassa 8 ja marraskuusta 2016 huhtikuuhun 2020 kuvassa 9.



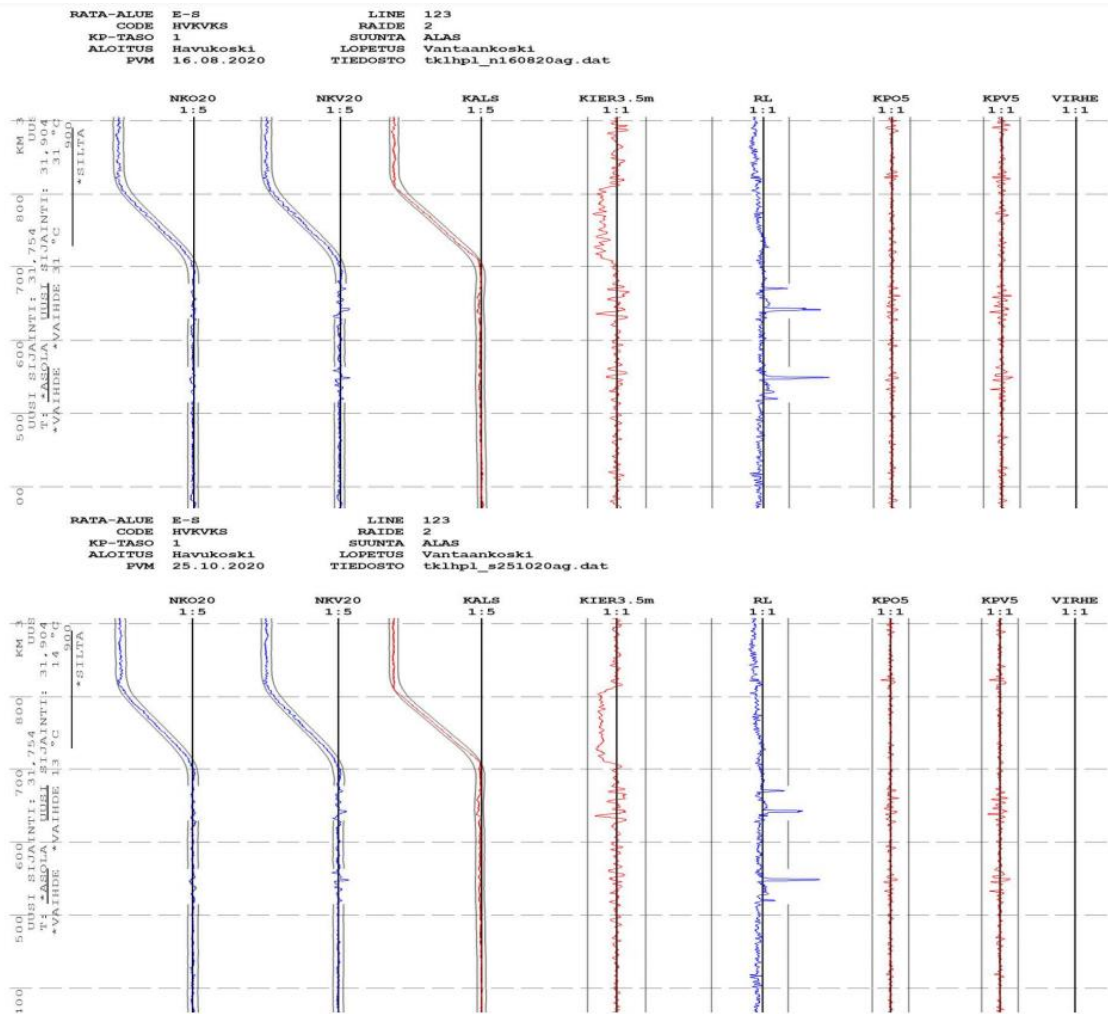
Kuva 4. Eteläisen pohjaimellisen raiteen radantarkastusmittausten tulokset huhtikuulta 2019 ja 2020. Käyrillä ylempi vaihde on V618 ja alempi V617. (Varis & Luomala 2021)

Eteläisellä raiteella 2019 ja 2020 tehtyjen mittausten tulokset ovat lähes identtiset, eli raiteen geometria on pysynyt tämän vuoden ajan käytännössä muuttumattomana ja käytännössä virheettömänä. Tutkimusraportin mukaan näiden mittausten perusteella ei esiintynyt kunnossapitotuennan tarvetta.



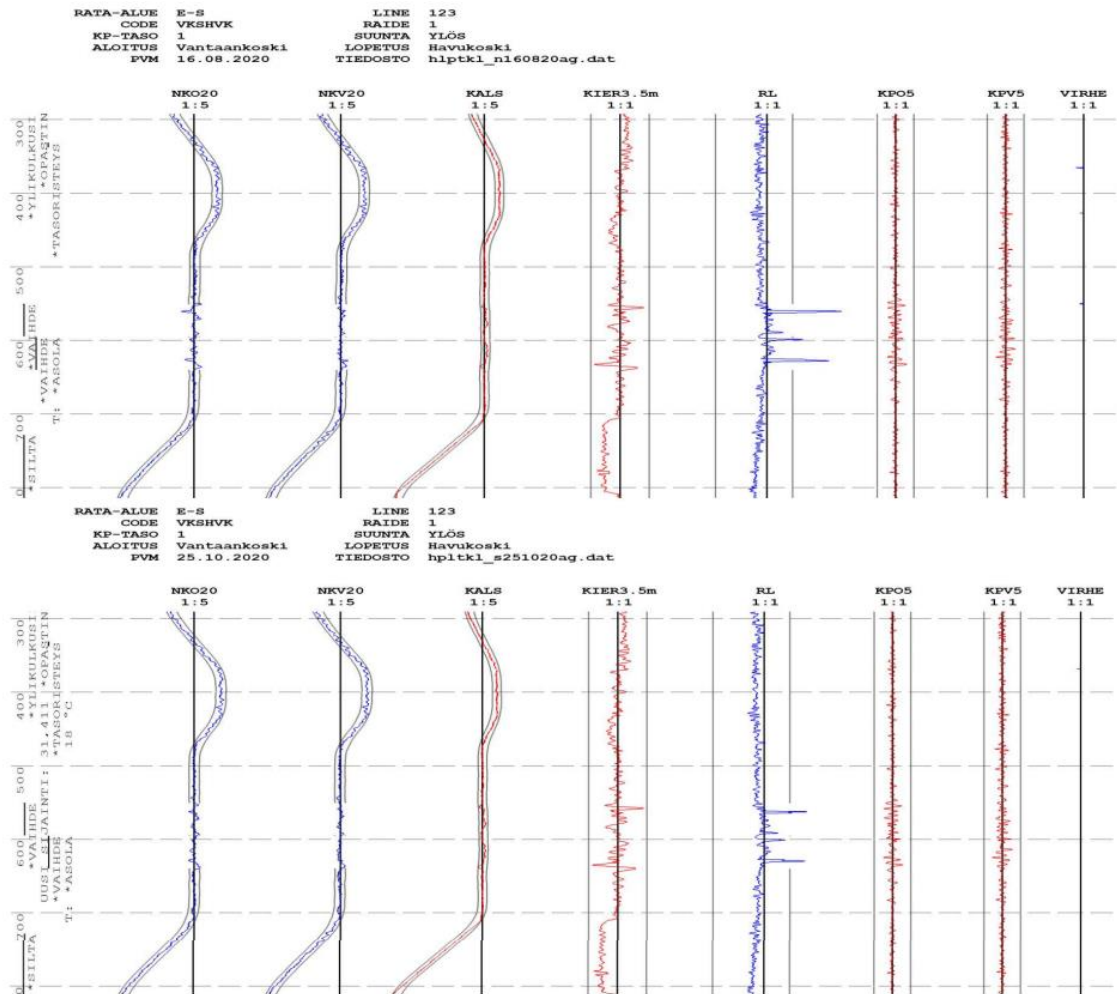
Kuva 5. Pohjoisen tavanomaisilla pölkyillä varustetun raiten radantarkastusmittausten tulokset huhtikuulta 2019 ja 2020. Käyrillä ylempi vaihde on V615 ja alempi V616. (Varis & Luomala 2021)

Verrattaessa pohjoisen raiten tuloksia eteläiseen raiteseen huomataan pohjoisen pohjaimettoman raiten geometriassa merkittävää vaihtelua ja enemmän virherajojen ylityksiä käytännössä kaikissa mittauksissa. D-luokan virherajat ylittyvät kieroudessa molempien vaihteiden risteysten kohdalla ja korkeuspoikkeamassa kärkialueilla. Tähtiluokan virheitä ei kuitenkaan havaittu ja geometria ei ole heikentynyt mittausten välillä, joten Variksen & Luomalan mukaan välittömälle kunnossapitotuennalle ei ole mittausten perusteella tarvetta, joskin geometriaa saataisiin todennäköisesti parannettua tukemalla. Molemmat raitet tuettiin elokuussa 2020 osana koko Kehäradan läpituontaa, jonka jälkeen raitten geometriat mitattiin jälleen elokuussa ja lokakuussa 2020. Näiden mittausten tulokset molemmilla raiteilla on esitetty kuvissa 6 ja 7.



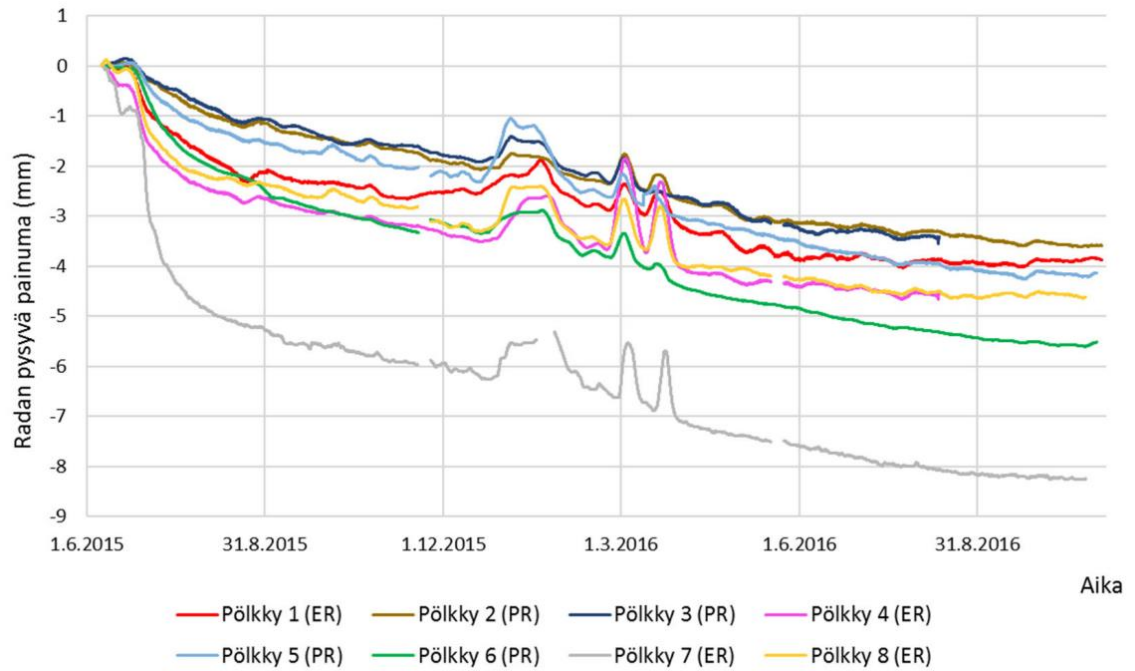
Kuva 6. Eteläisen raiteen radantarkastusmittausten tulokset elokuulta ja lokakuulta 2020. (Varis & Luomala 2021)

Mittauksista nähdään tuennan parantaneen geometriaa, mutta vain hyvin vähän johtuen raiteen hyvästä kunnosta tuettaessa, minkä ansiosta suurille muutoksille ei ole raportin mukaan ollut tarvetta. Lokakuun mittauksissa ei ole huomattavissa käytännössä minkäänlaisia muutoksia, joten raiteen voidaan sanoa olevan tuennan jälkeenkin hyvässä kunnossa.



Kuva 7. Pohjoisen raiteen radantarkastusmittausten tulokset elokuulta ja lokakuulta 2020. (Varis & Luomala 2021)

Pohjoisella raiteella tuennan tuomat muutokset ovat huomattavasti selkeämmät. Valtaosa virheistä on saatu korjattua raiteen pystypoikkeamien ja kierousvirheiden pienennyttyä, ja vaihdealueille on kirjautunut vain yksi nuolikorkeusvirhe. Kierousongelmat ja nuolikorkeudet ovat kuitenkin vaihdealueilla lähellä virherajaa. Lokakuun mittauksissa virherajat eivät ole kuitenkaan vielä ylittyneet ja ainoa vaihdealueiden virhekin on poistunut, joten geometria vaikuttaisi pysyneen muuttumattomana.

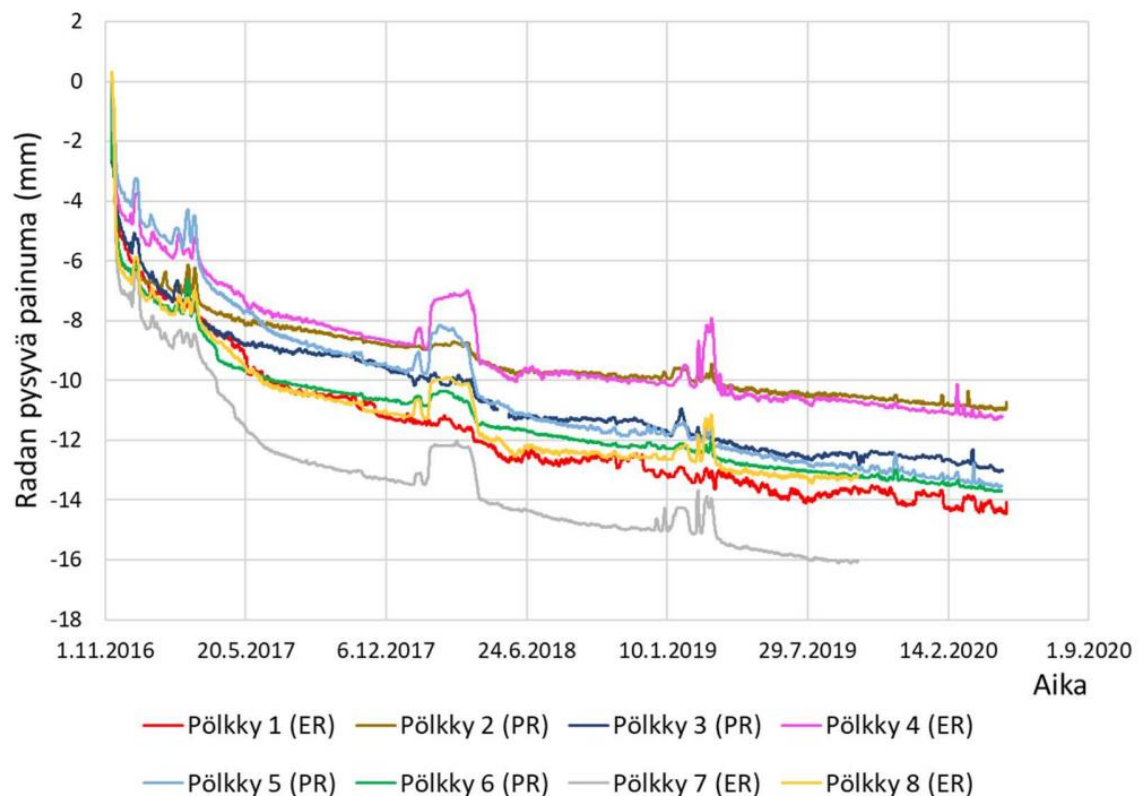


Kuva 8. Pölkkyistä mitattu radan pysyvä painuma kesäkuusta 2015 lokakuuhun 2016. ER tarkoittaa eteläistä pohjaimellista raidetta ja PR pohjoista tavanomaista raidetta. (Varis & Luomala 2018)

Pölkkyt, joihin anturit asennettiin tutkimusta varten, valittiin siten, että molempien raiteiden molemmista vaihteista mitataan vastaavia rakenteita, eli pölkkyt 1 ja 3 ovat vastaavien pohjaimellisen ja pohjaimettoman vaihteen kääntölaitteiden kohdalla olevat pölkkyt, ja vastaavasti 2 ja 4 etujatkosalueen pölkkyt, 5 ja 8 välikiskoalueen pölkkyt, sekä 6 ja 7 matemaattisen pisteen kohdalla olevat pölkkyt. Pölkkyjen sijoittuminen on nähtävissä Variksen ja Luomalalan tutkimuksen liitteestä 1. (Varis & Luomala 2018)

Heti mittausten alkuvaiheessa pohjaimilla varustetun eteläisen raiteen pölkkyt ovat alkaneet painua, toisin kuin pohjoisen, mutta raportin mukaan rakentamisen aikainen liikenne kulki yksinomaan eteläistä raidetta pitkin, joten merkittävämpää on vertailla tuloksia liikennöinnin aloituksen jälkeen heinäkuulta eteenpäin. Liikennöinnin aloituksen jälkeen nähdään pohjaimellisten pölkkyjen painuneen huomattavasti (jopa yli 70 %) tavanomaisen raiteen pölkkyjä enemmän. Tämä asennuksen jälkeinen painuma on pohjainpölkkyille luontaista pohjainten asettuessa paikoilleen sepelin painuessa niihin kiinni, kuten tässä työssä on aiemmin todettu. Noin kahden kuukauden jälkeen pohjainpölkkyjen painuma alkaa hidastua, jonka jälkeen tavanomaisen raiteen pölkkyjen painuman nopeus on keskimäärin suurempaa kuin pohjaimellisten ja painumakäyrät

alkavat lähestyä toisiaan tavanomaisen raiteen painuessa nopeammin. Pohjaimellinen pölkky 7 erottuu muista huomattavasti suuremmalla painumalla, mikä johtunee kyseisen pölkyn rakennuksenaikaisen tuennan epäonnistumisesta. Kahden kuukauden jälkeen tämän pölkyn muita nopeampi painuma kuitenkin tasoittuu ja se on alkanut käyttäytyä muiden pölkkyjen kaltaisesti. Kaikkien pölkkyjen painumissa on myös havaittavissa talviaikaan väliaikaisia n. 1 mm positiivisia muutoksia, mikä raportin mukaan johtuu routanousuista. (Varis & Luomala 2018)



Kuva 9. Pölkkyistä mitattu radan pysyvä painuma marraskuusta 2016 huhtikuuhun 2020. ER tarkoittaa eteläistä raidetta ja PR pohjoista raidetta. (Varis & Luomala 2021)

Marraskuun 2016 tuennan jälkeisistä mittauksista nähdään pölkkyissä tapahtuvan hyvin nopeasti alkuperäisen mittausjakson alun painumiin nähden moninkertaisia painumia, mitkä johtuvat tuennan jälkeisestä tukikerrossepin tiivistymisestä. Tuennan jälkeisestä painumasta huomataan pölkyn 7 käyttäytyneen eri tavalla kuin aiemmin. Liikennöinnin aloittamisen jälkeen kesällä 2015 pölkky alkoi välittömästi painua huomattavasti muita nopeammin, mutta nyt se pysyi ensimmäisten kuukausien ajan huomattavasti lähempänä muiden pölkkyjen painumaa. Keväällä 2017 se kuitenkin jälleen painui huomattavasti

muita nopeammin, mikä Variksen & Luomalan tutkimuksen mukaan voi johtua kevään 2017 äkkinäisistä lämpötilan nousuista, joiden aikana tukikerros on sulanut todennäköisesti hyvin nopeasti ja siten voinut aiheuttaa tietyillä alueilla pysyviä geometrian muutoksia. Pölkyn 7 painuma kuitenkin jälleen tasoittuu ajan kanssa muiden pölkkyjen kaltaiseksi. Toinen poikkeava pölkky on pohjoisella raiteella V615 etujatkoksella sijaitseva pölkky 2, joka on painunut koko seurantajaksolla huomattavasti muita pölkkyjä vähemmän, mikä johtunee hyvin onnistuneesta tuennasta. (Varis & Luomala 2021)

Tuennan jälkeisen nopean painuman jälkeen pölkkyjä 2 ja 7 lukuun ottamatta painuma on ollut n. 3–4 mm puolen vuoden aikana. Tämän jakson jälkeen kaikkien pölkkyjen painuma on hidastunut ja lopun 3 vuoden seurantajaksolla pölkkyt ovat keskimäärin painuneet n. 1 mm vuodessa. Pohjaimellisten pölkkyjen absoluuttiset painumat ovat vielä mittausjakson lopussakin hieman suurempia, kuin pohjaimettomien, mutta erot ovat n. 1 mm luokkaa eli hyvin pieniä. Pohjaimellisten pölkkyjen käyristä on kuitenkin havaittavissa painuman hidastumista toisin kuin pohjaimettomista. Erityisen hyvin pohjaimen tuomat erot ovat nähtävissä pölkkyparin 5 ja 8 käyristä, joissa pölkkyjen liike on alkupainuman jälkeen melkein identtistä, mutta pölkyn 8 painuma hidastuu jatkuvasti käytännössä pysähtyen kesällä 2019 toisin kuin pölkyn 5, joka jatkaa painumista. (Varis & Luomala 2021)

4 PORI-MÄNTYLUOTO PÄÄLLYSRAKENNETYÖT

Pori-Mäntyluoto-Tahkoluoto-rataosuudella tehtiin kesän ja syksyn 2021 aikana perusparannushanke. Hankkeesta diplomityön kannalta oleellinen osa on Pori-Mäntyluoto-rataosuudelta noin ratakilometrit 322+640...342+060, joiden matkalla uusittiin päällysrakenne, levitettiin ratapenkereitä, uusittiin tasoristeyksien kansia ja parannettiin tasoristeysturvallisuutta, uusittiin rumpuja ja Lattomerenojan ratasilta, sekä Mäntyluodon ratapihan vaihteiden vaihdot ja päällysrakenteen uusiminen. Lisäksi rakennettiin uusia huoltoteitä, meluvallien pohjarakenteita sekä varastokenttiä. Rataosuus on yksiraiteinen, sähköistetty ja junien kulunvalvontajärjestelmällä (JKV) varustettu tavaraliikennerrata. (Väylävirasto, 2021b)

Vuonna 2020 rataosuudelle on rakennettu testirataosuus ratakm+m 327+550...328+900, jolla tutkittiin pohjainten toimintaa betonipölkyissä ja erilaisia synteettisiä ratapölkkyjä. Tästä aiemmin rakennetusta osuudesta uusittiin vain noin 150 m pitkä osuus uusilla pohjaimellisilla pölkyillä. Tässä aiemmin toteutetussa lyhyessä pohjainkokeilussa haluttiin selvittää voidaanko pohjaimella vaimentaa tärinää, sillä rata sijaitsee valtaosin pehmeän maaperän päällä, sen läpi kulkee paljon raskasta junaliikennettä ja sen läheisyydessä on paljon asuinrakennuksia. Alueen asukkaita häiritsevälle tärinälle etsittiin uutta ratkaisua ja päädyttiin kokeilemaan, olisiko pohjaimista apua. Päällysrakenteen uusimisen jälkeen havaittiin pohjainten vaimentaneen tärinää huomattavasti enemmän, kuin niiden laskennallisesti olisi pitänyt. Tämän positiivisen tuloksen myötä testirataa päätettiin laajentaa vuoden 2021 päällysrakennurakassa. (Väylävirasto, 2021b)

2021 tehdyssä urakassa testirataosuutta laajennettiin pohjainten osalta yhteensä noin 17 ratakilometrin verran viiden erilaisen pohjaintyyppin testauksia varten. Referenssiosuuksia vaille koko urakan linjarata rakennettiin pohjaimellisilla pölkyillä. Pohjaimellisia pölkkyjä käytettiin myös vaihteissa sekä Mäntyluodon ratapihalla neljällä noin 50 metrin pituisella osuudelle sivuttaisvastuksen tutkimusta varten. Tutkimuksella haluttiin selvittää pohjaimen ja erityisesti erilaisten pohjaintyyppien vaikutusta rataliikenteen aiheuttamaan tärinään, raidegeometrian heikkenemiseen sekä sivuttaisvastukseen. Rataan asennettiin eri paksuisia ja jäykkyyksisiä pohjaimia, jotta voitiin vertailla miten

pohjaimen paksuus ja alustaluku vaikuttavat radan käyttäytymiseen ja tärinään. Tutkimuksen rataosuudet valittiin pohjaolosuhteiltaan keskenään mahdollisimman homogeenisiltä alueilta ja mahdollisimman kaukana rummuista sekä tasoristeyksistä.

Päällysrakenneurakan valmistuttua pohjainten testiosuuksilla suoritettiin palautuvan painuman ja tärinän mittauksia testijunan ylittäessä ne. Mittauksissa käytettiin testijunaa, jossa oli 40 hiilellä lastattua vok-vaunua (yhteensä 90 tonnia) sekä 2 Sr1-veturia molemmissa päissä. Mittauspisteiden yli ajettiin kolmella eri nopeudella, 40 km/h, 50 km/h ja 70 km/h, kullakin kaksi kertaa molemmista suunnista joulukuun 2021 kahtena ensimmäisenä viikonloppuna. Jokaisen pohjaintyyppin testiosuudelta mitattiin pölkyn ja tukikerroksen palautuva painuma Tampereen yliopiston tutkijoiden toimesta sekä maaperän tärinä A-insinöörien tutkijoiden toimesta. Kuvassa 10 on esitetty radan vieressä suoritettujen maaperän tärinämittauksissa käytettyä mittauslaitteistoa. Näiden mittausten perusteella saadaan lisää tietoa useamman pohjaintyyppin toiminnasta suomalaisessa ratarakenteessa, mikä tulee helpottamaan pohjaimellisten rakenteiden suunnittelua tulevaisuudessa. Tutkimusten tulokset tosin julkaistaneen vuoden 2022 aikana, joten tähän diplomityöhön ne eivät kerenneet. Pohjainten tuomat lisäkustannukset päällysrakenteen, vaihteiden ja näiden alusrakenteiden rakentamisen kokonaiskustannuksista olivat karkeasti viiden prosentin luokkaa hankkeen kustannusarvion mukaan.



Kuva 10. Maaperän värinämittauksissa Pori-Mäntyluodossa joulukuussa 2021 käytetty mittalaite. Valokuva: Erno Oikarinen.

4.1 Tutkitut pohjaintyytit

Päällysrakenneurakassa rataan asennettiin viidellä eri pohjaimella varustettuja pölkkyjä. Pohjaimet hankittiin kahdelta toimittajalta, Pandrolilta ja Getzneriltä, ja niitä oli kolmea eri paksuutta eri alustaluvuilla. Tutkitut pohjaintyytit, niiden paksuudet, staattiset alustaluvut, linjaraitteille asennetut määrät ja käytetyt pölkkytyypit on esitetty taulukossa 4 ja esimerkit pohjainten 1, 2 ja 5 teknisten tietojen lomakkeista liitteissä 1–3. (Väylävirasto, 2021b)

Taulukko 4. Pori-Mäntyluoto-urakalla käytetyt pohjaintyyppit.

	Pohjaintyyppi	Toimittaja	Paksuus	Alustaluku	Määrä	Pölkky
Pohjain 1	USP-R-07e	Pandrol	7 mm	0,18 N/mm ³	17 900	Bp99
Pohjain 2	USP-I-10b	Pandrol	10 mm	0,10 N/mm ³	850	Bp99
Pohjain 3	SLB 3007 G	Getzner	7 mm	0,30 N/mm ³	8 600	Bp99
Pohjain 4	SLB 1308 G	Getzner	8 mm	0,13 N/mm ³	700	B97
Pohjain 5	SLB 1510 G	Getzner	10 mm	0,13 N/mm ³	600	B97

Lisäksi pohjaintyyppiä 1 asennettiin 300 kpl läpivientipölkkyihin sekä 510 kpl vaihdepölkkyihin vaihteille V911 Mäntyluodossa ja vaihteille V823, V825, V839, V824 ja V828 Porin ratapihalla. Valtaosa linjasta rakennettiin siis pohjaintyyppillä 1 ja 3. Muilla pohjaimilla varustetuilla pölkyillä rakennettiin 300–500 m pitkät yhtenäiset testiosuudet. Käytetyt betonipölkkyt Bp99 ja B97 ovat nykyisen radan päällysrakenneohjeen (Väylävirasto, 2021a, s. 21) mukaiset uusien ja uusittavien lyhyt- ja pitkäkiskoraiteiden vakiopölkkyt, joiden kanssa käytetään 54E1- tai 60E1-kiskoja ja Wossloh14-kiskonkiinnityksiä.

4.2 Pohjainten asennuksen vaikutus päällysrakennetöihin

Kaikki haastatellut asiantuntijat totesivat, ettei pohjaimellisen pölkyn asentamisen pitäisi poiketa tavanomaisen asentamisesta muuten kuin vaatimalla tuettaessa pohjaimen paksuuden verran normaalia suuremman tukemissyvyyden, jotta varmistutaan etteivät tukemiskoneen hakut voi osua pohjaimiin. Tukemissyvyyden lisäksi Pori-Mäntyluodossa oli riskinä pohjainpölkkyjen sekoittuminen, sillä poiketen aiemmista urakoista, joissa on käytetty vain yhtä pohjaintyyppiä kerrallaan, käytettiin viittä eri pohjaintyyppiä, joista osaa oli kahdella eri kiskokiinnityksellä ja yhtä myös vaihdepölkkyissä. Työmaalla pölkystä on käytännössä mahdotonta tarkistaa mikä pohjain siinä on kiinni, koska pohjain on valtaosin betonin sisällä ja ne näyttävät päällepäin samalta. Näistä johtuen urakoitsijalla tuli olla tiedossa tarkalleen mille välille asennetaan mitkään pölkkyt ja

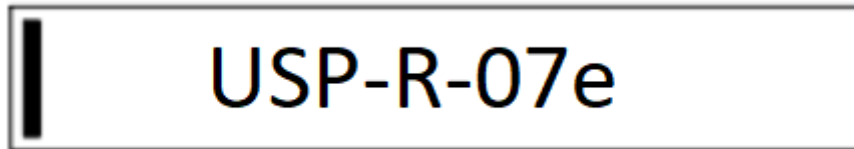
pölkkyissä tuli olla selkeästi merkittynä mikä pölkky on kyseessä. Pölkkyjen päihin maalattiin tehtailla värikoodaukset, joista näki pölkkyihin kiinnitettyjen pohjainten tyypit. Osa värikoodauksista olivat keskenään samankaltaisia, kuten pohjaimen 3 lila ja pohjaimen 5 pinkki, mutta sekaannuksilta vältyttiin. Esimerkki Pandrol-USP-I-10b pohjaimella ja 60E1-kiskokiinnikkeillä varustetun pölkyn värikoodauksesta on esitetty kuvassa 11.



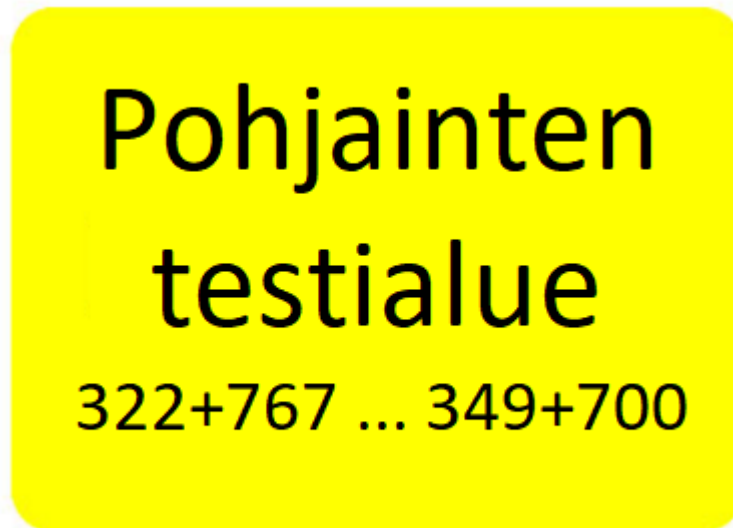
Kuva 11. Pohjaimella Pandrol USP-I-10b ja 60E1-kiskokiinnikkeillä varustetun pölkyn merkintä. Valokuva: Erno Oikarinen.

Suunnitelmissa ilmoitettiin ratakm+m välit, mihin asennettiin mitäkin pölkkytyyppiä ja työmaalla tiedettiin, mitä pölkkyjä tehtaalta milloinkin toimitettiin, sekä nähtiin asentaessa värikoodauksesta pölkyn tyyppi, joten rakentaminen sujui tältä osin ilman suuria ongelmia. Pohjaintyyppien vaihtumiskohdat merkittiin kiskon kylkeen liidulla ja myöhemmin T-149 kaarremerkintäkilvillä, joihin kirjoitettiin käytetyt pohjaintyyppit. Lisäksi vaihtumiskohdista otettiin sijaintitiedot tarkemittauksilla, jotta tiedot pohjainalueista eivät jääneet vain kiskomerkintöjen varaan. Testialueen päihin asennettiin

T-353 kunnossapidon lisäkilvet kertomaan kunnossapitäjille rataosuudella sijaitsevasta pohjainten testialueesta. Esimerkit käytetyistä kylteistä on esitetty kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Pohjaimen USP-R-07e alkamiskohdassa käytetty T-149 kaarremerkkintä. (Väylävirasto 2021b)



Kuva 13. Testialueen päihin asennettu kyltti T-353 kunnossapidon lisäkilpi. (Väylävirasto 2021b)

Päällysrakennetöiden etenemistä haittasi kuitenkin pölkkytoimitusten hitaus. Pölkkytehtailta ei saatu toimitettua pölkkyjä sujuvasti rakentamisen aikataulun vaatimalla tahdilla, mistä johtuen päivällä työmaalle kuljetetut pölkkyt tarvittiin jo seuraavan työvuoron aikana rakentamiseen, eli ratapölkkyjä ei saatu varastoon asti puskuriksi. Tämän vuoksi urakoitsija joutui välillä rakentamaan suunniteltua lyhyempiä matkoja rataa osassa työvuoroista. Alkusyksystä urakoitsija joutui myös pitämään yhden viikon ajan taukoa rakentamisesta pölkkyjen puutteen takia ja siirtymään suunnitelmasta poiketen yhden viikon ajaksi linjaradan rakentamisesta Porin päässä Mäntyluodon ratapihan rakentamiseen, koska Porin päähän käytettävät pölkkyt uhkasivat loppua kesken,

mutta Mäntyluotoon käytettäviä pölkyjä oli saatu riittävästi varastoon. Kokonaisuudessaan aikataulussa kuitenkin pysyttiin ja itse pohjaimilla ei ollut vaikutusta rakentamistöihin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Pohjainten vaikutus ratarakenteisiin

Pohjaimilla on saavutettavissa merkittäviä vaikutuksia ratarakenteen käyttöikään useiden positiivisten vaikutusten kautta, mutta on tärkeää tietää minkä tyyppinen pohjain soveltuu mihinkin käyttötarkoitukseen. Merkittävimmät vaikutukset pohjaimilla ovat pölkky-sepeli-kontaktipinnan interaktioihin ja niiden kautta tukikerroksen kulutuskestävyyteen, sekä radan kokonaisjäykkyyteen. Radan kokonaisjäykkyys on Suomessa vielä hyvin vähän tutkittu keino radan kunnan ja kuormituskestävyyden arvioinnissa, mutta muualla maailmassa sitä on tutkittu ja käytetty enemmän. Pohjaimilla on yhdessä pohjamaan ja joustavien välilevyjen kanssa merkittävin vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen, joten niillä voidaan tarvittaessa tuoda huomattavasti lisää joustoa ratarakenteeseen. Potentiaalisia käyttökohteita tälle ovat jäykkien rakenteiden päällä lepäävät raiteet, kuten silloilla tai tunneleissa. Näissä pohjamaa ei tuo joustoa ratarakenteeseen, jolloin rakenne on hyvin jäykkä ja siten altis geometriavirheiden synnylle, joten näissä kohteissa pohjaimet olisivat luonteva käyttökohde jouston lisäämiseksi.

Myös vaihteet ovat penkereelle rakennettua linjaraidetta huomattavasti jäykempiä rakenteita, ja tavanomaisille vaihteille on jo suunniteltu ja osin koekäytetty korvaavat elastiset vaihteet, jossa pohjaimet ovat vakiovarusteena yhdessä muiden uusien rakenneosien kanssa. Elastisista lyhyitä vaihteita on käytetty viime vuosina useissa kohteissa ympäri Suomea, mutta ne eivät ole täysin korvanneet perinteistä vaihdetta vakioratkaisuna. Pitkiä elastisia vaihteita ei ole Oulun koekäytön ongelmien jälkeen vielä asennettu muualle, mutta niidenkin koekäyttöä olisi hyvä kokeilla uudestaan, sillä teknisesti niiden pitäisi olla yhtä hyvä rakenne kuin lyhyenkin.

Kokonaisjäykkyys on merkittävässä roolissa myös siirtymäalueilla ratapenkalta jäykempiin rakenteeseen, kuten siltojen ja tunneleiden päissä, vaihdealueilla tai rumpujen kohdalla. Tällaisilla kohdilla radan kokonaisjäykkyys muuttuu lyhyellä matkalla huomattavasti, mikä yleensä aiheuttaa muutoskohdan pehmeämmän rakenteen puolella rakenteen pysyvää painumista huomattavasti jäykän rakenteen puolta enemmän. Tästä rataa syntävä kuoppa aiheuttaa huomattavia dynaamisia voimia rakenteisiin ja ylittäviin

juniin, mikä edelleen heikentää rakenteen kantavuutta ja haittaa matkustusmukavuutta. Pohjaimia voitaisiin käyttää tasaamaan siirtymäalueiden jäykkyyseroja asentamalla siirtymäalueelle pohjainpölkkyjä, joissa olevien pohjainten jäykkyys olisi optimoitu kasvamaan siirryttäessä pehmeältä rakenteelta jäykälle. Toisaalta siirtymäalueilla pohjaimilla on mahdollista aiheuttaa myös haitallisia vaikutuksia, sillä käyttämällä liian pehmeitä pohjaimia, varsinkin jos käytetään vain yhtä pohjaintyyppiä, rakenteesta saattaa tulla liian joustava mikä altistaa sitä edelleen pystygeometrian heikkenemiselle.

Pohjaimet tuovat pölkkyjen ja sepelin välisiin koviin kontaktipintoihin joustavan elementin, johon sepelirakeet voivat upota kiinni. Tämä kasvattaa huomattavasti pölkyn ja sepelin välistä kontaktipinta-alaa, minkä ansiosta liikenteen kuormat jakautuvat tasaisemmin sepelille. Pohjainten käyttö myös tasaa vierekkäisten pölkkyjen tukeutumiseroja, minkä ansiosta ratarakenne käyttäytyy homogeenisemmin ja kuormat jakautuvat useamman pölkyn alueelle. Lisäksi pohjaimet tasoittavat pölkkyjen päiden pystysuuntaista palautuvaa painumaa kuormituksen alaisena, mikä vähentää pölkkyjen alapuolisten tyhjätilojen ja siten tukeutumattomien pölkkyjen synnyn lähes olemattomaksi. Nämä vaikutukset vähentävät huomattavasti yksittäisille sepelirakenteille tulevia rasituksia, mikä hidastaa ratasepelin kulumista ja siten kasvattaa sen käyttöikää huomattavasti sekä hidastaa ratarakenteen pysyvää painumaa huomattavasti ja optimaalisissa olosuhteissa jopa olemattomaksi. Myös ratarakenteisiin kohdistuvat dynaamiset iskukuormat vähentyvät yksittäisten ongelmakohtien vähentyessä, mikä edelleen hidastaa rakenteiden kulumista, vähentää tärinää ja parantaa matkustusmukavuutta.

5.2 Pohjainten vaikutus tärinään

Pohjainten vaikutusta tärinään on tutkittu maailmalla kohtuullisen paljon sekä simuloimalla että kenttäkokeilla, ja tutkimustuloksista on löydettävissä muutamia yleisiä linjoja. Valtaosassa tutkimuksista todettiin pohjainten käytön hieman kasvattavan kiskojen ja pölkkyjen palautuvaa painumaa, mutta vaimentavan maaperään säteilevää tärinää. Nämä vaikutukset korostuvat pehmeämmillä pohjaimilla eli ne vaimentavat maaperän tärinää paremmin kuin jäykät pohjaimet, mutta kasvattavat myös kiskojen ja pölkkyjen liikettä jäykkiä enemmän. Toinen yleinen tulos oli tärinän voimistuminen

tutkimuksesta riippuen alle 40 Hz tai alle 50 Hz taajuuksilla, mutta huomattava vaimentuminen näitä korkeammilla taajuuksilla noin 200 tai 250 Hz:in asti. Joissakin tutkimuksissa myös matalilla taajuuksilla havaittiin huomattavaa vaimentumista. Tutkimusten tuloksissa oli tärinän vaimentumisen suhteen huomattavasti koekohtaisia vaihteluita, mikä kertoo käytetyn ratarakenteen, pohjainten ja ylittävien junien ominaisuuksien vaikuttavan merkittävästi pohjainten tuomaan tärinänvaimennukseen. Kaikki pohjaimet eivät siis sovellu yhtä hyvin kaikkiin olosuhteisiin vaan täytyy tietää, minkälainen pohjaintyyppi toimii parhaiten tietyllä pohjaolosuhteilla, rakenteella ja liikennekuormalla. Merkittävää on tietää myös pohjaimellisen pölkyn resonanssitaajuuudet, jotta vältetään asentamasta tietyllä taajuudella resonoivia pohjainpölkkyjä raiteelle, jolla liikenteen aiheuttamassa tärinässä nämä taajuudet ovat yleisiä.

Pohjainten soveltuvuudesta runkomelun vaimennukseen löytyi molempiin suuntiin tuloksia, mikä ei ole yllättävää, sillä lähteestä riippuen runkomelulle herkimmin altistavat tärinän taajuudet ovat väleiltä 4–50 Hz, 4–80 Hz tai 16–100 Hz. Pohjainten aiheuttama matalataajuuksisen tärinän voimistuminen sijoittuu näiden alapäähän, joten kohteesta riippuen pohjaimet voivat altistaa lisääntyneelle runkomelulle. Tämän vuoksi pohjainten käyttöä runkomelueristyksessä suunniteltaessa tulee tuntea hyvin taajuudet, joille eristettävät rakennukset ovat alttiita. Ihmisen kokeman värähtelyn merkittävimmät taajuudet pehmeällä maaperällä ovat välillä 5–15 Hz ja kovalla 10–25 Hz, eli juuri taajuusalueella, jonka tärinää pohjaimet usein voimistavat. Lisäksi pohjainten aiheuttama radan rakenneosien liike voi mahdollisesti aiheuttaa ilmamelua, mutta tämän vaikutuksen ei pitäisi olla merkittävä verrattuna niiden geometrian tasaisuuden ja kuormien tasaisemman jakautumisen kautta saavutettavien dynaamisten kuormien vähentymisen tuomaan melun vaimennukseen. Näiden seikkojen vuoksi pohjaimet eivät välttämättä aina ole toimiva ratkaisu radan läheisyydessä ulkona koetun melun vaimennukseen varsinkaan raskailla junilla, joiden aiheuttaman tärinä sijoittuu yleensä matalammille taajuuksille kuin kevyempien junien. Kaiken kaikkiaan pohjaimilla voidaan pienentää merkittävästi maaperään säteilevää tärinää ja ilmamelua, sekä joissain tapauksissa runkomelua.

Suomessa pohjaimilla on saavutettu merkittävää tärinän vaimentumista Pori-Mäntyluodon 2020 testiosuuden mittauksissa ja kohtuullista runkomelun vaimentumista Vantaalla 2009. Suomen muuta maailmaa poikkeavan ratarakenteen vuoksi meillä tulisi kuitenkin suorittaa koekäyttöjä erilaisille pohjaintyypeille, jotta saadaan selville minkälainen pohjain toimii parhaiten eri pohjamaan, rakennekerrospaksuuksien, välilevyjen ja junien, ainakin tasolla matkustajajuna vai raskas tavarajuna, yhdistelmillä. Tähän Pori-Mäntyluodon vuoden 2021 testirata ja sieltä saatavat viiden eri pohjaintyyppin mittaustulokset tulevat antamaan huomattavasti uutta tietoa.

5.3 Pohjainten vaikutus asennustöihin

Pohjanpölkkyillä ei ole merkittäviä vaikutuksia pölkkyjen vaihdon suunnitteluun tai asennukseen verrattuna tavanomaisiin ratapölkkyihin. Ainoa muutos verrattuna tavanomaisten pölkkyjen asentamiseen on pohjaimen paksuuden verran suurempi asennussyvyys ja siten tukemisyvyys. Kun tämä huomioidaan päällysrakennetta ja koneohjausta suunnitellessa, suurempi asennussyvyys ei vaikuta itse päällysrakenneurakan töihin. Tukemista suunnitellessa pohjainten tuoma ylimääräinen pölkkyjen paksuus tulee huomioida nuotitettaessa, minkä jälkeen tukeminen tehdään hieman normaalia suuremmalla hakkujen syvyydellä, mutta n. 10 mm ekstrasyyvyys ei vaikuta tukemistyön suoritettavuuteen. Käytettäessä useamman tyyppisiä pohjaimia, kuten Pori-Mäntyluodon testiradan pohjainosuuksia tai useammalla pohjaintyyppillä rakennettavaa siirtymäaluetta tai vaihdetta rakennettaessa urakoitsijalla tulee olla selvää, mitä pohjainpölkkyjä asennetaan mihinkin kohtaan raidetta, mutta selkeillä suunnitelmilla ja pölkkyjen merkinnöillä ongelmat saadaan helposti minimoitua.

5.4 Pohjainten vaikutus kustannuksiin

Pohjainten asentaminen karkeasti puolitoistakertaistaa pölkyn hinnan, mikä päällysrakenneurakassa tarkoittaa muutamien prosenttien suuruista kustannusten kasvua ja vaihteissa, tunneleissa sekä silloissa niiden korkeampien kustannuksen vuoksi vielä tästä pienempiä suhteellisia kustannuksia. Pohjaimilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä erikoisrakenteissa, kunnossapitokustannuksissa ja kunnossapidon aiheuttamien

liikennehaittojen vähentymisen kautta, joten ainakin runsasliikenteisillä radoilla pohjainten pitäisi maksaa kustannuksensa takaisin elinkaarensa aikana.

5.5 Pohjaintyyppien erot

Pohjainten jäykkyydellä on suuri vaikutus sen toimintaan osana raidetta, kuten RATO 11:a (Väylävirasto 2021a) on vuoden 2021 päivityksen myötä mainittu. Jäykemmät pohjaimet soveltuvat paremmin radan geometrian pysyvyyden parantamiseen, jäykkyyserojen hallittuun tasaamiseen ja korrugaation vähentämiseen, kun taas pehmeämmät tärinän ja runkomelun vaimentamiseen. Keskivertojäykillä pohjaimilla taas voidaan vaikuttaa jonkin verran kaikkiin näistä ja niillä voidaan tietyissä olosuhteissa saavuttaa myös huomattavasti aiemmin ajateltua tehokkaampaa tärinävaimennusta, kuten Pori-Mäntyluoto-radalla havaittiin vuonna 2020. Toisaalta erittäin jäykillä tai erittäin pehmeillä pohjaimilla voi olla haluttujen vaikutusten lisäksi heikentävä vaikutus toisen ääripään pohjaintyyppin parantamiin ominaisuuksiin, eli erittäin jäykkä pohjain voi kasvattaa tärinää ja erittäin pehmeä tuoda liikaa joustoa rataan.

5.6 Suositukset pohjaintyyppien käyttöön jatkossa

Erilaisten pohjainten toimintaa Suomen muusta maailmasta poikkeavalla rataverkolla tulisi tutkia lisää ja tutkimusten myötä ottaa pohjaimet vakiovarusteeksi useissa eri ratarakenteissa. Tähänastisista koekäytöistä ja maailmalla tehdyistä tutkimuksista nähdään pohjainten käytöllä olevan huomattavia positiivisia vaikutuksia radan toimintaan, joten niiden käyttöä kannattaisi kasvattaa merkittävästi useissa eri kohdetyypeissä. Useissa Keski-Euroopan maissa pohjaimet ovat jo vakiovaruste pääradoilla vaihteissa, tiukoissa kaarteissa, silloilla ja myös linjaraiteilla.

Pohjaimet tulisi ottaa vakiokomponenteiksi ainakin pääratojen vaihteissa, eli korvata vanhan vaihderakenteen käyttö kokonaan elastisilla vaihteilla kaikissa vaihdetyypeissä. Tunneleissa ja silloilla pohjainten tuoman jouston pitäisi parantaa merkittävästi raidegeometrian pysyvyyttä ja tasoittaa radan pohjarakenteiden kuormituksia, joten ne olisivat myös luonteva käyttö- ja tutkimuskohde. Samalla voitaisiin tutkia myös pohjainten vaikutusta siirtymäalueilla. Lisäksi pohjaimet vaikuttavat olevan toimiva

vaimennuskeino rataliikenteen aiheuttamaan tärinään ja ilmameluun sekä olosuhteista riippuen runkomeluun. Pori-Mäntyluodon tärinätkimusten myötä parhaiten tärinän ja melun vaimennukseen soveltuvien pohjaintyyppien käyttöä tulisi lisätä vaihtoehtona nykyisin käytössä oleville keinoille. Linjaraiteilla pohjaimilla saavutettavat vaikutukset ratarakenteen kulumiseen ja siten kunnossapitotarpeeseen ovat merkittäviä, joten pohjainten vaikutuksista ratarakenteen elinkaaren aikaisiin kustannuksiin tulisi tehdä laaja selvitys pääradoilla sekä tiukoissa kaarteissa. Pohjainten käytöllä voitaisiin myös ohentaa sepelitukikerrosta ilman merkittäviä haittavaikutuksia, joten niiden käytöllä voitaisiin saavuttaa huomattavia säästöjä rakennuskustannuksissa linjaraiteilla, tunneleissa ja silloilla erityisesti alueilla, joissa raidesepelin hankkiminen on haastavaa.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää kirjallisuuskatsauksen, haastattelujen, geometrian käyttäytymistutkimusten ja Pori-Mäntyluoto päällysrakenneurakan seurannan avulla kattavasti pohjainten vaikutuksia junaradan käyttäytymiseen, sekä näiden myötä luoda pohjaa jatkotutkimuksille ja pohjainten tulevalle käytölle Suomen rautateillä. Valtaosa selvityksestä perustui kansainvälisiin pohjaintutkimuksiin, sillä Suomessa pohjainten toimintaa ei ole vielä tutkittu kovin laajasti. Suomen poikkeavan ratarakenteen ja radoilla liikkuvien suomalaisten ja venäläisten junien eroavaisuuksien tuomien haasteiden vuoksi pohjainten vaikutuksissa voi Suomen radoilla olla eroja ulkomailla tehtyihin tutkimuksiin verrattuna, mutta vaikutusten pitäisi kuitenkin olla saman suuntaisia.

Pohjaimilla voidaan saavuttaa merkittäviä positiivisia vaikutuksia mm. tärinään ja radan geometrian pysyvyyteen, jonka myötä myös kunnossapitotarpeeseen ja -kustannuksiin. Pohjaintyyppin jäykkyydellä on merkittävä vaikutus sen vaikutukseen ratarakenteessa, sillä pehmeämmät pohjaimet vaimentavat tärinää ja melua, kun taas jäykemmät parantavat raiteen geometrian pysyvyyttä ja hidastavat radan rakenneosien kulumista. Erittäin jäykillä tai pehmeillä pohjaimilla voi olla myös negatiivisia vaikutuksia, joten suunniteltaessa pohjainten käyttöä tulee tietää mihin radan ominaisuuksiin ja raideliikenteen ilmiöihin halutaan vaikuttaa, ja miten erilaiset pohjaintyyppit vaikuttaisivat näihin.

Pohjainten koekäyttöjä Suomen radoilla tulisi lisätä huomattavasti ja suorittaa pidempikestoisia tutkimuksia linjaraitteilla ja myös muissa radan erikoisrakenteissa kuin vaihteissa. Näiden tutkimusten myötä voitaisiin laatia kattava selvitys pitkäaikaisista vaikutuksista radan toimintaan ja kunnossapitokustannuksiin, minkä myötä kyettäisiin arvioimaan, milloin pohjaimet ovat kustannustehokas ratkaisu koko niiden elinkaaren aikana. Tämänhetkisen tutkimustiedon mukaan kannattavimpia pohjainten asennuskohteita ratageometrian pysyvyyden kannalta ovat runsaasti liikennöityjen raskaan liikenteen ratojen vaihteet, tiukat kaarteet ja sillat. Tärinän- ja meluntorjunnassa pohjaimilla voidaan myös saavuttaa merkittäviä vaikutuksia suhteellisen halvalla.

LÄHDELUETTELO

Alves Ribeiro, C., 2012. Transições aterro-estrutura em linhas ferroviárias de alta velocidade: análise experimental e numérica. (Ph.D.), Faculty of Engineering, University of Porto (FEUP), Porto.

Alves Ribeiro, C., Paixão, A., Fortunato, E. & Calcada, R., 2015. Under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: numerical modelling and experimental validation. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 11, no. 11, s. 1432-1449.

Auer, A., Potvin, R., Godart, P. & Schmitt, L., 2013. Under Sleeper Pads in Track – the UIC Project. *European Railway Review*, vol. 19, no. 2.

Auer, F. & Schilder, R., 2009. Technical and economical aspects to under sleeper pads - Part 1: Long-term experiences in the obb-network. *ZEV Rail*, vol. 133, s. 180-193.

Briaud, J.-L., 1997. Settlement of Bridge Approaches (The Bump at the End of the Bridge). National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: National Academy Press. 75 s.

Costa D'Aguiar, S., Arlaud, E., Potvin, R., Laurans, E. & Funfschilling, C., 2014. Railway Transitional Zones: A Case History from Ballasted to Ballastless Track. *The International Journal of Railway Technology*, Vol. 3, no. 1, s. 37-61.

Cuéllar, V., Valerio, J., Rivas, J.A., & Rodríguez, M., 2009. Improvement of transition zones for an old embankment.

ERRI-D230.1 Committee, 1999. Bridge Ends - Embankment Structure Transition, State of Art Report. Utrecht: European Rail Research Institute.

Getzner, 2015. Optimisation of Transition Zones. Bürs: Getzner Werkstoffe GmbH. 12 s.

Getzner, 2016. Sleeper Pads Reduce Life Cycle Costs. Bürs: Getzner Werkstoffe GmbH. 4 s.

Getzner, 2018. Under Sleeper Pads for Ballasted Track. Bürs: Getzner Werkstoffe GmbH. Saatavissa: <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/sleeper-pads>. 16 s.

Insa, R., Salvador, P., Inarejos, J. & Roda, A., 2012. Analysis of the influence of under sleeper pads on the railway vehicle/track dynamic interaction in transition zones. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 226, no. 4, s. 409-420.

International Union of Railways, 2009. Under sleeper pads – summarizing report. 40 s.

- Jayasuriva, C., Indraratna, B. & Ngo T.N., 2019. Experimental study to examine the role of under sleeper pads for improved performance of ballast under cyclic loading. Wollongong: University of Wollongong. 37 s.
- Johansson, A., Nielsen, J. C. O., Bolmsvik, R., Karlström, A. & Lundén, R., 2008. Under sleeper pads – Influence on dynamic train-track interaction. *Wear*, 265 (9-10), s. 1479-1487.
- Kaewunruen, S., Aikawa, A. & Remennikov, A.M., 2017. Vibration attenuation at rail joints through under sleeper pads. St. Petersburg: Transportation Geotechnics and Geocology.
- Kaewunruen, S. & Remennikov, A. M., 2015. Under sleeper pads: field investigation of their role in detrimental impact mitigation. Wollongong: University of Wollongong, Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part A. 5264.
- Kauppinen, M., 2011. Ratakiskon elinkaari. Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-01_ratakiskon_elinkaari_web.pdf. 113 s.
- Kaynia, A.M., Schmitt, L., Lozano del Moral, A., Pecker, A., Cuéllar, V., Clouteau, D. & Berggren, E., 2005. SUPERTRACK, Sustained Performance of Railway Tracks: Final Report.
- Kuula, P., Luomala, H., Pulkkinen, E. & Kolisoja, P., 2017. Tukikerroksen toiminnan kehittäminen. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-19_tukikerroksen_toiminnan_web.pdf. 112 s.
- Lakusic, S., Ahac, M. & Haladin, I., 2010. Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. Zagreb: University of Zagreb. 8 s.
- Le Pen, L., Watson, G., Hudson, A. & Powrie, W., 2015. Behaviour of under sleeper pads at switches and crossings – Field measurements. *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 232(4), s. 1049-1063.
- Lewis, R. & Olofsson, U., 2009. Wheel-rail interface handbook. Cambridge: Woodhead Publishing. 856 s.
- Lichtberger, B., 2005. Track Compendium. 1st Edition. Hampuri: Eurailpress. 634 s. ISBN 3-7771-0320-9.
- Lozano del Moral, A. & Cuéllar, V., 2009. Track stiffness variations observed in transition zones of Spanish railways. Madrid: 3as Jornadas Hispano Portuguesas sobre Geotecnia en las Infraestructuras Ferroviarias, 25-26, s. 2-13.
- Liikennevirasto, 2017. Rautatiesillan siirtymälaatat (DL RATA). Tyypipiirustukset. Helsinki: Liikennevirasto.

Liikennevirasto, 2018. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 Radan rakenne. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-13_rato3_web.pdf. 39 s.

Loy, H., 2008. Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs. *European railway review*, Vol. 4, 6 s.

Loy, H., 2009. Under Sleeper Pads in Turnouts. *Railway Technical Review*, Vol. 2, s. 35-38.

Loy, H., 2012. Mitigating vibration using under-sleeper pads. *Railway Gazette International*, Vol. 168 (4), s. 40–42.

Luomala, H., 2021. Haastattelu 5.7.2021.

Marschnig, S. & Veit, P., 2011. Making a case for under-sleeper pads. *International Railway Journal*, vol. 51, no. 1.

Mottahed J., Zakeri J.A. & Mohammadzadeh S., 2018. Field and Numerical Investigation into the Effect of Under Sleeper Pads on Dynamic Behavior of Railway Bridges. Iran University of Science and Technology.

Mottahed, J., Zakeri, J.A. & Mohammadzadeh, S., 2019. A Field Investigation on the Effects of Using USPs in Transition Zone from Ballasted Track to Bridges. Iran University of Science and Technology.

Myllymäki, T, 2021. Haastattelu 24.6.2021.

Nicks, J.E., 2009. The Bump at the End of the Railway Bridge. (Ph.D.), Texas A&M University.

Nielsen, J. C. O., Schneider, P. & Bolmsvik, R., 2010. In situ performance of a ballasted railway track with under sleeper pads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 255 Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, s. 299-309.

Paixão, A., Alves Ribeiro, C., Pinto, N.M.P., Fortunato, E. & Calcada, R., 2015. On the use of under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: experimental field testing. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 11, no. 2, s. 112-128.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A., 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-06_radan_pystysuuntainen_web.pdf [viitattu 18.5.2021]. 190 s.

Peltonen, T. & Backholm, M., 2009. Raideliikenteen runkomelun tutkimuksia, USP-radan eristävyysmittaukset. Helsinki: Insinööritoimisto Akukon Oy.

Plotkin, D. & Davis, D., 2008. Bridge Approaches and Track Stiffness. U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. 41 s.

Potocan, S. & Dorfner, T., 2013. Under Sleeper Pads for Life Cycle Management used in Building Sustainable High Quality Tracks. Bueers: Getzner Werkstoffe GmbH. 6 s.

Prager, G. & Kopp, E., 2001. Schlupfwellenmessungen am Stanradoberbau und am Oberbau mit besohlenen Schwellen in Hieglau (n.v.). Instutut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Eisenbahmwesen und Öffentlicher Verkehr der Universität Innsbruck.

Quirschmair, M. & Loy, H., 2015. Managing track stiffness in transition zones. Railway Gazette International, Vol. 171 (8), s. 34-37.

Ratahallintokeskus, 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 15: Radan kunnossapito. Helsinki: Ratahallintokeskus. 63 s.

Read, D. & Li, D., 2006. Design of Track Transitions Research Results Digest. Washington: Transportation Research Board, Vol. 79, 38 s.

Selig, E. T. & Li, D., 1994. Track Modulus: Its meaning and Factors Influencing It. Transportation Research Record, no. 1470, Railroad Research Issues, s. 47-54.

Salonen, M. et al., 2017. Luumäki-Imatra tavararatasuunnitelma, suunnitelmaselostus. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: [https://aineistot.vayla.fi/hankkeet/rata/luumaki_imatra_taravara_ras/A_selostusosa/LUI_MA_selostusosa/LUI_MA_suunnitelmaselostus.pdf](https://aineistot.vayla.fi/hankkeet/rata/luumaki_imatra_taravara_ras/A_selostusosa/LUI_MA_suunnitelmaselostus.pdf). 154 s.

Schilder, R., 2013. USP – a contribution to save money in track maintenance. Sydney: AusRAIL PLUS.

Schmid, F., 2019. Best Practice in Wheel-Rail Interface Management for Mixed Traffic Railways. Birmingham: University of Birmingham. 354 s.

Stahl, W., 2005. Improvement of ballasted tracks using under sleeper pads – investigations and experiences in Germany -. München: Munich University of Technology. 10 s.

Skoglund, K. A., 2002. A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design, Eng. D Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Engineering and Technology. 160 s.

Talja, A., 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo: VTT. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>. 50 s.

Talja, A. & Saarinen, A., 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. Helsinki: VTT. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2468.pdf>. 56 s.

UIC, 2009. Under Sleeper Pads – Summarising Report (4 ed.). Wien: Union Internationale des Chemins de Fer. Witt, S., 2008. The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics. (M.Sc), Linköping University, Linköping.

Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 993/1992. Annettu Helsingissä 29.10.1992.

Varis, R., 2018. Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-66_keharadan_pohjaimellisten_web.pdf. 50 s.

Varis, R & Luomala, H., 2019. Oulun elastisten vaihteiden seurantamittaukset. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-18_oulu_elastisten_web.pdf. 87 s.

Varis, R, 2021. Haastattelu 6.7.2021.

Varis, R & Luomala, H., 2021. Vaihteiden kehitystyö (luonnos). Helsinki: Väylävirasto. 88 s.

Veit, P. & Marschnig, S., 2009. Technical and economical aspects to Under Sleeper Pads - Part 2: Economic efficiency in the ÖBB-network. ZEV Rail, Vol. 133, s. 436-443.

Väylävirasto, 2018. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 18 Rautatietunnelit. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-19_rato18_rautatietunnelit_web.pdf. 81 s.

Väylävirasto, 2019. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 8 Rautatiesillat. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2019-30_rato8_web.pdf. 25 s.

Väylävirasto, 2020. Bruttotonnit rataosittain 2019. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: https://vayla.fi/documents/25230764/35410603/Bruttotonnit+rataosittain+2019_080520.pdf/6b0040b5-bd41-447b-8281-e3e572cb3a9b/Bruttotonnit+rataosittain+2019_080520.pdf?t=1588951091762.

Väylävirasto, 2021a. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11 Radan päällysrakenne. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2021-29_rato11_web.pdf. 60 s.

Väylävirasto, 2021b. Pori-Mäntyluoto urakka-aineisto.

Zakeri, J.-A. & Ghorbani, V., 2011. Investigation on dynamic behavior of railway track in transition zone. Journal of Mechanical Science and Technology, 25(2), s. 287-292.

Zakeri, J.-A., Esmaceli, M. & Heydari-Noghabi, H., 2014. A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations. Journal of rail and rapid transit 0(0), s. 1-7.

Zbiciak, A., Kraskiewicz, C., Al Sabouni-Zawadzka, A., Pelczynski, J. & Dudziak, S., 2020. A Novel Approach to the Analysis of Under Sleeper Pads (USP) Applied in the Ballasted Track Structures. Warsaw: Warsaw University of Technology.

Zhang, S., Xiao, X., Wen, Z. & Jin, X., 2008. Effect of unsupported sleepers on wheel/rail normal load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, s. 662-673.

USP-R-07e tekniset tiedot.

USP-R-07e

General Properties of the Resilient Material

This under sleeper pad is made of high quality resin-bonded rubber (CDM-RR material).

USP MFF® technology ensures the fixation onto the fresh concrete sleeper.

Property	Typical value
Colour	Black
Elastic pad thickness	7 mm
USP MFF® thickness	0.40 mm
Surface profile	Flat
Dimensions (1)	Tailor made to fit the bottom of the sleeper
Sleeper coverage	Partial or full
Density	1100 kg/m ³
Weight	7.7 kg/m ²
IRS category (Leaflet 67131)	Soft
Environmental impact	> 90% recycled 100% recyclable

(1) Tolerances per separate partial piece of ± 0.4% for length & ± 2 mm for width (measured at 20°C) with an adhesion specified in our technical drawing

Field of application

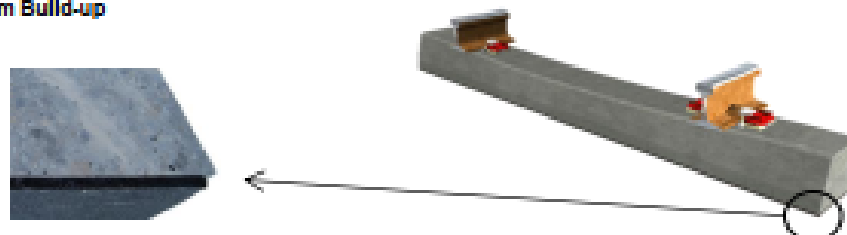
Track category	Typical axle load	Track protection & quality (LCC)	Transition zone	Vibration isolation
TC1 - Urban light rail	≤ 130 kN	✓✓✓	✓	✓
TC2 - Urban light rail	160 kN	✓✓✓	✓	✓
TC3 - Main Line	225 kN	✓✓✓	✓	✓
TC4 - Heavy Freight	300 kN	✓✓✓	✓	✓

System Stiffness - Typical values following EN 16730:2018

Parameter	Track category			
	TC1	TC2	TC3	TC4
Static bedding modulus Castor (Prest1)	0.15 N/mm ²	0.15 N/mm ²	0.16 N/mm ²	0.18 N/mm ²
Static bedding modulus Clead (Prest2)	0.18 N/mm ²	0.19 N/mm ²	0.21 N/mm ²	0.25 N/mm ²
Dynamic bedding modulus Cdyn1 (5 Hz)	0.21 N/mm ²	0.21 N/mm ²	0.23 N/mm ²	0.24 N/mm ²
Tolerances on bedding modul (-)	± 30 %			

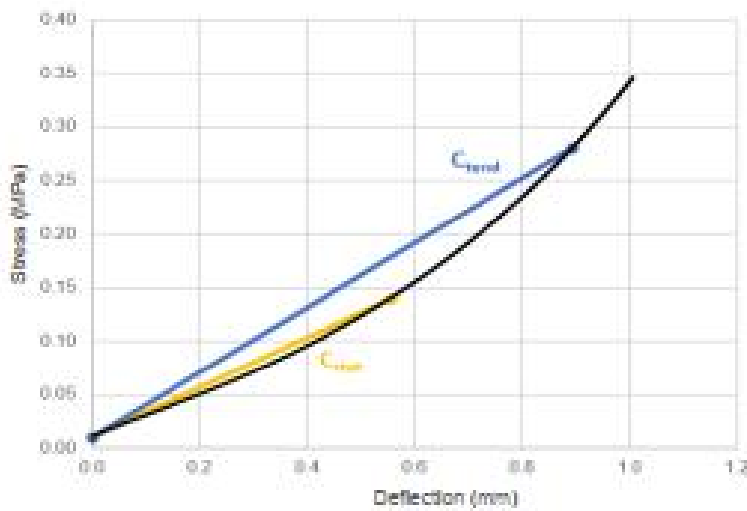
+ Variations/Tolerances are based on a 250x250 mm sample (Refer to Quality Plan)

System Build-up



Load - Deflection curve (according to EN 18730:2018)

Static load-deflection diagram - Track category TC4



Material Performance Tests

Parameter	Method	Value
Bond strength by pull-off (concrete UST-concrete sleeper)	EN 18730:2018	≥ 0.4 MPa single value and ≥ 0.5 MPa average for 4-point test *
Tensile strength	Based on ISO 37	> 0.55 MPa
Elongation at break	Based on ISO 37	≥ 40%
Effect of repeated loading	DNV 45673-4	No cracks or perforations after 8 million cycles
Resistance to weathering (50 ppm-salts at 40°C)	DNV 53609-1	No crack, nor stitch, no change in appearance
Freeze-thaw resistance	DNV 45673-4	No cracks or perforations after test Change in C_{50} @ 10°C: 15% Average pull-out strength after test > 0.5 MPa
Ageing resistance (168h / 70°C)	DIN 53508	Change in C_{50} < 10% Change in mass < 5%
Resistance to fire	DIN 4102-1	B0 (for a less dense material)

* Value obtained with USP MPFR bonding layer

Disclaimer: This document has been collected using data compiled with intentionally recognized test procedures. All data provided is given in good faith using state of the art practices and production tolerances and it may be used for evaluation and design purposes. This data cannot be considered a warranty as there may be factors, outside our knowledge and control, which affect the performance of our product and therefore Pandrol cannot be held responsible for the project specific performance of our product. Please contact Pandrol technical department for application recommendations. Pandrol reserves the right to modify our data and product without notice.



USP-I-10b tekniset tiedot.

USP-I-10b

General Properties of the Resilient Material

This under sleeper pad is made of high quality resin-bonded rubber (GDM-RR material).

USP MFF® technology ensures the fixation onto the fresh concrete sleeper.

Property	Typical value
Colour	Black
Elastic pad thickness	10 mm
USP MFF® thickness	0.40 mm
Surface profile	Flat
Dimensions (1)	Tailor made to fit the bottom of the sleeper
Sleeper coverage	Full
Density	820 kg/m ³
Weight	8.2 kg/m ²
UIC category (Leaflet 713-1)	Very Soft
Environmental Impact	> 90% recycled 100% recyclable

(1) Tolerances: per separate partial piece of ±0.5% for length & ±1 mm for width (measured at 20°C) unless otherwise specified in our technical drawing

Field of application

Track category	Typical axle load	Track protection & quality (LCC)	Transition zone	Vibration isolation
I - Urban light rail	100 kN	✓	✓	✓
II - Underground railway	130 kN	✓	✓	✓
III - Suburban rapid transit	160 kN	✓	✓	✓
IV - Main-line railway	250 kN	✓	✓	✓

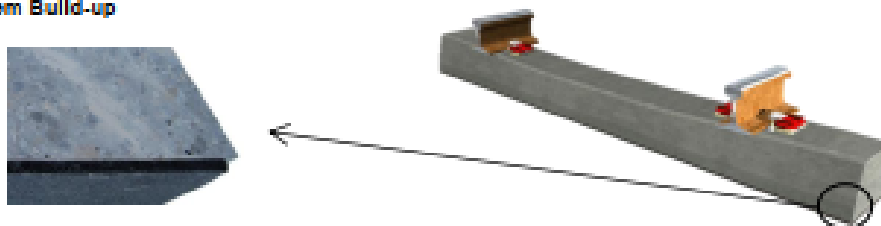
System Stiffness - Typical values following DIN 45873-8

Parameter	Track category			
	I	II	III	IV
Static bedding modulus C _{stat} (medium ballast compaction)	0.28 N/mm ²	0.28 N/mm ²	0.18 N/mm ²	0.18 N/mm ²
Static bedding modulus C _{stat} (high ballast compaction)	- *	- *	- *	0.13 N/mm ²
Dynamic bedding modulus C _{dyn} (5 Hz)	0.11 N/mm ²	0.11 N/mm ²	0.13 N/mm ²	0.13 N/mm ²
Tolerances on bedding moduli (-)	±20 %			

* DIN 45873-8 norm only defines high ballast compaction values for track category IV

+ Variation/Tolerances are based on a 388x388 mm sample (Refer to Quality Plan)

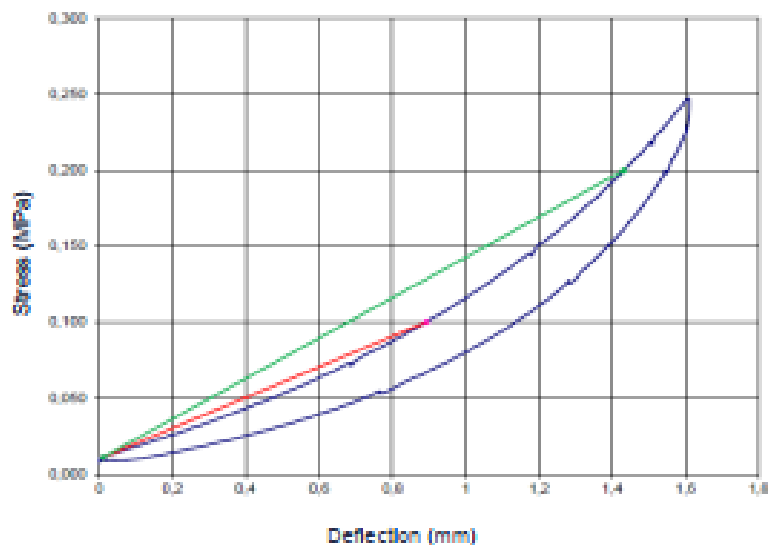
System Build-up



USP-I-10b tekniset tiedot.

Load - Deflection curve (according to DIN 45673-8)

Static load-deflection diagram - Track category IV



Material Performance Tests

Parameter	Method	Value
Bond strength by pull-off (connection USP-concrete sleeper)	DIN 45673-6	≥ 0.4 MPa single value and ≥ 0.5 MPa average for 4-point test *
Tensile strength	Based on ISO 37	0.50 MPa
Elongation at break	Based on ISO 37	≥ 40%
Creep rate at 0.01 MPa	ISO 8013	< 1%/decade
Elastic recuperation	ISO 8013	> 95%
Compression set (50%/23°C/70h)	ISO 815-1	< 5%
Effect of repeated loading	DIN 45673-6 (CT_IGEV 016)	No cracks or perforations after 8 million cycles for a sleeper and a softer rail (Successful Vitrolog test)
Resistance to weathering (50 ppm ozone at 40°C)	DIN 53509-1	No crack, nor notch, no change in appearance
Freeze-thaw resistance	DIN 45673-6	No cracks or perforations after test Change in ρ_{20} @10Hz: 12% Average pull-out strength after test > 0.5 MPa
Ageing resistance (168h/70°C)	DIN 53508	Change in Color < 10% Change in mass < 5%
Resistance to fire	DIN 4102-1	B2 (for a less dense material)

* Value obtained with USP MCRB bonding layer

Data provided in this document has been collected using tests completed with internationally recognized test procedures. All data provided is given in good faith using state-of-the-art practices and production tolerances and may be used for calculation and design purposes. This data cannot be considered a warranty as there may be factors, outside our knowledge and control, which affect the performance of our product and therefore Pandrol cannot be held responsible for the project specific performance of our product. Please contact Pandrol technical department for application recommendations. Pandrol reserves the right to modify our data and product without notice.



Sylomer® Under Sleeper Pad SLB 1510 G

by getzner
sylomer®

Product key data	
Static bedding modulus	$C_{stat} = 0.120 \text{ N/mm}^2$ (EN 16730/TC 3) $C_{stat} = 0.130 \text{ N/mm}^2$ (EN 16730/TC 4)
Main range of application	TC 3: main lines, high speed lines TC 4: heavy haul lines



Product properties	
Material	elastoplastic Under Sleeper Pad (USP) made of mixed cellular polyurethane (PUR) elastomer with mounting mesh for concrete sleepers
Colour	elastoplastic layer: black, mounting mesh: black
Thickness	approx. 15 mm including mounting mesh, approx. 10 mm without mounting mesh
Specific mass	approx. 4.2 kg/m ²
Fixation on the sleeper	full surface connection provided by the mounting mesh which is directly embedded into the wet concrete during the production process of the sleeper
Bond strength by pull-out of USP on sleeper	$\sigma_{max} = 0.40 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{min} = 0.50 \text{ N/mm}^2$ (measured according to EN 16730)
Range of application	<ul style="list-style-type: none"> - In ballasted track - for ballast protection - track stabilisation and improvement of track quality
Fatigue test of USP on concrete block	test report acc. to EN 16730 no. 3518-2017 of Technical University of Munich (TUM)
Approvals	approvals from numerous railway operators in different countries

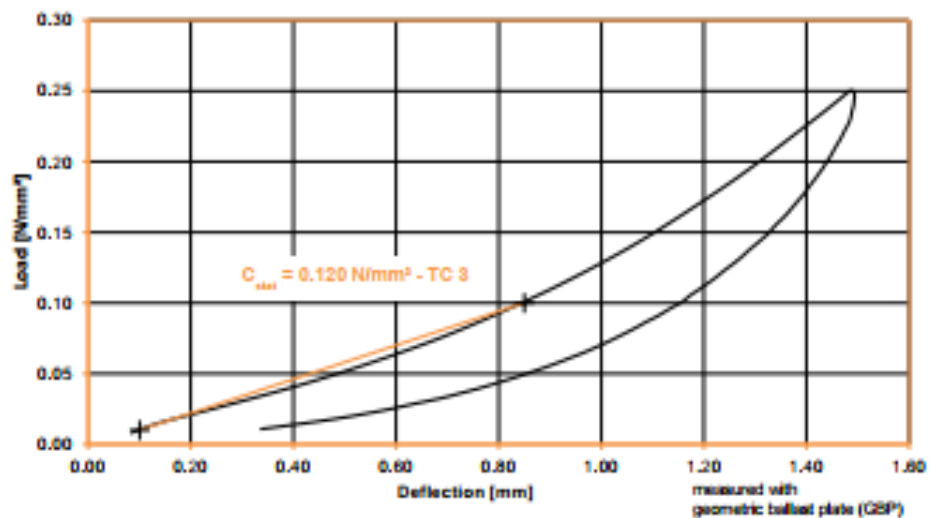
Sylomer® Under Sleeper Pad SLB 1510 G

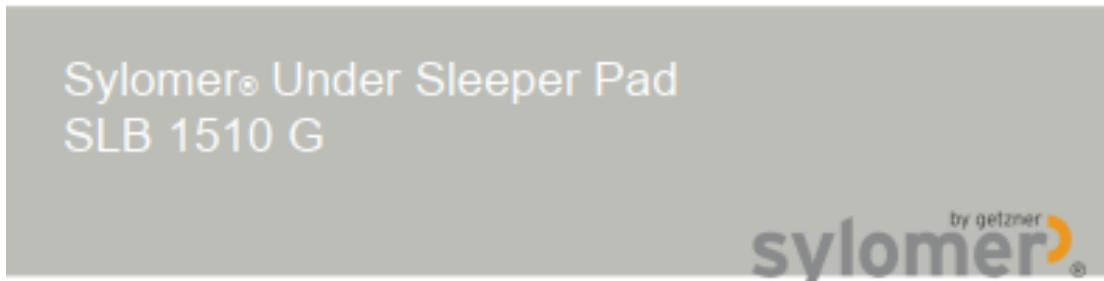


Material properties measured according to track category TC 3

Material properties	Characteristic data	Test method	Remark
Static bedding modulus C_{stat} between 0.01 and 0.10 N/mm ²	0.120 N/mm ²	EN 16730 TC 3	USP on concrete block (approval)
Static bedding modulus C_{stat} between 0.01 and 0.10 N/mm ²	0.120 N/mm ²	EN 16730 TC 3	USP alone (quality control)
Low frequency dynamic bedding modulus $C_{dyn}(f)$ for determination of track dynamics	$C_{dyn,0.15s}$	0.210 N/mm ²	EN 16730 TC 3
	$C_{dyn,0.25s}$	0.240 N/mm ²	EN 16730 TC 3
Low frequency dynamic bedding modulus $C_{dyn}(f)$ for determination of track dynamics	$C_{dyn,0.15s}$	0.220 N/mm ²	EN 16730 TC 3
	$C_{dyn,0.25s}$	0.260 N/mm ²	EN 16730 TC 3

Static bedding modulus C_{stat} - TC 3

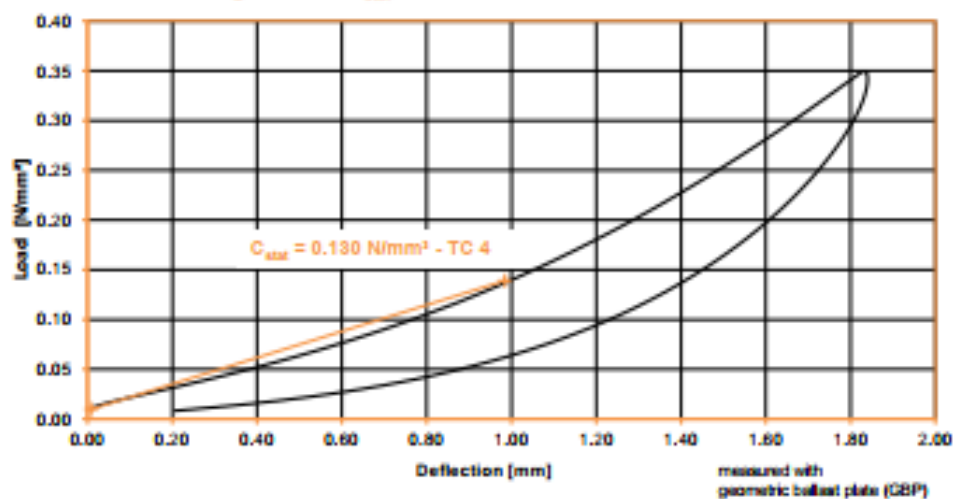




Material properties measured according to track category TC 4

Material properties	Characteristic data	Test method	Remark
Static bedding modulus C_{stat} between 0.01 and 0.14 N/mm ²	0.130 N/mm ²	EN 16730 TC 4	USP on concrete block (approval)
Static bedding modulus C_{stat} between 0.01 and 0.14 N/mm ²	0.130 N/mm ²	EN 16730 TC 4	USP alone (quality control)
Low frequency dynamic bedding modulus $C_{dyn}(f)$ for determination of track dynamics			
$C_{dyn,20Hz}$	0.230 N/mm ²	EN 16730 TC 4	USP on concrete block (approval)
$C_{dyn,10Hz}$	0.240 N/mm ²	EN 16730 TC 4	
Low frequency dynamic bedding modulus $C_{dyn}(f)$ for determination of track dynamics			
$C_{dyn,20Hz}$	0.250 N/mm ²	EN 16730 TC 4	USP alone (quality control)
$C_{dyn,10Hz}$	0.260 N/mm ²	EN 16730 TC 4	

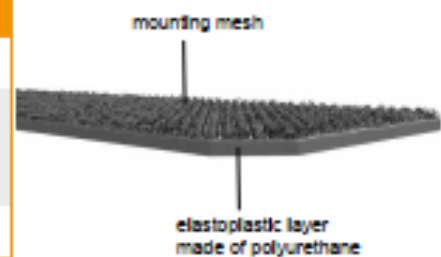
Static bedding modulus C_{stat} - TC 4



Sylomer® Under Sleeper Pad SLB 1510 G

by getzner
sylomer®

Product design	
Design	2 layers
Geometry	adjusted to the shape of the sleeper; a distance ≥ 10 mm between the sleeper edge and the used USP is recommended; 2 pieces per sleeper
Delivery form	stacked on pallets



Material properties	Characteristic data	Test method	Remark
Tensile strength σ	2.50 N/mm ²	ISO 527-3	
Fatigue test	passed	EN 16730 TC 3	In ballast box test report no. 3518-2017/TUM
Capability for stacked stocking of sleepers with USP			
max. number of sleepers max. load	15 pcs. 0.80 N/mm ²	EN 16730 TC 3	
Effect of severe environmental conditions			
max. increase of $C_{w,10}$	15%	EN 16730 TC 3	typical value
$\sigma_{w,10}$	0.40 N/mm ²		bond strength by pull-out of USP on sleeper
$\sigma_{w,20}$	0.50 N/mm ²		refer to chemical resistance data sheet
Resistance to water	excellent resistance	based on DIN 53428	refer to chemical resistance data sheet
Resistance to chemical agents	good resistance	based on DIN 53428	refer to chemical resistance data sheet
Resistance to fire	B2 class E	DIN 4102 EN ISO 11925-2	normally inflammable EN 13501-1
Resistance to hydrocarbons	good resistance	based on DIN 53428	refer to chemical resistance data sheet
Resistance to ozone	excellent resistance	based on DIN 53428	refer to chemical resistance data sheet

DB SLB 1510 EN © Copyright by Getzner Werkstoffe GmbH | 10/2018

All information and data is based on our current knowledge. Further information can be found in the download area of our website. The data can be applied for calculations and as guidelines, are subject to typical manufacturing tolerances and are not guaranteed. We reserve the right to amend the data.