

OSSI PELTOKANGAS
ANTTI NURMIKOLU

Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla



Ossi Peltokangas, Antti Nurmikolu

Raidegeometrian kunnossapito
tukemalla ja tukemiskalusto
Suomen rataverkolla

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015

Liikennevirasto
Helsinki 2015

Kannen kuva: Ossi Peltokangas

Verkkajulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-093-3

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Ossi Peltokangas ja Antti Nurmikolu: Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015. 132 sivua ja 2 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-093-3.

Avainsanat: radat, penkereet, kunnossapito, rataverkko

Tiivistelmä

Tukikerros on radan liikennöitävyyden edellyttämän raiteen tasaisuuden hallinnan kannalta keskeisin radan rakenneosia. Tukikerroksen raideseppelin hienonemisen ja uudelleenjärjestymisen sekä alempien rakenneosien pysyvien muodonmuutosten myötä muodostuvaa raiteen epätasaisuutta korjataan tukemiskoneen avulla. Tässä työssä käsitellään laaja-alaisesti tukemiseen liittyviä moninaisia osa-alueita perustuen kirjallisuus selvitykseen, haastatteluihin ja tukemiskoneiden operointeihin tutustumisiin.

Tukemistarve määräytyy suurelta osin radantarkastusvaunulla tehtävien raidegeometriamittausten perusteella. Siksi olisi tärkeää, että Suomessa käytössä olevassa mittakantaperusteisessa radantarkastuksessa vääristyvät mittaustulokset korjattaisiin laskennallisesti ennen tuentojen kohdentamista. Tuentatietoja ei Suomessa kerätä rekisteriin, mikä on hyvin merkittävä puute vaikuttaen rataomaisuuden hallintaan monella tasolla.

Nykyisin Suomen markkinoilla on käytettävissä runsas kymmenen sekä linja- että vaihteen tukemiskonetta, jotka ovat kolmen eri toimijan omistuksessa. Stabilisaattoreita Suomessa on kaksi. Eri koneet soveltuvat parhaiten erityyppisiin tehtäviin, mutta työn tehokkuudesta tingittäessä yksittäisen koneen käyttöalue laajenee. Tehokkaimmilla linjatukemiskoneilla työsaavutus voi olla jopa 2500 raidemetriä tunnissa.

Tukeminen voidaan toteuttaa joko suhteellisella menetelmällä, jossa raiteen nostoja ja sivuttaissiirtoja ohjataan tukemiskoneen oman mittausjärjestelmän perusteella tai tarkkuusmenetelmällä, jossa tukemisen yhteydessä toteutettavat raiteen siirrot perustuvat ennalta tehtyihin mittauksiin, ns. nuotitukseen. Suhteellisella menetelmällä työskenneltäessä raiteen vaakaja pystygeometriaan jää jäännösvirheitä. Tukemiskoneen mittausjärjestelmän mittakantaperusteisuudesta johtuen suhteellinen menetelmä myös korjaa aallonpituudeltaan erilaisia virheitä eri tehokkuudella. Tarkkuusmenetelmällä työskenneltäessä myös pidemmän aallonpituuden virheet tulevat korjatuiksi, ja on mahdollista saavuttaa nuotituksen mukainen virheetön raidegeometria.

Tukemisparametreilla tarkoitetaan muun muassa tukemishakkujen tukemispainetta, värähtelytaajuutta, puristus aikaa sekä ratapölkyn alapinnan ja tukemishakun yläpinnan välystä. Näillä tekijöillä on selvästi vaikutusta tukemistyön laatuun, mutta tukemiskonevalmistajista riippumaton tutkimusta niistä on tehty niukasti. Joka tapauksessa Suomessa tukemisparametrien vaikutusten tarkastelu, ja siten myös niiden tapauskohtainen optimointi on ollut hyvin vähäistä.

Tukemisvaikutuksen pysyvyyttä lisäävä, mutta Suomessa suurelta osin sivuutettu, mahdollisuus on ns. suunnitellun ylinoston käyttö. Vaihteiden tukeminen on monia ehdottomasti tunnettavia erityispiirteitä sisältävä haasteellisin tukemistehtävä, joka vaatii onnistuakseen suurta huolellisuutta ja ammattitaitoa niin nuotituksessa kuin tukemistyössä.

Raideseppelin hienontuneisuuden oletetaan vaikuttavan suoraan tukemistyöllä saavutettavissa olevaan geometrian laatuun ja ennen muuta tason pysyvyyteen. Tämän tutkimusprojektin seuraavan vaiheen keskeisenä sisältönä on raideseppelin kunnan ja tukemistoimien vaikutusten pysyvyyden välisen yhteyden selvittäminen mittavien kenttäkoejärjestelyin. Yhteyden perusteella voidaan arvioida elinkaaritaloudellisinta tukikerroksen puhdistusajankohtaa.

Ossi Peltokangas ja Antti Nurmikolu: Underhåll av spårgeometrin genom befästningar och befintlig befästnings-utrustning i bannätet i Finland. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 23/2015. 132 sidor och 2 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-093-3.

Sammanfattning

Banöverbyggnaden är den mest centrala konstruktionsdelen i en järnväg och behövs för att säkerställa järnvägsspårens jämnhet så att järnvägarna ska kunna trafikeras. Då spår-makadamen i banöverbyggnaden blir mer finfördelad och samtidigt omfördelas samt då komponenterna i de lägre skikten permanent ändrar form, blir järnvägen ojämn, vilket repareras med hjälp av en befästningsmaskin. I det föreliggande arbetet behandlas många olika typer av delområden som har att göra med befästning ur ett brett perspektiv. Arbetet grundar sig på en litteratursökning, intervjuer och studier av hur befästningsmaskiner fungerar i praktiken.

Behovet av befästning definieras i huvudsak vid mätningar av spårgeometrin. Dessa mätningar utförs med en vagn för spårkontroll. Därför vore det viktigt att de förvrängningar som uppstår i mätresultaten vid spårkontrollerna som i Finland baseras på mätdatabaser skulle korrigeras kalkylmässigt innan det fastställs var befästningarna ska placeras. Uppgifter om befästningar samlas inte i något register i Finland, vilket är en mycket betydande brist som påverkar hanteringen av järnvägsegendom på många nivåer.

På den finländska marknaden har man för närvarande tillgång till drygt tio maskiner för befästning av såväl järnvägslinjer som växlar. Dessa maskiner ägs av tre olika aktörer. Det finns två stabilisatorer i Finland. Olika maskiner lämpar sig bäst för olika typer av uppgifter, men om man prutar på arbetets effektivitet, blir användningsområdet för enskilda maskiner större. Med de mest effektiva maskinerna för befästning av järnvägslinjer uppgår arbetsprestationen till rentav 2 500 spårmeter per timme.

Befästningen kan utföras med den proportionella metoden, där rälsförhöjningar och sidoförflyttningar av rälsen styrs utgående från befästningsmaskinens eget mätsystem. Det andra alternativet är precisionsmetoden, där förflyttningar av rälsen i samband med befästning grundar sig på mätningar som har gjorts i förväg, dvs. mätningssdata eller så kallade noter. Om man arbetar med den proportionella metoden uppkommer kvarstående fel i järnvägsspårens horisontal- och vertikalgeometri. Eftersom befästningsmaskinens mätsystem baseras på en mätdatabas korrigeras inte heller alla typer av fel i våglängden lika effektivt genom den proportionella metoden. Om man arbetar med precisionsmetoden korrigeras även fel i längre våglängder och det är möjligt att skapa en felfri spårgeometri som är förenlig med mätningssdata.

Med befästningsparametrar avses bland annat trycket på befästningen vid pålning, vibrationsfrekvensen, presstiden, samt mellanrummet mellan sliprarna och de övre kanterna av pålar som är avsedda för befästning. Dessa faktorer inverkar helt klart på befästningens kvalitet. De berörda parametrarna har emellertid undersökts endast i ett fåtal studier som är oberoende av tillverkarna för befästningsmaskinerna. Konsekvenserna av de tillämpade befästningsparametrarna och därigenom även optimeringen av dessa parametrar från fall till fall har hur som helst undersökts endast i mycket begränsad utsträckning i Finland.

En möjlighet som i stort sett ignoreras i Finland men som gör befästningen mer stabil är tillämpningen av så kallade planerade överlyft. Den mest utmanande uppgiften är befästningen av spårväxlar. Detta arbete har många särdrag som man absolut måste känna till. För att arbetet ska lyckas krävs det stor noggrannhet och yrkesskicklighet i fråga om såväl mätningssdata som befästningsarbete.

Finfördelningen av spårmakadam antas ha en direkt inverkan på den kvalitetsnivå som kan uppnås i fråga om geometrin och framför allt geometrins beständighet med hjälp av befästning. Det centrala innehållet i följande fas av detta forskningsprojekt är att utreda korrelationen mellan spårmakadamens skick och beständigheten av befästningseffekterna genom omfattande fältexperiment. På grundval av denna korrelation kan man bedöma vilken tidpunkt som vore mest gynnsam för att rensa banöverbyggnaden med avseende på livscykelekonomin.

Ossi Peltokangas ja Antti Nurmikolu: Track geometry maintenance and maintenance machinery on the Finnish railway network. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 23/2015. 132 pages and 2 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-093-3.

Summary

In relation to management of track geometry, ballast bed is the most crucial structural component of a railway track. Degradation and rearrangement of ballast as well as permanent deformation of lower structural components cause deviations in track geometry that are repaired with the help of tamping machine. This study deals wide-rangingly with various sub-themes of tamping. Study is based on literature review, interviews and observations of tamping operations.

Need for tamping is mainly determined based on results of track geometry car measurements. Therefore it would be essential that distorted measurements gained with chord-based track geometry car, as currently in Finland, are corrected with transfer functions before allocation of tamping. Realization data of tamping are not being gathered into a register in Finland, which is an essential shortage hindering railway asset management in many levels.

Currently there are about 10 track tamping machines, about 10 universal (also turnout capability) tamping machines and 2 dynamic track stabilizers available in Finnish railway markets. Machines are owned by three contractors. There are certain kinds of tamping tasks where different types of machines suit best, but compromises in efficiency widen their range of use. Most efficient track tamping machines deal with up to 2500 track meters per hour.

Tamping can be performed either with relative method, where lifting and straightening of the track is controlled by machine's own measurement system, or with absolute method, where shifts of track in liaison with tamping are based on pre-measurements. Relative method leaves residual errors in vertical and horizontal track geometry. Due to chord-based measurement system of tamping machine efficiency of relative method to correct deviations depends also on wavelength of errors. With absolute method also longer wavelength deviations can be smoothed.

Tamping parameters include squeezing pressure and oscillation frequency of tamping tines, squeezing time and tine penetration depth. These parameters clearly affect the quality of tamping result, but their research independent from tamping machine manufacturers is scarce. Examination and case-specific optimization of these parameters has, however, been very little in Finland.

Designed over-lifting could be a possibility to increase the permanence of tamping action, but its application in Finland has been rare. Tamping of turnouts includes many special features. It is the most challenging tamping task, the success of which requires great care and proficiency in both pre-measurements and tamping action itself.

Degree of fouling of ballast bed is generally assumed to affect track geometry quality that can be gained by tamping, and especially its permanence. The next phase of this research project contains extensive field test arrangements and deals with the linkage between degree of fouling of ballast and permanence of effects of a tamping action. Understanding the linkage is the key in assessment of life-cycle economic timing for ballast cleaning.

Esipuhe

Tämä raiteen tukemista koskeva, haastatteluihin, tukemiskoneisiin tehtyihin vierailuihin ja kirjallisuuteen perustuva selvitys tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikössä.

Raportti kattaa ensimmäinen vaiheen Tukikerroksen toiminnan kehittäminen -tutkimusprojektista. Projekti tähtää tuottamaan nykytiedon aukkokohtiin tutkittua faktaa, jonka turvin tukikerrokseen kohdistettavia kunnossapito- ja parantamistoimenpiteitä koskeva päätöksenteko kehittyy entistä elinkaaritaloudellisemmaksi. Työ kuuluu Liikenneviraston rahoittamaan tutkimusohjelmaan Elinkaaritehokas rata (TERA).

Työtä ohjasi TTY:llä professori Antti Nurmikolu ja Liikenneviraston puolesta aluepäällikkö Erkki Mäkelä. Tämän raportin ovat laatineet dipl.ins. Ossi Peltokangas ja Antti Nurmikolu.

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto
Kunnossapito-osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	RADAN GEOMETRINEN KUNTO	13
2.1	Radan geometrian mittausten menetelmät ja tarkastustajuuksuus	13
2.2	Geometrisen kunnon arvioinnissa käytetyt suureet	18
2.2.1	Korkeuspoikkeama	18
2.2.2	Kallistus	20
2.2.3	Kierous	21
2.2.4	Nuolikorkeus ja nuolikorkeuspoikkeama	21
2.2.5	Raideleveys	23
2.3	Geometrisuureiden raja-arvot	24
2.3.1	Virheluokat	24
2.3.2	Raja-arvot	25
2.4	Geometrisen kunnon arviointi laajemmin	26
2.5	Tukemistarpeen määräytyminen	28
3	RADAN TUKEMINEN SUOMESSA JA MAAILMALLA	30
3.1	Tukemisen peruseriaate ja vaiheet	30
3.1.1	Tukemishakkujen tunkeutumisvaihe	32
3.1.2	Puristusvaihe	34
3.1.3	Tukemishakkujen takaisinvento	36
3.2	Tukemisparametrit	38
3.2.1	Tukemisyksiköiden toimintaperiaatteet	38
3.2.2	Tukemispaine	40
3.2.3	Tukemishakkujen värähtelytaajuus	40
3.2.4	Puristusaika	45
3.2.5	Tukemissyvyys ja vällys	47
3.2.6	Noston ja sivuttaissiirron suuruus ja rajoitukset	51
3.3	Tukemistavat	54
3.3.1	Kunnossapitotuenta	54
3.3.2	Läpituenta	54
3.4	Tukemismenetelmät	55
3.4.1	Suhteellinen menetelmä	55
3.4.2	Tarkkuusmenetelmä	65
4	TUKEMISTYÖN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS KUNNOSSAPIDOSSA	68
4.1	Tukemistyön suunnittelussa huomioitavia tekijöitä	68
4.1.1	Tukemistavan valinta	68
4.1.2	Tukemismenetelmän valinta	68
4.1.3	Tukemistyön ajoittaminen	68
4.1.4	Tukemisalueen määrittäminen	69
4.1.5	Tukemisen edellyttämät mittaukset ja nuotitus	69
4.1.6	Tukemistyön vaatimat esityöt	75
4.1.7	Sepelöintitarpeen arviointi	75
4.1.8	Koneresurssien suunnittelu	76
4.1.9	Työsuunnitelma ja jälkityöt	77
4.2	Vaihteen tukemisen erityispiirteet	77
5	TUKEMISTYÖHÖN LIITTYVÄ KALUSTO	82

5.1	Nykyaikainen tukemiskone yleisesti	82
5.2	Tukemiskoneiden ohjaustietokoneet	84
5.3	Tukemiskoneiden mittausjärjestelmät	86
5.4	Linjatukemiskoneet	91
5.4.1	Linjatukemiskoneet Suomessa	91
5.4.2	Linjatukemiskoneet maailmalla	101
5.5	Vaihteentukemiskoneet	103
5.5.1	Vaihteentukemiskoneet Suomessa	104
5.5.2	Vaihteentukemiskoneet maailmalla	110
5.6	Stabilisaattorit ja muut tiivistäjät	110
5.7	Muu tukemistyöhön liittyvä kalusto	116
5.7.1	Sepelöintiyksiköt	116
5.7.2	Sepeliaurat	117
6	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	120

LIITTEET

Liite 1	UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan yhteenveto tukemis- ja muista käytännöistä joillain Euroopan rataverkoilla (45).
Liite 2	Suomen rataverkolla käytettävät tukemissyvyydet eri kisko- ja ratapölkkytyyppien sekä tukikerrosmateriaalien yhdistelmillä sekä linjaosuuksilla että vaihteissa (2).

1 Johdanto

Tukikerros on raiteen tasaisuuden hallinnan ja säilyttämisen kannalta keskeisin radan rakenneosana. Tukikerros muun muassa tukee raidetta, jakaa ratapölkyiltä välittyvän kuormituksen alempien rakennekerrosten sallimalle tasolle ja radan geometrian hallinnan näkökulmasta ennen kaikkea mahdollistaa radan geometriavirheiden korjaamisen tukemiskoneella tukemalla. Yleisellä tasolla Suomen rataverkolla on jatkuvana pyrkimyksenä mahdollistaa suuremmat liikennöinti nopeudet ja raskaammat akselipainot, mikä nostaa raiteen tasaisuuden hallinnan ja ratapölkyjen tukeutumistilan laadun merkitystä entisestään.

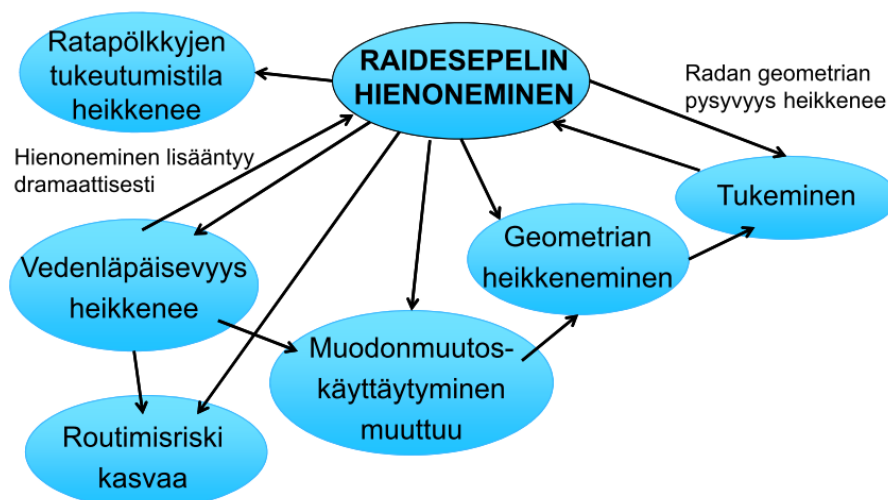
Suomessa tukikerros rakennetaan tyypillisesti karkearakeisesta murskatusta kiviaineksesta, raidesepeleistä ja tukikerrospaksuus betonipölkkyraiteessa on tyypillisesti 550 mm [55]. Vaikka alempiluokkaisilla rataosilla voidaan tukikerros materiaalina käyttää myös raidesoraa, niin tässä raportissa tukikerroksella tarkoitetaan, ellei toisin mainita, raidesepeleistä rakennettua tukikerrosta. Pohdittaessa tukikerrokselta vaadittavia ominaisuuksia, voidaan yleisesti todeta optimaalisen tukikerroksen pystyvän sietämään ja siirtämään alemmille rakennekerroksille radalla liikkuvan kaluston aiheuttamat kuormitukset ja esimerkiksi lämpövaihteluiden aiheuttamat rasitukset pienin palautuvien muodonmuutoksien ilman merkittävien pysyvien muodonmuutosten syntymistä. Hieman yksityiskohtaisemmin tarkasteltuna on Nurmikolu [58] kirjallisuus selvityksensä perusteella todennut tukikerros materiaalin edullisiksi ominaisuuksiksi seuraavaa:

- Mahdollisimman suuri raekoko kuitenkin siten, että raiteen tukeminen on edelleen mahdollista
- Verrattain tasarakeinen raekokojakauma
- Vähäinen hienoainespitoisuus
- Suuri sitkeys eli hyvä iskevän kulutuksen kesto
- Suuri kovuus eli hyvä hiovan kulutuksen kesto
- Vähäinen alttius kemialliselle ja pakkasrapautumiselle
- Kuutiomainen ja teräväsärmäinen raemuoto
- Suuri sepelirakeiden pinnan karkeus, erityisesti mikrokarkeus
- Materiaalista irtoavan hienoaineksen suuri vedenläpäisevyys ja heikko vedensitomiskyky

Nykyään Suomessa käytettävän uuden raidesepelein rakeisuusjakauma on pääradoilla EN-standardin 13450 [56] luokan F mukainen. Standardin kansallisen soveltamisohjeen [57] mukaan myös luokan E (uusioraidesepeleli ja alempiluokkaiset radat) ja luokan C (kuorma- ja vaihtotyöalueet) raidesepelein käyttö on mahdollista. Kansainvälisesti tarkasteltuna Suomessa käytettävä luokan F raidesepeleli on varsin karkearakeista [58], [59], [60]. Rakeisuusjakauman lisäksi on asetettu vaatimuksia esimerkiksi raidesepelein muotoarvolle, iskunkestävyydelle ja kulutuskestävyydelle. Suomessa raidesepeleitukikerroksen käyttöä päätymistä arvioidaan rakeisuusseulonnan 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summana saatavan rakeisuusluvun perusteella siten, että sepeleinpuhdistuksen taloudellisena rajana pidetään tämänhetkisessä käytännössä rakeisuuslukua 88.

Raidesepeliin kohdistuvia kuormituksia tarkasteltaessa voidaan siihen todeta kohdistuvan sepeliä kuluttavaa ja hienontavaa rasitusta jo ennen raidesepelin toimintaa varsinaisessa ratarakenteessa. Tällaista rasitusta syntyy muun muassa materiaalin kuormauksesta, kuljetuksesta ja asennuksesta. Merkittävimmät tukikerrosmateriaalia hienontavat ja kuluttavat tekijät Suomen rataverkolla ovat liikennekuormitus ja kunnossapitotoimet, erityisesti tukeminen, jota tosin tehdään myös uudisrakentamisen yhteydessä [107]. Edellä mainittujen tekijöiden aiheuttamaa kuormitusta on käytännössä mahdotonta välttää. Mekaanisten kuormitusten lisäksi raidesepeliin kohdistuu sen käyttöänsä aikana ympäristörasituksia, jotka liittyvät pääosin veden läsnäoloon rakenteessa, lämpötilan muutoksiin tai näiden yhdistelmiin. Yksittäisissä tapauksissa ympäristörasitusten vaikutus voi olla hyvinkin merkittävä, mutta yleisellä tasolla mekaanista kuormitusta voidaan pitää sepelitukikerroksen käyttöänsä näkökulmasta määrävänä. Tukikerrokseen kohdistuvia kuormituksia on esitelty yksityiskohtaisemmin esimerkiksi Nurmikolu [58].

Kuvassa 1.1 on havainnollistettu raidesepelin hienonemisen vaikutuksia ja niiden monimutkaisia vuorovaikutussuhteita. Hiljattain rakennetulla tai tuetulla radalla ratapölkkyjen voidaan olettaa olevan varsin optimaalisessa kontaktissa tukikerrokseen ja raidegeometrian olevan tasainen. Toistuvan liikennekuormituksen aiheuttaman sepelirakeiden hienonemisen ja murtumisen sekä edellisten mahdollistaman rakeiden uudelleenjärjestymisen myötä kontakti väjäämättä heikkenee etenkin ratapölkkyjen päiden alueella. Raidesepelirakeiden hienonemista tapahtuu koko rataverkolla, mutta erityisesti radan pystysuuntaisen jäykkyyden epäjatkuvuuskohtissa, kuten siltapäädissä, tasoristeyksissä ja vaihteissa, ratapölkyn päiden alle saattaa muodostua jopa tyhjätiloja [14]. Tällaisissa tapauksissa liikennekuormituksen aiheuttama dynaaminen kuormituslisä on huomattava ja tukikerrosmateriaalin hienoneminen iskukuormitusten myötä enenevässä määrin kiihtyvää. Lisäksi hienontuneen raidesepelin vedenläpäisevyys on heikentynyt, mikä Suomen olosuhteissa edelleen johtaa routimisriskin kasvamiseen. Toisaalta vedenläpäisevyyden heikentyessä voi tukikerroksessa muodostua raidesepelin hienonemisen kannalta erittäin epätoivottava tilanne, jossa liikennekuormituksen alaiseen rakenteeseen muodostuu huokosveden ylipainetta, jolloin ylipaineen pyrkiessä tasoittumaan toistuvat akseliylitykset voivat aikaansaada hiovan hienoainemassan pumppauksenomaisen liikkeen tukikerroksen huokostilassa. Myös hienontuneen raidesepelin kyky vastustaa niin palautuvia kuin pysyviäkin muodonmuutoksia on heikentynyt verrattuna uuteen raidesepeliin [107], [108], [109]. Tämä kuormituskestävyyden heikkeneminen yhdistettynä varsinaisen hienonemisen aiheuttamaan painumaan raiteessa johtaa ennen pitkää raidegeometrian heikkenemiseen ja virheisiin radantarkastuksessa niin, että raidegeometria joudutaan korjaamaan/palauttamaan tukemalla. Kuten edellä mainittiin, tukemistyön on todettu olevan merkittävä raidesepeliä hienontava tekijä. Heikentyneen kuormituskestävyyden takia tukemistyöllä saavutettavissa oleva lähtötaso on heikompi [3] ja tukemisen vaikutusten pysyvyys on lyhytkestoisempi, mikä johtaa raidegeometrian nopeampaan heikkenemiseen ja tiheämpään tukemistarpeeseen. Varsinaisen tukemistyön aiheuttaman hienonemisen lisäksi tukeminen löyhdyttää tukikerrosta, mikä edelleen johtaa sepelirakeiden hankaantumiseen ja murtumiseen liikennöinnin tiivistäessä tukikerroksen tukemisen jälkeen. Jossain vaiheessa tukemisen vaikutukset hienontuneessa raidesepelissä ovat niin lyhytkestoisia ja rakeiden uudelleenjärjestyminen niin nopeaa, että tukemistarve on käytännössä jatkuvaa. Tällöin ongelman pysyvä korjaaminen vaatii tukikerroksen puhdistusta seulomalla. Radan pysyviä muodonmuutoksia tarkasteltaessa on muistettava, että useissa tapauksissa radan geometrian heikkeneminen johtuu muissa (alus rakenne, pohjamaa) kuin tukikerroksessa syntyneistä muodonmuutoksista.



Kuva 1.1. Havainnekuva raidesepelin hienonemisen vaikutuksista ja niiden vuorovaikutussuhteista.

Nyt tehty kirjallisuustutkimus on osa laajempaa tutkimusprojektikonaisuutta, jonka tavoitteena on selvittää keinoja tukikerroksen toiminnan kehittämiseen Suomessa. Tätä tavoitetta voidaan edistää selvittämällä raidesepelin kunnan/hienontuneisuuden ja tukemistyön vaikutusten pysyvyyden yhteys sellaisella tarkkuudella, että sepelitukikerroksen elinkaaritilaloudellisimman seulonta-/puhdistusajankohdan arvioiminen etenkin raidegeometrian kunnossapidon näkökulmasta on mahdollista. Toisaalta tavoitetta voidaan lähestyä kartoittamalla maailmalla ratapölkkyjen tukeutumistilan ja raidegeometrian heikkenemisen ehkäisemiseksi käytettyjä menetelmiä sekä arvioimalla edellytyksiä ja mahdollisuuksia kyseisten menetelmien käytölle Suomessa tai kokonaan uuden menetelmän kehittämiseksi. Edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi nähtiin tarpeelliseksi tutkia kirjallisuuslähteisiin ja haastatteluihin perustuen, miten raidegeometrian kunnossapito on Suomen nykykäytännössä hoidettu ja millaista tukemiskalustoa rataverkollamme on käytettävissä, mikä mahdollistaa toisaalta myös nykykäytäntöjen kehittämispotentiaalin arvioimisen.

Tämän väliraportin aluksi esitellään radan geometrisen kunnan selvittämisessä käytettyjä menetelmiä, kuten radantarkastusvaunuja, minkä jälkeen esitellään geometrisen kunnan arvioinnissa käytettyjä suureita ja niiden määritelmät. Luvussa 2 esitellään lisäksi geometriavirheen korjaamisen kiireellisyyttä osoittavia virheluokkia Suomen nykykäytäntöön ja standardiin EN 13848-5 perustuen sekä geometriavirheiden suuruuden arvioinnissa käytettäviä periaatteita. Luvun lopuksi tarkastellaan pintapuolisesti tukemistarpeen määräytymistä ja määräytymisperusteita Suomen rataverkolla.

Luvussa 3 esitellään ensin tukemistyön peruseriaate, tukemishetken eri vaiheet ja niiden merkitys tukemistyön lopputulokselle, minkä jälkeen paneudutaan tukemistyöhön liittyvien muuttujien ja parametrien merkitykseen ja vaikutuksiin. Luvun lopuksi esitellään ensin pääosin hallinnollisen merkityksen omaavat tukemistyötavat, jotka Suomessa ovat kunnossapitotuenta ja läpituenta. Tämän jälkeen paneudutaan syvällisemmin suhteelliseen tukemistyömenetelmään ja tarkkuustyömenetelmään, joiden yhteydessä käsitellään yksityiskohtaisesti tukemiskoneiden mittajärjestelmien toimintaperiaatteita. Luvussa 4 käsitellään aluksi pintapuolisesti koko tukemis-

prosessia ja siinä huomioitavia tekijöitä ja luvun lopuksi käydään läpi joitain vaihteiden tukemiseen liittyviä erityispiirteitä.

Luvussa 5 esitellään ensin yleisesti nykyaikaisen tukemiskoneen tärkeimmät osat sekä tukemiskoneiden ohjaustietokoneiden ja mittausjärjestelmien kehittymistä 1970-luvulta aina nykypäivään asti. Luvun pääpaino on Suomen rataverkolla toimineen tai toimivan tukemiskaluston kattavassa esittelyssä sekä maailmalla käytössä olevien kehittyneimpien tukemiskonetyyppien suppeammassa esittelyssä. Luvun lopuksi esitellään tukemistyöhön varsinaisten tukemiskoneiden lisäksi liittyvää kalustoa, kuten stabilisaattoreita ja niiden käyttöä sekä sepelöintiyksiköitä ja sepeliauroja.

2 Radan geometrinen kunto

Eräs tukemistarpeen määräytymiseen (ks. luku 2.5) määräävästi vaikuttava tekijä on radan geometrinen kunto ja geometriavirheet. Tässä luvussa esitellään radan geometrisen kunnan selvittämisen menetelmiä sekä kunnan arvioinnissa käytettyjä suureita ja niiden raja-arvoja.

On pidettävä mielessä, että läheskään kaikissa tapauksissa virheet tai geometrian heikkeneminen eivät johdu tukikerroksesta, mutta valtaosa näistä virheistä pyritään korjaamaan tukemalla. Tunnisen [2] mukaan ensisijaisesti tulisi pyrkiä poistamaan ongelman syy, mutta tämä on olemassa olevilla radoilla harvoin mahdollista. [7]

2.1 Radan geometrian mittausmenetelmät ja tarkastustaaajuus

Radan geometrian ja sen suureiden mittaamiseen käytetyt mittausmenetelmät voidaan jakaa varsinaisiin radantarkastusvaunuihin (*track recording cars/vehicles*), kevyempiin mittausvaunuihin (*track geometry measuring trolley, TGMT*) ja käsikäyttöisiin mittalaitteisiin (*manually operated device, MOD*). Merkittävimpänä erona kahden ensin mainitun välillä on se, että radantarkastusvaunut mittaavat radan geometrian kuormitettuna ja TGMT:t kuormittamattomana. Radantarkastusvaunujen markkinoita hallitsevat käytännössä kolme valmistajaa: Matisa, MerMec ja Plasser & Theurer, kun taas TGMT:itä valmistavia toimijoita on useampia. [15], [16]

Kevyemmällä mittausvaunuilla voidaan ainakin kehittyneimpien mallien osalta mitata pääosin samat suureet kuin varsinaisilla radantarkastusvaunuilla, mutta esimerkiksi korkeuspoikkeamien kohdalla tämä vaatii kaksi mittausajoa kummallekin kiskolle erikseen. Käsikäyttöiset mittalaitteet soveltuvat tyypillisesti vain yksittäisten suureiden, kuten raidelevyden ja kallistuksen, määrittämiseen. Myös kierouden määrittäminen laskennallisesti käsikäyttöisten mittalaitteiden kallistusmittaus-tuloksista on mahdollista. Standardin EN 13848-4:n [16] mukaan korkeuspoikkeamien ja nuolikorkeusarvojen määrittäminen käsikäyttöisillä laitteilla ei ole mahdollista. [16] Sekä TGMT:n että MOD:n kohdalla mittausnopeus on varsin alhainen ja ne soveltunevatkin paremmin pistemäisten kohteiden mittaamiseen ja tutkimuskäyttöön. Suomessa mobiilin mittausvaunun käyttöön perustuvia ratamittauspalveluja tarjoaa ainakin Proacon Oy, jolla on käytössä kuvassa 2.1 esitetty RAMI-WAGON. Yrityksen internetsivujen mukaan vaunun mittausnopeus on parhaimmillaan 3 km/h ja mitattu data voidaan kääntää suoraan nuotitusmuotoon (ks. luku 4.1.5) eri valmistajien tukemiskoneille [63].



Kuva 2.1. Proacon Oy:n käytössä oleva RAMI-WAGON-mittausvaunu. [63]

Suomen rataverkolla radan geometrisen kunnan tärkeimpänä indikaattorina käytetään radantarkastusvaunujen, EMMA:n ja ELLI:n, tekemiä mittausajoja. Kuvassa 2.2 on esitetty VR Track Oy:n radantarkastuspalveluiden käytössä oleva Plasser & Theurerin EM 120-tarkastusvaunu (EMMA), jonka mittausajonopeus on maksimissaan 120 km/h. EMMA-vaunun kokonaispaino on noin 64,5 tonnia, josta etupään (kuvassa 2.2 oikealla) vetävän telin osuus on noin 32 t, takapäin vapaan telin osuus noin 26 t ja keskimäisen kelluvan telin paino on noin 6,5 tonnia [10]. [2], [12]



Kuva 2.2. Radantarkastusvaunu Plasser & Theurer EM 120 (EMMA). [12]

Yleisesti radantarkastusvaunujen ratageometrian mittausmenetelmä perustuu joko mittakantamittaukseen (*chord*) tai inertiamittaukseen (*inertial*). Mittakantamittaus, joka tehdään suhteellisena mittauksena eli mittaus tehdään suhteessa kiskon keskimääräiseen korkeusasemaan nähden, toteutetaan useimmiten kolmipistemittauksena, jossa esimerkiksi mittausvaunun telit muodostavat kaksi mittauspistettä ja niiden keskellä sijaitseva erillinen mittausteli kolmannen pisteen. Mittakantamittaus voidaan toteuttaa myös kosketuksettomana mittauksena lasereiden avulla, mutta tällöin esimerkiksi sumussa tai lumisissa olosuhteissa mittaaminen ei

välttämättä onnistu. Suomessa käytössä olevista radantarkastusvaunuista EMMAn geometrian mittaaminen perustuu mittakantamittaukseen mittapyöräkertojen avulla. ELLI-vaunussa voidaan raiteen geometrian mittaamiseen käyttää sekä kosketuksetonta lasersäteisiin perustuvaa mittakantamittausta että Applanix POS/TG-järjestelmään perustuvaa inertiamittausta [12]. [14]

EMMAN oman mittakannan pituus on 12 metriä ja vaunun omien telien etäisyydet keskellä sijaitsevaan mittausteliin ovat 5 ja 7 metriä. Esveldin [13] mukaan mittakantamittaukseen perustuvien vaunujen mittaustulosalue on tyypillisesti rajoittunut aallonpituudeltaan muutamasta metrillä noin 30 metriin saakka, mutta tulostettavia aallonpituuksia voidaan kasvattaa laskennallisesti yli 100 metriin. Mittakantamittauksen heikkoutena on mittaustelien keskinäisten etäisyyksien perusteella määräytyvien tiettyjen aallonpituuksien korostuminen ja toisten aallonpituuksien aliarviointi, mikä johtaa muuntofunktioiden käyttöön muutettaessa mittaustulosta radan geometriaksi. Muuntofunktioista huolimatta mittakantamittaus havaitsee heikosti erittäin lyhytaaltoisia geometriavirheitä. Käytettäessä symmetristä mittausteliväliä juuri kyseisen telivälin suuruista aallonpituutta ei havaita käytännössä lainkaan. Näin ollen standardi EN 13848-1 [15] suosittelee käyttämään epäsymmetristä pyöräväliä mittakantamittauksissa. [14]

Inertiamittaus perustuu liikettä mittaavien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien käyttöön. Mittakantamittauksesta poiketen inertiamittaus tehdään vain yhdessä pisteessä ja siinä saadaan mittaustuloksena suoraan radan geometria. Esveldin [13] mukaan inertiamittauksella voidaan saavuttaa lähes virheetön kuvaus radan geometriasta ja sen virheistä. Lisäksi voidaan mitata myös aallonpituudeltaan pitkiä, yli 100 metrin mittaisia virheitä. Perinteisesti inertiamittaus on vaatinut toimiakseen tietyn suuruisen ajonopeuden, mutta anturitekniikan kehittyttyä on saatavilla lähes nollataajuuksia mittaavia kiihtyvyyssantureita. Näiden mittaustarkkuus hyvin pienillä nopeuksilla on kuitenkin edelleen heikko ja teoriassa inertiamittaus toimiikin sitä paremmin mitä suuremmalla nopeudella ajetaan. [14]

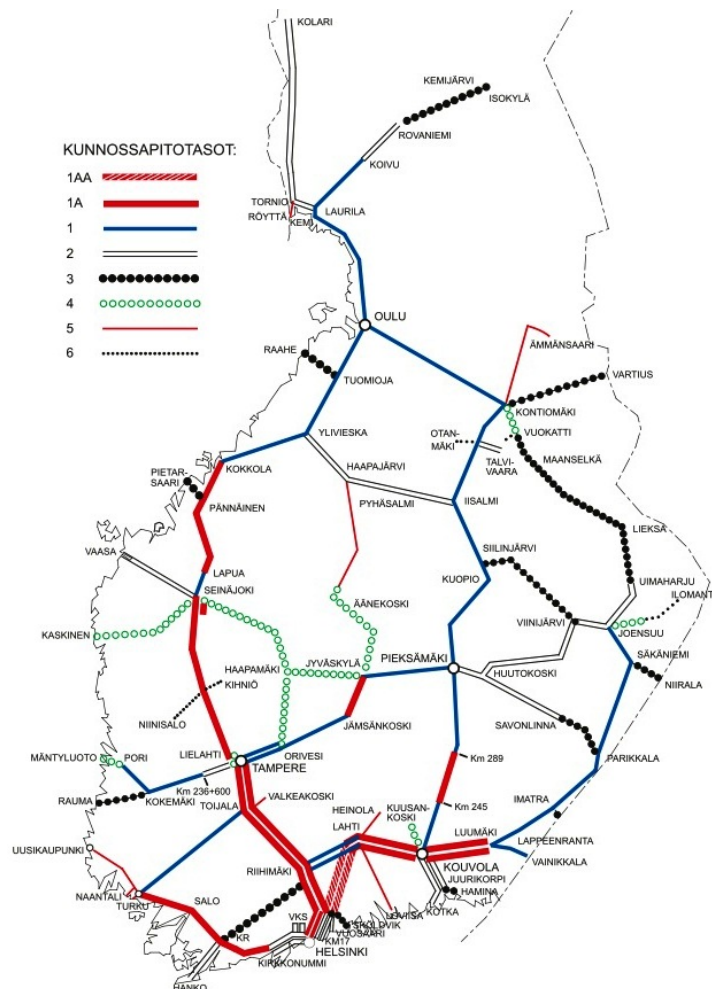
Perinteisesti radan kuormittamatonta geometriaa on mitattu takymetrillä. Menetelmän etuna on, että sillä saadaan selville radan absoluuttinen geometria miten pitkältä osuudelta tahansa. Absoluuttisen geometrian mittaamisen myötä myös radantarkastusvaunujen mittauksissa kulloinkin käytettävän muuntofunktion mahdollisesta ”hukkaamat” virheet tulevat mitatuiksi. Haastatteluiden perusteella on käynyt ilmi, että Suomessa on ollut tapauksia, joissa takymetrimittauksella on todettu geometriavirhe paikassa, jossa EMMA ei ole virhettä havainnut. Näiden tapausten yleisyyttä on kuitenkin hankalaa arvioida ja ne saattavat johtua ainakin osin siitä, että radantarkastusvaunu kuormittaa rataa mitatessaan, kun taas takymetrillä mitataan kuormittamatonta geometriaa. Takymetrimittauksen merkittävimpana rajoituksena on sen hitaus. Työsaavutusta voidaan kasvattaa jonkin verran kasvattamalla mitattavien pisteiden etäisyyttä, mutta samalla mitatuksi tulevan geometrian pistetiheys luonnollisesti heikkenee. Nyrkkisääntönä käytännön ratamittauksissa voitaneen nykyisin pitää 20 metrin pisteväliä linjaosuuksilla ja 10 metrin pisteväliä vaihteissa. Oman epävarmuustekijänsä takymetrimittauksen tulosten laatuun ja luotettavuuteen tuo niiden riippuvuus mittauksessa käytettyjen kiintopisteiden laadusta. Suomen rataverkon kiintopisteverkko on rakennettu useiden vuosikymmenten aikana useiden eri toimijoiden toimesta. Esimerkiksi kallioleikkausalueilla kiintopisteet pysyvät tarkasti paikallaan vuosikymmeniä, mutta vaikkapa turvesoilla pisteiden rakennustavalla on suuri merkitys niiden pysyvyydelle, eivätkä edes huolellisesti rakennetut kiintopisteet välttämättä pysy paikallaan kovin pitkään. Rajoituksistaan huolimatta taky-

metrimittaus on, soveltuvampien menetelmien yleistymisen ollessa hidasta, edelleen käytetyin nuotitusmittausmenetelmä Suomen rataverkolla.

Radantarkastusajoja tehdään Suomen rataverkon pääraiteilla 2–6 kertaa vuodessa radan kunnossapitotasosta taulukon 2.1 mukaisesti riippuen. Radan kunnossapitotasot Suomen rataverkolla vuonna 2013 on esitetty kuvassa 2.3. Radantarkastusajoista tehdään vuosittain yhteenvetoraportteja kunnossapito- ja korvausinvestointitarpeiden arvioimista varten. Keskeisimpiä raportteja ovat kevään ja syksyn tarkastusajojen loppuraportit sekä vuosittainen loppuraportti, jossa arvioidaan koko Suomen rataverkon kunnan kehittymistä laajemmin.

Taulukko 2.1. Pää- ja sivuraiteiden tarkastustarve/-taajuus kunnossapitotasoittain Suomen rataverkolla. Muokattu lähteestä [9]

Kunnossapitotaso	Raiteet	Mittaus raiteentarkastusvaunulla, krt/vuosi	Tarkastus liikkuvasta kalustosta, krt/vuosi	Kävelytarkastus krt/vuosi	Vaihdetarkastus krt/vuosi
1AA		6, väli ≤ 3 kk	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	2-3	4
1A		6, väli ≤ 3 kk	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	2	4
1		3	6, raiteentarkastusajojen puolivälissä	1-2	4
2		2	6, väli ≤ 2 kk	1-2	2-4
3		2	6, väli ≤ 2 kk	1-2	2-4
4	Pääraiteet	2	3, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	2-4
	Sivuraiteet	1	3		
	Sn 80 raiteenvaihtopaikat				
5	Pääraiteet	2	2, tarpeen mukaan, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	1
	Sivuraiteet	1 krt / 3 vuotta	1, mittaresiinalla tai vastaavalla		
	Sn 35 raiteenvaihtopaikat				
6	Pääraiteet	2	2, tarpeen mukaan, vähintään 6 kk välein veturista	1-2	1
	Sivuraiteet	1 krt / 3 vuotta	1, mittaresiinalla tai vastaavalla		
	Kuorma- ja seisontaraiteet	Sovitetaan erikseen			



Kuva 2.3. Suomen päätöjen kunnossapitotasot vuonna 2013. [8]

UIC:n ratageometrian pysyvyyteen keskittyneessä tutkimusprojektissa [45] vertailtiin radantarkastuskäytäntöjä Euroopan eri maiden välillä. Selkeyden vuoksi tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan kahdentyyppisten rataosuuksien tarkastuskäytäntöjä siten, että molemmilla rataosuuksilla päivittäinen bruttotonnimäärä oli yli 30 000 tonnia ja toisella rataosuudella suurin sallittu nopeus oli 140 km/h ja toisella 250 km/h.

Pienemmän sallitun nopeuden, 140 km/h, omaavilla rataosuuksilla tarkastusväli vaihteli yhdestä kuukaudesta yhteen vuoteen keskiarvon ollessa 6 kuukautta. Kuusi kymmenestä infraisännöitsijästä (*Infrastructure Manager, IM*) käytti mittakantamittaukseen perustuvaa mittausmenetelmää. Useimmissa tapauksissa käytössä oli epäsymmetrinen mittauspyöräväli, mutta mittauspyörien tarkemmat keskinäiset etäisyydet vaihtelivat maasta ja käytettävästä radantarkastusvaunusta riippuen. Neljä kymmenestä isännöitsijästä käytti inertiamittausta, jonka aallonpituusalue oli pääosin 3–25 metriä. [45]

Suuremman sallitun nopeuden, 250 km/h, radoilla tarkastusväli vaihteli huomattavasti, viikoittaisesti tarkastuksesta kuuden kuukauden tarkastusväliin. Suuremmalla nopeudella kaksi seitsemästä IM:stä käytti mittakantamittausta ja viisi seitsemästä inertiamittausta. Mittausten aallonpituusalueena käytettiin pääosin 3–25 metriä, mutta muutamilla oli lisäksi käytössä 25–70 metrin tai suurempi aallonpituusalue. Raportista ei selviä, olivatko kyseiset IM:t samoja kuin pienemmän sallitun nopeuden radan kohdalla.

2.2 Geometrisen kunnan arvioinnissa käytetyt suureet

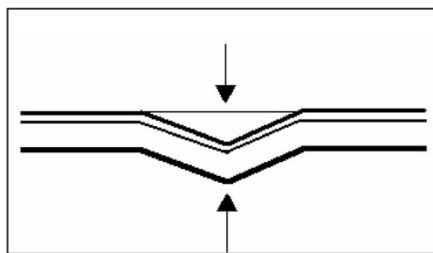
Seuraavassa on esitelty radantarkastusajoissa tarkastettavat suureet eli korkeuspoikkeama, kallistus, kierous, nuolikorkeus, raideleveys ja kaaren muoto sekä niiden määritelmät. Suureiden virheluokkia ja raja-arvoja käsitellään luvussa 2.3. Tarkastettavien suureiden mittaamisen vaatimukset on esitetty tarkemmin standardissa EN 13848-1.

Muita tarkastusajojen yhteydessä tarkastettavia suureita ja kohteita ovat mm. ajojohtimen asentoa ja muita ominaisuuksia kuvaavat suureet sekä kiskoprofiili. [12]

Suomessa käytetty mittausjärjestelmä sitoo suureiden mittaustulokset paikkaan käyttämällä GPS- ja ratametritietoja radantarkastustietokannasta. Näiden synkronointi toteutetaan GPS-tunnistuksena sekä sähköratapylväiden kääntöorren kiintopistetunnistuksena. Järjestelmän pituusmittaus pystyy jopa promillen tarkkuuteen 220 km/h mittaussnopeudella, mikä on maailmanlaajuisestikin ainutlaatuista. [18]

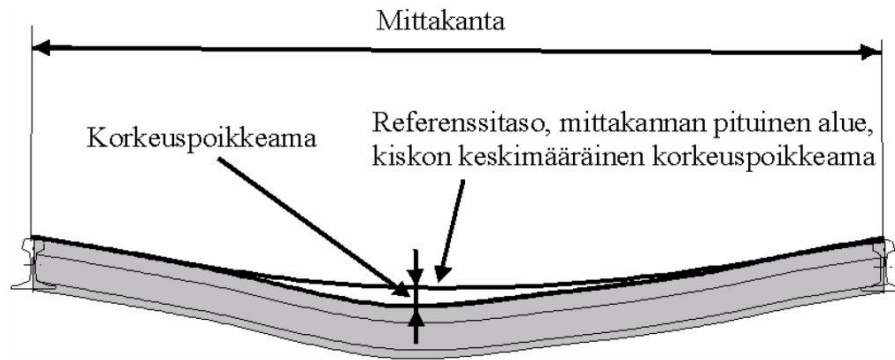
2.2.1 Korkeuspoikkeama

Korkeuspoikkeama (*longitudinal level*) on määritelty suomenkielisessä kirjallisuudessa kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla. Ratahallintokeskuksen julkaisun ”Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta” [10] vuodelta 2005 mukaan ”korkeuspoikkeamilla tarkoitetaan kiskon kulkupinnan teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyyttä kiskon todellisesta kulkupinnasta” kuvan 2.4 mukaisesti. Tässä teoreettisella jäniteellä tarkoitetaan käytännössä kulloinkin valitun mittakannan pituutta, jolloin korkeuspoikkeamalla käsitetään esimerkiksi viiden metrin mittakannan tapauksessa kiskon todelliselle kulkupinnalle asetetun viiden metrin mittaisen suoran keskikohtaan kohdistuoraa etäisyyttä kiskon todelliseen kulkupintaan.



Kuva 2.4. Korkeuspoikkeaman määritelmä julkaisun ”Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta” mukaisesti. [10]

Toisaalta Ratateknisten ohjeiden osan 13 ”Radan tarkastus” mukaan korkeuspoikkeama on ”kiskon kulkupinnan korkeussuuntainen poikkeama verrattuna keskimääräiseen raiteen korkeustasoon” kuvan 2.5 mukaisesti. Referenssitaso voi olla joko vaakasuora tai kallistettu. [9]

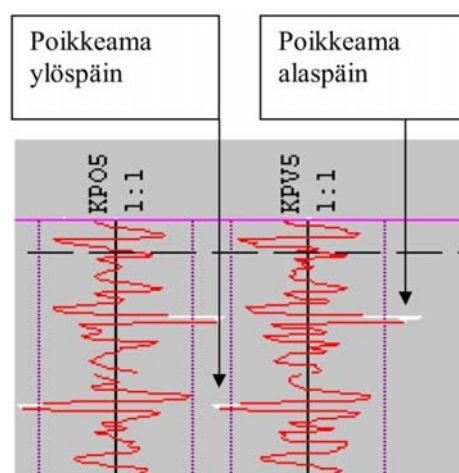


Kuva 2.5. Korkeuspoikkeaman määritelmä Ratateknisten ohjeiden osan 13 ”Radan tarkastus” mukaisesti. [9]

Standardissa 13848-1 [15] korkeuspoikkeama esitetään määritettäväksi kiskon kulkupinnan korkeussuuntaisena poikkeamana kiskon keskimääräisestä asemasta. Tämä määritelmä on hyvin lähellä kuvan 2.5 mukaista määritelmää.

Korkeuspoikkeamat mitataan Suomessa radantarkastusvaunun 12 metrin (5+7 metriä) mittakannalla kummastakin kiskosta, mutta ne tulostetaan 5 metrin mittakannalla. Tulokset voidaan tulostaa laskennallisesti myös 12, 35 ja 70 metrin mittakannoille. Korkeuspoikkeama määritetään sekä oikealle (KPO) että vasemmalle (KPV) kiskolle erikseen peräkkäisistä mittauksista [9]. Kuvassa 2.6 on esitetty korkeuspoikkeamien kuvautuminen EMMAn mittaustulosteeseen. Tulosteessa D-luokan virherajan (pistekatkoviiva) ylittyessä käyrä kuvautuu valkoisena. [10]

Standardi 13848-1 [15] korostaa, että käytettäessä mittakantamittaukseen perustuvaa geometrian mittausta, kuten EMMAn tapauksessa, on mitattua signaalia ”uudelleenväritettävä” (*re-colouring*) mittakantamittauksessa käytettävään Fouriermuunnokseen liittyvän siirtofunktion vaikutusten eliminoimiseksi.



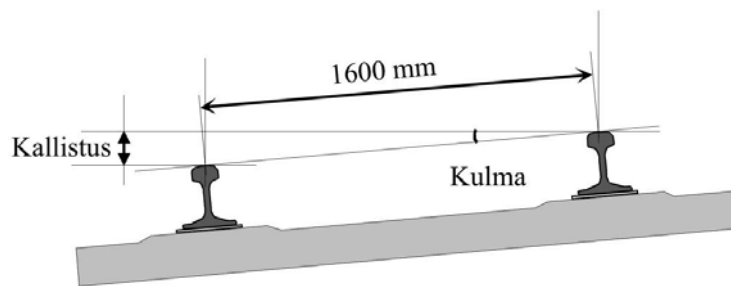
Kuva 2.6. Korkeuspoikkeamatulosten kuvautuminen radantarkastustulosteeseen. [10]

2.2.2 Kallistus

Kallistus (*cross level, superelevation, cant*) on raiteen kiskojen kulkupintojen ja vaakasuoran horisontin välinen kulma, joka esitetään suorakulmaisen kolmion korkeuskateettina, kun toisena kateettina on vaakasuora taso ja hypotenuusana nimellinen raideleveys lisättynä kahdella 60 E1-kiskon hamaran leveyden (72 mm) puolikkaalla sekä pyöristettynä lähimpään 10 millimetriin. Näin ollen Suomen 1524 mm raideleveydellä saadaan 60 E1-kiskolle hypotenuusan pituudeksi 1600 mm yhtälön 2.1 mukaisesti. [9]

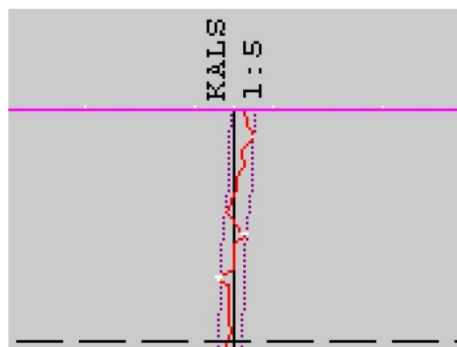
$$1524\text{mm} + \left(2 \cdot \frac{72\text{mm}}{2}\right) = 1596\text{mm} \rightarrow 1600\text{mm} \quad 2.1$$

Kallistus mitataan Suomessa mittausvaunun lattiaan kiinnitetyllä gyroskoopilla [10] ja tulos voidaan ilmoittaa joko kiskojen kulkupintojen ja vaakasuoran horisontin välisenä kulmana tai yleisemmin kiskojen kulkupintojen korkeuserona millimetreinä kuvan 2.7 mukaisesti. [9]



Kuva 2.7. Kallistus. [9]

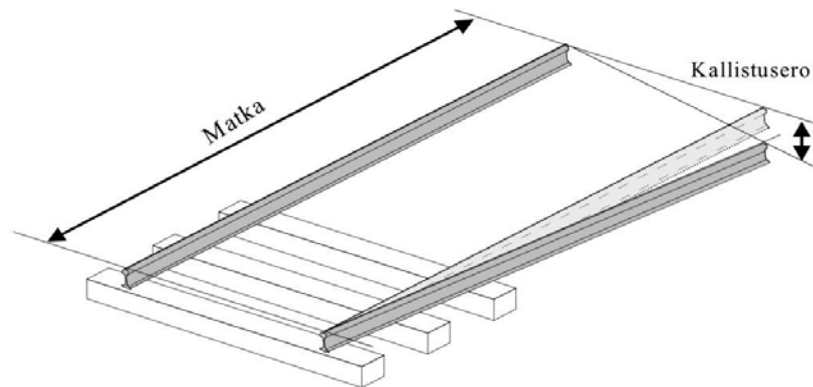
Radantarkastustuloksiin kuvautuvan kallistuskäyrän suunta ei ole riippuvainen mittausajon suunnasta, vaan kallistus näyttää aina oikeaan suuntaan. Kallistus (KALS) tulostuu tuloskäyrälle mittakaavassa 1:5 ja mittakaavaa on mahdollisuus muuttaa ohjelmassa (kuva 2.8). [10]



Kuva 2.8. Kallistuksen kuvautuminen radantarkastustuloksissa. [10]

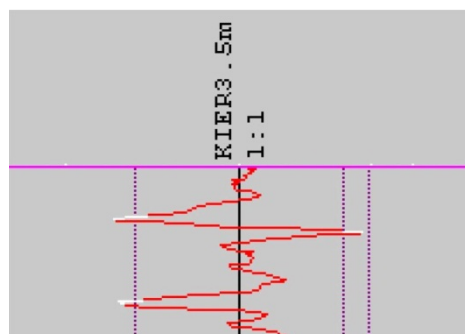
2.2.3 Kierous

Kierous eli ns. ristiheitto (*twist*) tarkoittaa kahdesta, toisistaan määritellyllä etäisyydellä sijaitsevasta kohdasta mitattua kiskojen kallistuseroa (kuva 2.9) ja se esitetään viistelukuna tai millimetreinä määritellyllä mittakannalla, jolloin kierouden yksikkönä on vastaavassa järjestyksessä joko ‰ tai mm/m. [9]



Kuva 2.9. Kierous. [9]

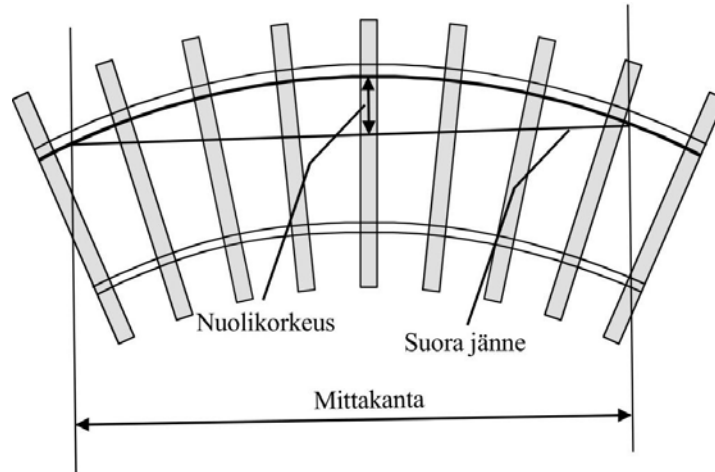
Kierous voidaan mitata joko suoraan mittalaitteella tai laskea kallistuksen arvoista [11]. Radantarkastustuloksissa kierous lasketaan kallistuksen muutosarvoista ja se tulostetaan laskennallisesti 3,5 metrin matkalta [10]. Kieroudeksi ei käsitetä siirtymäkaarissa olevaa suunniteltua kallistuksen muutosta, mutta suunniteltu kallistuksen muutos ei kuitenkaan saa ylittää Ratateknisten ohjeiden (RATO) osassa 2 ”Radan geometria” mainittuja viisteluvun vähimmäisarvoja [9]. Kierouden (KIER) kuvautuminen radantarkastustulosteeseen on esitetty kuvassa 2.10.



Kuva 2.10. Kierouden kuvautuminen radantarkastustulosteeseen. [10]

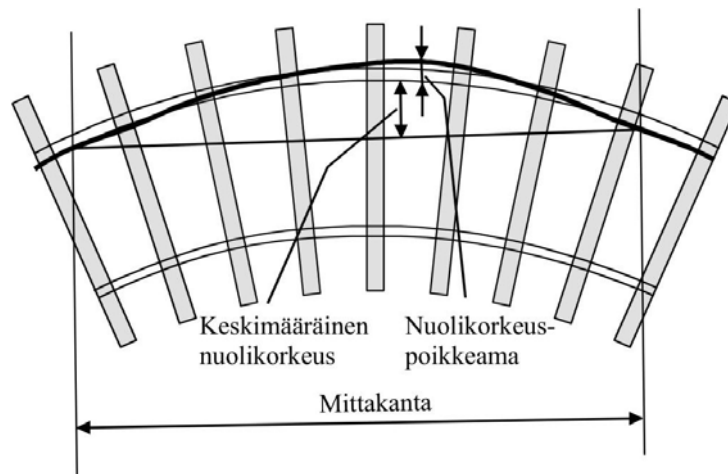
2.2.4 Nuolikorkeus ja nuolikorkeuspoikkeama

Nuolikorkeus (*alignment*) määritetään kiskon suurimpana sivusuuntaisena poikkeamana suorasta mittakannan pituisesta jänteestä kuvan 2.11 mukaisesti. Säännöllisessä ympyränkaaressa nuolikorkeuden maksimiarvo sijaitsee näin jänteen keskikohdalla ja säännöllisellä suoralla nuolikorkeus saa arvon nolla. [9]



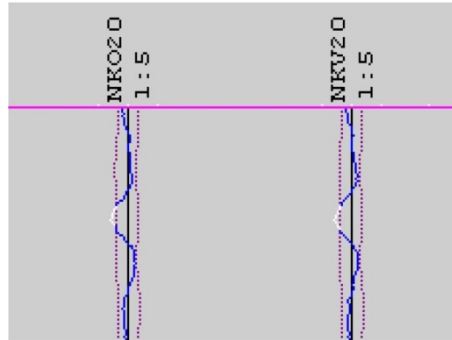
Kuva 2.11. Nuolikorkeuden määrittäminen. [9]

Nuolikorkeuteen tiiviisti liittyvä käsite on **nuolikorkeuspoikkeama**, joka määritetään kumman tahansa kiskon poikkeamana raiteen poikittaissuunnassa verrattuna keskimääräiseen nuolikorkeuteen (kuva 2.12). Keskimääräinen nuolikorkeus mitataan peräkkäisistä mittaustuloksista. Nuolikorkeuspoikkeamaa ei ilmoiteta radantarkastuksen tulostulosteissa. [9]



Kuva 2.12. Nuolikorkeuspoikkeama. [9]

Suomen rataverkolla nuolikorkeus mitataan kummastakin kiskosta 12 metrin pituisen jänteen keskeltä, mutta se tulostetaan tuloksissa matemaattisena nuolikorkeutena 20 metrin jänteellä (kuva 2.13). Nuolikorkeudet tulostuvat tuloskäyrälle mittakaavassa 1:5, joka on mahdollista muuttaa ohjelmassa. Tarvittaessa nuolikorkeudet oikealle (NKO) ja vasemmalle (NKV) kiskolle voidaan tulostaa laskennallisesti myös 35 ja 70 metrin mittakannoilla. Nuolikorkeuskuvaajien virherajat seuraavat kaarteissa kaaren muotoa eli geometriassa olevan kaaren muoto on siis nähtävissä nuolikorkeustuloksista. [10]



Kuva 2.13. Nuolikorkeustulosten kuvautuminen radantarkastustulosteeseen. [10]

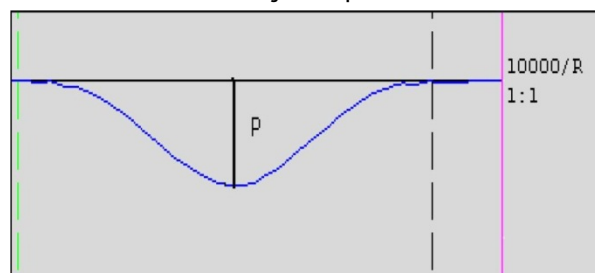
Radantarkastustuloksiin kuvautuu myös **kaaren muoto** ($10000/R$). Muoto tulostuu mittakaavassa 1:1 (kuva 2.14) ja tulosteeseen kuvautuneen säteen avulla voidaan laskea kaaren todellinen säde yhtälön 2.2 mukaisesti: [10]

$$R = \frac{10000}{p} \quad 2.2$$

missä

R on kaaren todellinen säde [m]

p on kaaren muotoa kuvaavan janan pituus radantarkastustulosteessa [mm]

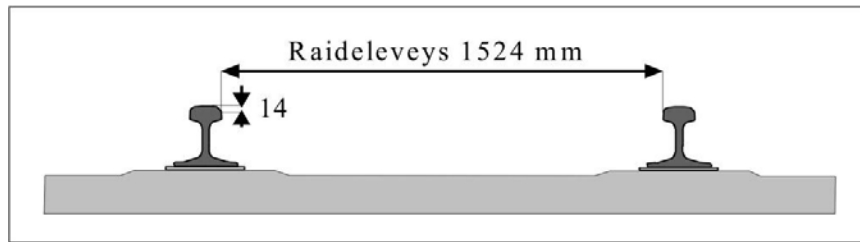


Kuva 2.14. Kaaren muodon kuvautuminen radantarkastustulosteeseen. [10]

Myös nuolikorkeuden mittaamisessa käytetään mittakantamittausta eli korkeuspoikkeaman mittausmenetelmään liittyvät rajoitukset ja huomiot pätevät myös nuolikorkeuden kohdalla. [15]

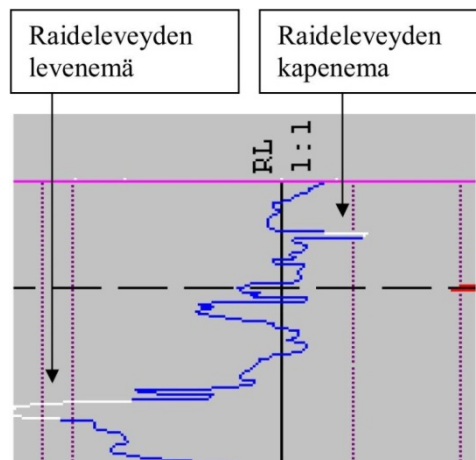
2.2.5 Raidелеveys

Edellä esitellyistä suureista kaikkia voidaan ainakin jossain määrin muuttaa tukikerrokseen vaikuttamalla eli tukemisella. Edellisten lisäksi radantarkastusajossa määritetään myös raideleveys (*gauge*) kuvan 2.15 mukaisesti. Raideleveyteen ei voida vaikuttaa tukemistoimilla, vaikka ainakin uusimmat tukemiskoneet mittaavat myös raideleveyden.



Kuva 2.15. Raideleveyden (RL) määrittäminen. [9]

EMMA-vaunulla raideleveys mitataan kulkusuunnassa taaimmaisella mittausakselilla ja se kuvautuu radantarkastustulosteessa kuvan 2.16 mukaisena. [10]



Kuva 2.16. Raideleveyden kuvautuminen radantarkastustulosteeseen. [10]

2.3 Geometriasuureiden raja-arvot

Tässä luvussa esitellään geometriasuureille Suomessa ja maailmalla käytettyjä virheluokituksia sekä raja-arvojen määrittämisen perusteita. Tärkeimpänä vertailulähteenä on käytetty standardia EN 13848-5 [17].

Suomen ohjeistuksessa [9] ja esimerkiksi standardissa 13848-5 [17] esitettyjen raja-arvojen yksityiskohtaista vertailua tämän raportin yhteydessä ei nähty tarkoituksenmukaiseksi raja-arvojen määrittelyperusteiden ja radantarkastusvaunujen eroavaisuuksien takia.

2.3.1 Virheluokat

Suomessa radantarkastusajoissa mitattaville suureille on määritetty kunnossapitotasoittain (kuva 2.3) kolme virheluokkaa, jotka kuvaavat virheen vakavuutta: [9], [10]

- **C-luokka:** Virhe on alkava virhe, jonka kehittymistä on tarkkailtava ja virhe on mahdollisesti korjattava.
- **D-luokka:** Virhe on sisällytettävä kunnossapitosuunnitelmaan ja korjattava saman kunnossapitokauden aikana ennen seuraavaa tarkastusta. Lisäksi D-luokan virheet vaikuttavat mitatun kilometrin virhemetrimäärään.
- **★-luokka:** Virhe on korjattava välittömästi, ns. ”tähtiluokan” virhe.

Radantarkastuksessa mukana olevan kunnossapitäjän on arvioitava välittömästi ★-luokan virheestä aiheutuvat toimenpiteet ja käytävä tutkimassa ★-luokan virhe paikan päällä heti tarkastusajon päätyttyä. Virheen paikalle on määrättävä nopeusrajoitus, kunnes virhe on korjattu. Nopeusrajoitus on määritettävä niin alhaiseksi, että virhe ei nopeutta vastaavalla kunnossapitotasolla ole enää ★-luokan virhe. Mikäli virhe jää myös alhaisemmalla nopeusrajoituksella ★-luokan virheeksi, on tapauskohtaisesti arvioitava tarvetta liikenteen keskeyttämiselle. [9], [10]

Standardissa EN 13848-5 [17] on esitetty kolme virheluokkaa geometriavirheiden vakavuuden arviointiin suurimmasta sallitusta nopeudesta riippuen:

- **AL:** *Alert Limit* viittaa arvoon, jonka ylittyessä radan geometrinen kunto on arvioitava ja huomioitava säännöllisen kunnossapidon suunnittelussa.
- **IL:** *Intervention Limit* viittaa arvoon, jonka ylittyessä vaaditaan kunnossapito-toimia siten, että IAL ei ylity ennen seuraavaa tarkastusta.
- **IAL:** *Immediate Action Limit* viittaa arvoon, jonka ylittyessä vaaditaan toimia raiteiltasuistumisen riskin vähentämiseksi hyväksyttävälle tasolle. Tämä voidaan toteuttaa liikenteen keskeyttämisellä, nopeusrajoituksella tai geometrian korjaamisella.

Tarkasteltaessa edellä esiteltyjä virheluokkia havaitaan niiden olevan vaadittavilta toimenpiteiltään hyvin yhteneväiset.

2.3.2 Raja-arvot

Suomessa tarkastusvaunumittauksessa mitattavien geometriasuureiden raja-arvot on annettu kunnossapitotasoinen eli käytännössä suurimpaan sallittuun nopeuteen perustuen. Tarkat raja-arvot on esitetty Ratateknisten ohjeiden osan 13 ”Radan tarkastus” liitteessä 1. Lisäksi geometriasuureille on annettu erikseen ratatöiden vastaanottoa koskevat rajat. [9]

Standardin 13848-5 [17] raja-arvojen määrittely poikkeaa Suomen käytännöstä. Sen mukaan virheitä tulisi tarkastella sallitun nopeuden ja tarkasteluaallonpituuden yhdistelmänä. Standardi esittää virheitä tarkasteltavan kolmella eri aallonpituusalueella, jotka ovat:

- D1: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$
- D2: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$
- D3: $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$

Näistä aallonpituusalue D3 tulisi standardin [17] mukaan huomioida vain 250 km/h suuremmilla nopeuksilla ja kyseinen aallonpituusalue liittyykin liikennöintiturvallisuuden sijaan enemmän matkustusmukavuuteen vaikuttaviin virheisiin. Taulukossa 2.2 on esitetty esimerkki standardissa 13848-5 ehdotetuista korkeuspoikkeaman raja-arvoista AL- ja IL-luokan virheille eri nopeuksien ja aallonpituusalueiden yhdistelmillä.

Taulukko 2.2. Standardin 13848-5 ehdottamat korkeuspoikkeaman raja-arvot eri nopeuksien ja aallonpituusalueiden D1 ja D2 yhdistelmillä. [17]

Speed (in km/h)	Mean to peak value (in mm) <i>AL</i>		Mean to peak value (in mm) <i>IL</i>		Mean to peak value (in mm) <i>IAL (reminder)</i>	
	Wavelength range		Wavelength range		Wavelength range	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>
$V \leq 80$	12 to 18	N/A	17 to 21	N/A	28	N/A
$80 < V \leq 120$	10 to 16	N/A	13 to 19	N/A	26	N/A
$120 < V \leq 160$	8 to 15	N/A	10 to 17	N/A	23	N/A
$160 < V \leq 230$	7 to 12	14 to 20	9 to 14	18 to 23	20	33
$230 < V \leq 300$	6 to 10	12 to 18	8 to 12	16 to 20	16	28

Taulukkoon 2.2 liittyen standardissa 13848-5 [17] huomautetaan, että taulukossa mainittu keskimääräinen arvo tulisi määrittää matkalta, joka on vähintään kaksinkertainen verrattuna aallonpituusalueen suurempaan raja-arvoon eli alueella D1 vähintään 50 metrin ja alueella D2 vähintään 140 metrin matkalta. Käytännössä näin määritettynä keskimääräinen arvo on kuitenkin lähellä nollaa ja virheiden suuruuden arvioinnissa voidaan näin käyttää arvoa nolasta maksimiarvoon.

2.4 Geometrisen kunnan arviointi laajemmin

Radantarkastusvaunun tulostulokäyrien perusteella voidaan paikallistaa yksittäiset virhepisteet. Rataverkon kunnossapidossa on kuitenkin tarpeen pystyä arvioimaan rataosuuden geometrista kuntoa myös laajemmassa mittakaavassa. Niinpä raiteentarkastusajon tuloksena tehdään yhteenvetoraportti, joka sisältää tulostulokäyrien mukaisen virhelistauksen ja mitatun rataosuuden perustietojen lisäksi kilometriyhteenvedon ja geometrisen kunnan palvelutasoindeksin.

Kilometriyhteenvedo sisältää kilometrin arvostelun sekä C- ja D-luokan virheiden pituudet kyseisellä kilometrillä yhteensä ja lisäksi jaettuna sadan metrin osuuksiin tai kilometrillä sijaitseviin yksittäisiin vaihteisiin. Näiden lisäksi esitetään joidenkin suureiden keskihajonta (*standard deviation, SD*) sekä 200 metrin osuuksittain että koko kilometriltä. Yllämainitussa ja taulukossa 2.3 esitetyssä kilometrin arvostelussa lasketaan kilometrin virhemetrimäärä laskemalla yhteen sillä esiintyneiden D-luokan virheiden pituudet. Pöällekkäin esiintyneet virheet lasketaan vain kertaalleen ja mikäli kilometrillä on ollut tähtiluokan virhe, voi kilometri saada enintään tyydyttävän arvosanan.

Taulukko 2.3. Yksittäisen kilometrin arvostelu radantarkastusajon tuloksista. [9]

Arvostelu	Kilometrin virhepistemäärä = D-luokan virheiden metrimäärä kilometrillä
Kiitettävä	= 0
Hyvä	≤ 10
Tyydyttävä	≤ 25
Epätydyttävä	> 25

Geometriasuureiden keskihajontaa käytetään kuvaamaan tarkasteltavan osuuden geometrian tasalaatuisuutta eli käytännössä muuttujan arvojen vaihtelua niiden keskiarvon ympärillä. Suomessa keskihajonta lasketaan kallistukselle, korkeuspoikkeamille ja nuolikorkeuksille yhtälön 2.3 mukaisesti. Standardissa 13848-6 [64] keskihajonta esitetään tyypillisesti laskettavaksi vain korkeuspoikkeamille ja nuolikorkeuksille aallonpituusalueella D1. Suomen rataverkon radantarkastuksessa mittaukset tehdään joka 25 cm välein eli 200 metrin matkalta kertyy yhteensä 800 mittausarvoa. [10], [64]

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad 2.3$$

missä

- SD on keskihajonta
 N on mittausarvojen lukumäärä
 x on mitattu arvo tietyllä hetkellä
 \bar{x} on mitattujen arvojen keskiarvo

Keskihajontaan rautatietekniikassa kiinteästi liittyvä termi on keskihajontaindeksiksi kutsuttu TQI (*Track Quality Index*). Suomalaisessa käytännössä VR Track Oy:n radantarkastuspalvelut määrittää TQI:n kertomalla keskihajonnan kahdella, jolloin TQI sisältää 95 % arvoista. Tätä kutsutaan myös 95 prosentin luotettavuustasoksi, kun arvojoukko oletetaan likimain normaalisti jakautuneeksi. Standardissa 13848-6 [64] ei ole mainintoja TQI:n laskennan yhteydessä käytettävistä kertoimista, jolloin käytännössä käytetään kerrointa 1, jolla saavutetaan noin 67 % luotettavuustaso. Tämä perustavanlaatuisen ero TQI:n laskentatavassa on hyvä pitää mielessä vertailtaessa Suomessa ja maailmalla mitattuja arvoja. Tunnisen [2] mukaan erityisesti korkeuspoikkeaman TQI ohjaa muun muassa läpituentatarpeen arviointia ja kunnossapitotason 1AA radoille onkin Ratateknisten ohjeiden osan 13 liitteessä 4 esitetty kunnossapidon raja-arvot myös eri geometriasuureiden keskihajontaindeksille.

Geometrisen kunnan palvelutaso (GKPT) on geometrisen kunnan havainnollistamiseen kehitetty indeksi, joka voidaan laskea yhtälön 2.4 mukaisesti. GKPT:n maksimiarvo on 100 %. [9], [10]

$$GKPT = 100\% + (P - T) - ET \quad 2.4$$

missä

- $GKPT$ on geometrisen kunnan palvelutaso [%]
 P on vakio, joka määritetään kunnossapitosopimuksessa. Tämä vakio, kuvaa rataosuudella olevien sellaisten virheiden määrää, johon kunnossapitäjä ei voi ainakaan helposti vaikuttaa. [%]
 T on tarkasteluvälillä mitattujen tyydyttäväksi arvosteltujen kilometrien prosentuaalinen osuus. [%]
 ET on tarkasteluvälillä mitattujen epätyydyttäväksi arvosteltujen kilometrien prosentuaalinen osuus [5]

Kuntoindeksin laskennassa lisäehtona on, että jos $(P-T) \geq 0$, niin laskennassa käytetään arvoa 0. [10]

Radantarkastusraportin yhteydessä esitetään myös GKPT:n kaltainen vaihteiden geometrisen kunnan palvelutaso VKPT, joka perustuu yhtälön 2.4 kaltaiseen yhtälöön, jossa muuttujana on tyydyttävien ja epätydyttävien vaihteiden lukumäärän prosentuaalinen osuus. [9]

2.5 Tukemistarpeen määräytyminen

Edellä esiteltiin radan geometrisen kunnan arvioimisessa käytettyjä suureita ja niille määritettyjä virheluokkia sekä radan geometrisen kunnan arviointi yleisemmällä tasolla. Yksityiskohtaisen jaottelun tekeminen siitä, kuinka suuri suhteellinen osuus Suomen rataverkolla vuosittain tuettavista osuuksista määräytyy tuettavaksi minkäkin tekijän tai raja-arvon ylittymisen johdosta, oli tämän raportin puitteissa mahdotonta. Alla on kuitenkin käsitelty tukemistarpeen määräytymistä ja määräytymisperusteita yleisemmällä tasolla.

Tukemistyön tarve syntyy pääosin seuraavien tekijöiden vaikutuksesta: [2]

- uudisrakennus- ja parantamiskohteiden edellyttämä tukemistarve ja kohteiden vaatima jälkituenta
- läpituontatarve (ks. luku 3.3.2) korkean kunnossapitotason radoilla
- radan tarkastuksissa radanpitäjän määrittelemien raja-arvojen kautta määräytyvä tukemistarve kunnossapitoalueittain eli niin sanotut kunnossapitotuennat (ks. luku 3.3.1)

Tarpeetonta tuentaa pyritään välttämään sen tukikerrosta hienontavan vaikutuksen takia. Betoniratapölkkyraiteessa läpituontaa on kuitenkin tehtävä sopivin väliajoin ratapölkkyjen keskeltä kantamisen välttämiseksi. Pääosin henkilöliikenteen käytössä olevilla raiteilla läpituontaa voidaan yleensä tehdä harvemmin kuin runsasta raskasta tavaraliikennettä palvelevilla raiteilla. [7]

Uudisrakentamis- ja perusparannusprojekteissa tukemistyötä tehdään käytännössä aina. Tyypillisiä tukemistyötä vaativia projekteja ovat esimerkiksi raiteenvaihtokoneella tehtävät koko päällysrakenteen uusimistyöt sekä sepeliseuloilla tehtävät tukikerroksen seulonta-/puhdistustyöt. Yleisesti tällaisten projektien yhteydessä raide tuetaan kahdesti tai tarvittaessa useamminkin jo rakentamisen tai uusimisen aikana. Kolmas tuentakerta tulee ajankohtaiseksi viimeistään, kun päällysrakenteeseen kohdistunut liikennekuormitus on enintään 100 000 bruttotonnia. Näitä tukemiskertoja seuraa niin sanottu jälkituenta noin 1 - 2 vuoden päästä käyttöönotosta. [2] Myös stabilisaattorin (ks. luku 5.6) käyttö on tyypillistä perusparannusten ja uudisrakentamisen yhteydessä.

Tunnisen [2] mukaan läpituontatarve määräytyy useimmiten tarkastelemalla radan geometrisen kunnan kehittymistä pidemmällä ajanjaksolla ja pidemmillä rataosuuksilla kerrallaan. Läpituontatarpeen arvioinnissa tärkeä arviointikriteeri on myös keskihajontaindeksi, erityisesti korkeuspoikkeaman osalta.

Muiden kuin yllä esiteltyjen tukemistöiden voidaan katsoa kuuluvan kunnossapitotuentojen piiriin, vaikka toki esimerkiksi usean lähekkäisen yksittäisen virheen korjaaminen läpituennalla on sinällään osa radan kunnossapitoa. Radantarkastustuloksia tarkasteltaessa rataosuus voidaan Tunnisen [2] mukaan jaotella esimerkiksi neljään luokkaan seuraavasti:

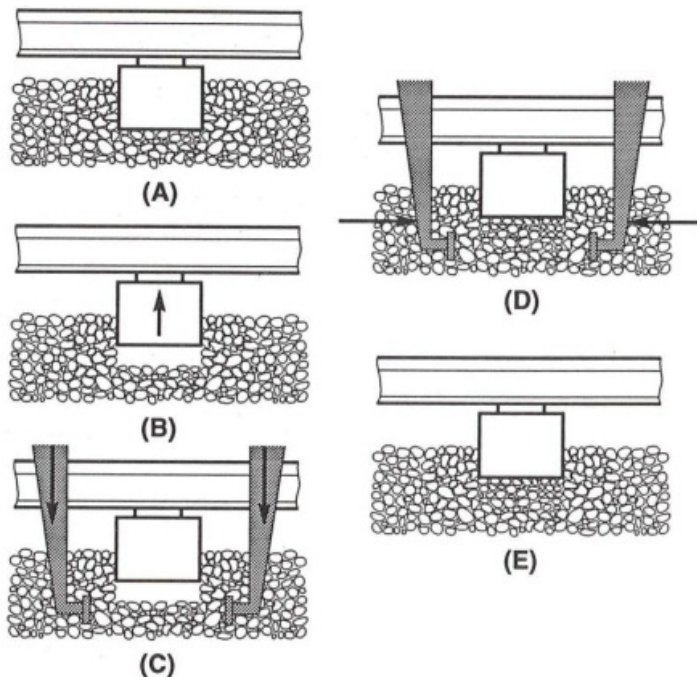
- sellaisenaan hyväksyttävät alueet, joilla ei esiinny virheitä tai virheet eivät ylitä raja-arvoja
- kunnossapitotuentana korjattavat osuudet
- läpituentana korjattavat osuudet
- osuudet, jotka vaativat muita toimenpiteitä kuin tukemista ongelman korjaamiseksi.

3 Radan tukeminen Suomessa ja maailmalla

Tässä luvussa esitellään ensin tukemistyön peruseriaate ja siihen liittyvät vaiheet, minkä jälkeen tarkastellaan yksityiskohtaisesti tukemisaggregaattiin ja -työhön liittyviä parametreja. Tämän jälkeen käsitellään tukemistyötapoja ja tukemismenetelmiä. Lopuksi tarkastellaan tukemistyön suunnittelussa huomioon otettavia tekijöitä.

3.1 Tukemisen peruseriaate ja vaiheet

Tukemisella (*tamping*) käsitetään raiteen rakentamista tai palauttamista haluttuun vaaka- ja pystygeometriaan ja se perustuu raiteen nostoon ja raideseppelin uudelleentivistämiseen ratapölkkyjen alle. Raiteen aseman laskeminen tukemistyöllä ei ole mahdollista, vaan se vaatii esimerkiksi tukikerroksen seulomista [2]. Kuvassa 3.1 on esitetty tukemistyön peruseriaate yksittäisen ratapölkyn kohdalla. [1]



Kuva 3.1. Tukemistyön peruseriaate yksittäisen ratapölkyn kohdalla. Muokattu lähteestä [1]

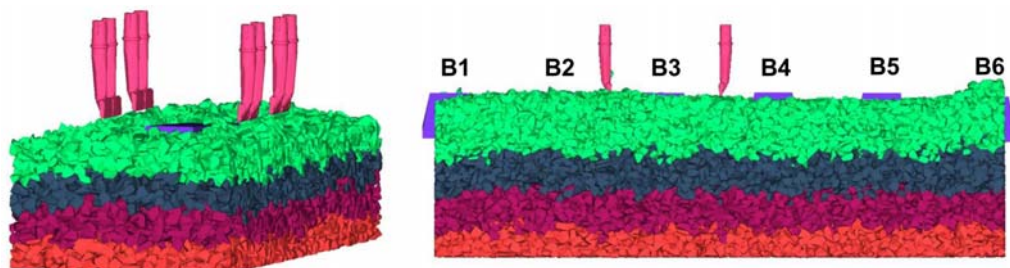
Kuvassa 3.1 esitettyjä vaiheita on selvennetty seuraavassa luettelossa: [1]

- A. Tukemiskone ajetaan tuettavan ratapölkyn kohdalle.
- B. Raide nostetaan ennalta määritettyyn korkeuteen ja noston johdosta ratapölkyn alle muodostuu tyhjätila. Noston yhteydessä tehdään myös haluttu sivusiirto eli ”rekkaus” ja raiteen kallistaminen.
- C. Tukemishakut työnnetään tukikerrokseen tuettavan ratapölkyn molemmin puolin.
- D. Tukemishakut puristavat raideseppiä kohdassa B muodostettuun tyhjätilaan, mikä saa ratapölkyn jäämään halutulle korkeudelle.
- E. Tukemishakut nostetaan ylös tukikerroksesta, raide lasketaan paikoilleen ja tukemiskone siirtyy seuraavan tuettavan ratapölkyn kohdalle.

Tukemistoimet tehdään tuettavan ratapölkyn molemmille päille samanaikaisesti. Nykyaikaiset tukemiskoneet voivat tukea useampia ratapölkkyjä yhtä aikaa yhden raiteennoston aikana. Tukemiskoneita ja niiden ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 5.

Varsinaisen tukemistyön onnistuminen ja halutun lopputuloksen saavuttaminen riippuvat merkittävässä määrin kuvan 3.1 vaiheista C, D ja E, joskin sillä oletuksella että vaiheessa B raiteen nosto- ja/tai sivuttaissiirtoarvot ovat olleet oikeat. Vaiheen B onnistuminen riippuu suoraan esimerkiksi geometriatietojen ja mittaustietojen oikeellisuudesta sekä tukemiskoneen mittaustajustuksesta eikä niinkään varsinaisesta tukemistyöstä. Tarkasteltaessa lähemmin vaiheita C-E on tarkoituksenmukaisempaa jakaa varsinainen tukemishetki kolmeen osaan: hakkujen tunkeutumiseen tukikerrokseen, sepelin puristamiseen tuettavan ratapölkyn alle ja hakkujen poisvetämiseen.

Perales et al. [40] ovat Ranskassa tarkastelleet edellä mainittuja kolmea vaihetta LMGC90-ohjelmistolla tehdyn kolmiulotteiseen NSCD-algoritmiin (*Non Smooth Contact Dynamics*) perustuvan DEM-simuloinnin (*Discrete Element Method*) avulla. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta kuvassa 3.2 esitettyä näytettä. Vasemmanpuoleinen näyte kuvaa yhden ratapölkyn yhden pään tilannetta, jossa ratapölkky tuetaan kahdeksan tukemishakun avulla ja oikeanpuoleinen näyte tilannetta, jossa on kuusi peräkkäistä ratapölkkyä sisältävä rataosuus tukemishakkujen määrän ollessa sama.



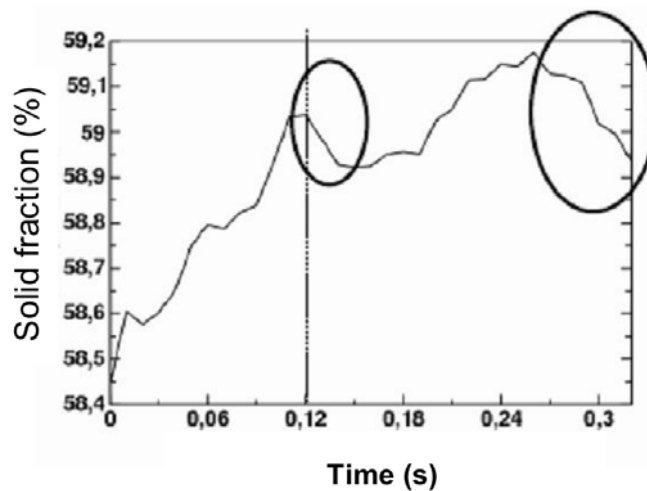
Kuva 3.2. Raidesepelipartikkeleista koostuva yhden ratapölkyn näyte vasemmalla ja kuusi peräkkäistä ratapölkkyä (B1-B6) sisältävä rataosuusnäyte oikealla. Molemmissa näytteissä kahdeksan digitalisoitua tukemishakua. [40]

Kuvassa 3.2 esitetyt raidesepelinäytteet koostuivat 20 000 (vasemmalla) ja 93 000 (oikealla) jäykästä monikulmiosta, jotka kuvaavat raidesepelirakeita. Simuloitujen raidesepelirakeiden rakeisuusjakauma oli 25/50 mm. Näytteiden mitat olivat 0,9 x 2 m vasemmalla ja 3,2 x 2 m oikealla. Sepelitukikerroksen paksuus oli molemmissa tapauksissa 0,6 metriä. Kitkakertoimen arvoksi rakeiden välillä annettiin 1, näytteen ja ”pohjamaan” välillä 0,6 ja nolla näytteen ja kuviteltujen näytelaatikon seinien välillä. Ennen tukemistyön simulointia näytteisiin kohdistettiin liikennekuormitusta vastaava kuormitus, jonka suuruus ei kuitenkaan käy tutkimuksesta ilmi. NSCD-algoritilla tehtävien simulointien laatua voidaan arvioida mallinnettujen sepelirakeiden limittymisasteen (*overlap rate*) perusteella. Limittymisaste oli tutkimuksen kaikissa tapauksissa alle 1,5 %, mikä Peralesin et al. [40] mukaan ilmaisee simulointien korkeaa laatua.

3.1.1 Tukemishakkujen tunkeutumisvaihe

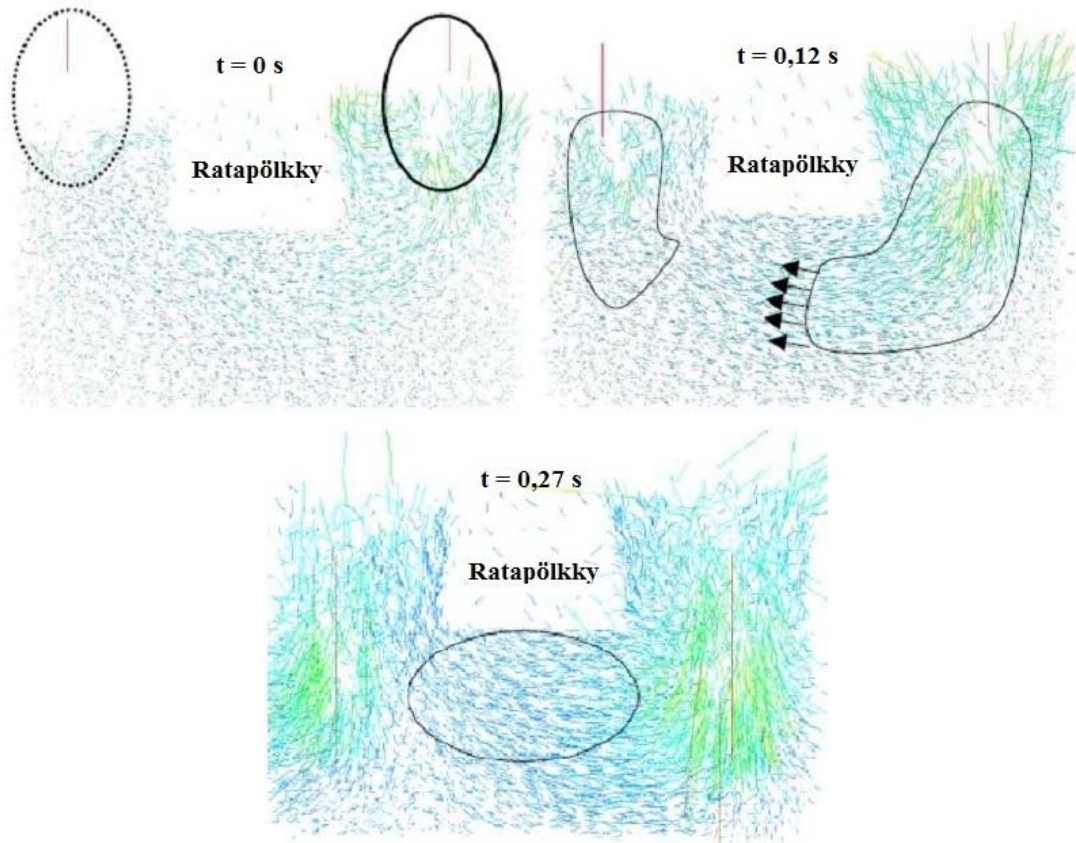
Tarkastellaan tukemishakkujen tunkeutumisvaihetta kuvassa 3.2 oikealla olevan näytteen ratapölkyn B3 avulla. Kyseisen ratapölkyn alle on sepelirakeita poistamalla muodostettu 20 mm tyhjätila kuvaamaan noston suuruutta. Tunkeutumisvaihe simuloitiin Peralesin et al. [40] tutkimuksessa vuodelta 2011 laskemalla värähtelevät tukemishakut tukikerrokseen 0,2–2 m/s nopeudella siten, että tukemishakkujen kärkien ja ratapölkyn alareunan etäisyys pystysuunnassa on 20 mm. Tarkka hakkujen laskunopeus ei käy tutkimuksesta ilmi, mutta Saussine et al. [41] ovat vuonna 2008 käyttäneet hyvin samankaltaisissa simuloinneissa arvoa 1,0 m/s.

Kuvassa 3.3 on esitetty raideseppelin tiivistymistä kuvaavan kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen (*solid fraction*) pölkyn B3 alla tukemishakkujen tunkeutumisvaiheessa ajan funktiona. Kuvaajan hienoisesta epämääräisyydestä huolimatta havaitaan kiinteän aineksen osuuden trendin olevan kasvava tunkeutumisvaiheen edetessä. Kuvassa 3.3 ympyröillä korostetuilla ajanhetkillä 0,12 s ja 0,27 s on havaittavissa tiivistymisen heikkenemistä, mitkä ajallisesti osuvat Peralesin et al. [40] mukaan tunkeutumisvaiheen keskikohtaan ja loppukohtaan, mutta syitä niiden taustalla ei ole käsitelty tutkimusartikkelissa. Yleisesti kuvasta 3.3 havaitaan kiinteän aineksen osuuden lisääntyneen 0,5 prosenttiyksikköä tunkeutumisvaiheen alku- ja loppuhetken välillä.



Kuva 3.3. Kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen tukemishakkujen tunkeutumisvaiheen aikana. [40]

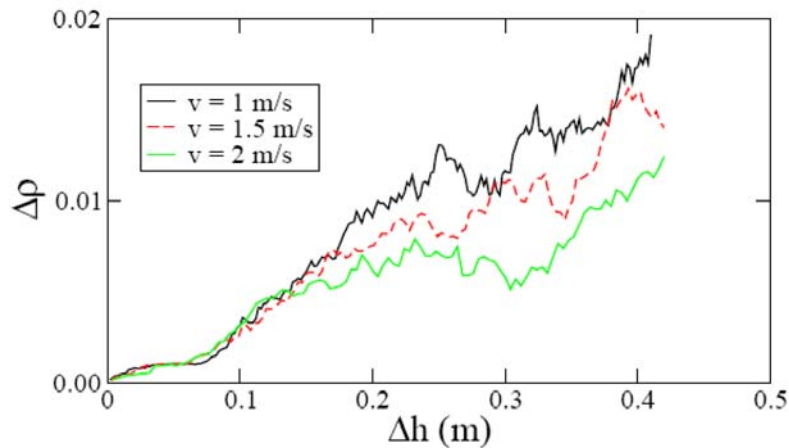
Kuvassa 3.4 on havainnollistettu raideseppelirakeiden siirtymiä tunkeutumisvaiheen aikana siirtymävektoreiden avulla. Jo ajanhetkellä 0 s ja varsinkin ajanhetkellä 0,12 s tukemishakkujen aiheuttamissa siirtymissä on havaittavissa selkeä epäsymmetrisyys ratapölkyn B3 eri puolilla.



Kuva 3.4. Tukemishakkujen tunkeutuminen tukikerrokseen ja raidesepelirakeiden siirtymävektorit tunkeutumisvaiheen alussa (0 s), puolivälissä (0,12 s) ja loppuhetkellä (0,27 s). Muokattu lähteestä [40].

Epäsymmetrisyys ja ratapölkyn vasemmanpuoleisten sepelirakeiden pienemmät siirtymät johtuvat siitä, että simuloinneissa tuettiin ensin nyt esitetyn ratapölkyn B3 vasemmalla puolella oleva ratapölkky B2 (ks. kuva 3.2), jolloin pölkyn B2 tukemisen vaikutuksesta pölkyn B3 vasemmalla puolella tukikerrokseen on jäänyt ”aukko” tai raidesepeli on löyhemmässä tilassa. Tämä mahdollistaa vasemmanpuoleisten tukemishakkujen helpomman tunkeutumisen tukikerrokseen ratapölkkyä B3 tuettaessa. [40]

Saussine et al. [41] tutkivat simuloinneissaan myös tukemishakkujen tunkeutumisnopeuden vaikutusta tiivistyneisyyden lisääntymiseen hakkujen lopullisella tunkeutumisvyvytydellä. Simuloinnin tulokset 1, 1,5 ja 2 m/s tunkeutumisnopeuksille on esitetty kuvassa 3.5. Käytetyn raidesepelinäytteen raekokojakauma ja tiheys sekä tukemishakkujen kärkien ja ratapölkyn alapinnan pystysuuntainen etäisyys olivat samat sekä näytekokoa lähes sama kuin Peralesin et al. [40] tutkimuksessa. Rakeiden poistamisella kuvattu noston suuruus oli 10 mm ja kitkakerroin rakeiden välillä 0,5.

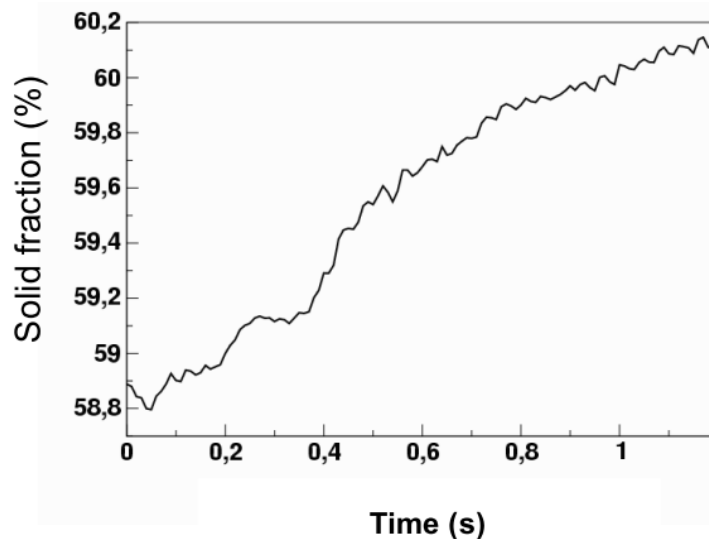


Kuva 3.5. Tukemishakkujen tunkeutumisnopeuden vaikutus kiinteän aineksen osuuden lisääntymiseen. [41]

Kuvasta 3.5 havaitaan, että tunkeutumisnopeuden kasvu pienentää tiivistyneisyyttä, mikä Saussinen et al. [41] mukaan johtuu värähtelevien hakkujen tukikerrokseen aiheuttamien värähtelysyklien pienemmästä määrästä tunkeutumisnopeuden ollessa suurempi.

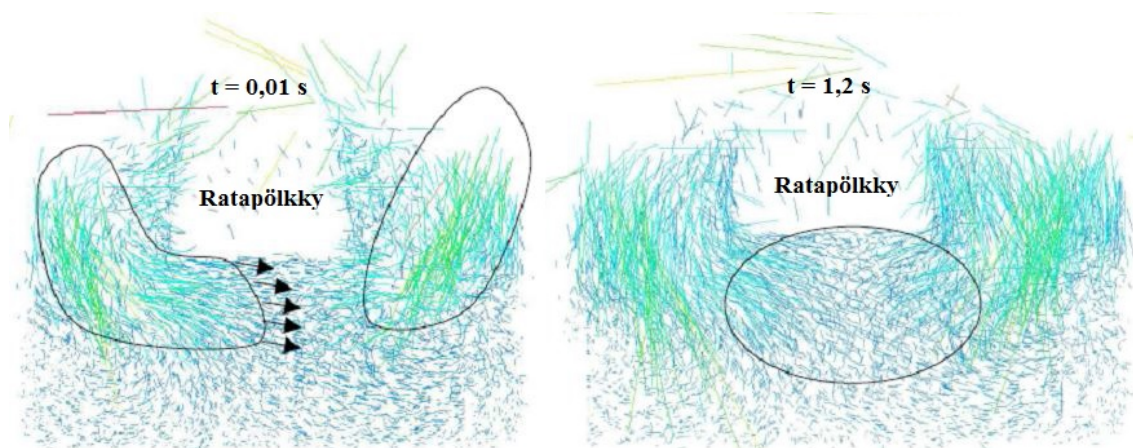
3.1.2 Puristusvaihe

Tunkeutumisvaiheen jälkeen värähtelevät tukemishakut puristavat raidesepeäliä ratapölkyn alle täyttäen pölkyn nostossa syntyneen tyhjätilan. Tätä kutsutaan puristusvaiheeksi. Kuvassa 3.6 on esitetty kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen ratapölkyn alla puristusvaiheen aikana.



Kuva 3.6. Kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen puristusvaiheen aikana. [40]

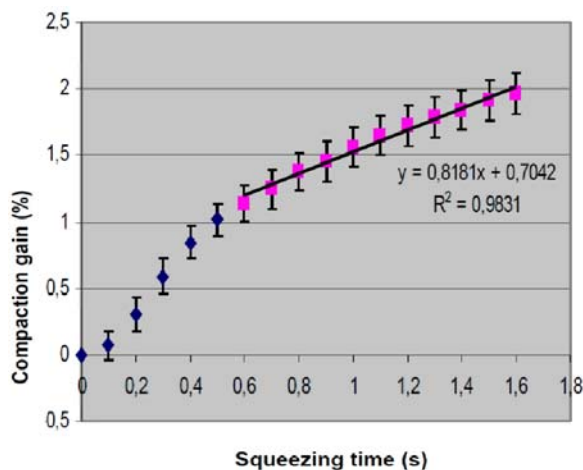
Kuvasta 3.6 havaitaan, että suunnilleen ajanhetken 0,05 s jälkeen kiinteän aineksen osuus näytteessä ratapölkyn B3 alla kasvaa melko tasaisesti koko puristuksen ajan. Yleisesti voidaan todeta kiinteän aineksen osuuden kasvavan noin 1,2 prosenttiyksikköä puristusvaiheen aikana. Kuvassa 3.7 on esitetty raidesepelipartikkeleiden siirtymävektorit puristusvaiheen ajanhetkillä 0,01 ja 1,2 s.



Kuva 3.7. Raidesepelirakeiden siirtymävektorit puristusvaiheen alkuosassa (0,01 s) ja loppuhetkellä (1,2 s). Muokattu lähteestä [40].

Jo kuvassa 3.4 havaittu ratapölkyn B2 tukemisesta johtuva siirtymävektoreiden epäsymmetrisyys on havaittavissa myös kuvassa 3.7, mikä ilmenee pölkyn vasemmanpuoleisten raidesepelirakeiden vaivattomampana siirtymisenä ratapölkyn alle. Epäsymmetrisyys vaikuttaa tasoittuvan saavutettaessa puristusvaiheen loppuhetki $t = 1,2$ s.

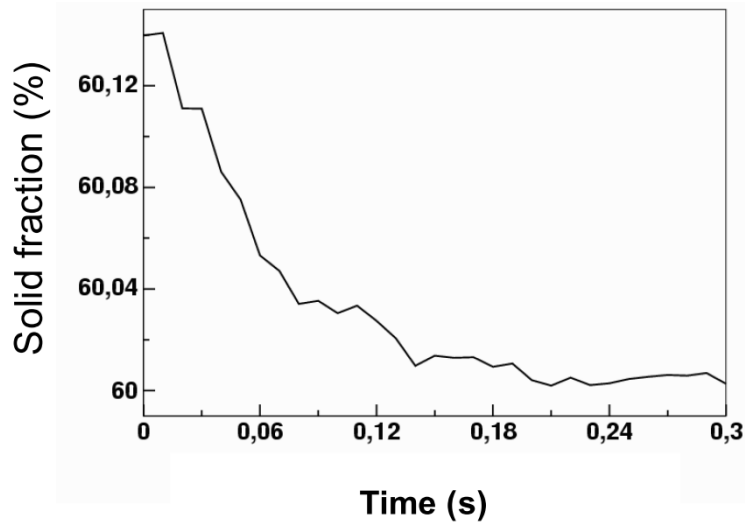
Perales et al. [40] ovat lisäksi esittäneet kiinteän aineksen keskimääräisen kasvun ja sen keskihajonnan kehittyvän puristusvaiheen aikana kuvan 3.8 mukaisesti. Heidän mukaan tiivistyneisyyden lineaarinen kehitys ajanhetken 0,6 s asti johtuu tukikerrokseen kohdistetusta puristavasta voimasta ja hieman hitaampi lineaarinen kehitys ajanhetken 0,6 s jälkeen tukemishakkujen värähtelystä.



Kuva 3.8. Kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kasvu ja keskihajonta puristusvaiheen aikana. [40]

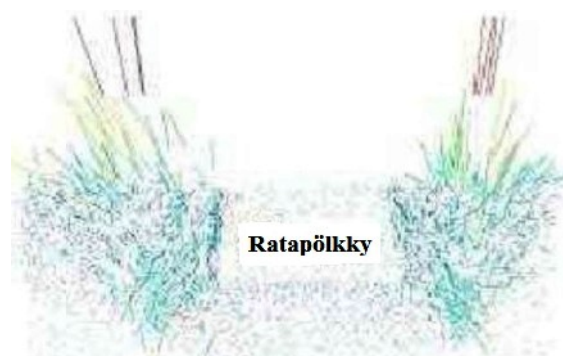
3.1.3 Tukemishakkujen takaisin veto

Tukemisen kolmesta vaiheesta viimeinen on tukemishakkujen takaisin veto tukikerroksesta, minkä jälkeen tukemiskone voi siirtyä seuraavan tuettavan ratapölkyn kohdalle. Kuvassa 3.8 on esitetty kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen ratapölkyn alla takaisinvetovaiheen aikana.



Kuva 3.8. Kiinteän aineksen osuuden keskimääräinen kehittyminen tukemishakkujen takaisinvetovaiheen aikana. [40]

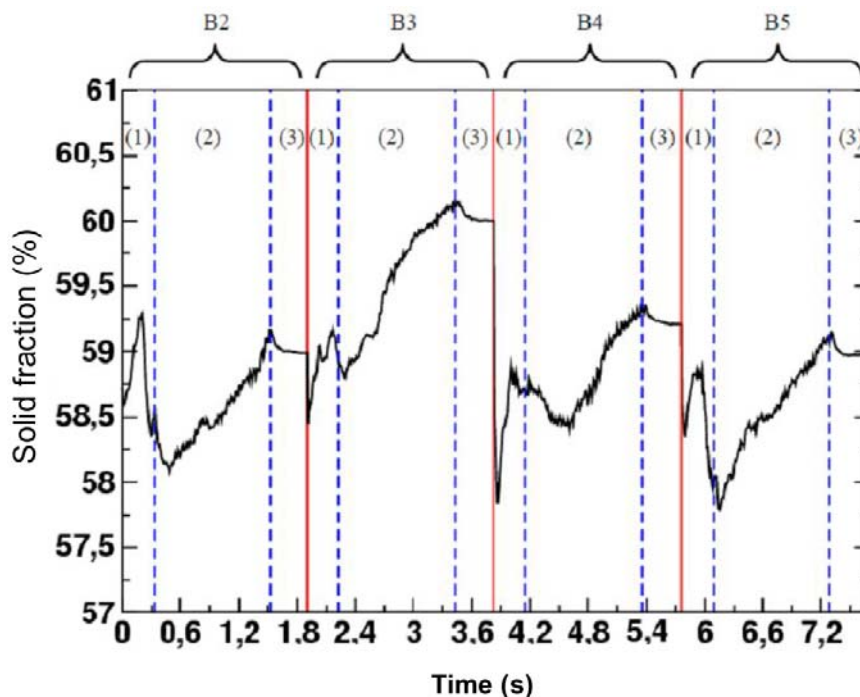
Kuvassa 3.8 havaitaan kiinteän aineksen osuuden vähäinen, suuruudeltaan noin 0,15 prosenttiyksikköä, pieneneminen hakkujen takaisinvedon aikana. Tämä johtuu edellisen vaiheen aiheuttaman vaakasuuntaisen puristuksen vapauttamisesta. Kuvassa 3.9 on esitetty raidesepelirakeiden siirtymävektorit hakkujen takaisinvetovaiheen lopussa. [40]



Kuva 3.9. Raidesepelirakeiden siirtymävektorit takaisinvetovaiheen loppuhetkellä (0,3 s). Muokattu lähteestä [40].

Kuvasta 3.9 havaitaan ratapölkyn viereisten raidesepelirakeiden seuraavan tukemishakkujen liikettä. Tarkasteltaessa kuvissa 3.3, 3.6 ja 3.8 esitettyjä raidesepelin tiivistyneisyyttä kuvaavia kiinteän aineksen osuuksia ratapölkyn alla, havaitaan, että puristusvaihe on tiivistymisen kannalta merkittävin sen vaikutuksen oltua 1,2 prosenttiyksikköä. Hakkujen tunkeutumisvaiheen vaikutus oli 0,5 ja takaisinvetovaiheen -0,15 prosenttiyksikköä. Kuvassa 3.10 on esitetty Peralesin et al. [40] simuloinneissaan

saama kiinteän aineksen osuuden kehittyminen kuvan 3.2 oikeanpuoleisen näytteen ratapölkkyjen B2, B3, B4 ja B5 alla. Simuloinnissa käytetyt parametrit olivat ilmeisesti muuten samoja eri pölkkyille, mutta sepelirakeita poistamalla muodostetut nostoa kuvaavat tyhjätilat olivat 10, 20, 30 ja 40 mm vastaavassa järjestyksessä. [40]



Kuva 3.10. Tiivistyneisyyden kehittyminen ratapölkkyjen B2-B5 alla eri vaiheiden aikana. (1) kuvaa tunkeutumisvaihetta, (2) puristusvaihetta ja (3) takaisinvetovaihetta. [40]

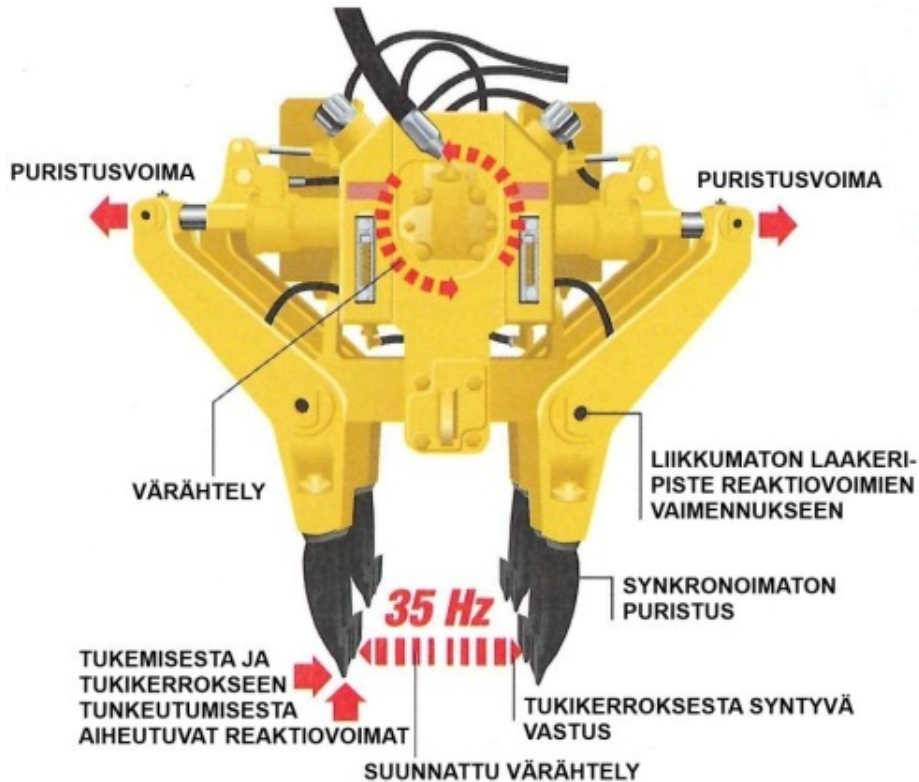
Kuvasta 3.10 on nähtävissä suurta epäsäännöllisyyttä liittyen tiivistyneisyyden kehitykseen tukemishakkujen tunkeutumisvaiheessa tai heti sen jälkeen. Lisäksi havaitaan, että tiivistyneisyyden lisääntymisen kannalta puristusvaihe on ehdottomasti merkittävin. Tämä on ristiriidassa niin ikään Ranskassa Saussinen et al. [41] tekemien simulointien kanssa, joiden perusteella he toteavat tunkeutumisvaiheen merkityksen olevan noin puolet tiivistyneisyyden kasvusta koko tukemisprosessin aikana. Toisaalta Saussinen et al. [41] simuloinneissa esimerkiksi kitkakerroin sepelipartikkeleiden välillä oli 0,5 Peralesin et al. [40] käyttämän 1,0 sijaan, mikä ei voi olla vaikuttamatta tuloksiin.

Yhteenvedon voitaaneen todeta kaikilla kolmella, mutta erityisesti hakkujen tunkeutumis- ja puristusvaiheilla, olevan vaikutusta tukemisen lopputulokseen. Perales et al. [40] toteavat lopullisen tiivistyneisyyden vaikuttavan erittäin merkittävästi liikennöinnin rataan aiheuttamiin pysyviin muodonmuutoksiin ja korostavat, että jo pieniläkin, suuruudeltaan 0,1 prosenttiyksikön, tiivistyneisyyden lisäyksillä on muodonmuutoksia pienentävä vaikutus.

3.2 Tukemisparametrit

3.2.1 Tukemisyksiköiden toimintaperiaatteet

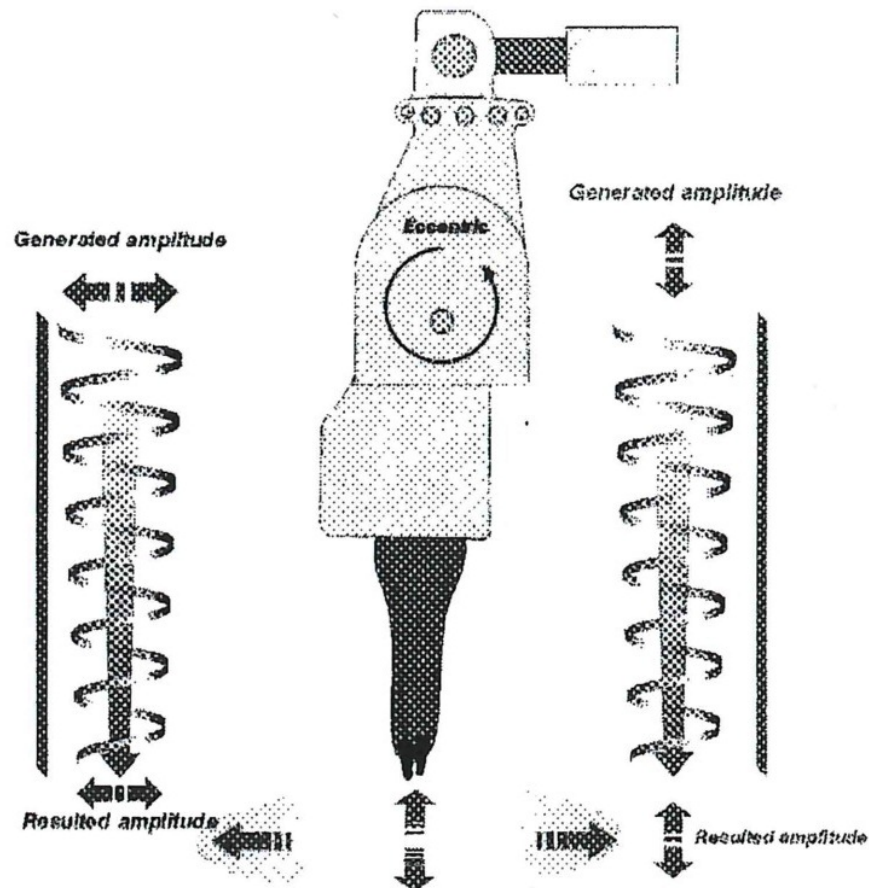
Tukemistyöhön liittyy useita tukemisen lopputulokseen ja sen pysyvyyteen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä, joita on esitelty seuraavissa luvuissa. Kuvassa 3.11 on esitetty havainnekuva Plasser & Theurerin tukemiskoneen tukemisyksiköstä/tukemisaggregaatista (*tamping unit*).



Kuva 3.11. Plasser & Theurerin tukemiskoneen tukemisyksikkö. Muokattu lähteestä [3]

Plasser & Theurerin tukemisperiaatetta kutsutaan asynkroniseksi tasapainetuennaksi (*non-synchronous uniform-pressure tamping*). Tällä metodilla tukikerrosmateriaali tiivistetään ratapölkyn alle värähtelyn ja paineohjatun vaakasuuntaisen puristuksen avulla ja riittävän puristuksen saavuttamisen ensisijaisena arviointiperusteena käytetään tukemishakkujen liikkeen suuruuden sijaan tukemishakkujen ja tukikerroksen välistä tukemispainetta. Näin ollen jokainen itsenäinen tukemishakkupari puristaa toisistaan riippumatta tukikerrosmateriaalia ratapölkkyjen alle kunnes ennalta asetettu tavoitepaine saavutetaan. Tukemisyksikön synnyttämä värähtely saa tukemishakuille tyypillisesti aikaan 3–5 mm vaakasuuntaisen värähtelyamplitudin. [3]

Toisen suuren tukemiskonevalmistajan Matisan uudempien, 1990-luvulta lähtien valmistettujen tukemiskoneiden tukemisperiaate poikkeaa Plasser & Theurerin periaatteesta siten, että Matisan koneissa tukemishakut liikkuvat elliptistä rataa vaakasuoran liikkeen sijaan kuvan 3.12 mukaisesti. Elliptinen liike toteutetaan tukemishakun varren epäkeskisyydellä. Marbachin [5] mukaan Matisan tukemisperiaatteen pystysuuntaisen värähtelykomponentin ansiosta raidesepeleirakeet lukkiutuvat paremmin ratapölkyn alle ja tukemishakkujen tunkeutuminen varsinkin huonokuntoisempaan tukikerrokseen on helpompaa.



Kuva 3.12. Havainnekuva Matisan elliptiseen värähtelyyn perustuvasta tukemisperiaatteesta. [5]

Kuitenkin Lichtbergerin [3] mukaan sivuttaissuuntaisen värähtelykomponentin lisääminen elliptisen tukemisperiaatteen tavoin löyhentää tukikerroksen alemmaa, stabilisoitunutta osaa, mikä johtaa epätasaiseen tiivistymiseen ja lisää raidesepeleirakeiden liuskoittumista ja edelleen heikentää radan geometrian pysyvyyttä.

On huomautettava Bernhard Lichtbergerin toimivan Plasser & Theurerin tutkimus- ja testausosaston johtajana ja Jörn Marbachin olevan nykyään Matisan markkinointijohtaja. Valmistajista riippumattomia kirjallisuuslähteitä tukemisperiaatteisiin liittyen ei tämän tutkimuksen yhteydessä löydetty.

3.2.2 Tukemispaine

Plasser & Theurerin tukemiskoneissa käytettävä tukemispaine on tyypillisesti 115–125 bar [3]. Tukemispaineen valinta riippuu erityisesti tukikerroksen kunnosta ja yleisesti hyväkuntoinen tukikerros saavuttaa tavoitellun tiiviyn paremmin ja alemmalla tukemispaineella. Aalto [4] on esittänyt opinnäytetyössään uudelle tai seulotulle raidesepelille käytettäväksi 95–110 barin tukemispainetta ja vanhalle raidesepelille jo yllä mainittua 115–125 baria. [2] Aalto [4] on lisäksi todennut tukemispaineen olevan liian suuri, jos tukemishakkujen varret toistuvasti koskettavat tuettavan ratapölkyn reunoja tai jos puristusvaiheen aikana on havaittavissa selkeää ”sepelivirtaa” ratapölkyn päiden alueella.

International Union of Railways (UIC) [45] on parhaiden käytäntöjen oppaassaan vuonna 2008 kerännyt tietoja useilta eurooppalaisilta rataverkoilta. Tarkastelussa olivat mukana Sveitsi, Espanja, Saksa, Kreikka, Unkari, Ranska, Iso-Britannia, Itävalta, Belgia ja Norja. Tarkastelussa radat jaettiin karkeasti kahteen luokkaan: perinteisiin (*conventional*) rataosuuksiin, joiden suurin sallittu nopeus vaihtelee maittain ollen välillä 160–220 km/h sekä tätä korkeamman nopeuden rataosuuksiin. Tarkempi luokittelu käy ilmi tämän raportin liitteen 1 ensimmäiseltä sivulta. Oppaasta käy ilmi, että tarkastelussa mukana olleilla rataverkoilla käytetyt tukemispaineet, jotka vaihtelevat pääosin välillä 90–140 bar, ovat yllä esitellyille kahdelle nopeusluokalle suunniteltujen samat. Ainoastaan Espanjassa alemman nopeuden ratojen tukemispaine 110–120 bar kasvaa suurempiin nopeuksiin siirryttäessä 175 bariin, mikä on ylivoimaisesti suurin tarkastelussa esille tullut tukemispaine. [45]

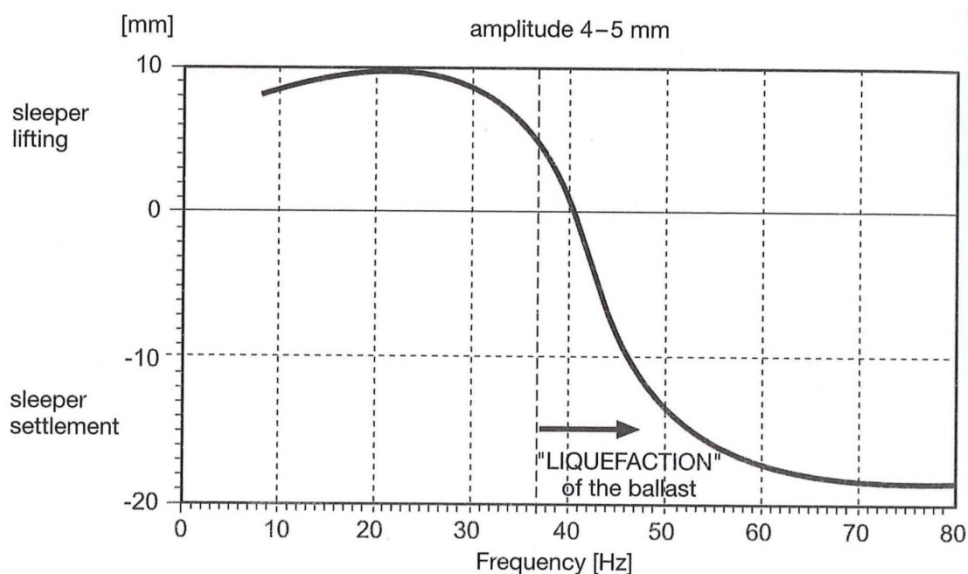
Tukemispainetta voidaan tarvittaessa säätää tukemistyön yhteydessä ja esimerkiksi uudisrakennuskohteiden hyvin löyhän raideseppelin kohdalla myös huomattavasti 95 baria alempien tukemispaineiden käyttäminen voi tulla kyseeseen. Haastatteluiden perusteella ainakin uusimmissa tukemiskonemalleissa tukemishakkuja on hyvin löyhän raideseppelin tapauksessa mahdollista ohjata myös puristusaikaperusteisesti (ks. luku 4.2.4) paineohjauksen sijaan. Lisäksi haastatteluiden perusteella tukemispaineen optimointikäytännöt Suomen rataverkolla ovat hyvin vaihtelevat toisten pyrkinessä hyvinkin optimaalisen tukemispaineen käyttöön ja toisten jättäessä tukemispaineen täysin huomiotta. Ainakin eräs perustelu tukemispaineen huomiotta jättämiselle on ollut, ettei tukemiskoneen miehistö voi tietää mikä tukikerrosmateriaalin kunto kulloinkin on.

3.2.3 Tukemishakkujen värähtelytaajuus

Tukikerrosmateriaalin tiivistyminen tuettaessa perustuu raiteen nostolla saavutetun riittävän tyhjätilan lisäksi tukemishakkujen tukikerrokseen kohdistamaan värähtelyvään kuormitukseen. Värähtelevän kuormituksen vaikutus on erityisen tehokas sepeli-tukikerroksella. [2]

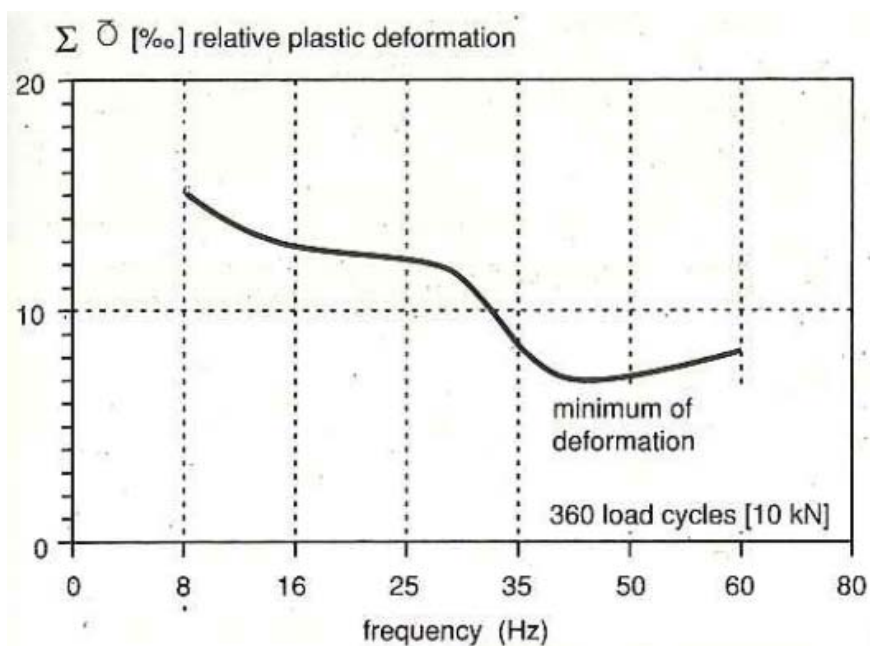
Lichtbergerin [3] mukaan tukemishakkujen optimaalinen värähtelytaajuus on 35 Hz. Johann Fischerin vuonna 1983 Grazin teknillisessä yliopistossa Itävallassa [52] tekemän väitöskirjan tuloksiin perustuen Lichtbergerin [3] mukaan 35 Hz suuremmilla taajuuksilla tukikerrosmateriaali ”juoksettuu”, mikä johtaa heikkoon tuentatulokseen ja yli 40 Hz:n taajuuksilla raidesepeleirakeet eivät tiivisty vaan kulkeutuvat tukemishakkujen lomitse (kuva 3.13). Fischerin [52] väitöstutkimuksen tarkemmat yksityiskohdat esimerkiksi koejärjestelyihin ja käytetyn raideseppelin rakeisuusjakaumaan

liittyen eivät käy ilmi Lichtbergerin [3] julkaisusta, eikä alkuperäistä väitöstä ollut saatavilla tämän kirjallisuustutkimuksen yhteydessä.



Kuva 3.13. Tukikerrosmateriaalin "juoksettuminen" yli 35 Hz:n tukemistaajuuksilla. [3]

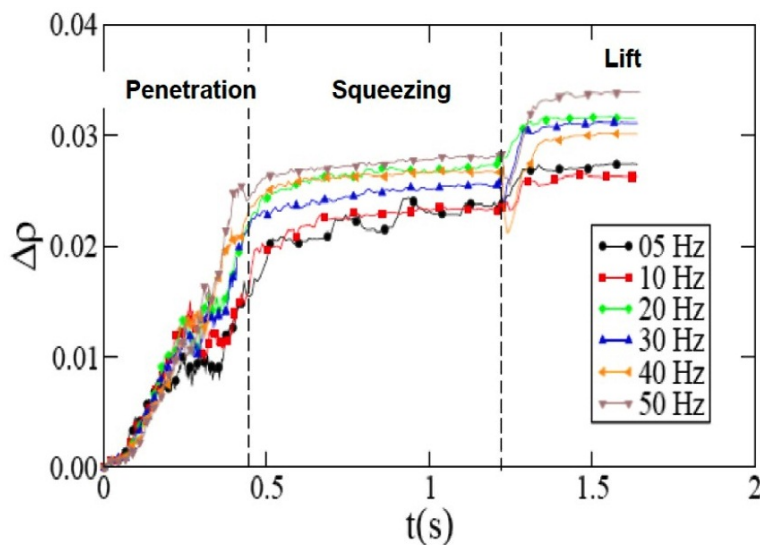
Kuvasta 3.13 havaitaan Lichtbergerin [3] mukaan, että yli 40 Hz:n tukemistaajuuksilla tuettavan ratapölkyn korkeusasema itse asiassa laskee. Huomattavasti 35 Hz alemmilla tukemistaajuuksilla tukikerrosmateriaalin tiivistyminen ratapölkyn alle estyy. Samaiseen Fischerin [52] väitöstutkimukseen nojautuen on Riessberger [42] esittänyt tukemistyön vaikutusten pysyvyyden riippuvan tukemistaajuudesta kuvan 3.14 mukaisesti, josta havaitaan muodonmuutosten olevan pienimmillään suunnilleen 40–45 Hz:n alueella.



Kuva 3.14. Dynaamisen kuormituksen aiheuttama tukikerroksen suhteellinen plastinen muodonmuutos taajuuden funktiona. [42]

Edellä mainittu 35 Hz:n tukemistaajuus on yleisesti käytössä Plasser & Theurerin valmistamissa tukemiskoneissa, kun taas Matisan tukemiskoneissa tukemistaajuus vaihtelee välillä 40–45 Hz ollen tyypillisesti 42 Hz. Hieman pienemmän tukemiskonevalmistajan Harscon tukemiskoneissa taajuus on 50 Hz. [2]

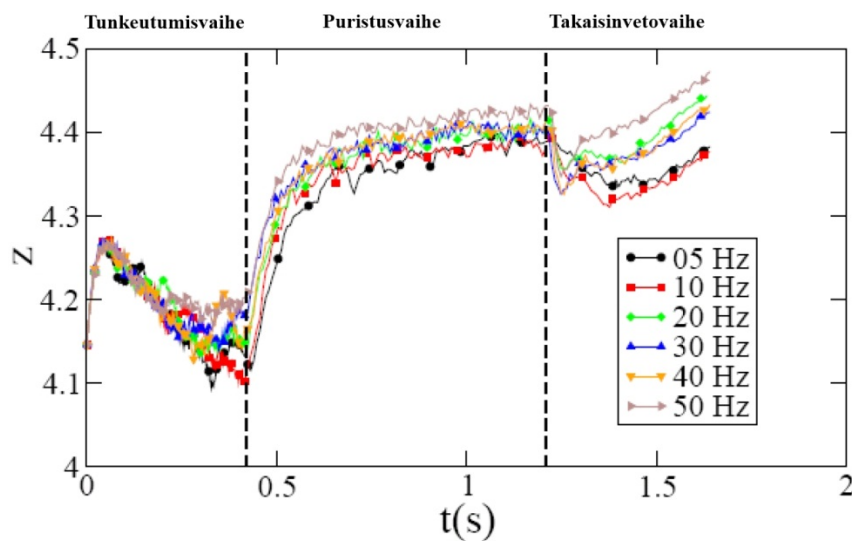
Jo luvussa 3.1 osin esitellyissä Saussinen et al. [41] DEM-simuloinneissa tutkittiin pääosin tukemishakkujen värähtelytaajuuden vaikutusta eri tekijöihin. Kuvassa 3.15 on esitetty taajuuden vaikutus kiinteän aineksen osuuden kasvuun koko tukemisprosessin aikana.



Kuva 3.15. Tukemishakkujen värähtelytaajuuden vaikutus kiinteän aineksen osuuden kasvuun ratapölkyn alla. [43]

Kuvasta 3.15 havaitaan, että noin puolet tukemisella saavutetusta tiivistyneisyyden kasvusta syntyy tunkeutumisvaiheen (*penetration*) aikana ja että tiivistyneisyyden kasvu on suurempaa suuremmilla taajuuksilla. Tarkasteltaessa 0,8 sekunnin kestoista puristusvaihetta (*squeezing*) havaitaan kiinteän aineksen osuuden kasvavan kaikilla taajuuksilla siten, että suhteellinen kasvu on merkittävin alhaisilla taajuuksilla. Tämä johtuu Saussinen et al. [41], [43] mukaan siitä, että pienempien taajuuksien mahdollistama suurempi sepelirakeiden ”höllentyminen” (*relaxation*) värähtelyjakson aikana merkitsee suurempaa kiinteän aineksen osuuden kasvua. Hakkujen takaisinvetovaiheessa tiivistyneisyyden pientä pudotusta vaiheen alkuvaiheessa seuraa kiinteän aineksen osuuden selkeä kasvu. Tiivistyneisyyden kasvu lisääntyy taajuuden kasvaessa. Nyt havaittu tiivistyneisyyden kehitys takaisinvetovaiheessa on selvässä ristiriidassa kuvan 3.8 havaintojen kanssa, mutta Saussine et al. [41], [43] eivät erittele syitä tulosten välisiin eroihin Peralesin et al. [40] kanssa. Tosin Perales ja Saussine ovat molemmat kirjoittajina sekä lähteessä [40] että [43] eli tulosten eroavaisuuksien voi nee olettaa johtuvan esimerkiksi simuloinneissa käytettyjen parametrien eroista tai mallinnusmenetelmien kehittymisestä vuosien 2008–2011 välillä.

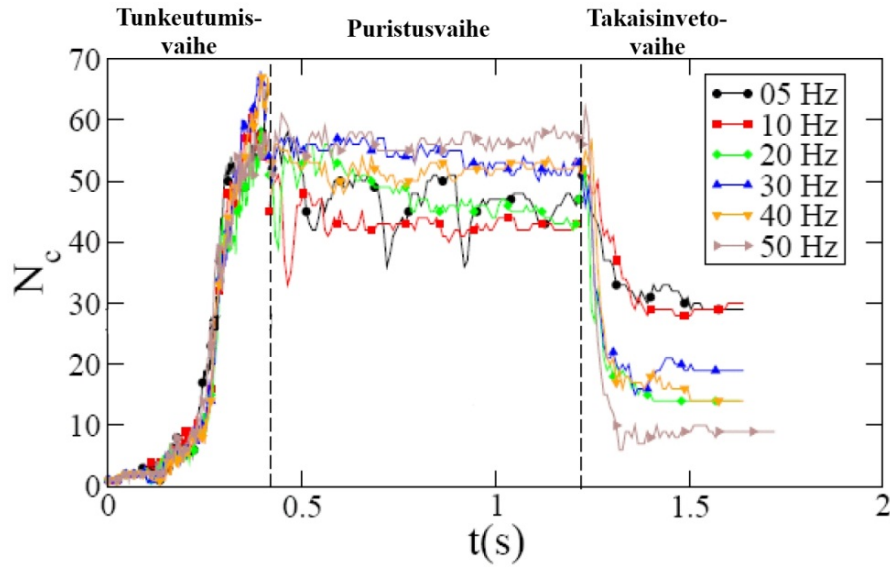
Saussine et al. [41] ovat simuloinneissaan tarkastelleet tukemishakkujen värähtelytaajuuden merkitystä myös raidesepelirakekohtaisella tasolla. Kuvassa 3.16 on esitetty tukemishakkujen värähtelytaajuuden merkitys tuettavan ratapölkyn alla olevien vierkkäisten sepelirakeiden välisten kontaktien määrään tukemisprosessin edetessä.



Kuva 3.16. Koordinaatioluvun Z kehittyminen tukemisprosessin aikana. Muokattu lähteestä [41].

Saussinen et al. [41] mukaan koordinaatioluku Z , joka siis ilmaisee vierekkäisten sepelirakeiden välisten kontaktien määrää, kuvaa tukikerroksen tiivistyneisyyttä paikallisella tasolla. Kuvasta 3.16 havaitaan koordinaatioluvun laskevan tunkeutumisvaiheen aikana värähtelyn vaikutuksesta. Puristusvaiheen alussa koordinaatioluku kasvaa nopeasti ensimmäisen värähdysytklin aikana ja yleisemmin tiivistyneisyyden kasvaessa suuremmassa mittakaavassa ainakin jonkin verran puristuksen vaikutuksesta myös rakeiden välisten kontaktien lukumäärä kasvaa. Takaisinvetovaiheen aikana koordinaatioluku muistuttaa kuvassa 3.15 esitettyä kiinteän aineksen osuuden kehittymistä notkahtaen ensin hieman ja kasvaen sen jälkeen. Eri värähtelytaajuuksien väliset erot ovat liian epämääräisiä yksityiskohtaisten johtopäätösten tekemiseen, mutta yleisesti voidaan todeta koordinaatioluvun kasvaneen tukemisprosessin aikana kaikilla taajuuksilla siten, että korkeimmalla 50 Hz taajuudella lopullinen kasvu oli suurinta ja pienintä alhaisilla 5 ja 10 Hz taajuuksilla.

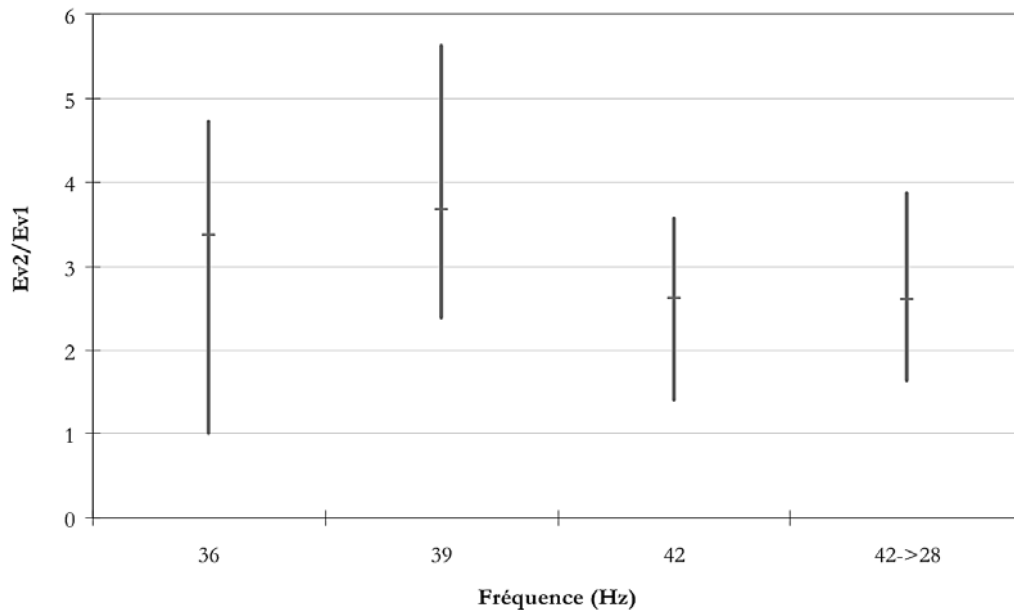
Tarkasteltaessa kuvassa 3.17 esitettyä tuettavan ratapölkyn pohjaan kontaktissa olevien raidesepelirakeiden määrän kehitystä tukemisprosessin edetessä havaitaan tunkeutumisvaiheen kasvattavan kontaktien määrää varsinkin vaiheen loppuosassa tukemishakkujen saavuttaessa lopullisen tukemissyvyyden. Keskimääräinen kontaktien määrä tunkeutumisvaiheen lopussa on noin 55 taajuudesta riippumatta. Puristusvaiheessa kontaktien määrä säilyy suunnilleen samana lukuun ottamatta alinta 5 Hz taajuutta, jolla havaitaan noin 10 raekontaktin suuruista vaihtelua puristusvaiheen aikana. Saussinen et al. [41] mukaan tämä on merkki jo edellä mainitusta raejärjestelmän ”höllentymisestä”. Takaisinvetovaiheessa havaitaan kontaktien määrän huomattava aleneminen siten, että alemmilla 5 ja 10 Hz taajuuksilla kontaktissa olevien rakeiden määrä tukemisprosessin lopussa on noin 30. Vastaavasti kontaktien määrä 20–40 Hz taajuuksille on noin 20 kpl ja 50 Hz taajuudelle vain noin 10 kpl.



Kuva 3.17. Tuettavan ratapölkyn pohjaan kontaktissa olevien raideseperirakeiden lukumäärän (N_c) kehittyminen tukemisprosessin aikana eri taajuuksilla. Muokattu lähteestä [41]

Saussinen et al. [41] mukaan ratapölkyn pohjaan kontaktissa olevien seperirakeiden määrän aleneminen takaisinvetovaiheessa, varsinkin suuremmilla taajuuksilla, johtuu värähtelyn välittymisestä rakeiden välillä ja sen aiheuttamasta uudelleenjärjestymisestä tukemishakkujen takaisinvedossa aiheutettujen ”reikien” suuntaan. Liittyen ratapölkkyyn kontaktissa olevien rakeiden määrän voimakkaaseen alenemiseen korkeammilla taajuuksilla on todettava, että korkeammilla taajuuksilla saavutetaan vastaavasti korkeimmat kiinteän aineksen osuudet sekä suurin raideseperirakeiden välisen keskinäisten kontaktien määrä, mikä saattaa olla hyvinkin tärkeä tekijä tukikerroksen kyvyssä vastustaa liikennekuormitusten aiheuttamia pystysuuntaisia muodonmuutoksia.

Paderno [47] on luvussa 3.2.5 tarkemmin esitellyssä väitöstutkimuksessaan tarkastellut myös taajuuden merkitystä Matisan elliptiseen värähtelyyn perustuvassa tukemisperiaatteessa. Ratapölkyn pään alla tehtyjen levykuormituskokeiden muodonmuutosmoduulien suhteet E_{v2}/E_{v1} , jotka Padernon [48] mukaan kuvaavat tukikerroksen stabiiliutta, on esitetty kuvassa 3.18. Kuvasta havaitaan, että pienimmät suhdeluvut eli suurin tukikerroksen stabiilius saavutetaan suurimmalla 42 Hz:n taajuudella. Lähes yhtä pysyvään tulokseen päästiin äärioikealla esitetyssä tapauksessa (42->28), jossa tunkeutumis- ja puristusvaiheissa käytettiin taajuutta 42 Hz sekä takaisinvetovaiheessa taajuutta 28 Hz.



Kuva 3.18. Ratapölkyn pään alla tehtyjen levykuormituskokeiden muodonmuutosmoduulien E_{v2} ja E_{v1} suhteiden vaihteluväli ja keskiarvo eri tukemishakkujen värähtelytaajuuksilla. [47]

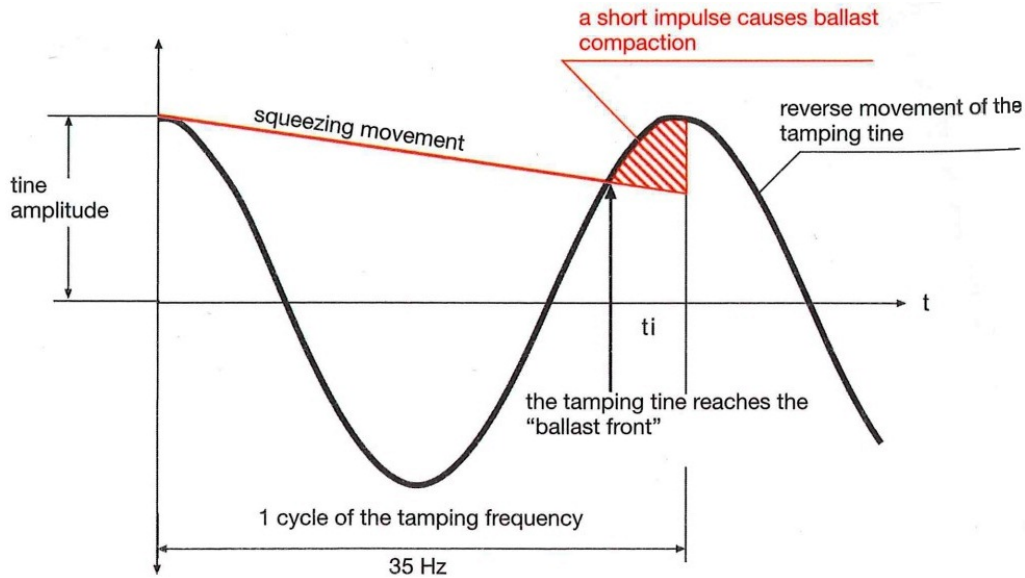
UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan [45] kartoituksesta käy ilmi, että käytetty tukemistaajuus on yleisesti välillä 35 - 45 Hz, ainoastaan Espanja poikkesi tästä joukosta 35 - 40 Hz taajuudellaan (ks. liite 1).

Yhteenvedona tukemishakkujen värähtelytaajuuden merkitykseen liittyen voidaan todeta, että tukemistyö vaikuttaisi olevan tehokkainta suuremmilla taajuuksilla. Kirjallisuusselvityksessä löydettyjen lähteiden perusteella on, myös tukemisperiaatteiden eroavaisuudesta johtuen, vaikeaa määritellä yhtä optimaalista arvoa värähtelytaajuudelle, mutta se sijainnee karkeasti välillä 30–50 Hz. Viitaten Lichtbergerin [3] kuvassa 3.13 esittämään raideseppelin juoksettumiseen yli 35 Hz taajuudella, ovat sekä Perales et al. [40] että Saussine et al. [41] todenneet juoksettumista ilmenevän korkeammilla 40–50 Hz taajuuksilla ainoastaan paikallisesti tukemishakkujen läheisyydessä.

3.2.4 Puristusaika

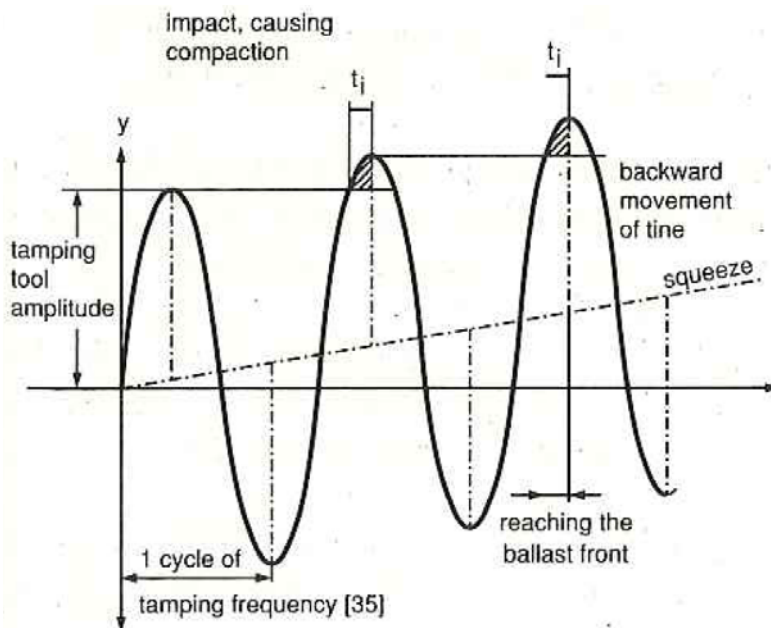
Puristusvaiheessa raidesepeä tuettavan ratapölkyn alle puristavan voiman vaikutuksen on oltava riittävän pitkäkestoinen, jotta sepelirakeiden uudelleenjärjestyminen ratapölkyn alle on mahdollista. Mikäli tukemishakkujen värähtelytaajuus on niin suuri, että tiivistävä puristuspulssi jää liian lyhytkestoiseksi, tiivistystulos heikkenee suuriakin tukemispaineita käytettäessä. [44]

Kronenbergin [44] mukaan yhden tukemispuristuspulssin optimikesto on vähintään 5 ms, jotta raidesepeirakeiden uudelleenjärjestyminen on mahdollista (kuva 3.19). Lichtbergerin mukaan tämä minimioptimikesto voidaan saavuttaa vain noin 35 Hz tukemistaajuuksilla, koska korkeammilla tukemistaajuuksilla puristusnopeuden tulisi olla huomattavasti suurempi riittävän puristuspulssin keston varmistamiseksi. Puristusnopeuden huomattava nostaminen taas on hankalaa raideseppelin aiheuttaman vastuksen vuoksi.



Kuva 3.19. Tukemispuristuspulssin osuus yhdessä tukemishakun värähtelysyklissä. [3]

Kuvassa 3.19 esitetty tukemispuristuspulssi kenties havainnollistuu paremmin Riessbergerin ja Wentyn [42] esittämässä kuvassa 3.20, jossa on kuvattu kolme puristuspulssia peräkkäin.



Kuva 3.20. Periaatekuva tukemishakkujen siirtymäamplitudin ja puristusnopeuden vaikutuksesta puristuspulssiin ja raidesepelin tiivistymiseen. [42]

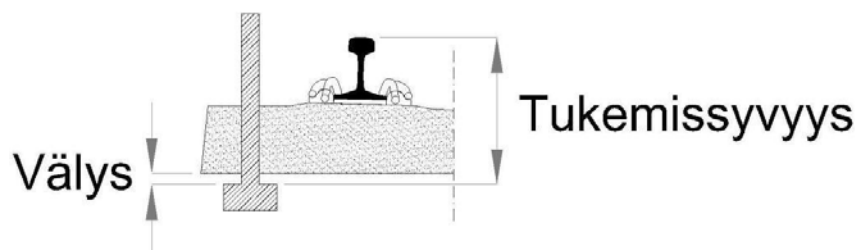
Kuvista 3.19 ja 3.20 nähdään, että tukemishakun raidesepeliä tiivistävä vaikutus on hyvin lyhykestoinen. Esimerkiksi 35 Hz tukemistaajuudella yhden värähdysyklin pituus on $1/35$ s eli 28,6 ms ja 42 Hz tukemistaajuudella noin 23,8 ms. Matisan 42 Hz:llä käyttämä elliptinen rata sekä epätietoisuus tukemishakkujen tarkoista puristusnopeuksista vaikeuttavat korkeammilla värähtelytaajuuksilla vaadittavan puristusnopeuden lisäyksen arviointia.

Sekä Aalto [4] että Tunninen [2] ovat esittäneet puristusajan suositelluksi arvoksi 0,8–1,2 sekuntia ottamatta kantaa puristusnopeuteen. Tunninen [2] korostaa kyseisten arvojen olevan konekohtaisia arvoja Plasser & Theurerin valmistamille tukemiskoneille. Hyväkuntoinen tai uusi raidesepeli saavuttaa tavoitettavuuden nopeammin ja sille voidaankin Aallon [4] mukaan käyttää pienemmän puristusapineen lisäksi myös lyhyempää, 0,8 sekunnin, puristusaikaa. Lichtberger [3] mainitsee vuonna 2011 tyyppillisiksi puristusajan arvoiksi 0,8 s uusilla radoilla sekä 1,2 s kunnossapidon perusarvona, kun taas Riessberger ja Wenty [42] esittivät vuonna 1993 kokemukseräiseksi optimiarvoksi 0,8–1,0 sekuntia.

UIC [45] suosittelee parhaiden käytäntöjen oppaassaan käyttämään kunnossapidossa 1,2–1,5 sekunnin puristusaikoja ja huomauttaa, että uuden, löyhän raidesepelin tiivistyminen saattaa vaatia jopa 2,5–3,0 sekunnin puristusajan. Käytännössä jälkimmäinen vaatimus toteutettaneen tukemalla sama ratapölkky kahteen kertaan nostamalla tukemishakut välillä pois tukikerroksesta. Tarkastelluilla Euroopan rata verkoilla käytetyt puristusajat eivät vaihdelleet rataosuuden suurimman sallitun nopeuden perusteella lainkaan, mutta yleisesti käytettyjen puristusaikojen vaihteluväli oli laajahko, 1–3 sekuntia (ks. liite 1).

3.2.5 Tukemissyvyys ja välys

Tukemissyvyydellä tarkoitetaan kiskon yläpinnan tai tukemishakkujen perustilan ja tukemishakkujen yläpinnan väliä kuvan 3.21 mukaisesti. Välyksellä tarkoitetaan ratapölkyn alapinnan tai ratapölkyn alapinnassa mahdollisesti olevan pohjaimen alapinnan ja tukemishakkujen yläpinnan pystysuuntaista väliä [2], [4]. Tukemissyvyydellä on merkittävä vaikutus tukemistyön vaikutusten pysyvyyteen ja se on riippuvainen kiskoprofiilista, mahdollisesta aluslevystä ja ratapölkkytyypistä [2]. Jos välys on riittämätön, tukemishakut osuvat ratapölkkyyn ja välyksen ollessa liian suuri raidesepeli ei tiivisty tasaisesti ja riittävästi [42].



Kuva 3.21. Tukemissyvyys ja välys.

Paderno [46] on EPFL:ssä Lausannessa Sveitsissä vuonna 2010 tekemässään väitöskäytöksessään tarkastellut tukemissyvyuden vaikutusta tukemistoimien vaikutusten pysyvyyteen. Tarkastelut tehtiin laboratoriorahallin rakennetulla UIC60-kiskoisella ja betoniratapölkkyllisellä 19 metriä pitkällä koeradalla, joka rakennettiin 5 metriä leveään ja 2 metriä syvään koekuoppaan. Koejärjestelyt sisälsivät lisäksi tarkoitusta varten modifioidun Matisan tukemisaggregaatin yhden ratapölkyn tukemiseen kerrallaan (kuva 3.22).



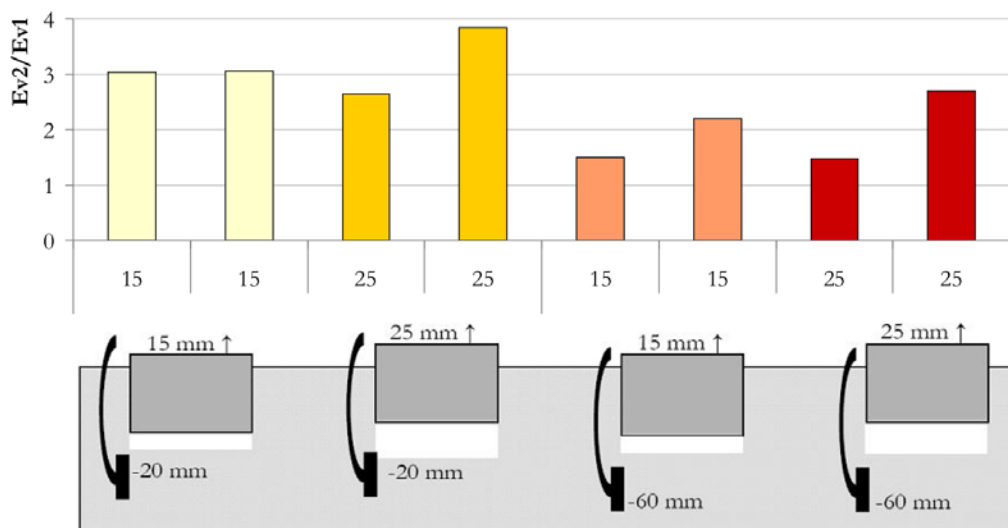
Kuva 3.22. Koejärjestelyissä käytetty tukemisyksikkö ja liikennekuormitus-simulaatioissa käytetty kuormitusjärjestely (vasemmalla). [47]

Tukikerroksen pysyvyyden tarkasteluun Paderno [48] käytti sveitsiläisen standardin SN 670317b mukaisesti tehtyä levykuormituskoetta, joka tehtiin suoraan ratapölkyn pään alapuolella ratapölkyssä olevan reiän mahdollistaessa kuormituksen välttämisen ratapölkyn alle kuvan 3.23 mukaisesti. Yllä mainitun standardin mukaisesti tehtynä levykuormituskoe poikkeaa jonkin verran esimerkiksi Liikenneviraston Tutkimuksia ja selvityksiä -sarjan julkaisussa 10/2011 ”Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus” esitellystä Suomen käytäntöjen mukaisesta levykuormituskoekkeesta. Merkittävimmät erot liittyvät sveitsiläisen standardin kuormitusportaiden suuruuteen (noin 5,35 kN / porras) sekä niiden määriin, jotka ovat 7 kpl ensimmäisellä kuormituskerralla ja 6 kpl toisella kuormituskerralla maksimikuormitusten ollessa kuormituskertojen lopussa vastaavassa järjestyksessä noin 37,5 kN ja 31,8 kN eli huomattavasti suomalaisen käytännön 60 kN:n maksimikuormitusta ja 10 kN:n kuormitusportaita pienempiä. Kuormituslevyjen halkaisija 300 mm on molemmissa käytännöissä sama. Muodonmuutosmoduulien laskentakaavat ovat keskenään samankaltaisia siten, että sveitsiläisen käytännön mukaisilla laskelmilla saadaan noin 10 % pienemmät moduularvot, kun Poissonin luvun olettaa olevan 0,4. [49]



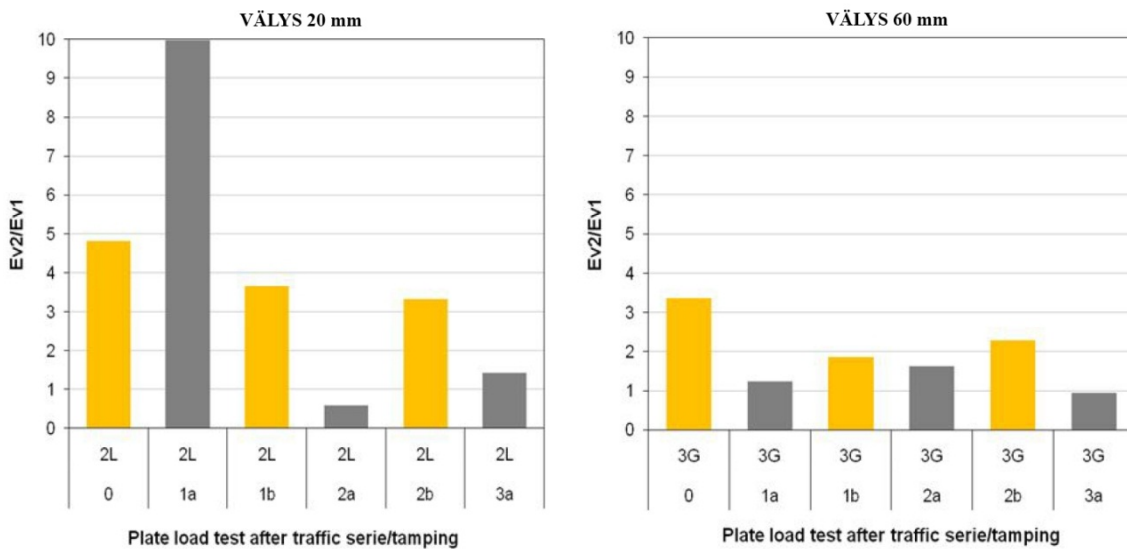
Kuva 3.23. Ratapölkyn pään alla tehtävän levykuormituskokeen koejärjestelyt. [48]

Padernon [48] mukaan edellä esitellyllä tavalla tehdyn levykuormituskokeen ensimmäisen ja toisen kuormituskerran muodonmuutosmoduulien suhde E_{v2}/E_{v1} kuvaa tukikerroksen stabiiliutta kuormitusten alaisena. Tukemissyvyyden merkityksen tutkimiseksi Paderno [48] käytti kokeissaan kahta, 15 ja 25 mm noston suuruutta (ks. seuraava luku 3.2.6) sekä kahta, 20 ja 60 mm, välyksen suuruutta. Kokeessa käytetty raidesepeli oli EN 13450 standardin mukaista raekojakaumaltaan 31,5...60 mm sepeliä [46]. Kuvassa 3.24 on esitetty ”epästabiiliussuhteiden” E_{v2}/E_{v1} suuruudet eri nostojen ja välyksien yhdistelmille.



Kuva 3.24. Levykuormituskoikkeella ratapölkyn pään alta mitattu muodonmuutosmoduulien suhde eli ”epästabiiliussuhde” E_{v2}/E_{v1} eri noston ja välyksen suuruuksien yhdistelmillä. [48]

Kuvasta 3.24 havaitaan, että suuremmalla 60 mm välyksellä saavutetaan huomattavasti pienemmät suhdeluvut, mikä tarkoittaa tukikerroksen parempaa pysyvyyttä. Paderno [48] teki tutkimuksessaan myös pidempiä koesarjoja, joissa koerataosuutta kuormitettiin 4 Hz kuormitustaajuudella 22,5 akselipainolla yhteensä seitsemän miljoonan kuormitusyöksen ajan. Koerata tuettiin 20 mm nostolla ja 42 Hz:n tukemistaajuudella aina 45 miljoonan kumulatiivisen bruttotonnin jälkeen. Myös näiden kuormituskokeiden yhteydessä tehdyissä levykuormituskokeissa havaittiin kuvan 3.25 mukaisesti suuremman välyksen vaikuttavan positiivisesti tukikerroksen pysyvyyteen sekä liikennekuormitusyösten jälkeen tarkasteltuna.



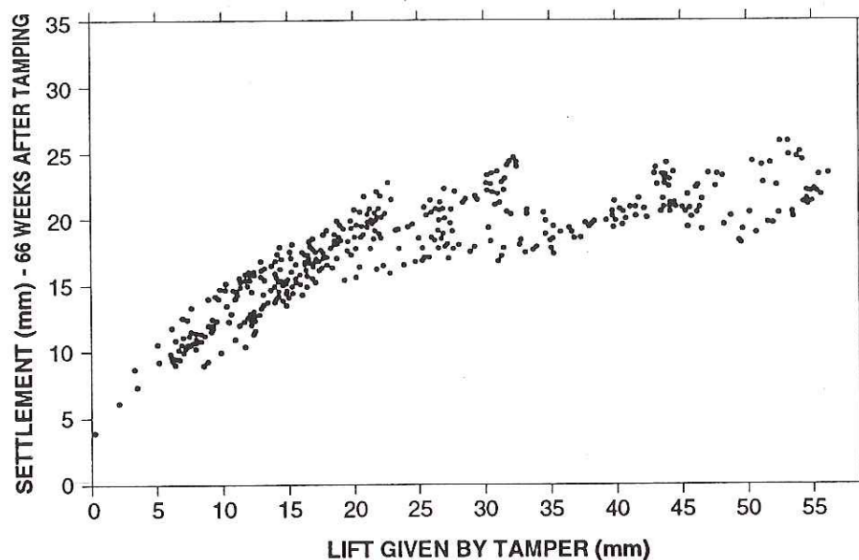
Kuva 3.25. Muodonmuutosmoduulien suhde E_{v2}/E_{v1} välyksillä 20 mm (vasemmalla) ja 60 mm (oikealla). Keltaiset pylväät kuvaavat levykuormituskokeen tuloksia tukemisen jälkeen ja harmaat pylväät 45 miljoonan bruttotonnin kuormitusyöksen jälkeen. Muokattu lähteestä [48].

Lichtbergerin [3] mukaan välykset ovat tyypillisesti 15–20 mm optimivälyksen ollessa 15 mm ja samaan optimiarvoon ovat päätyneet myös Riessberger ja Wentz [42]. UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan [45] mukaan välyksen on oltava välillä 10–20 mm. UIC:n tarkastelussa mukana olleiden toimijoiden kohdalla välykset vaihtelivat suuresti ollen lähellä yllä esitettyjä arvoja esimerkiksi Kreikassa 10–15 mm, Saksassa 20 mm ja Sveitsissä 30 mm, mutta huomattavasti suurempia esimerkiksi Itävallassa (30–40 mm), Belgiassa (70+10 mm) ja Norjassa (~80 mm). Kuten liitteen 1 sivuilta 4 ja 5 käy ilmi, on välykset ilmoitettu arvona ”ratapölkyn pohjan alapuolella”, mutta taulukosta ei käy ilmi onko etäisyys varsinkin suurempien arvojen kohdalla mitattu esimerkiksi tukemishakkujen ”lappujen” ala- vai yläreunasta.

Tunninen [2] on esitellyt Suomessa käytettyjä välyksen ja tukemissyvyyden arvoja erilaisilla kisko- ja ratapölkkytyyppien sekä tukikerrosmateriaalien yhdistelmillä. Yleisesti voidaan todeta soratukikerroksen kohdalla käytettävän 10 mm välystä ja 15 mm välystä sepelitukikerroksellisilla radoilla. Tukemissyvyyksiä on esitelty tarkemmin liitteessä 2.

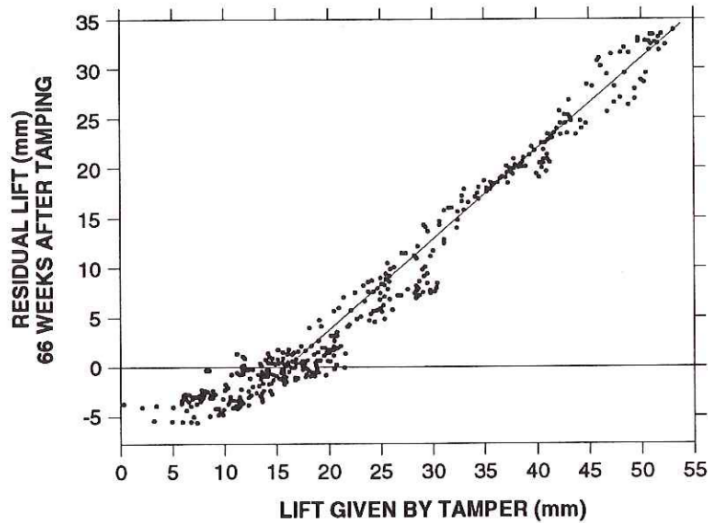
3.2.6 Noston ja sivuttaissiirron suuruus ja rajoitukset

Tukemishakkujen tunkeutuessa ja puristuessa tukikerrokseen, on niiden syrjäytettävä tilavuutensa verran tukikerrosmateriaalia. Jotta tukikerrosmateriaalin syrjäytyminen olisi mahdollista ilman tukikerrosmateriaalin tarpeetonta kulumista, on raidetta nostettava riittävästi riittävän tyhjätilan aikaansaamiseksi. Tätä nostoa kutsutaan perusnostoksi, jonka on Tunnisen [2] mukaan oltava vähintään 20 mm. Aalto [4] on vuonna 1999 maininnut perusnoston vähimmäissuuruudeksi 10 mm ja Lichtberger [3] 15–20 mm. Selig & Waters [1] ovat todenneet kuvan 3.26 mukaisesti, että riittämätön perusnosto johtaa radan alkuperäisen, virheellisen geometrian nopeaan palautumiseen tuennan jälkeen. UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan [45] tarkastelussa vaatimus 10–20 mm minimiperusnostosta on varsin yleinen Ranskan ja Belgian erottuessa joukosta 2–5 mm vaatimuksellaan.



Kuva 3.26. *Liikennekuormituksen (66 viikkoa) aiheuttaman ratapölkyn pystysuuntaisen painuman suuruus verrattuna noston suuruuteen tukemishetkellä. [1]*

Kuvassa 3.26 on esitetty pistejoukko, jossa jokainen piste kuvaa yhden ratapölkyn yhden pään noston suuruutta tukemishetkellä sekä 66 viikon liikennöinnin aiheuttaman samaisen ratapölkyn pään pystysuuntaista painumaa. Kuvasta on havaittavissa selkeä taitekohta suunnilleen 20–25 mm noston kohdalla. Tätä pienemmillä noston suuruuksilla painuma liikennöinnin jälkeen on suunnilleen sama kuin alkuperäinen noston suuruus eli käytännössä tuennalla saavutettu uusi ratageometria ei kyseisillä noston suuruuksilla ollut kovin pysyvä, kun taas tätä suuremmilla nostoilla ratapölkky on liikennöinnin jälkeen ns. jäännösnoston (*residual lift*) verran alkuperäistä asemaansa korkeammalla, mikä kuvaa pysyvämpää geometrian korjaantumista. Jäännösnoston suuruuden riippuvuus alkuperäisen noston suuruudesta tuennan yhteydessä käy paremmin ilmi kuvasta 3.27.

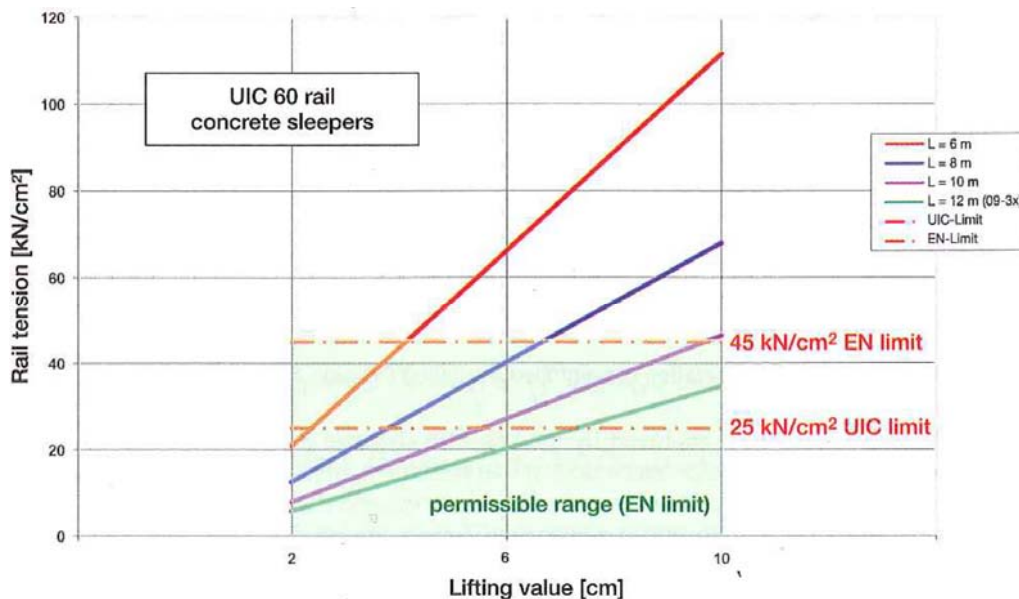


Kuva 3.27. Jäännösnoston ja alkuperäisen noston suuruuden yhteys tuennan ja 66 viikon kestoisen liikennöinnin jälkeen. [1]

Kuvasta 3.27 havaitaan jäännösnoston kasvavan varsin lineaarisesti tukemisen yhteydessä tehtävän noston kasvaessa. Myös Kearsley & Van As [50] ovat tehneet hyvin samankaltaisia havaintoja Etelä-Afrikassa kaarteissa tekemissään mittauksissa ja he ovat lisäksi todenneet alkuperäisen noston suuruuden selittävän jopa 86 % jäännösnoston vaihtelusta.

Seligin & Watersin [1] mukaan mahdollinen selitys yllä esitellylle ilmiölle on seuraava: tukemishakkujen vaakasuuntaisesti puristaessa pystysuunnassa tiivistynyttä raidesepeliä, sepeli laajenee ylöspäin täyttäen ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen välisen tyhjätilan. Matalilla nostoilla tukikerroksen raerunko (*ballast skeleton*) muuttuu tällöin muotoaan, mutta sepelirakeiden uudelleenjärjestymistä ei tapahdu, sillä sepelirakeiden ollessa kontaktissa ratapölkyn pohjaan rakeiden raerungon muuttuminen ei voi edistyä. Rakeiden järjestyksen säilyttyä muuttumattomana raerungon sisällä, tuennan jälkeinen liikennöinti tiivistää tukikerroksen uudelleen sepelirakeiden omaksuessa suunnilleen tuentaa edeltäneen raerungon mukaisen sijainnin toisiinsa nähden. Näin ollen radan geometria palaa alkuperäiseen muotoonsa. Suurempien nostojen kohdalla ratapölkyn alle muodostuu riittävän suuri, raerungon sekoittumisen mahdollistava tyhjätila ja samanaikaisesti uusia sepelirakeita liittyy muodostamaan uutta raerunkoa. Selig & Waters [1] pitävät riittävänä nostona nostoa, jonka korkeus on enemmän kuin tuettavan tukikerroksen rakeisuusjakauman läpäisyprosenttia 50 vastaava raekoko eli D_{50} . Uudelleen muodostuneen raerungon kohdalla tuennan jälkeinen liikennöinti tiivistää tukikerroksen uuden raerungon mukaisesti ja näin radalle syntyy uusi geometria.

Edellä esitetyn perusteella voidaan esittää noston suuruudelle jokin minimivaatimus eli ns. perusnosto. Toisaalta nosto ei voi olla miten suuri tahansa, sillä noston aikana kiskoon kohdistuva jännitys ja joissain tapauksissa myös tukemiskoneen riittämätön nostovoima saattavat rajoittaa noston suuruutta. Lichtberger [3] on esittänyt noston vaikutuksesta kiskoon kohdistuvan jännityksen kasvavan kuvan 3.28 mukaisesti tukemiskoneen akseliväleillä 6–12 metriä. Samassa kuvassa on oranssein pistekatkoviivoin esitetty myös UIC:n 25 kN/cm² ja EN-standardin 14033 45 kN/cm² raja-arvot kiskon jännitykselle, kun käytössä on UIC60-kisko ja betoniratapölkkyt.



Kuva 3.28. Kiskoon kohdistuvan jännityksen suhde noston suuruuteen erilaisilla tukemiskoneiden akseliväleillä. [3]

Kuvasta 3.28 havaitaan, että esimerkiksi nykyaikaisen Plasser & Theurerin 09–3X tukemiskoneen 12 metrin akselivälillä 45 kN/cm² jännitysrajoitus ei ylitä edes varsin suurella 100 mm nostolla. Tarkasteltaessa tukemiskoneiden nostovoimien riittävyttä, voidaan todeta, että esimerkiksi Matisan B 66 UC tukemiskoneen noin 9,8 metrin akselivälillä 100 mm nostoon vaadittava voima Lichtbergerin [3] esittämällä raiteen komponenteilla on noin 110 kN kiskoa kohden. Kyseisen tukemiskoneen nostovoiman voidaan todeta olevan riittävä sen maksimin ollessa 125 kN kiskoa kohden, etenkin kun 100 mm suuruiset nostot ovat verrattain harvinaisia.

Toisaalta noston suuruutta rajoittaa myös tukemishakkujen vaikutuspinta-ala, sillä liian suurella nostolla tukemisen vaikutus on epätäydellinen ja lyhytkestoisempi [2]. Sekä Aalto [4] että Tunninen [2] ovat todenneet kertanoston maksimin olevan kunnossapitotöissä 70 mm, mihin Aalto on edelleen lisännyt yli 35 mm noston vaativan kaksi puristuskertaa, joiden välillä tukemishakut on nostettava ylös. Aallon [4] mukaan toimittaessa välittömästi sepelinpuhdistuskoneen jäljessä, on maksimikertanosto 100 mm ja tällöin noston ollessa yli 50 mm on tehtävä kaksi erillistä puristuskertaa. UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan [45] tarkastelussa 50–60 mm maksimikertanosto osoittautui varsin yleiseksi. Kuitenkin Saksassa, Isossa-Britanniassa ja Norjassa suurimmat sallitut kertanostot olivat normaaleille rataosuuksille 25, 25 ja 30 mm sekä nopeille rataosuuksille 25, 25, 50 mm vastaavassa järjestyksessä. Belgiassa on kerrottu tavallisille rataosuuksille käytettävän maksimikertanoston suuruutena arvoja lähellä minimiperusnostoa eli 5–10 mm sekä nopeammilla rataosuuksilla maksimikertanoston arvoa 35 mm.

Aalto [4] on todennut jatkuvakiskoraiteen aseman muutosten vaativan erityistä huomiota ja Ratateknisten ohjeiden osassa 19 ”Jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet” sivulla 27 onkin raiteen suorille osille määrätty seuraavasti: [51]

- Raide on palautettavissa alkuperäiseen korkeus- ja vaakasuuntaiseen asemaansa ilman uudelleen neutralointia, jos raiteen geometrian pysyvät muutokset alkuperäisestä asemastaan ovat
 - painuma on ≤ 50 mm ja
 - sivusiirtymä on ≤ 40 mm
- Raide on saatettava alkuperäiseen geometriseen asemaansa ja vapautettava neutraalilämpötila-alueella $+12\dots+22$ °C lämpöjännityksistä kiskonkiinnitykset irrottamalla ja kiinnittämällä, jos raiteen geometrian pysyvä
 - painuma on > 50 mm, mutta ≤ 80 mm
- Raide on palautettava alkuperäiseen asemaansa, neutraloitava ja loppuhitsattava, jos raiteen geometrian pysyvät muutokset ovat
 - painuma on > 80 mm ja
 - sivusiirtymä > 40 mm

Lisäksi kaarteissa ja suoralla muutosalueen päissä raide tulee katkaista ja neutralointi sekä loppuhitsaus suorittaa uudelleen, kun siirto on yli 30 mm ja kaarteiden säde ≤ 1000 m tai kun siirto on yli 40 mm ja kaarteiden säde on yli 1000 m. [51]

3.3 Tukemistavat

Tukemistavat on Suomessa kunnossapidon organisoinnin helpottamiseksi jaettu kunnossapitotuentaan ja läpituentaan, joita esitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa.

3.3.1 Kunnossapitotuenta

Kunnossapitotuennalla käsitetään radantarkastuksissa havaittujen pistemäisten geometriavirheiden korjaamista siten, että varmistetaan turvallinen liikennöinti rai-teella. Kunnossapitotuennassa tuettavan rataosuuden pituus on tyypillisesti alle 200 metriä, mutta alue voi olla pidempikin, jos korjataan esimerkiksi useampia lähekkäin sijaitsevia pistemäisiä virheitä tai jos virhe sijoittuu kaarteiden alueelle. [2]

Kunnossapitotuennat tehdään tyypillisesti tukemiskoneen omaan mittakantaan perustuvalla suhteellisella menetelmällä (ks. luku 3.4.1). Myös tarkkuusmenetelmää (luku 3.4.2) voidaan käyttää suurempien tarkkuusvaatimusten myötä geometrian pakopisteiden, kuten esimerkiksi sillan, laiturin tai vaa’an, kohdalla. [2]

3.3.2 Läpituenta

Läpituennalla tarkoitetaan vähintään 200 metrin mittaisen, usein merkittävästi tätä pidemmän, rataosuuden yhtäjaksoista tukemista, jossa raiteen nosto- ja sivuttaissiirtoarvot on suunniteltu eli ns. nuotitettu ennen tukemistyötä eli läpituenta tehdään aina tarkkuusmenetelmää (luku 3.4.2) käyttäen siten, että tarkkuutta voidaan vielä edelleen parantaa esimerkiksi vaihteissa, pitkillä suorilla tai kaarteissa käyttämällä laserohjausta. Haastatteluissa on käynyt ilmi, että käytännössä läpituennalla käsitetään yleensä hyvin pitkien osuuksien, jopa kokonaisten rataosien, tukemista kauttaaltaan. Läpituentaan liittyy kunnossapitotuentaan verrattuna huomattavasti enemmän eri resurssien käyttöä ja työvaiheiden suunnittelua. Tunnisen [2] mukaan läpituenta-

tavalla tehtävän tukemistyön tavoitteena tulee aina olla yhtenäisen, suunnitellun raidegeometrian saavuttaminen ja läpituentarpeen määrittämisen tulee aina perustua yhteen tai useampaan seuraavista tekijöistä: [2]

- Keskihajontaindeksien osoittaman raidegeometrian vaihtelun aiheuttama tarve tukemistyölle korkean kunnossapitotason radoilla
- Rataosalla on huomattavasti alkavaa systemaattista virhettä, kuten esimerkiksi kehittyviä kallistusvirheitä kaksiraiteisilla rataosilla
- Selkeä tarve muodostaa rataosalle yhtenäinen raidegeometria esimerkiksi rataosalla, jossa on tehty paljon tukemistöitä suhteellisella menetelmällä ja geometria on päässyt ”vaeltamaan”
- Tarve varmistaa rataosan laajuudessa betoniratapölkyille yhtenäinen tuketumispinta-ala ja tukikerroksen tasalaatuinen kuormituskäyttäytyminen.

Tunnisen [2] mukaan läpituentarvotyössä nostot pysyvät maltillisena, 20–50 mm suuruisena, millä varmistetaan tukikerroksen jousto-ominaisuuksien tasalaatuisuus. Keskimääräistä enemmän painuneet rataosuudet nostetaan etukäteen kunnossapitotuentana ja stabilisoidaan tarvittaessa. Läpituenta ei ole suositeltavaa sellaisilla alueilla, joilla keskihajontaindeksin tai muun indikaattorin heikkeneminen johtuu tekijöistä, joihin tukemisella ei voida vaikuttaa.

Käytännön tukemistyötä seurattaessa on käynyt ilmi, että läpituentaan kuuluvaksi laskettavia yli 200 metrin osuuksia tuetaan enemmän tai vähemmän myös suhteellisella menetelmällä. Tämä saattaa johtua esimerkiksi nuottien puutteesta nuottitus työn jäätyä jälkeen tukemistyön etenemisestä, mutta on myös tapauksia, joissa tukemiskonemiestistö tuntuu ”suosivan” suhteellista menetelmää erinäisistä syistä. Eräs tällainen syy saattaa olla nuottituksessa esiintyvät hyvin pienet, esimerkiksi 5 mm nostot, jotka tukemiskonemiestistön kokemusten ja myös luvun 3.2.6 havaintojen perusteella eivät käytännössä voi olla pysyviä. Tällöin tyypillinen menettelytapa on tukea kyseessä oleva osuus esimerkiksi 20...30 mm perusnostoa ja suhteellista menetelmää käyttäen. Tukemistyön tulosten pysyvyyden näkökulmasta tämän kaltainen menettely on perusteltavissa, mutta läpituennalla tavoiteltavan radan geometrian absoluuttisiin nuottitusmittauksiin perustuvan tasalaatuisuuden ja alkuperäisen aseman palauttamistavoitteen näkökulmasta ei.

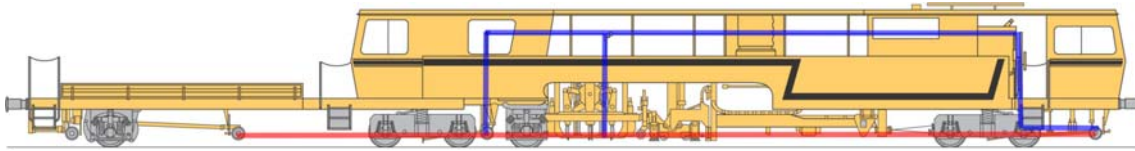
3.4 Tukemismenetelmät

Nykyisellä tukemiskalustolla käytössä olevia tukemistyömenetelmiä sekä Suomessa että maailmanlaajuisesti ovat suhteellinen menetelmä ja tarkkuusmenetelmä, jotka esitellään seuraavissa luvuissa.

3.4.1 Suhteellinen menetelmä

Suhteellinen menetelmä (*smoothing method, relative tamping*) on tukemisen työmenetelmä, joka perustuu tukemiskoneen omaan mittakantaan [2] luvussa 2.1 esitellyn radantarkastusvaunu EMMAn mittausperiaatetta vastaavasti. Tukemiskoneen omaan mittakantaan perustuvaan geometrian mittaamiseen liittyviä tärkeimpiä osia ovat muiden muissa tukemiskoneen mittapyörästöt, mittausjärjestelmään liittyvät noston ja sivuttaissiirron mittalangat (Plasser & Theurerin tukemiskoneet) tai elektrooptinen järjestelmä NEMO (Matisan uudemmat tukemiskoneet) sekä ohjaustietokone ja siihen liittyvät ohjelmistot. Kuvassa 3.29 on hahmoteltu Plasser & Theurer 09-32 CSM -tukemiskoneen sivuttaissiirron mittalangat punaisella ja noston mittalangat

sinisellä värillä. Kuvassa äärimmäisenä vasemmalla näkyvä viides mittapyörästä palvelee tukemiskoneen piirturijärjestelmää. Tukemiskoneiden ohjaustietokoneita ja niiden kehitystä käsitellään hieman tarkemmin luvussa 5.2 sekä tukemiskoneiden mittausjärjestelmiä tarkemmin luvussa 5.3.



Kuva 3.29. Havainnekuva Plasser & Theurer 09-32 CSM -tukemiskoneen mittalankojen sijainnista. Sivuttaissiirron mittalanka on hahmoteltu punaisella ja noston mittalanka sinisellä. Muokattu lähteestä [65]

Suhteellista menetelmää käytetään tyypillisesti silloin, kun radan olemassa olevaa geometriaa ei ole haluttu tai ehditty selvittää etukäteen ennen tukemistyötä. Aalto [4] on lisäksi maininnut suhteellisen menetelmän valittavan yleensä silloin, kun raiteen absoluuttisen geometrisen aseman virheet ovat vähäisiä ja tukemistyön pääpaino on raiteen asennon virheiden korjaamisella.

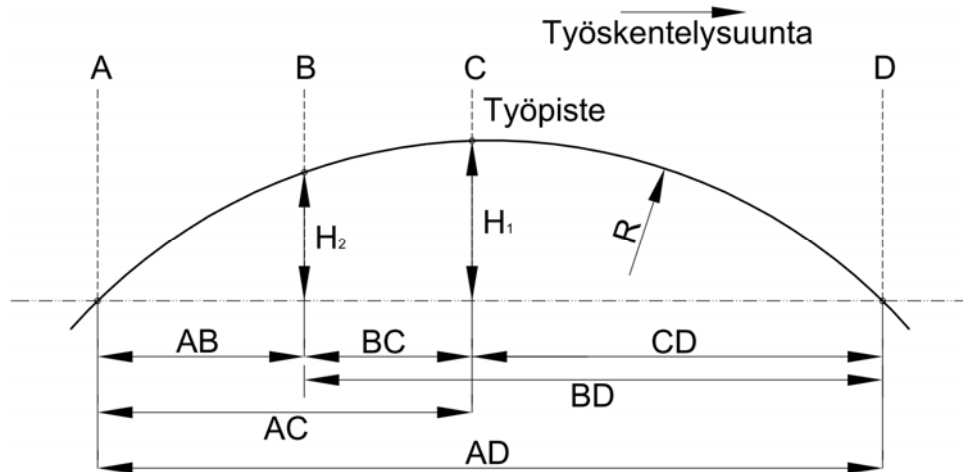
Suhteellista menetelmää käytettäessä on tukemiskoneessa oltava uusien geometriatieto ja työssä on hyödynnettävä raidegeometrian poikkeamahavaintoja sekä raidegeometrian muutoskohtia osoittavia merkintöjä maastossa. Suomessa suhteellista menetelmää voidaan käyttää pistemäisiin kunnossapitotuentoihin (luku 3.3.1) koko rataverkolla ja laajempaan kunnossapitotyöhön alempien kunnossapitotasojen 5 ja 6 radoilla (ks. kunnossapitotasot, kuva 2.3). [2]

Selkeyden vuoksi seuraavassa esittelyssä on erotettu toisistaan suhteellisella menetelmällä tehtävissä sivuttaissiirroissa ja nostoissa käytettävät periaatteet, koska ne poikkeavat jonkin verran toisistaan.

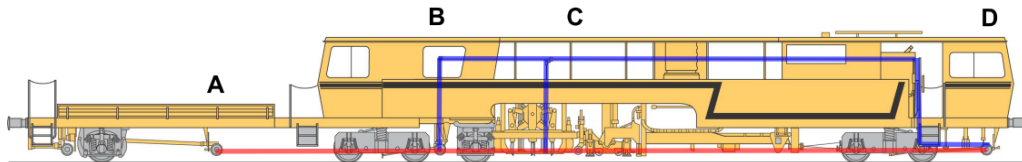
Sivuttaissiirto

Raiteen sivuttaissiirroissa eli ns. oikomisessa tai ”rekkauksessa” (*lining*) käytettävät järjestelmät siirtävät korjattavan pisteen joko kolmen muun pisteen kautta kulkevalle ympyränkaarelle tai kahden muun pisteen kautta kulkevalle suoralle. Ensinnä mainittua, niin sanottua neljän pisteen mittausmenetelmää, voidaan käyttää sekä suorilla että kaarteissa. Jälkimmäistä, kolmen pisteen menetelmäksi kutsuttua järjestelmää voidaan käyttää aina suorilla, mutta kaarteissa vain jos korjattavaa pistettä voidaan siirtää haluttu määrä sivuun kahden muun pisteen määrittämältä suoralta. [4], [53] Yllä mainitun rajoituksen vuoksi kolmen pisteen mittausjärjestelmän käyttö rekkauksen kaarteissa vaatii käytännössä radan geometrian parametrien tuntemisen.

Neljän pisteen menetelmässä (kuva 3.30) piste A on tukemiskoneen mittakannan äärimmäinen mittauspyörästä työskentelysuunnassa koneen peräpäässä, piste B on takimmaisesta mittauspyörästä ja työpisteen C välillä oleva mittauspyörästä ja piste D työskentelysuunnassa etummainen mittauspyörästä kuvan 3.31 mukaisesti. Raiteen sivuttaissiirto tehdään työpisteessä C.



Kuva 3.30. Sivuttaissiirrossa käytettävän neljän pisteen mittausmenetelmän periaate.



Kuva 3.31. Kuvassa 3.30 käytettyjen mittauspyörästöjen sijainti tukemiskoneessa. Muokattu lähteestä [65]

Työskenneltäessä ympyränkaarella ja käytettäessä määrätyn mittaista mittakantaa (AD) sekä kahta, tietyillä etäisyyksillä pisteistä A ja D sijaitsevista pisteistä B ja C määritettyä versiniä H_2 ja H_1 , on versinien (*versine*) suhde i vakio yhtälön 3.1 mukaisesti. Suomessa versinistä käytetään yleisemmin termiä nuolikorkeus. Kyseinen suhde i vaihtelee tukemiskonetyypeittäin mittauspyörästöjen keskinäisten sijaintien vaihdella ollen esimerkiksi Plasser & Theurerin tukemiskoneelle 09-32 CSM noin 1,22 ja koneelle 09-3X noin 1,51. Lisäksi tämä vakio on riippumaton ympyränkaaren säteestä. Näin työskenneltäessä pisteessä B mitattu versini H_2 kerrotaan suhteella i ja näin saatua arvoa verrataan versiniin pisteessä C ja raidetta siirretään, kunnes nämä arvot kohtaavat. Suoralla, joka geometrisesti tarkasteltuna on äärettömän kaarresäteen ja nuolikorkeuden arvon nolla omaava kaarre, neljän pisteen menetelmässä tukemiskoneelle syötetään versinin H_1 arvoksi nolla.

$$i = \frac{H_1}{H_2} = \frac{AC \cdot CD}{AB \cdot BD} \quad (3.1)$$

missä

i on kuvan 3.30 pisteissä B ja C mitattujen versinien suhde [-]

H_1 on pisteessä C mitattu versini yhtälön 3.2 mukaisesti

H_2 on pisteessä B mitattu versini yhtälön 3.3 mukaisesti

AC, CD, AB, BD ovat mittauspyörästöjen välisiä etäisyyksiä kuvan 3.30 mukaisesti

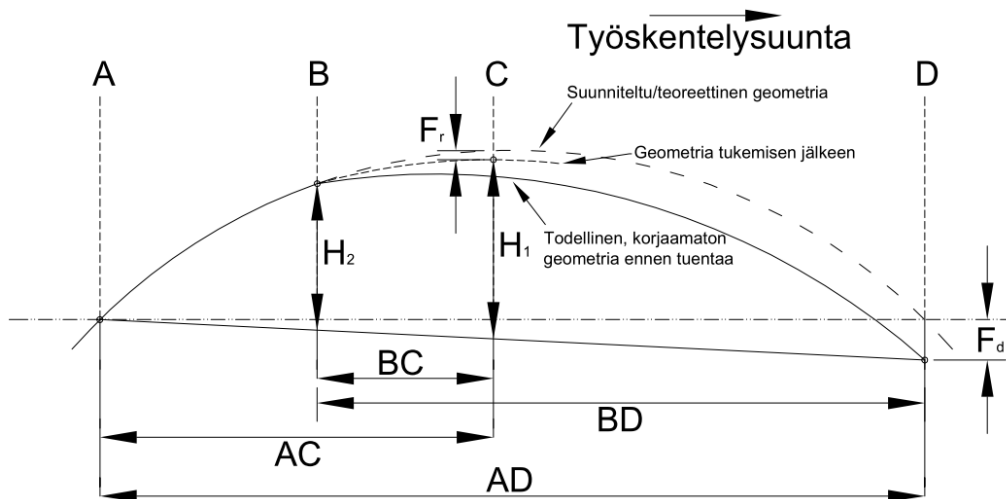
$$H_1 = \frac{AC \cdot CD}{2 \cdot R} \quad (3.2)$$

$$H_2 = \frac{AB \cdot BD}{2 \cdot R} \quad (3.3)$$

missä

R on ympyränkaaren säde [m]

Teoriassa kaikkien neljän pisteen oletetaan sijaitsevan ympyränkaarella kuvan 3.30 mukaisesti. Todellisuudessa ja geometrialtaan virheellisellä radalla näin ei välttämättä ole, vaan piste D on siirtynyt sivusuunnassa pois ympyränkaarelta. Tämä pätee sillä oletuksella, että tukemiskoneen taaemmat mittauspyörästöt A ja B sijaitsevat jo tukemalla korjatulla geometrialla. Piste D sijaitessa sivussa ympyränkaarelta virheen F_d verran suhteellisella menetelmällä työskenneltäessä ordinaattojen H_2 ja H_1 mittaus häiriintyy siten, että geometriavirhe pisteessä C ei korjaannu kokonaan, vaan pisteeseen jää jäännösvirhe F_r (kuva 3.32).



Kuva 3.32. Jäännösvirheen muodostuminen suhteellista tuentamenetelmää ja neljän pisteen mittausmenetelmää käytettäessä.

Jäännösvirheen F_r suuruus riippuu pisteessä D olevan alkuperäisen virheen F_d suuruuden ja tukemiskoneen mittauspyörästöjen keskinäisestä sijainneista riippuvan ns. virheenpienennysuhteen (*error reduction ratio*) suhteesta yhtälöiden 3.4 ja 3.5 mukaisesti.

$$F_r = \frac{F_d}{n} \quad (3.4)$$

missä

F_r on jäännösvirhe tukemisen jälkeen pisteessä C

F_d on alkuperäisen virheen suuruus pisteessä D

n on virheenpienennysuuhde yhtälön 3.5 mukaisesti

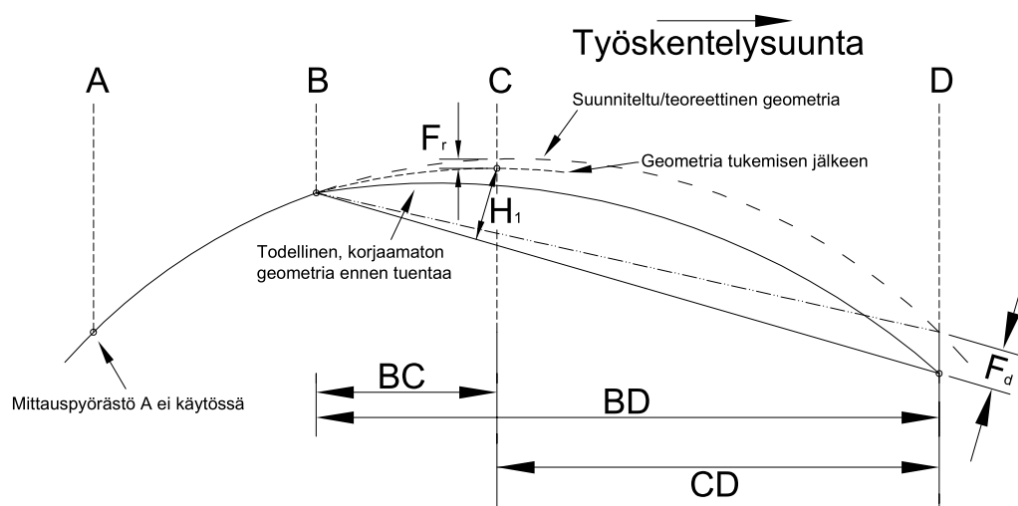
$$n = \frac{AD \cdot BD}{AC \cdot BC} \quad (3.5)$$

missä

AD, BD, AC, BC ovat mittauspyörästöjen välisiä etäisyyksiä kuvan 3.30 mukaisesti

Sekä vanhempien että modernimpien tukemiskoneiden mittauspyörästöjen keskinäiset sijainnit poikkeavat toisistaan konetyyppikohtaisesti, mutta sijainnit ovat kuitenkin useimmissa tapauksissa niin samankaltaisia, että perustellusti voidaan todeta virheenpienennyssuhteen n olevan tyypillisesti välillä 6...7. Toisin sanoen neljän pisteen menetelmää käytettäessä tukemisen jälkeinen raiteeseen jäävä sivuttaissuuntaisen virhe pienenee noin kuudes- tai seitsemäsosaan alkuperäisestä virheestä.

Kolmen pisteen menetelmässä korjattava piste siirretään siis kahden muun pisteen kautta kulkevalle suoralle. Tällöin kuvan 3.31 taaimmainen mittauspyörästö A ei ole käytössä ja kuvan 3.33 mukaisesti versiniä H_2 ei mitata.



Kuva 3.33. Kolmen pisteen menetelmän periaate ja jäännösvirheen muodostuminen sitä käytettäessä.

Kuten edellä mainittiin, vaatii kolmen pisteen menetelmän käyttö kaarteissa tavoiteltavan ratageometrian tuntemisen, sillä muuten mittausjärjestelmä pyrkii vaikuttamaan siten, että sivuttaissiirron tuloksena on aina suora [4]. Tämä johtaa siihen, että kolmen pisteen menetelmässä pisteessä C mitattua versiniä H_1 verrataan kaaren tunnettuun kaarresäteeseen perustuvaan yhtälön 3.6 mukaiseen "tavoiteversiniin" ja raidetta siirretään, kunnes kyseiset versinit ovat samat. Entisaikaan tavoiteversinit annettiin tukemiskoneelle käsin, mutta nykyään ohjaustietokoneet laskevat ne automaattisesti kaarresädetiedon perusteella.

$$H_1 = \frac{BC \cdot CD}{2 \cdot R} \quad (3.6)$$

missä

BC, CD ovat mittauspyörästöjen välisiä etäisyyksiä kuvan 3.33 mukaisesti

R on ympyränkaaren säde [m]

Kolmen pisteen järjestelmää käytettäessä virheenpienennyssuhde n määräytyy yhtälön 3.7 mukaisesti. Tukemiskoneille ominaisten mittauspyörästöjen keskinäisten sijaintien perusteella kolmeen pisteen menetelmän virheenpienennyssuhde on tyypillisesti noin 3 eli menetelmä jättää raiteeseen noin kolmasosan alkuperäisestä virheestä, mikä on noin puolet enemmän kuin neljän pisteen menetelmän kohdalla.

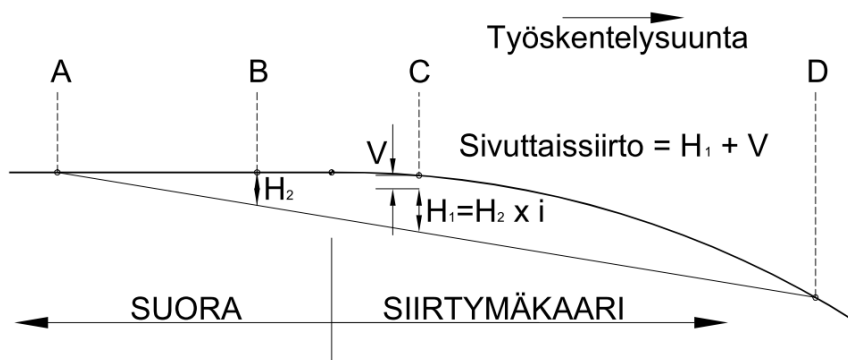
$$n = \frac{BD}{BC} \quad (3.7)$$

missä

BD, BC ovat mittauspyörästöjen välisiä etäisyyksiä kuvan 3.33 mukaisesti

Kolmen pisteen menetelmän pienehköstä virheenpienennyssuhteesta johtuen tukemistyön edetessä piste B joutuu jossain vaiheessa jäännösvirheelliselle osuudelle, jolloin jäännösvirhe pisteessä B vaikuttaa mittaukseen ei-toivotusti menetelmän olettaessa pisteen B sijaitsevan jo korjatulla geometrialla. Kolmen pisteen menetelmä ei myöskään sisällä neljän pisteen menetelmän sisältämää kahden versinin vertaamisen tuomaa ”tasoittavaa” vaikutusta, vaan jäännösvirheiden aiheuttamien ”sykkyröiden” synty on helpompaa. Tästä johtuen kolmen pisteen menetelmän ja suhteellisen menetelmän yhteiskäyttö kaarteissa ei ole kovin suositeltavaa.

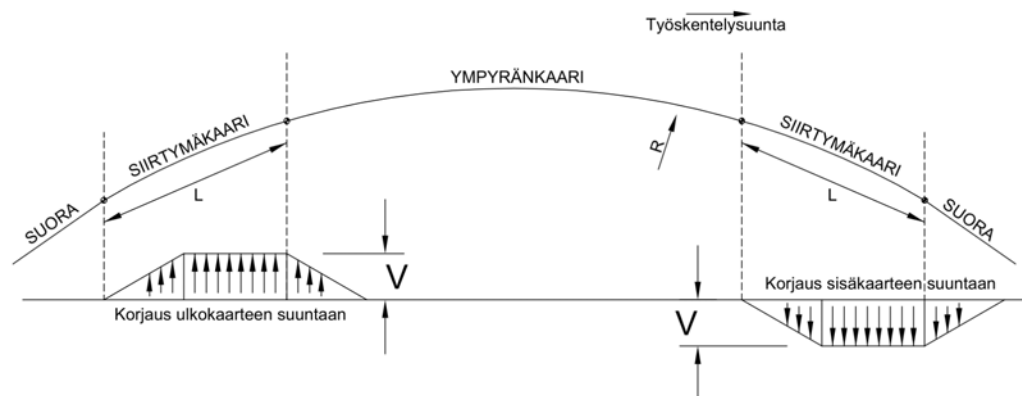
Eräs suhteellista menetelmää koskeva erityispiirre on korjausarvojen syöttäminen siirtymäkaarissa sekä kolmen että neljän pisteen menetelmää käytettäessä. Siirtymäkaari on vaakageometrian elementti, jossa kaarevuus eli säteen käänteisarvo muuttuu ja niitä käytetään esimerkiksi suoran ja ympyränkaaren tai kahden ympyränkaaren välissä. Siirtymäkaarityyppejä ovat esimerkiksi klotoidi sekä kolmannen ja neljännen asteen paraabelit. [66] Korjausarvon V syöttämisen periaate neljän pisteen menetelmällä työskenneltäessä on esitetty kuvassa 3.34.



Kuva 3.34. Korjausarvojen syöttämisen periaate työskenneltäessä siirtymäkaarella suhteellisella menetelmällä.

Korjausarvot on syötettävä jokaiselle tuettavalle kohdalle, esimerkiksi ratapölkkykohdaisesti, erikseen. Perinteisesti tämä on tehty käsin konekohtaisten korjausarvokatalogien avulla, mutta nykyään tukemiskoneiden ohjaustietokoneet laskevat korjausarvot automaattisesti mittauspyörästöjen etäisyyksiin, ympyränkaaren säteeseen R ja siirtymäkaaren muotoon ja pituuteen L perustuen. Laajemmassa mittakaavassa korjausarvojen syöttämisen periaate neljän pisteen menetelmää käytettäessä on kuvan 3.35 mukainen. Kolmen pisteen menetelmällä työskenneltäessä korjausarvojen syöt-

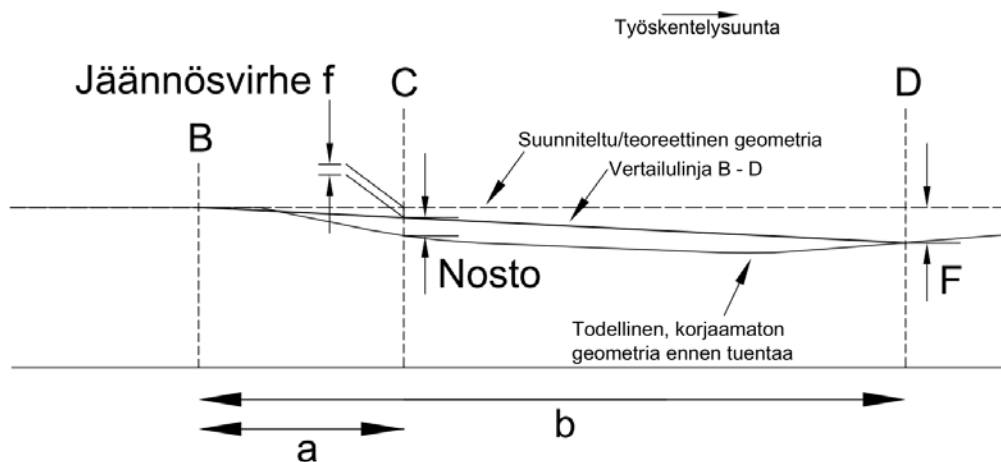
tämisperiaate siirtymäkaareissa on hieman monimutkaisempaa, mutta sekin perustuu konekohtaisiin korjausarvokatalogeihin.



Kuva 3.35. Korjausarvojen antamisen periaate siirtymäkaarissa neljän pisteen menetelmällä.

Pitkittäinen ja poikittainen nosto

Tukemiskoneiden radan pituussuuntaisen noston mittausjärjestelmä perustuu kuvassa 3.31 esitettyihin mittapyörästöihin B, C ja D kuvan 3.36 mukaisesti. Nostoa tehtäessä raidetta nostetaan työpisteessä C, kunnes se on vertailulinjan B–D tasolla. Mittaus tehdään kummallekin kiskolle erikseen.



Kuva 3.36. Tukemiskoneiden tekemän noston periaate.

Teoriassa pisteiden B ja D sijaitessa suunnitellulla geometrialla, tulee mahdollinen virhe työpisteen C kohdalla korjatuksi kokonaan. Kuitenkin, kuten sivuttaissiirronkin tapauksessa, piste D sijaitsee tyypillisesti virheellisellä geometrialla. Tämä vaikuttaa siten, että työpisteen C nostaminen vertailulinjan B–D tasolle ei johda haluttuun geometriaan, vaan raiteeseen jää yhtälön 3.8 mukainen jäännösvirhe f .

$$f = \frac{F \cdot a}{b} = \frac{F}{r} \quad (3.8)$$

missä

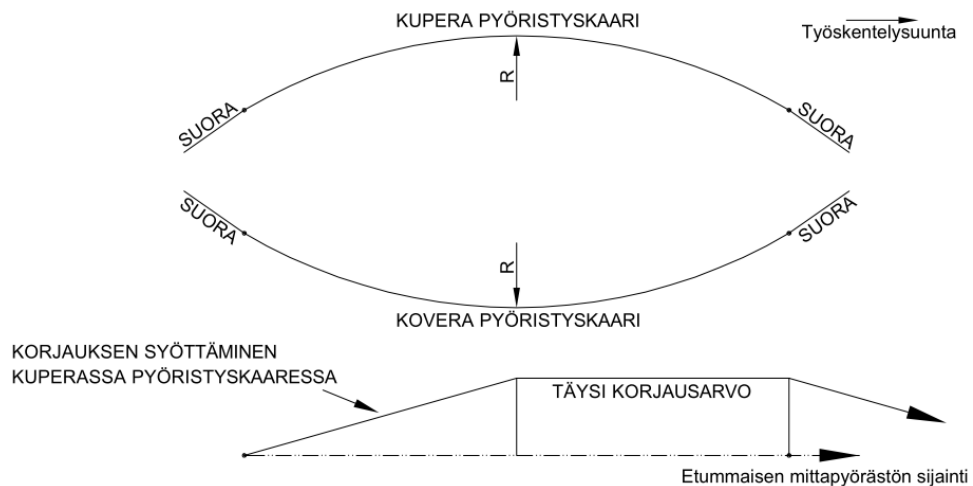
- f on jäännösvirhe pisteessä C
 F on virhe pisteessä D
 a on mittauspyörästön B ja työpisteen C välinen etäisyys
 b on vertailulinjan B – D pituus
 r on virheenpienennyssuhde b / a

Nykyaikaisten tukemiskoneiden mittapyörästöjen keskinäisillä etäisyyksillä noston virheenpienennyssuhde on tyypillisesti noin 3,0...3,3 eli jäännösvirheen suuruus pisteessä C on noin kolmasosa alkuperäisestä virheestä pisteessä D. Mittausperiaatteesta johtuen suhteellisella menetelmällä tehtävällä pitkittäisellä nostolla vain aallonpituudeltaan melko lyhyet virheet tulevat korjatuiksi tai lievennetyiksi.

Mikäli työpiste sijaitsee valmiiksi vertailulinjan yläpuolella, nostoa ei tapahdu. Tällöin raiteelle voidaan tehdä niin sanottu vakio- tai perusnosto, jotta myös vertailulinjan yläpuolelle muuten jäävät ”töyssyt” tulevat tasoitetuiksi. Käytännössä vakionosto toteutetaan nostamalla etummaista mittapyörästöä D joko fyysisesti tai kuvitteellisesti ennalta määritetyn määrän ylöspäin.

Poikittaissuuntaisessa nostossa kiskojen keskinäinen korkeusasema määritetään heilurivaaioilla (*pendulum*). Vaa’at sijaitsevat tyypillisesti sekä tukemiskoneen etupäässä että työpisteen lähellä ja nykyään enenevässä määrin myös koneen takapäällä, mutta myös poikkeuksia voi esiintyä konetyyppikohtaisesti. Etupään heilurivaa’alla mitataan ero teoreettisen eli halutun kallistuksen tai kallistuksettomuuden ja olemassa olevan kallistuksen välillä, josta se siirretään sopivan vaihesiirron avulla työpisteeseen. Työpisteen heilurivaa’alla hallitaan halutun kallistuksen toteutumista tuettaessa. Tukemiskoneen peräpäähän vaakaa käytetään tukemistyöllä saavutetun kallistuksen tai kallistuksettomuuden varmistamiseen ja tallentamiseen.

Kuten sivuttaissiirron tapauksessa, myös raiteen korkeussuuntaisten nostojen tekemiseen liittyy korjausarvojen syöttämistä tiettyjen raidegeometrian elementtien kohdalla. Pystygeometrian pyöristyskaaria varten laskettavia ja syötettäviä korjausarvoja kutsutaan usein teoreettisiksi jatkeiksi. Pitkittäissuuntaisissa nostoissa korjausarvoja vaaditaan pystygeometrian taitepisteiden pyöristyskaarissa ja niiden tangenttipisteissä sekä kallistetuissa kaarteissa siirtymäkaaren alueella niin sanotun kartiovaikutuksen eliminoimisen [4]. Korjausarvot voidaan syöttää joko käsin konekohtaisesti taulukoihin perustuen tai korjaus voi tapahtua automaattisesti tukemiskoneen ohjaustietokoneen tekemänä. Pyöristyskaarissa korjausarvo määritetään tukemiskoneen mittapyörästöjen sijainnista riippuvan konetyyppikohtaisen vakion ja pyöristyskaaren säteen suhteena. Korjausarvon syöttämisen periaate kuperan pyöristyskaaren eri vaiheissa on esitetty kuvassa 3.37. Koveralle pyöristyskaarelle korjaus tehdään päinvastaiseen suuntaan.



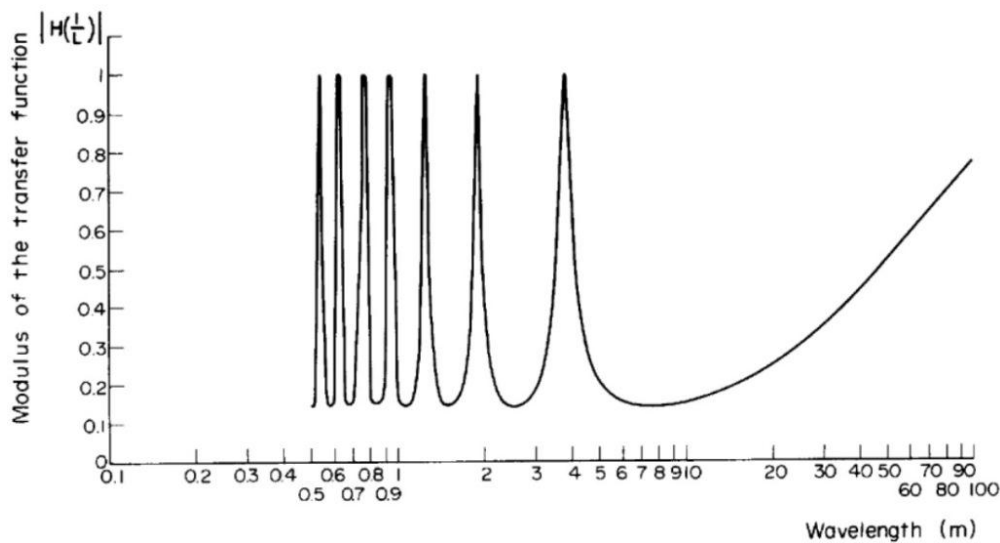
Kuva 3.37. Korjausarvojen syöttämisperiaate kuperassa pystygeometrian pyöristyskaareissa.

Suorilla eli kallistuksettomilla rataosuuksilla poikittaisen noston mittajärjestelmä huolehtii automaattisesti oikeista nostoista kummallekin kiskolle. Kallistuksellisilla osuuksilla eli kallistusviisteissä ja kallistuksellisissa ympyränkaarissa mittausjärjestelmää joudutaan ohjaamaan. Jos kallistus on aikaansaatu vain toista kiskoa nostamalla, voidaan ohjausarvona syöttää suoraan työpisteen kohdalle haluttu kallistuksen arvo. Jos kallistus on aikaansaatu nostamalla molempia kiskoja tai laskemalla toista kiskoa, on ohjausarvojen antaminen hieman työläämpää, sillä samalla joudutaan ohjaamaan myös pitkittäisen noston mittausjärjestelmää. [4]

Uudemmissa tukemiskoneilla, joissa on käytettävissä WinALC- (Plasser & Theurer) tai TGCS-ohjaustietokoneet, on mahdollista tehdä ensin ns. mittausajo koneen omalla mittakannalla ja tukea raideosuus sen tulosten perusteella [45]. Edellä esitellyt jäännösvirhetekijät pätevät kuitenkin myös tässä tapauksessa. Muutamien haastatteluiden perusteella kyseistä mittausajovaihtoehtoa käytetään Suomen rataverkolla hyvin vähän, jos ollenkaan.

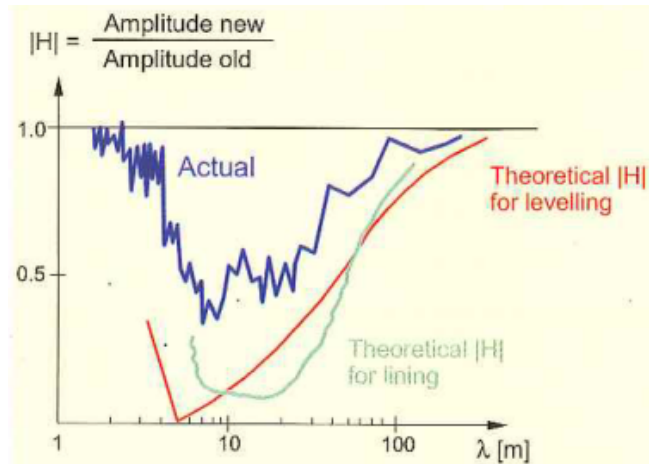
UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaassa [45] suhteellisen menetelmän suurimmaksi eduksi on mainittu sen edullisuus mittauksien ja ennakkosuunnittelun vähäisyydestä johtuen. Kuitenkin, johtuen erityisesti suhteellisen menetelmän kyvyttömyydestä korjata pitkän aallonpituuden virheitä, useat maat käyttävät sallitulta nopeudeltaan yli 160 km/h radoilla seuraavassa luvussa esiteltyä tarkkuusmenetelmää. UIC:n katsauksessa viisi kymmenestä maasta käytti alle 160 km/h radoilla suhteellista menetelmää, kaksi sekä suhteellista että tarkkuusmenetelmää ja kolme pelkkää tarkkuusmenetelmää. Tarkasteltaessa yli 160 km/h ratoja, enää Saksassa käytettiin pelkkää suhteellista menetelmää. Kolmessa maassa käytettiin molempia menetelmiä ja viisi maata käytti pelkkää tarkkuusmenetelmää suuremman nopeuden radoilla. Oppaassa mainitaan lisäksi suhteellisen menetelmän aiheuttavan geometrian vääristymistä siirtymäkaarissa useiden suhteellisella menetelmällä tehtyjen tuentojen jälkeen. Edellisen lisäksi suuria kiihtyvyyksiä aiheuttavien ”piikkien” synty on mahdollista, mikä alentaa matkustusmukavuutta ja kasvattaa dynaamisia kuormituksia. Jäännösvirheiden takia tuettu raide ei koskaan jää virheettömäksi, mikä UIC:n mukaan lisää raiteeseen kohdistettavien tukemiskertojen määrää ja edelleen kasvattaa kustannuksia lisätyömäärän ja sepelin hienontumisen kautta.

Suhteellisen menetelmän käyttöön liittyy lisäksi tässäkin raportissa jo muutamaaan otteeseen mainittu siirtofunktio. Hyvin yksinkertaistettuna tukemiskoneen teoreettinen siirtofunktio liittyy koneen mittauseriaatteesta johtuvaan rajoitukseen, jonka myötä tukemiskone pystyy korjaamaan aallonpituudeltaan jonkin suuruisia virheitä paremmin kuin toisia. Teoreettisen siirtofunktion vaikutus on helpoiten ymmärrettävissä tarkastelemalla kuvaa 3.38, jossa on esitetty erään tukemiskoneen pituussuuntaisen nostojärjestelmän teoreettisen siirtofunktion moduuliluku eri aallonpituuksilla. Käytännössä kyseinen siirtofunktion moduuliluku kuvaa tukemiskoneen kykyä pienentää aallonpituudeltaan kunkin suuruisia virheitä siten, että mitä pienempi moduuliluku on, sitä paremmin virhe korjaantuu. Teoreettisia siirtofunktioita eri tukemiskoneille ja siirtofunktioihin liittyvää teoriaa on esitellyt tarkemmin esimerkiksi Esveld [70]. Siirtofunktion vaikutuksia on pyritty tukemiskoneissa eliminoimaan erilaisin ohjaustietokonejärjestelmään (luku 5.2) sisällytetyin algoritmein.



Kuva 3.38. Erään tukemiskoneen nostojärjestelmän teoreettisen siirtofunktion moduuliluku virheen aallonpituuden suhteen. [69]

Tarkasteltaessa kuvaa 3.38 havaitaan, että kyseinen tukemiskone pystyy korjaamaan aallonpituudeltaan noin 4,5...35 metriset virheet varsin hyvin. Virheen aallonpituuden kasvaessa 35 - 40 metriä suuremmaksi koneen korjauskyky heikkenee nopeasti. Noin 4,5 metriä alhaisemmillä aallonpituuksilla korjauskyky on hyvin vaihteleva tiettyjen virheiden korjaantuessa erittäin hyvin ja tiettyjen jäädessä rataan täysin korjaamattomina. Teoreettisen siirtofunktion (*theoretical transfer function*) lisäksi kirjallisuudessa näkee usein puhuttavan todellisesta siirtofunktiosta (*actual transfer function*). Todellisella siirtofunktiolla tarkoitetaan yleensä tukemiskoneen todellista virhekorjauskykyä, kun mittauseriaatteen rajoitteiden lisäksi huomioidaan esimerkiksi koneen mahdolliseen epätäydelliseen toimintaan liittyvät ja ratarakenteesta (hienontunut raidesepeleli ym.) johtuvat tekijät. Esveld [13] on esittänyt kuvan 3.39 mukaisen vertailun teoreettisen ja todellisen siirtofunktion erosta.



Kuva 3.39. Teoreettinen ja todellinen siirtofunktio Plasser & Theurerin 07-32 tukemiskoneelle. [13]

Kuvasta 3.39 nähdään, että kyseisen tukemiskoneen virheenkorjauskyky on keskimäärin vain noin puolet siitä mitä teorian mukaan voisi odottaa. Edellä mainitulla noin 4,5...35 metrin aallonpituusvälillä virheet korjaantuvat todellisuudessakin kohdallisesti, mutta tämän alueen ulkopuolella erittäin heikosti. Itse asiassa on havaittu, että tukemiskoneilla on yleisesti taipumus jopa kasvattaa tietyn aallonpituuden virheitä varsinkin alle 4,5 metrin aallonpituusalueella [69], [70].

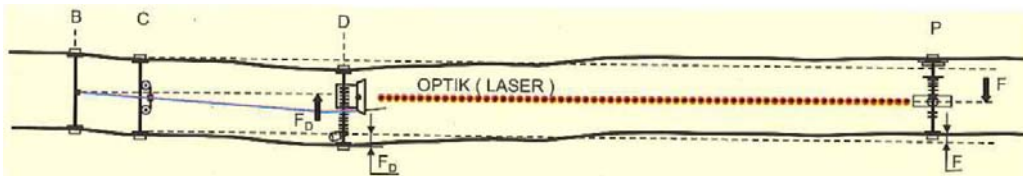
3.4.2 Tarkkuusmenetelmä

Tyypillisimmät tarkkuusmenetelmän käyttökohteet ovat ylempiluokkaisten ratojen kunnossapidon työt, joilla korjataan raiteen asemassa olevia suuria virheitä sekä esimerkiksi radan perusparannukseen tai uudisrakentamiseen liittyvät raiteen aseman muutostyöt. [4] Vaihteet tulisi aina tukea tarkkuusmenetelmää käyttäen [2].

Tarkkuusmenetelmää käytettäessä tukemistyö tehdään ennakkoon tehtyjen raidegeometriamittausten perusteella määritettyjen nosto- ja sivuttaissiirtoarvojen eli niin sanotun **nuotituksen** mukaisesti. Tälläkin menetelmällä työskenneltäessä on tukemiskoneella ja -työryhmällä oltava käytettävissään uusin geometriatieto, tukemistyön aloituspiste sekä suunnitellut nosto- ja sivuttaissiirtoarvot. [2] Nuotitusta ja sen tuloksia esitellään tarkemmin luvussa 4.1.5.

Tarkkuusmenetelmällä tehtävissä sivuttaissiirroissa käytetään pelkästään kolmea mittapyörästä niin suorilla kuin kaarteissakin. Tämä johtuu neljän pisteen menetelmän taipumuksesta tehdä tietyissä tapauksissa suoralle virheellinen kaarre. Sivuttaissiirrot tehdään ennalta määritettyjen nuottien mukaan joko siten, että konetta ohjataan käsin tukemisen aikana tai siten, että nuotit syötetään ennakkoon koneelle ja tukemiskone siirtää raidetta automaattisesti nuottien perusteella. Myös tarkkuusmenetelmällä työskenneltäessä on käytettävä korjausarvoja suhteellisen menetelmän kohdalla esiteltyjen tapausten yhteydessä, ellei tukemiskoneen automatiikka hyödynnä siihen valmiiksi syötettyä geometriatiedostoa.

Eräs sivuttaissiirtoon liittyvä menetelmä, joka voitaneen lukea tarkkuusmenetelmään kuuluvaksi, on laserin käyttö. Laserjärjestelmä koostuu laserlähteestä ja etummaisen mittapyörästä kohdalla sijaitsevasta vastaanottimesta. Laseria käytettäessä laserlähde viedään tukemiskoneen eteen, sää- ja muista olosuhteista riippuen jopa 300 metrin etäisyydelle. Aiemmin on ollut käytössä jopa 600 metrin etäisyyksiin pystyviä laserlähteitä, mutta niiden käyttö on sittemmin kielletty näölle vaarallisina. Suoralaseria käytettäessä laserlähde viedään mahdollisimman kauas tukemiskoneesta ja asetetaan tavoitegeometrian mukaan raiteen keskelle. Kuvassa 3.40 laserlähteen siirtämistä on kuvattu arvolla F katkoviivojen kuvatussa tavoiteltua vaakageometriaa. Tämän jälkeen vastaanotin hakeutuu lasersäteen kohdalle ja sen sijainnin eli virheen F_D perusteella raidetta siirretään työpisteessä C . Seuraavassa tuettavassa pisteessä tukemiskone toistaa automaattisesti samat toiminnot. Lasersäteellä ohjattua sivuttaissiirtoa voidaan jatkaa noin 20 metrin päähän laserlähteestä. Suoralaserien käytön laajuudesta Suomessa ei ole tarkkaa tietoa, mutta mahdollisuus suoralaserin käyttöön on useimmissa Suomessa käytössä olevissa tukemiskoneissa. Tarkkuusmenetelmää tai suoralaseria käytettäessä raiteeseen ei jää tuennan jälkeen jäännösvirheitä, toki sillä oletuksella, että nuotitusmittaukset ja tuenta on tehty virheettää.

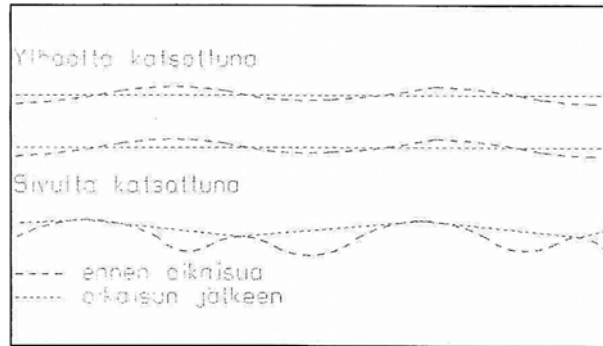


Kuva 3.40. Suoralaserin toimintaperiaate. [13]

Haastattelujen perusteella on selvinnyt, että Suomen rataverkolla on kokeiltu myös muutamia kaarrekäyttöön tarkoitettuja lasereita, mutta niiden käytöstä on ilmeisesti melko pian luovuttu niiden käyttämisen hitauden/hankaluuden takia. Laseria voidaan käyttää apuna myös nostoissa ja Suomenkin rataverkolla toimii useita ”pystylaserilla” varustettuja tukemiskoneita. Pystylaserin käyttö on kuitenkin ilmeisesti vaakalaseria huomattavasti vähäisempää.

Tarkkuusmenetelmällä tehtävissä nostoissa pystygeometrian virheet kuvan 3.36 pisteessä D on määritetty ennalta ja niin etummaista mittaussyörästä voidaan joko kuvitteellisesti tai fyysisesti siirtää raiteessa olevan virheen verran. Näin vertailulinja $B-D$ asettuu halutun geometrian tasolle ja pystysuuntaiset virheet tulevat kokonaan korjatuiksi. Tarkkuusmenetelmää käytettäessä myös aallonpituudeltaan pitkät virheet tulevat eliminoituiksi.

Aalto [4] on opinnäytetyössään esitellyt myös alempiluokkaisilla radoilla käytettävän niin kutsutun ”patista pattiin” -menetelmän. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 3.41. Sivuttaissiirrot tehdään tässä menetelmässä samalla tavalla kuin tarkkuusmenetelmää käytettäessä. Sitä vastoin nostoilla ei pyritä saavuttamaan suunniteltua geometriaa tai ns. tavoitegeometriaa, vaan lyhyemmät painuneet alueet ainoastaan nostetaan vierekkäisten alueiden kanssa samalle tasolle.



Kuva 3.41. ”Patista pattiin” -menetelmän vaikutus vaakageometriaan (ylhäällä) ja pystygeometriaan (alhaalla). [4]

UIC:n parhaiden käytäntöjen opas [45] mainitsee tarkkuusmenetelmän käytön eduiksi seuraavaa:

- Saavutetaan mittaustietoon perustuva tieto radan tarkasta asemasta
- Myös aallonpituudeltaan pidemmät virheet ja siirtymäkaaret tulevat korjatuiksi
- Matkustusmukavuus paranee
- Radan geometrisen kunnan heikkeneminen hidastuu
- Tuentojen jaksottaminen helpottuu
- Elinkaaritaloudellisuus paranee muun muassa radan geometrian pysyvyyden parantuessa

Tyypillisin tapa mitata absoluuttista raidegeometriaa tarkkuusmenetelmää varten lienevät takymetrimittaus ja muut manuaaliset menetelmät. Maailmalla on lisäksi kehitelty ja joillain rataverkoilla käytössä joitakin absoluuttiseen geometriaan perustuvia tarkkuusmenetelmän nuotituksen sovelluksia, kuten esimerkiksi Plasser & Theurerin EM-SAT-vaunu [106] ja Matisan markkinoima Palas-järjestelmä [39].

4 Tukemistyön suunnittelu ja toteutus kunnossapidossa

Tässä luvussa esitellään suppeasti tukemistyön suunnittelussa huomioitavia asioita. Pääasiassa esittelyssä keskitytään linjaosuuksien tukemiseen. Vaihteen tukemiseen liittyvät asiat on koottu lukuun 4.2. Tukemiskoneita ja muuta tukemistyöhön liittyvää kalustoa esitellään tarkemmin luvussa 5.

4.1 Tukemistyön suunnittelussa huomioitavia tekijöitä

4.1.1 Tukemistavan valinta

Tunnisen [2] mukaan peruseriaate tukemistavan valinnassa on, että pistemäiset virheet korjataan kunnossapitotuentoina, mikäli virhealue ei ole huomattavan laaja. Toisaalta taas läpituenta valitaan tukemistavaksi tarkastelemalla radan geometrisen kunnan kehittymistä pidemmällä aikavälillä. (ks. luku 3.3)

4.1.2 Tukemismenetelmän valinta

Valittava tukemismenetelmä riippuu ensisijaisesti rataosan kunnossapitotasosta ja tuettavan kohteen laajuudesta [2]. Suomen rataverkon osien kunnossapitotasot on esitetty kuvassa 2.3.

Korkean kunnossapitotason radoilla (1, 1A ja 1AA) tukemistyössä tulee käyttää tarkkuusmenetelmää, jotta suunnitellun raidegeometrian ylläpitäminen on mahdollisimman tehokasta. Radanpitäjä saattaa rataosakohtaisesti vaatia geometrian ylläpitoa niin sanotusti absoluuttisessa geometriassa, jolloin raidegeometria ja siihen kohdistetut toimenpiteet on sidottu kiintopisteverkkoon. Tällaisilla rataosilla suhteellisen menetelmän käyttäminen kunnossapitotuennoissa on sallittua ainoastaan pistemäisissä kohteissa korjattaessa raiteentarkastusajoissa havaittuja kiireellisiä virheitä. [2]

Kunnossapitotasojen 2, 3 ja 4 rataosilla suhteellisella menetelmällä tehtävä kunnossapitotuenta on laajemmin sallittua. Kuitenkin kohteissa, joissa raidegeometrian toleranssit ovat pienet (sillat, tasoristeykset, laiturialueet), tulee käyttää tarkkuusmenetelmää. [2]

Alempien kunnossapitotasojen 5 ja 6 alaisilla rataosilla suhteellisella menetelmällä tehtävät kunnossapitotuennot ovat pääosin riittäviä. Kunnossapitotöissä tulee kuitenkin seurata geometrian kehittymistä erityisesti kaarteissa. Tarkkuusmenetelmää tulee käyttää alueilla, joilla raidegeometrian toleranssit ovat pieniä. [2]

4.1.3 Tukemistyön ajoittaminen

Tukemistyön tekemisen ajankohta ja ajoittaminen riippuu muun muassa seuraavista tekijöistä: [2]

- korjattavan virheen vakavuudesta (ks. luku 2.3.1), mikä vaikuttaa tukemistyön kiireellisyyteen. Mikäli D-luokan virheitä esiintyy useampia lyhyellä osuudella, saattaa se vaikuttaa kaluston kulun stabiiliuteen ja kyseisen kaltaiset alueet tulee priorisoida kunnossapidossa.

- käytettävissä olevista tukemiskone- ja muista resursseista. Tukemiskoneille määritellään tarvittaessa kohteiden suoritusjärjestys.
- saatavissa olevista työraoista, jotka voivat vaihdella huomattavasti rataosakohtaisesti.
- tukemistyön vaatimien esitöiden (ks. luku 4.1.6) laajuus ja kesto
- sääolosuhteet erityisesti keväällä ja kuumina kesäpäivinä. Aikaisin keväällä tuettaessa routaantunut ratarakenne ei ole välttämättä sulanut kauttaaltaan ja tällöin tukemistyöllä harvoin saavutetaan pysyvä tulos. Lisäksi keväällä kiskon lämpötila voi vaihdella huomattavasti, jolloin hellekäärien muodostumisriski on suurempi. Jatkuvakiskoraiteella ylin työskentelylämpötila on +35 °C [4] suositeltavan lämpötilavälin ollessa +5...+27 °C [2].
- muista ratatöistä työalueella. Tukemistyöt tulee yhteensovittaa muiden kunnossapito- ja korjaustöiden kanssa. Erityisesti kiireettömissä tapauksissa tukemistöitä on kannattavaa pyrkiä niputtamaan tietylle aikavälille, jolloin voidaan optimoida resurssien ja ratakapasiteetin käyttöä.
- mahdollisesti työlle tarvittavista luvista. Esimerkiksi tukemistyön aiheuttama melu- tai pölyhaitta voi vaatia luvat. Lisäksi esimerkiksi tasoristeysten kansien purkamisesta on tiedotettava paikallisia viranomaisia ja asukkaita.

4.1.4 Tukemialueen määrittäminen

Kulloinkin tuettava alue, erityisesti kunnossapitotuennoissa, määritetään pääsääntöisesti raiteentarkastusajojen mittaustulosten perusteella. Tuettavan alueen määrittämisessä on mahdollisuuksien mukaan huomioitava, että [2]

- koko virhealue saadaan tuettua niin sanotun ”nollasta nollaan” -periaatteen mukaisesti.
- aloitus- ja lopetuskohdilla ei esiinny vaaka- tai pystysuuntaisia geometriavirheitä ja kallistus on paikallisen geometrian mukainen.
- alku- ja loppuviisteet eivät tule siirtymäkaaren alueelle tai vaihteen alueelle. Siirtymäkaaret ja vaihteet tulisi aina tukea kokonaisuudessaan. Alku- ja loppuviisteiden pituus riippuu kulloisenkin noston suuruudesta, sillä viisteiden kaltevuuden tulee olla noin 1:1000. Yksittäinen korkeuspoikkeama esimerkiksi eristysjatkoksen kohdalla voidaan kuitenkin tukea ilman viisteitä.
- esityöt, kuten kansirakenteiden purut tai mittaukset, saadaan tehtyä koko alueella ennen tukemistyötä.
- läpituentaa tehtäessä on eroteltava alueet, joilla on tehtävä esituentaa ennen varsinaista tuentaa siten, että nostot pysyvät läpituennassa 20...50 mm suuruisina.

4.1.5 Tukemisen edellyttämät mittaukset ja nuotitus

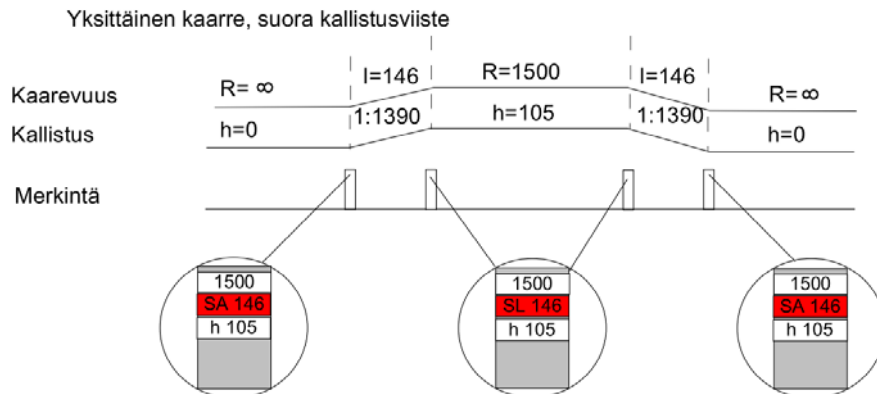
Tarkkuusmenetelmällä tehtävää tuentaa varten raiteen nykyinen sijainti on mitattava ja mittausdatan perusteella laadittava nuotitus tavoiteltavan tai absoluuttisen geometrian mukaisesti. Nuotitus on tarpeen esimerkiksi, kun raide ei ole oikeassa geometrisessa asemassaan, vaihteiden tuennassa, tuennan päättyessä kiinteään esteeseen tai laajemman tukemistyön kohdistuessa korkean kunnossapitotason radalle. [2] Tyypillisin Suomessa käytetty nuotitusmittausmenetelmä on takymetrimittaus. Nuotituksen tekee tyypillisesti joko mittaaaja tai suunnittelija.

Jo raidegeometriaa mitattaessa ja viimeistään lopullista nuotitusta suunniteltaessa on hyvä pitää mielessä muutamia tukemistyöhön liittyviä rajoitteita: [2]

- perusnoston suuruuden tulee olla vähintään 20 mm
- maksiminoston tulisi olla läpituennassa 50 mm ja kunnossapitotuennassa 70 mm. Tätä enemmän painuneet alueet on läpituennan osalta nostettava etukäteen ja tarvittaessa stabilisoitava (ks. luku 5.6).
- kaarteissa kallistusvirheiden korjaamisessa suuret nostot voivat olla tarpeen
- sivusiirron maksimi ilman kiskon neutralisointia on 40 mm, jolloin on huomioitava myös mahdolliset aikaisemmat neutraalilämpötilaa muuttaneet sivusiirrot
- raiteen sivusiirron ja kallistuksen vaikutus ajolangan sijaintiin suhteessa raiteeseen. Esimerkiksi kallistuksen muutoksen vaikutus ajolangan suhteelliseen sijaintiin on nelinkertainen.

Nuotituksessa olisi hyvä esittää vähintään seuraavat tiedot: [2]

- rataosa ja tukemistyön aloitus- ja lopetuspiste. Mittaajan ammattitaidolla on suuri merkitys aloituspisteen, kuten myös lopetuspisteen, valinnan onnistumisessa, sillä mittaajan on jo maastossa kyettävä arvioimaan mistä tuenta on mahdollista aloittaa ja mihin se voidaan lopettaa hyvin lopputuloksin. Aloituspiste on merkittävä tukikerrokseen (ei ratapölkkyyn) heijastavalla maalilla, ellei kiskon kyljessä ole selkeää pituusmittaa merkittynä.
- geometrian muutospisteet ja geometrian tiedot, kuten esimerkiksi siirtymäkaarien pituudet ja päätepisteet. Tässä suurena apuna maastossa toimivat kuvan 4.1 mukaiset kaarrepaalut, joista on apua myös tukemiskoneelle.



Kuva 4.1. Esimerkkikuva kaarrepaalujen sijainneista kaarteessa ja niiden merkinnöistä. [67]

- mahdolliset geometrian pakkopisteet, kuten sillat tai tasoristeykset
- nosto- ja sivuttaissiirtoarvot suorilla ja kaarteissa 20 metrin välein. Nuotituspisteiden välisillä osuuksilla sivuttaissiirto- ja nostoarvot interpoloidaan vierekäisistä nuotitusmittausarvoista.
- nosto- ja sivuttaissiirtoarvot tarvittaessa tiheimmin esimerkiksi vaihde- ja laiturialueilla
- mahdollisten laserpisteiden paikat olosuhteista riippuen maksimissaan 200–280 metrin välein

Tunninen [2] on maininnut, että mikäli tuettavalla alueella esiintyy pystygeometrian taitteita geometrian pakkopisteiden, kuten vaihteen, tasoristeyksen tai sillan, kohdalla, on nuotituksen suunnittelun yhteydessä laskettava tukemiskoneelle teoreettiset jatkeet, joilla varmistetaan suunniteltujen nostoarvojen toteutuminen kohteessa. Teoreettisten jatkeiden suunnittelu vaatii tukemiskoneen toimintaperiaatteen ymmärrystä.

Esimerkkikuva nuotitusmittausten tuloksista on esitetty kuvassa 4.2. Nuotitusmittausten tulokset voidaan siirtää uudemmissa tukemiskoneissa ohjaustietokoneelle esimerkiksi muistitikun avulla, mutta tyypillisesti ne syötetään tukemiskoneelle käsin kuvan 4.2 kaltaisen tulosteen avulla.

Raide: VAIHTEEN NOSTO- JA REKKAUSNU
 RAITEEN →

JK-VASEN

Pvm 05.05 LYÖNTISUUNTA: PIIRKKIO → KURITTI

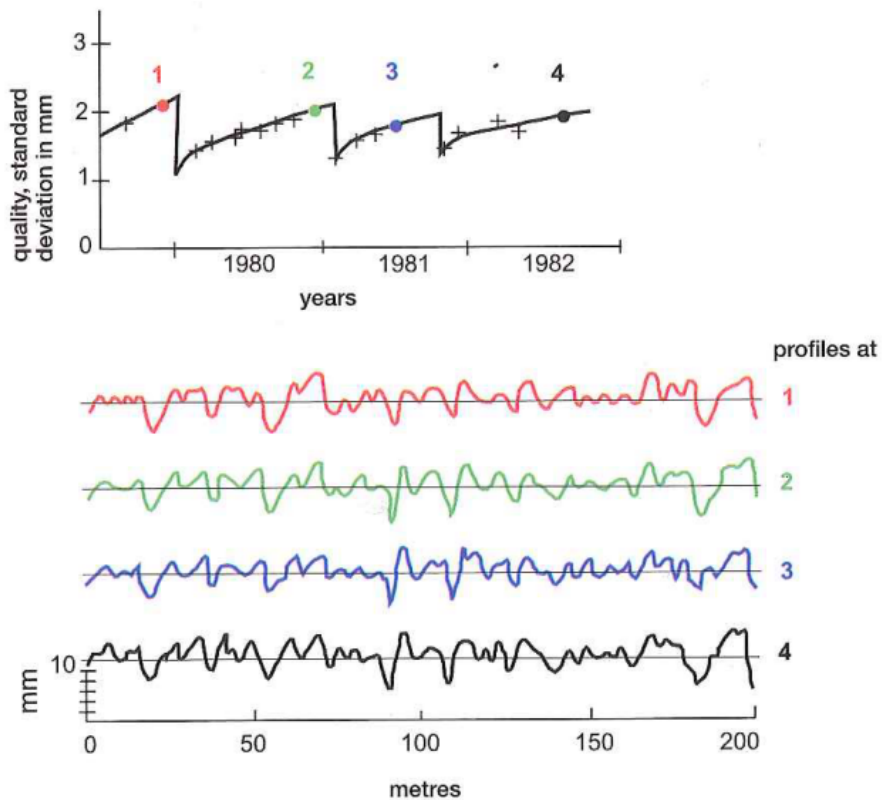
Elem.	km	m	Nosto	Siirto	Korkeus	Huom.	
						R =	L =
KM	189	960		5→	20		
		980		0	20		
		998,91		0	30		
	190	20		0	25		
		40		←20	30		
		60		←15	25		
		80		←10	25		
		100		←5	25		
		120		←5	25		
		140		←5	25		
OL		160		0	25		
		180		0	25		
		200		0	10		
		204,87		0	5	951	170
		220		←5	0		
		240		←10	0		
		260		←5	0		

SILT?

Kuva 4.2. Esimerkki nuotitusmittauksen tuloksena syntyvästä asiakirjasta linjaosuudelle.

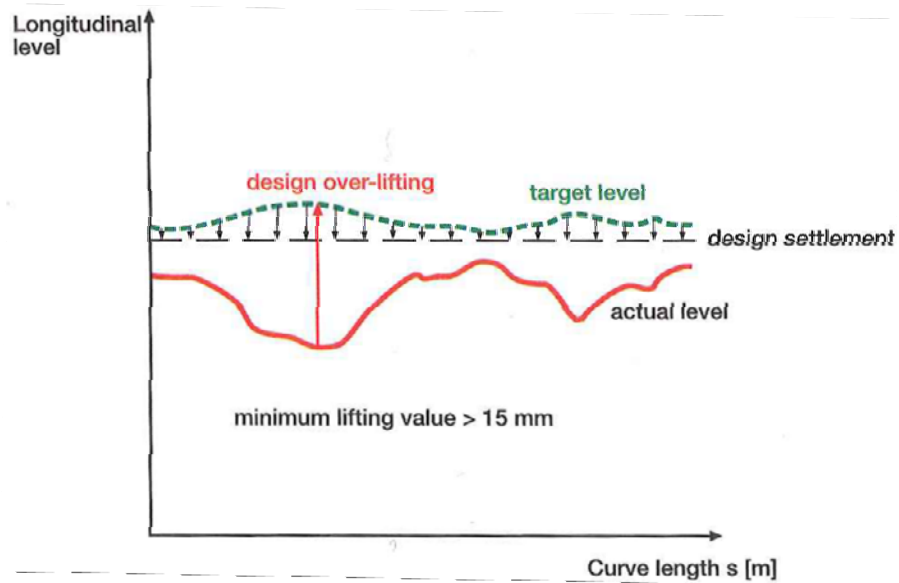
Eräs nuotitukseen ja tarkkuusmenetelmään kiinteästi liittyvä käsite on **johtokisko**. Tyypillisesti nuotitusmittaukset tehdään ainoastaan toiselle kiskolle eli johtokiskolle ja mittauksissa käytetty johtokisko kirjataan nuotitukseen. Esimerkiksi kuvassa 4.2 johtokiskona on käytetty vasenta kiskoa (JK. VASEN) kasvavien ratakilometriä suuntaan katsottuna. Suorilla johtokiskoksi valitaan alempana oleva kisko eli se kumpaa tullaan tuettaessa nostamaan enemmän. Näin ollen tukemiskone nostaa johtokiskoa nuotituksessa annetun määrän ja toista kiskoa niin, että suorilla vaadittu nollakallistus täyttyy. Kaarteissa nuotitusmittattava eli johtokisko on aina sisempi kisko. Tarkemmin kaarteissa noston johtokiskona on aina sisäkisko eli sisempää kiskoa nostetaan tavoitegeometriaan perustuvan nuotituksen mukaisesti ja ulkokiskoa nostetaan suhteessa sisäkiskoon geometrian vaatiman kallistuksen verran. Sivuttaissiirron johtokiskona kaarteissa toimii kuitenkin ulkokisko eli tukemiskoneen sivuttaissuunnan mittapyörästöt tukeutuvat kaarteissa ulkokiskoon. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaarteissa ulkokiskon vaakageometria tehdään hyväksi ja mahdolliset virheet jäävät/siirtyvät sisäkiskoon.

Maaillalla nuotituksessa otetaan ainakin jossain määrin huomioon pystysuuntaiseen geometriaan liittyvä, niin sanottu, ”radan muisti” (*ballast memory, track memory*), millä käsitetään radan geometrian nopeaa palaamista samaan virheelliseen muotoon tukemisen jälkeen kuvan 4.3 periaatteen mukaisesti. Kuvasta 4.3 havaitaan, että neljän, samalla 200 metrin rataosuudella Englannissa tehdyn, peräkkäisen tuentakerran jälkeisten mittausten perusteella ratageometrian pystysuuntaiset virheet ovat hyvin samansuuntaisia ja -suuruisia eri tuentakertojen jälkeen. [3]



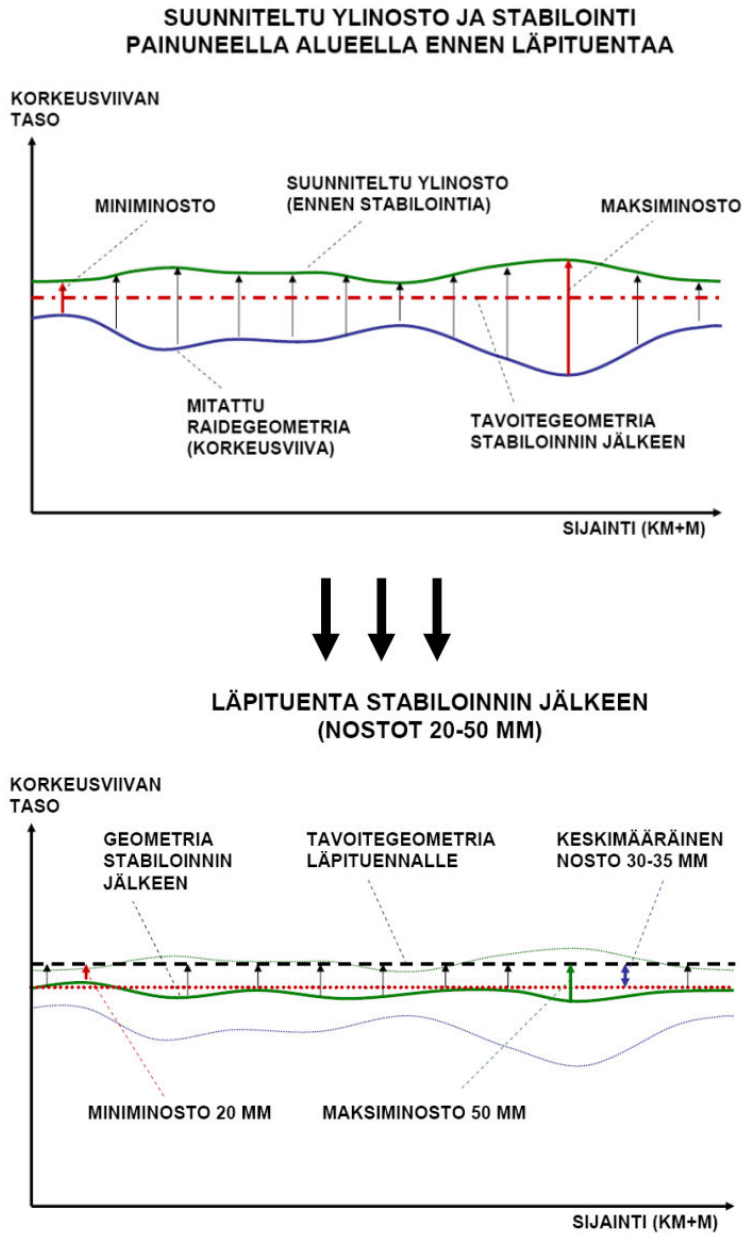
Kuva 4.3. Havainnekuva ”radan muistista” neljän perättäisen tuentakerran (ylhäällä) jälkeisen radan pystysuuntaisen geometrian profiilina (alhaalla) samalta rataosuudelta. [3]

Lichtberger [3] on esittänyt ns. ”suunnitellun ylinoston”-periaatteen, jolla radan muisti voidaan huomioida kunnossapidossa. Tässä, kuvan 4.4 mukaisessa periaatteessa, radan muistin mukaisia painumia pyritään kompensoimaan nostamalla enemmän painuneita alueita yli tavoitellun tason sillä oletuksella, että ylinostetut alueet painuvat radan muistin mukaisesti liikenteen vaikutuksesta enemmän muodostaen tasaisen geometrian.



Kuva 4.4. Periaatekuva suunnitellun ylinoston käyttämisestä kunnossapidossa. Korjaamaton geometria on esitetty punaisella, ylinostettu geometria vihreällä ja liikennöinnin aiheuttamien painumien jälkeinen lopullinen geometria mustalla katkoviivalla. [3]

Suomessa ainakin Tunninen [2] on sivunnut suunniteltua ylinostoa stabilisaattorin käytön yhteydessä. Tunnisen [2] mukaan läpituentaa suunniteltaessa enemmän painuneet alueet voidaan kuvan 4.5 mukaisesti nostaa pysyvimmin tuloksin kunnossapitotuentana ”yli” stabilointia varten, jolloin stabilisoinnin jälkeisessä läpituennassa nostot pysyvät kohtuullisina eikä raide palaudu stabilisoitaessa alkuperäiseen asemaansa. [2]



Kuva 4.5. Periaatekuva suunnitellusta ylinostosta stabilisointia varten. [2]

Haastatteluiden perusteella suunniteltu ylinosto on Suomessa jo käsitteenä melko vieras ja sitä tuskin hyödynnetään varsinkaan stabilisointiin liittymättömässä kunnossapidossa. Eräs syy tähän lienee menetelmän vaatimus radan absoluuttisen pystygeometrian ja sen kehittymisen tuntemisesta mielellään melko pitkältä aikaväliltä.

4.1.6 Tukemistyön vaatimat esityöt

Tukemistyötä suunniteltaessa on otettava huomioon onnistuneen tuennan vaatimat esityöt. Tunnisen [2] mukaan on varmistuttava, että tuennan edellytykset täyttyvät alla esitettyjen tekijöiden suhteen:

- Tukikerrosmateriaalin eli tyypillisesti raidesepelin tulee olla riittävän hyväkuntoista, jotta tuennalla voidaan aikaansaada pysyvä sepelin uudelleenjärjestyminen ja tiivistyminen ratapölkyn alle. Raidesepelin hienontumisen myötä kasvava hienoainespitoisuus ja rakeiden pienentynyt raekoko heikentävät huomattavasti tukemistyön vaikutusten pysyvyyttä. On kuitenkin huomioitava, että useissa tapauksissa raidesepelin kunnolle ei ole nopeasti tehtävissä suuria muutostoimenpiteitä ja usein joudutaan tukemaan sepeliltään heikko-kuntoista raidetta liikennöitävyyden ylläpitämiseksi.
- Tulee selvittää sijaitseeko tuettavalla alueella esteitä tuennan suorittamiselle esimerkiksi sillalla olevasta ohuesta tukikerroksesta johtuen. Lisäksi päällysrakenteesta tulee purkaa tukemistyön ajaksi esimerkiksi:
 - tasoristeysten kansirakenteet
 - akselinlaskijoihin, kuumakäynti-ilmaisimiin ja pyörävoimailmaisimiin liittyvät laitteet raiteessa
 - eristysjatkoksille mahdollisesti tehdyt painuman väliaikaiset korjaukset (levynostot) ja jatkosten yhdyskaapelin suoja-putki tai -levy.
- Ratapölkkyjen ja kiinnitysten tulee olla riittävän hyväkuntoisia ja kireällä. Lisäksi pölkkyväli ja ratapölkkyjen kohtisuoruus raiteessa tulee tarkistaa. Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteella on huomioitava tiheämpi ratapölkkyväli jatkosalueella. Useamman ratapölkyn tukemiseen tarkoitetuilla linjatukemiskoneilla tukemistyö saattaa estyä epätasaisen ratapölkkyvälin takia.
- Mahdolliset kisko- ja ratapölkkytyyppien vaihdokset tukemisalueella on selvitettävä etukäteen, sillä ne vaikuttavat tukemissyvyyden arvoon. Lisäksi kiskon kulkupinnan on oltavan riittävän hyväkuntoinen. Hyvin kulunut kisko voi joutaa virheellisiin mittaustuloksiin tuettaessa.
- Tukikerrokseen sijoitetut kaapelit tulee merkitä riittävän selkeästi. Ensisijaisesti kaapelit tulisi sijoittaa läpiviennillisiin ratapölkkyihin tai reilusti tukemissyvyyden alapuolelle hakkujen ulottumattomiin.

4.1.7 Sepelöintitarpeen arviointi

Edellisen luvun esitöiden lisäksi ennen tukemistyötä ja sen jälkeen on varmistuttava tukikerroksen poikkileikkauksen vaatimustenmukaisuudesta. Yleisesti tukikerrosmateriaalia tulee olla riittävästi tuentaa varten. Tukikerrosmateriaalin riittävyttä arvioitaessa on tarkasteltava erityisesti, että keskellä raidetta tukikerroksen pinta on ratapölkkyjen yläpinnan tasolla, ratapölkkyjen päissä on riittäväällä leveydellä sepeliä ja jatkuvakiskoraiteella on oikeinmuotoiltu sivuttaissuuntaista stabiliteettia lisäävä palle. Esitöiden suunnittelussa on arvioitava mahdollinen lisäsepelöinnin tarve huomioiden suunniteltujen nostojen suuruus ja sepelöintiä varten on varattava riittävästi sepeliä, jotta työ saadaan tehdyksi sille määritellyssä työraossa. Vaatimusten mukaisen tukikerroksen raidesepeli riittää noin 50 mm nostoon. Mikäli suunnitellut nostot ovat tätä suurempia tai tukikerros on jo valmiiksi vajaa, on sepelöinti tehtävä ennen tukemistyötä. Ennen tuentaa tehtävässä sepelöinnissä on kuitenkin huomioitava, että liiallinen sepeli ratapölkkyjen päällä hidastaa tuentaa. Lisäksi ratapölkkyjen ollessa sepelin peitossa, on tuennassa vaarana hakkujen osuminen pölkkyihin, koska tuke-

misyksikön ohjaaja ei näe pölkkyjä kunnolla. Edellistä voidaan ehkäistä ”vetämällä” tai harjaamalla esimerkiksi pölkkyjen keskikohdat esiin sepelöinnin jälkeen ennen tuentaa. [2]

Tunnisen [2] mukaan suurimman sallitun nopeuden ollessa enintään 160 km/h, sepelöinti voidaan tehdä samalla kerralla useammalle tukemisalueelle etukäteen tulevia tuentoja varten. Sepelöintitöitä voidaan tehdä myös jälkikäteen lyhyiden kunnossapitotuntojen osalta, kun samalla varmistetaan, että tukikerroksen mitat ovat riittävät myös tukemisen jälkeen. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että usein tuentojen jälkeen tukikerros on jätettävä joksikin aikaa vajaaksi erityisesti kiskojen lähetyvillä. Näin tapahtuu varsinkin vilkkailla rataosuuksilla, joilla työrajojen saaminen on hankalampaa.

Nopean, yli 160 km/h, liikenteen radoilla sepelöinti on tehtävä samassa työrajoissa tukemisen ja tukikerroksen muotoilun kanssa. Ellei tämä ole mahdollista, voidaan sepeliä lisätä tukikerroksen reunoille, josta se on nostettavissa vajaisiin kohtiin tuennan yhteydessä. Tunnelleissa sepelöinti on suositeltavaa tehdä tuennan yhteydessä samassa työrajoissa. [2]

Yleisesti tuennan jälkeen tukikerros on aina mahdollisesti täydennettävä ja muotoiltava vaatimusten mukaiseksi. Vaatimukset tukikerrokselle ja sen poikkileikkaukselle on esitetty Ratateknisten ohjeiden osassa 11 ”Radan päällysrakenne”.

4.1.8 Koneresurssien suunnittelu

Tukemistyössä tarvitaan useita erilaisia koneresursseja. Tarkoituksenmukaisimmat koneresurssit riippuvat työn laajuudesta siten, että suppeammassa kunnossapitotuennoissa voidaan toimia pienemmillä resursseilla ja laajoissa läpituenuissa on kannattavampaa käyttää suurempaan suoritteeseen pystyviä koneita ja yhdistää useita eri tehtäviä samaan työrajoon. [2]

Tukemiskoneen valinta riippuu muun muassa alla esitellyistä tekijöistä [2]. Käytännössä kaikkein soveltuvinta tukemiskonetta ei välttämättä aina ole saatavilla, vaikka koneita usein siirrelläänkin työkohteiden mukaan koko rataverkon laajuudessa.

- Rataosan päällysrakenneluokka ja kunnossapitotaso
- Päällysrakenteen komponentit ja mahdolliset erikoisrakenteet
- Tuettavan kohteen laatu: linjatuenta vai vaihteentuenta
- Tuettavan kohteen laajuus: yhden vai useamman ratapölkyn tukemiskone
- Nosto- ja sivuttaissiirtoarvot
- Raidegeometria: pienet kaarresäteet ja pystytaitteet rajoittavat suurien koneiden käyttöä
- Kustannustekijät

Varsinaisen tukemiskoneen lisäksi on suunniteltava koneresurssit esi- ja jälkitöiden toteuttamiseen. Suuri merkitys on sepelöintiyksiköiden ja tukikerroksen muotoiluun käytettävien koneiden käytön suunnittelulla. Sepelöintiyksikkönä voidaan hyvin pienissä kohteissa käyttää normaaleja maansiirtokoneita, jolloin sepeli tuodaan kohteeseen muuta reittiä kuin raidetta pitkin. Lyhyissä kunnossapitotuennoissa riittävä yhdistelmä on vetoyksikkö ja muutama sepelivaunu. Laajemmissa tuenuissa sepelivaunuja tarvitaan huomattavasti enemmän kohteen laajuudesta riippuen. Kunnossapitotuennoissa, kun ei tehdä suuria nostoja, tukikerroksen muotoiluun riittää usein sepelihaarja, joka kuuluu myös joidenkin uudempien tukemiskoneiden kalustoon. Teh-

täessä suurempia nostoja tai sepelöintiä tai työskenneltäessä suurien nopeuksien radoilla, on tukikerroksen muotoiluun käytettävä sepeliauraa. [2]

Joissain kohteissa, erityisesti uudisrakentamisessa ja perusparannuksien yhteydessä, on suunniteltava lisäksi stabilisaattoreiden (ks. luku 5.6) käyttö. Tukemiskoneiden lisänä tuennan yhteydessä käytettävää kalustoa on esitelty pintapuolisesti luvussa 5.7.

4.1.9 Työsuunnitelma ja jälkityöt

Tukemistyötä varten on laadittava työsuunnitelma, joka sisältää alla luetellut tiedot. Samassa työsuunnitelmassa voidaan esittää yhdessä useampia tuentakohteita, jos ne tehdään samoilla koneresursseilla. Läpituenta edellyttää huomattavasti esimerkiksi kiireellistä kunnossapitotuentaa perusteellisemmän suunnitelman. Osaltaan työsuunnitelma mahdollistaa tukemistyön laadun arvioinnin jälkeensä. [2]

- Työstä vastaavat henkilöt ja yhteystiedot
- Tukemisen syy
- Radantarkastusvaunun tulostuloste tuettavalta alueelta
- Aloitus- ja lopetuspisteet tukemialueelle tai -alueille
- Radan kunnossapitotaso, nopeustaso ja mahdolliset nopeusrajoitukset
- Suunniteltu toteutusajankohta ja ratatyövaraukset
- Tukemiskone ja muut koneresurssit
- Tarvittavat esityöt
- Sepelöintitarve kohteittain ja sepelöinnin ajoitus
- Toimintaperiaatteet geometrian pakkopisteiden kohdalla
- Työskentelyn lämpötilarajoitukset, kiskon neutralointitarve tai neutraali-lämpötilan tarkistus
- Tarvittaessa muutokset ajolankaan sähköradalla
- Nuotitus

Tuentaa suunniteltaessa on varattava riittävät resurssit myös jälkitöille, joilla rata saatetaan lopullisesti liikennöitävään ja vaatimukset täyttävään kuntoon. Tyypillisiä jälkitöiden tehtäviä ovat edellä esitellyn lisäksi esimerkiksi tuentaa varten purettujen laitteiden ja rakenteiden asentaminen paikalleen ja raiteen komponenttien kunnan tarkastaminen. [2]

4.2 Vaihteen tukemisen erityispiirteet

Kenties eniten erityishuomiota ja -osaamista vaativa raidegeometrian kunnossapidon osa-alue on vaihteiden tuenta, mikä on johtanut myös erityisten vaihteentukemiskoneiden kehittämiseen (ks. luku 5.5). Suomen rataverkolla käytettäviä vaihteita ja niiden osia ja ominaisuuksia on esitelty kattavasti Ratateknisten ohjeiden osassa 4 ”Vaihteet”.

Seuraavassa on lueteltu joitain vaihteiden tuennassa huomioitavia tekijöitä: [2], [6], [68]

- Vaihdetta tuetaan niin monta kertaa, että tavoiteltu geometria saavutetaan. Vaihteen tukeminen vaihteen rakentamisen tai osien vaihtamisen jälkeen lopulliseen geometriaan vaatii yleensä 2–3 tuentakertaa ja tätä useampia tuentakertoja tulisi pyrkiä välttämään. Ensimmäisen tuentakerran jälkeen vaihtee-

seen asetetaan enintään 50 km/h nopeusrajoitus, joka voidaan toisen tuentakerran jälkeen nostaa 80–100 km/h edellyttäen, että raiteen geometrinen asema on oikea ja geometrian pysyvyys voidaan taata. Tukemisajankohdat määräytyvät liikennemäärien ja työn lopetusajankohdan mukaan.

- Jos vaihteen kunnossapitotaso on 1A tai 1AA, vaihteen suoran raiteen tuennassa on käytettävä tarkkuusmenetelmää tai muuta menetelmää, jolla päästään vähintään samaan laatuun. Vaihteen kunnossapitotasona käytetään siihen liittyvien raiteiden kunnossapitotasoa.
- 1:9-vaihteiden tuennassa on huomioitava risteyksen siipikiskojen 4–5 mm ylikorotus, jonka vuoksi siipikiskot ovat normaalin kulkupinnan yläpuolella. Jos tämä jätetään huomioimatta, vaihde saattaa kallistua ja vaihdepölkkyt taipua risteyksen kohdalla. Risteysten ylikorotus on merkitty risteyspiirustuksiin.
- 1:26-vaihteessa kääntölaitteiden käyttö- ja tarkistustangot on irrotettava kahden ensimmäisen tuentakerran ajaksi. Nämä vaihteet on ehdottomasti tuettava risteysalueen tuentaan kykenevällä vaihteentukemiskoneella ja stabiloitava stabilisaattorilla. Yleisemminkin vaihteen tuennassa on käytettävä nimenomaan vaihteen tukemiseen tarkoitettuja tukemiskoneita.
- Vaihteentukemiskoneen noston tulee olla 20...50 mm. Mikäli nostoa on enemmän, vähennetään sitä tasaisesti koko tuettavalla vaihdealueella. Mikäli nostojen suuruus vaihtelee yli 40 mm, on nosto tehtävä kahdessa osassa siten, että ensin tuetaan eniten painuneet alueet ja sen jälkeen koko vaihdealue.

Ennen vaihteen tuentaa on muun muassa:

- selvitettävä kauttaaltaan vaihteen nykyinen kunto. Erityisesti on selvitettävä onko vaihdetta kiilattu esimerkiksi risteysalueella taipuneiden vaihdepölkkyjen johdosta.
- tarkastettava kiskon kiinnitykset vaihteen alueella
- varmistettava ratapölkkyjen olevan oikein suunnattuja ja oikealla ratapölkkyjaolla
- poistettava mahdolliset lämpöeristys-elementit
- varmistettava oikea tukemisjärjestys ja johtokisko
- takajatkosalueella vastakkain olevien lyhyiden pölkkyjen päiden välinen alue avattava poistamalla sepeli. Lisäksi päiden väliin voidaan asentaa esimerkiksi solumuovi estämään raidesepelin pääsy pölkkyjen väliin.
- vaihde tarkastettava ja tarvittaessa hitsauskunnostettava hitsausmestarin toimesta
- varmistettava, että vaihteeseen liittyvissä turvalaite- ja sähkökaapeleissa on riittävästi varoja nostoja ja sivusiirtoja varten.

Tuennan yhteydessä on huolehdittava, että vaihteen suora raide tuetaan ensiksi ja poikkeava raide sen jälkeen. Lisäksi on kulloinkin varmistuttava takajatkosalueen kolmannen kiskon riittävästä nostosta. Ellei tukemiskoneessa ole käytettävissä kolmannen kiskon nostolaitetta, on käytettävä kolmannen kiskon noston tekevää työryhmää. Vaihde tulee aina tukea kerralla valmiiksi. [2]

Tukemistyön jälkeen muun muassa:

- tuetaan tarvittaessa käsikäyttöisellä tukemiskoneella kääntölaitepölkkyt ja riistysalue
- asennetaan puretut elementit takaisin
- vaihdealue lisäsepelöidään tarvittaessa ja poistetaan ylimääräinen raidesepeleli harjakoneella. Vaihdepölkkyjen päälle ei saa jäädä sepeliä ja erityisesti on kiinnitettävä huomiota rullalaakereiden, kielien ja tukikiskojen välien, risteyksen sekä vastakiskosovitusten puhtauteen. Vaihdetta ei saa kääntää ennen puhdistusta.
- sepelistä puhdistettu vaihde pestään ja rasvataan huolellisesti
- tarkastetaan vaihteen toiminta ja säätöjen oikeellisuus ennen luovutusta liikenteelle

Keskusteluissa nousee usein esiin vaihteiden tukemisen vaikeus. Välillä kuulee sanottavan, että ”vaihteita ei voi tukea hyvin” tai ”vaihteita ei osata tukea” hieman puhujan taustasta riippuen. Selvää on, että vaihteen tukeminen on huomattavasti haastavampaa kuin linjaosuuksien tukeminen. Tämä johtuu ennen kaikkea kahdesta tekijästä, vaihteen haasteellisesta geometriasta poikkeavine raiteineen ja muutamista piste-mäisistä vaikeasti tuettavista kohdista vaihteessa.

Edellä ensin mainittu vaihteen geometrian haasteellisuus realisoituu erityisesti raiteenvaihtopaikoilla tai ratapihoilla, joilla tyypillisesti sijaitsee kaksi tai useampia vaihteita lähemmäs niin, että yhden vaihteen tukeminen vaikuttaa myös muun tai muiden vaihteiden geometriaan. Tällöin kaikki tuennan vaikutusalueella olevat vaihteet tulisi tukea kerralla. Sama tilanne muodostuu vaihteiden sijaitessa peräkkäin lähellä toisiaan, vaikka vain toisessa vaihteessa olisi havaittu geometriavirheitä, sillä tuentaa ei voida lopettaa vaihteen keskelle. Erityisen hankalaksi tukeminen muodostuu, jos vaihde on esimerkiksi jouduttu asentamaan kaarteeseen ja siinä on kallistus. Haastatteluiden perusteella on muodostunut mielikuva, että ainakin geometrisesta näkökulmasta vaihteiden onnistunut tukeminen on mahdollista, kunhan käytettävissä on oikeanlainen tukemiskone sekä osaava miehistö ja ennen kaikkea osaava mittausryhmä, jolla on kokemusta vaihteiden nuotittamisesta. Vaihteiden tuennassa tulisi aina käyttää tarkkuusmenetelmää. UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaassa [45] on esitetty esimerkki (kuva 4.6) Isossa-Britanniassa pitkien vaihdepölkkyjen kohdalla käytettävästä ”tandemuennasta” (*tandem tamping*), jollaista ei ainakaan raportin tekijän tietojen mukaan ole kokeiltu Suomessa.



Kuva 4.6. Vierekkäisten vaihteiden tandemtuentaa Isossa-Britanniassa. [45]

Toinen merkittävä vaihteiden tukemisen haaste johtuu muutamien pistemäisten kohteiden hankalasta tuettavuudesta. Näitä pisteitä ovat risteysalue ja vaihteen toiminnan kannalta välttämättömien kääntölaitteiden ja kääntöavustinten kohdat. Risteysalueella tukemisen hankaluus johtuu risteuksen leveydestä, jolloin tukemishakut eivät edes vaihteentukemiskonetta käytettäessä pääse kunnolla tiivistämään sepeliä suoraan risteuksen alle. Tämä ongelma korostuu risteuksen leveyden kasvaessa. Kääntölaitteiden kohdalla ongelma liittyy laitteiden käyttö- ja tarkistustankojen sijaintiin kahden vaihdepölkyn välissä, jolloin tukemishakkuja ei voida tuettaessa työntää kyseisten pölkkyjen väliin ja pölkkyt joudutaan tukemaan toispuoleisesti vain toiselta puolelta. Muutenkin jäykkyydeltään ympäröivästä raideosuudesta poikkeavassa vaihteessa edellä mainitut risteuksen ja kääntölaitteiden kohdat kielen kärjen lisäksi aiheuttavat vaihdealueen sisäisen jäykkyyden epäjatkuvuuskohdan, jossa dynaaminen kuormituslisä on merkittävä. Näiden epäjatkuvuuskohtien ollessa vielä mahdollisesti heikosti tuettuja tukemisen hankaluudesta johtuen on radan komponenttien ja tukikerrosmateriaalin kulumisen näissä pisteissä huomattavaa. Tämä johtanee nopeasti virheiden ilmaantumiseen radantarkastusajoissa, jolloin vaihde tai jopa useampia vaihteita on tuettava koko alueeltaan yksittäisen virheen takia. Tämä taas johtaa tukikerrosmateriaalin hieman turhaan kulumiseen ja hienonemiseen kauttaaltaan koko vaihdealueella ”ylimääräisen” tukemisen takia. Edellä mainittuun viitaten näiden vaihteen kohtien tukemiseen tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Näitä hankalia pisteitä yritetäänkin usein tukea kuvan 4.7 kaltaisilla käsikäyttöisillä tukemiskoneilla, mutta ilmeisesti hyvin vaihtelevin tuloksin.



Kuva 4.7. Käsikäyttöinen tukemiskone (Robel).

Täysin selvää ei ole, nostetaanko nykykäytännössä raidetta ylös aina käsintuennan aikana ja jos nostetaan, niin kuinka noston suuruutta seurataan. Joka tapauksessa varsinkin pölkyn alle suuntautuvan puristusvoiman tuottaminen on käsikäyttöisillä koneilla hankalaa. Eräs kokeilussa oleva menetelmä kääntölaitteepölkkyihin liittyvien tuentaongelmien ratkaisussa on kääntölaitteiden tankojen sijoittaminen onttoon vaihdepölkkyyn, jolloin kyseisen pölkyn molemminpuolinen tukeminen lienee mahdollista.

5 Tukemistyöhön liittyvä kalusto

Aina 1940-luvulle asti ratoja kunnossapidettiin maailmanlaajuisesti miestyövoiman ja käsikäyttöisten työkalujen avulla. Tällaisesta työryhmästä käytettiin Suomessa yleisesti nimitystä topparoiikka, jota kuulee vielä nykyäänkin liitettävän tukemistyöhön. Toisen maailmansodan jälkeen radat olivat yleisesti heikkokuntoisia, mikä osaltaan voimisti ratatyökoneiden kehittämistavoitteita ja ensimmäinen omalla konevoimalla liikkuva tukemiskone Matisa Standard rakennettiin 1945. Kehitys oli kuitenkin verrattain hidasta ja ensimmäinen hydraulisoitu raiteentukemiskone VKR 01 rakennettiin vasta 1955 ja vuonna 1957 saatiin käyttöön tukemistoiminnoiltaan täysautomaattisia koneita. Vielä 1960-luvulla tullessa suuri osa tukemistyöstä, varsinkin soratukikerroksellisilla radoilla, tehtiin käsin tukehakkuja käyttäen. Tukemiskoneet kehittyivät vuosi vuodelta ja vuoteen 1965 tullessa tukemiskoneissa oli jo pitkittäisvaaituslaitteisto, sivuttaisoikaisulaitteet ja nuolikorkeuspiirturit (Plasser & Theurer VKR 04) sekä joissain koneissa mahdollisuus kahden ratapölkyn samanaikaiseen tukemiseen (Duomatic). Tukemiskaluston kehittymistä Suomen rataverkolla esitellään tarkemmin myöhemmin tässä luvussa. [20], [21]

Nykyisin tukemiskoneet lajitellaan linjatukemis- ja vaihteentukemiskoneisiin, joiden väliset erot liittyvät pääasiassa koneiden tukemisyksiköihin sekä vaihteentukemiskoneiden mahdollisuuteen nostaa kiskoja useammasta kuin kahdesta pisteestä. Yleisesti raiteen tukemisessa käytetyn kaluston tyypillinen elinkaari on Tunnisen [2] mukaan 12–15 vuotta, mutta erityisesti uudempaa 1980- ja 1990-luvuilla hankittua tukemiskalustoa on Suomessa käytetty huomattavasti tätä pidempäänkin. Vanhemman konekannan käyttöä rajoittaa erityisesti niiden rajoittunut nostovoima verrattuna nykyaikaiseen raskaaseen betonipölkkyraiteeseen. Laitteiston kehityksestä ja ikäntymisestä johtuen eri aikoina hankittujen koneiden suorituskyky ja ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi.

5.1 Nykyaikainen tukemiskone yleisesti

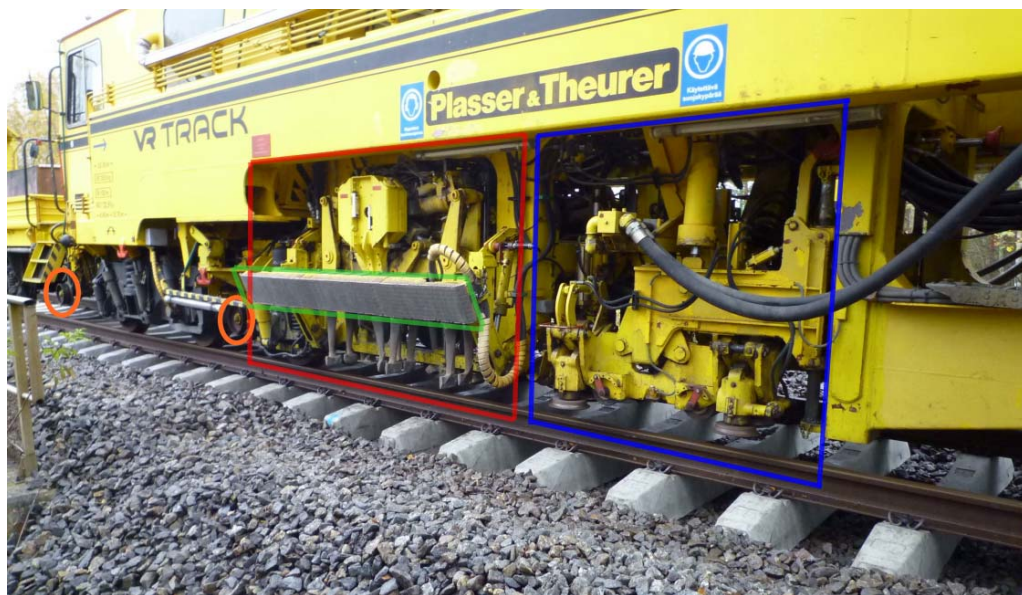
Tässä luvussa esitellään nykyaikaisen tukemiskoneen tärkeimmät osat yleisesti. Kuvassa 5.1 on esitetty VR Track Oy:n omistama Plasser & Theurerin valmistama tukemiskone 09-32 CSM. Koneen tunnuksessa 09 kuvaa sarjatunnusta ja 32 kertoo tukemishakkujen määrän eli kyseessä on kahden ratapölkyn tukemiskone. Kirjaimet CSM kertovat koneen tukemisyksikön olevan satelliittitoiminen (ks. luku 5.4).



Kuva 5.1. Yleiskuva Plasser & Theurerin 09-32 CSM tukemiskoneesta ja sen keskeisimmistä osista. Koneen työskentelysuunta kuvassa vasemmalle.

Kuvassa 5.1 on ympyröity vihreällä tukemiskoneen hytit. Vasemmanpuoleisessa hytissä tukemiskoneen esimies syöttää nosto- ja sivuttaissiirtoarvot tukemiskoneelle ohjaustietokoneen avulla sekä seuraa tukemistyön jälkeä mittaristojen ja työpiirturin avulla.

Oikeanpuoleisessa operaattorin hytissä tehdään varsinainen tukemistyö eli hallitaan tukemiskoneen liikumista tuettaessa ja tukemisyksikköä sekä yksityiskohtaisempia tukemisparametreja, kuten tukemispainetta, -syvyyttä ja puristusaikaa. Koneen työskentelysuunta on kuvassa oikealta vasemmalle. Punaisilla nuolilla on havainnollistettu tukemistyömenetelmien esittelyn yhteydessä mainittujen mittapyörästäjien sijainti. Sinisellä viivalla rajattu satelliittitoiminen tukemisyksikkö on esitetty tarkemmin kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Tukemiskoneen 09-32 CSM satelliittitoiminen tukemisyksikkö. Koneen työskentelysuunta on kuvassa oikealle.

Kuvassa 5.2 on rajattu sinisellä viivalla raiteen nostoon ja sivuttaissiirtoon eli rekaukseen käytettävä laitteisto, niin sanottu ”rullakelkka”, jolla raide siirretään haluttuun geometriseen asentoon ennen hakkujen tunkeutumista tukikerrokseen. Raiteeseen tartutaan laitteistossa alimmaisena näkyvillä kiekkoilla kiskon hamaran alapuolelta. Kiekkoja on hieman tukemiskoneesta riippuen tyypillisesti joko kaksi tai neljä yhtä kiskoa kohden eli yhtä kiskoa nostetaan joko yhdestä tai kahdesta pisteestä. Vaihtoehtoisesti joissain tukemiskoneissa käytetään kiekkojen sijaan eräänlaisia koukkuja/pihtejä. Tukemiseen tarvittavan värähtelyn ja puristuksen tuottavat tukemisaggregaatit sekä tukemishakut on rajattu kuvassa 5.2 punaisella. Kuten edellä mainittiin, tässä nimenomaisessa kahden ratapölkyn tukemiskonetyypissä on yhteensä 32 tukemishakua, jotka on sijoitettu neljään kahdeksan hakun ”ryhmään” kummankin kiskon viereen. Tukemishakkujen yläpuolella on rajattu vihreällä värillä reuna-tiivistäjä, jolla voidaan tiivistää tukikerrosta ratapölkkyjen päiden alueelta ja lisäksi oranssilla värillä jo kuvassa 5.1 esitellyt mittapyörästäjät. Oranssilla korostettujen lisäksi yksi mittapyörästäjä sisältyy rullakelkkaan työpisteessä.

Tyypillisesti tukemiskoneen miehistö koostuu kolmesta jäsenestä. Koneen esimies, joka omaa usein pisimmän kokemuksen, toimii koneen etuhytissä syöttäen esimerkiksi nuotituksen mukaiset arvot tukemiskoneelle ja valvoen työn jälkeä. Toinen henkilö tekee varsinaisen tukemistyön taaimmaisessa hytissä ohjaten tukemishakkujen toimintaa, joitain tukemisparametreja ja koneen liikkumista tuettaessa. Kolmas henkilö toimii usein koneen ulkopuolella tarkistaen ja merkatien koneen etupuolella esimerkiksi mahdollisten kaapelikourujen sijainnit. Tukemiskoneen ollessa varustettu harjakoneella, kolmas henkilö on useimmiten sen käyttäjä.

5.2 Tukemiskoneiden ohjaustietokoneet

Tukemiskoneiden ohjaustietokoneilla ja niihin liittyvillä järjestelmillä tarkoitetaan tässä raportissa tietokoneita ja muita laitteita, joilla mitatut ja halutut geometriatiedot ilmoitetaan tukemiskoneella sivuttaissiirtoja sekä nostoja varten ja joiden avulla voidaan seurata tukemistyön edistymistä. Luvussa 5.3 esitellyt tukemiskoneiden mittausjärjestelmät (NEMO ym.) toimivat kiinteässä yhteistyössä nyt esiteltävien ohjaustietokoneiden kanssa. Nykyaikaisissa tukemiskoneissa ohjaustietokoneen käyttöpaate sijaitsee tyypillisesti koneen työskentelysuunnassa etummaisessa hytissä (ks. kuva 5.1).

Vuoteen 1975 asti tukemistyössä käytettiin maailmanlaajuisesti apuna, sekä nostoissa että sivuttaissiirroissa, erilaisia konetyyppikohtaisia korjaustaulukoita ja -manuaaleja, joiden ohessa vaadittiin myös käsityönä tehtyä hienosäätöä. Käsityötä vaativat erityisesti siirtymäkaarien osuudet, sillä geometrian korjaamiseen liittyvä teoria perustuu suoriin ja ympyränkaariin kuten jo aiemmin tässä raportissa on käynyt ilmi. Vielä 1970- ja 1980-luvullakin tukemiskoneiden mittakantaa pyrittiin yleisesti pidentämään erilaisten lisävarsien ja -vaunujen avulla, jotka lisäsivät työmäärää. Digitaalitekniikan ensimmäiset hyödyntämiskokeilut tehtiin vuonna 1973 IPC:n parissa (*input calculator*), jota seurasivat DLT- ja DRIVER-järjestelmät (*DRIVING by External Reference*). Näiden ohessa kehitettiin ohjainyksiköitä erityisesti siirtymäkaarien geometrian ohjauksen näkökulmasta, joita olivat RVA sivuttaissiirrolle, ÜVA kallistukselle ja vuonna 1984 ilmestynyt GVA, jossa edelliset oli yhdistetty. [13] Edellä esitellyt järjestelmät lienevät Plasser & Theurerin kehittämiä. Matisan järjestelmien kehityksestä ei ollut saatavilla lähdekirjallisuutta.

Nykyään Plasser & Theurerin valmistamissa tukemiskoneissa on käytössä WIN-ALC-ohjaustietokone, joka nimensä mukaisesti käyttää Microsoft Windows-käyttöjärjestelmää. Aiemmin kyseinen järjestelmä toimi DOS-pohjaisena nimellä ALC, joka julkaistiin 1989. Esimerkkikuva etummaisessa hytissä sijaitsevasta ohjaustietokoneen käyttöpaatteesta on esitetty kuvassa 5.3. Kuvassa näkyvät kolme punavalkoista mittaristoa ovat vasemmalta oikealle sivuttaissiirron, noston ja työpiirturin mittarit. Mittaristojen punaisten alueiden väli tarkoittaa käytännössä 3 mm vaihteluväliä luonnossa.



Kuva 5.3. Esimerkkikuva Plasser & Theurerin tukemiskoneiden ohjaustietokoneen käyttöpaneelista. [71]

Ohjaustietokoneen tärkeimpänä tehtävänä on antaa tukemiskoneen miehistölle mahdollisuus seurata tukemisen edistymistä, hallita työn jälkeä ja tukemisparametreja ja puuttua ongelmiin nopeasti. Ohjaustietokoneita tarvitaan aina tukemiskoneella työskennellessä, sillä siihen syötetään geometriatiedot, kuten esimerkiksi siirtymäkaarien pituudet, kaarresäteet ja kallistusviisteet, ohjaustietokoneelle joko käsin tai ne voidaan siirtää ohjaukoneelle myös levykkeellä. Suomen rataverkolla toimivissa uudemmissa tukemiskoneissa geometriatiedot on yleensä tallennettu valmiiksi ohjaustietokoneelle. Ohjaustietokoneen tehtävät vaihtelevat jonkin verran käytettävästä tukemistyömenetelmästä riippuen. Tarkkuusmenetelmää käytettäessä geometriatiedoilla varustetulle ohjaustietokoneelle annetaan nosto- ja sivuttaissiirtoarvot sekä lähtöpiste, jolloin kone varmistaa oikeiden arvojen toteutumisen oikeissa kohdissa ja tallentaa toteutuneet arvot työnjäljenpiirturilla. Suhteellista menetelmää käytettäessä ohjaustietokone välittää tukemiskoneen mittausjärjestelmien antamia tietoja edelleen toteutettavaksi työpisteessä, kertoo tuettavan alueen geometriatiedot ja tallentaa toteutuneet arvot piirturilla. Molemmissa tapauksissa ohjaustietokone huolehtii korjausarvojen syöttämisestä niitä vaativissa kohdissa.

Matisan valmistamien tukemiskoneiden nykyinen ohjaustietokonejärjestelmä on vuodesta 2004 alkaen ollut linux-pohjainen CATT (*Computer Aided Track Treatment*). Kyseisestä ohjaustietokoneesta ja sen perustoiminnasta ei ollut saatavilla lähdekirjallisuutta. CATT-järjestelmään on lisäohjelmista saatavissa MIRIS-ohjelmisto (*Matisa Intelligent Railtrack Improvement System*), jonka Matisan brosyyrissä [39] kerrotaan parantavan tukemistyön tarkkuutta ja laatua verrattuna pelkän CATT:n käyttöön.

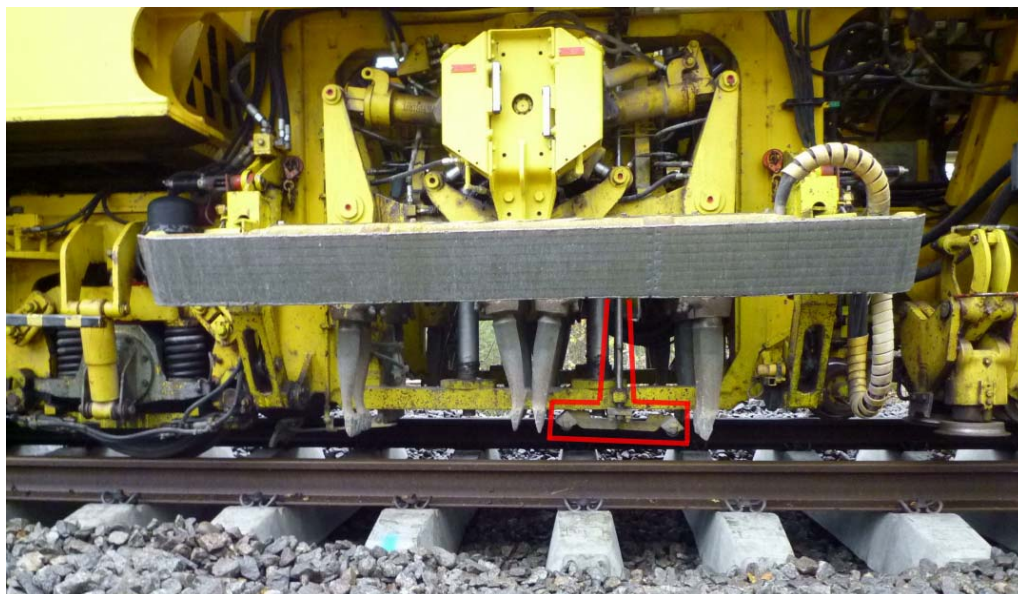
Sekä Plasser & Theurerin että Matisan ohjausjärjestelmät mahdollistavat tukemiskoneella tehtävään mittausajoon perustuvan työmenetelmän käytön Matisan MIRIS-järjestelmän jopa vaatiessa kyseisen mittausajon. Mittausajoon perustuva tukeminen voitaneen työmenetelmänä sijoittaa johonkin suhteellisen ja tarkkuusmenetelmän välimaastoon. Mittausajolla pyritään ennen kaikkea parantamaan sivuttaissiirto- ja nostoarvojen tarkkuutta suhteellisen menetelmän käyttöön verrattuna. Lisäksi tavoitteena on erilaisin järjestelmiin sisällytetyin siirtofunktiot huomioivin algoritmein parantaa tukemiskoneen kykyä korjata virheitä myös tyypillisesti tukemiskoneille hankalilta aallonpituusalueilta. Esimerkiksi MIRIS-järjestelmän etuna mainitaan sen

kykenevän korjaamaan virheitä 3...150 metrin aallonpituusalueella [39]. Kyseiset algoritmit ja niiden käytön vaikutukset tai todellinen teho ovat liikesalaisuuksia, joiden tietoja ei pyynnöistä huolimatta luovutettu tätä raporttia varten. On kuitenkin todennäköistä, että varsinkin lyhyen aallonpituuden virheet saattavat algoritmien käytöstä huolimatta tai jopa sen takia kertautua suuremmiksi. Pitkien aallonpituuksien virheiden korjaantumisesta ei saavutettu tarkempaa tietoa tämän raportin yhteydessä. Haastatteluiden perusteella edellä esitetyn kaltainen työmenetelmä ennen tukemista tehtävine mittausajoneen on varsin vähän käytetty Suomen rataverkolla johtuen kenties mittausajon viemästä ajasta ja menetelmän hyötyjen realisoitumisen epävarmuudesta. Haastatteluiden perusteella muutamissa maissa on tukemiskoneiden ohjaustietokoneisiin kehitetty myös omia lisäohjelmistoja omine algoritmeineen.

5.3 Tukemiskoneiden mittausjärjestelmät

Tukemiskoneiden mittausjärjestelmiä käsiteltiin jo tukemistyömenetelmien yhteydessä luvussa 3.4. Siinä missä aiemmassa esittelyssä tarkasteltiin mittausjärjestelmiä niiden toimintaperiaatteiden tasolla, tässä luvussa perehdytään hieman syvemmin varsinaisiin fyysisiin mittausjärjestelmän osiin sekä niiden sijaintiin ja toimintaan tukemiskoneessa.

Sekä sivuttaissiirron että nostojen suuruuden mittaaminen perustuu tukemiskoneen kiskoja vasten painettujen mittapyörästäjien muodostamaan mittakantaan. Mittapyörästäjien sijainnin mittaamiseen käytetyt mittausjärjestelyt ovat toisistaan poikkeavia eri valmistajien välillä, mutta mittauksen tuloksena selvitettävät suureet ovat samoja. Plasser & Theurerin tukemiskoneissa mittapyörästäjien sijaintia seurataan niiden välille pingotettuihin mittalangoiksi kutsuttuihin vaijereihin perustuvalla järjestelmällä. Kaaviokuva tästä järjestelmästä havainnollistettiin jo aiemmin kuvassa 3.29. Kuvassa 5.4 on esitetty Plasser & Theurerin 09-32 CSM -tukemiskoneen tukemisaggregaatti ja -hakut tarkemmin. Kuvassa on korostettu punaisella värillä tuettaessa raitteen noston seuraamiseen käytetyn työvaa'an alaosa, joka yläosastaan on yhteydessä tukemiskoneen läpi kulkeviin mittalankoihin. Noston suuruus mitataan siis suoraan hakujen eli työpisteen kohdalta, vaikka nosto tehdäänkin rullakelkalla hieman niiden vierestä.



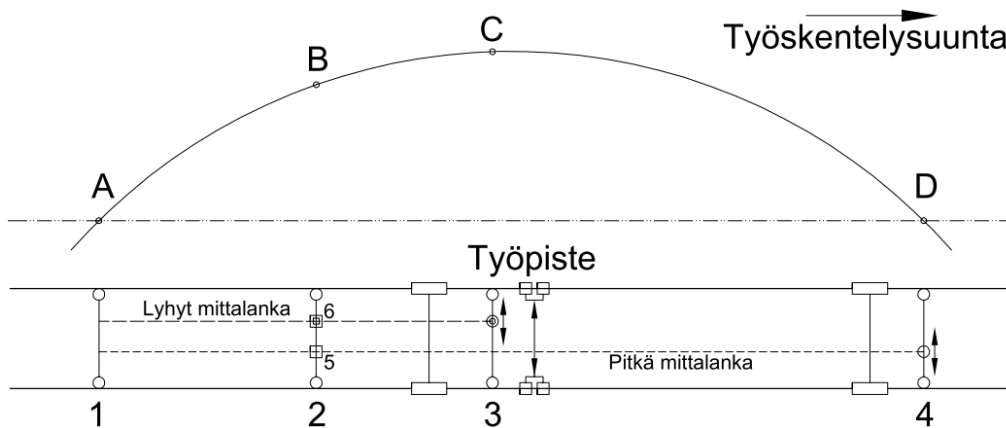
Kuva 5.4. Tukemiskoneen Plasser & Theurer 09-32 CSM tukemisaggregaatti ja -hakut sekä reunatiivistäjä. Koneen työskentelysuunta on kuvassa oikealle. Punaisella korostettu työpisteen noston mittausjärjestelmän alaosaa.

Kuvassa 5.5 on esitetty Plasser & Theurerin tukemiskoneille tyypillinen noston työvaa'an linkittyminen koneen läpi kulkeviin mittalankoihin.



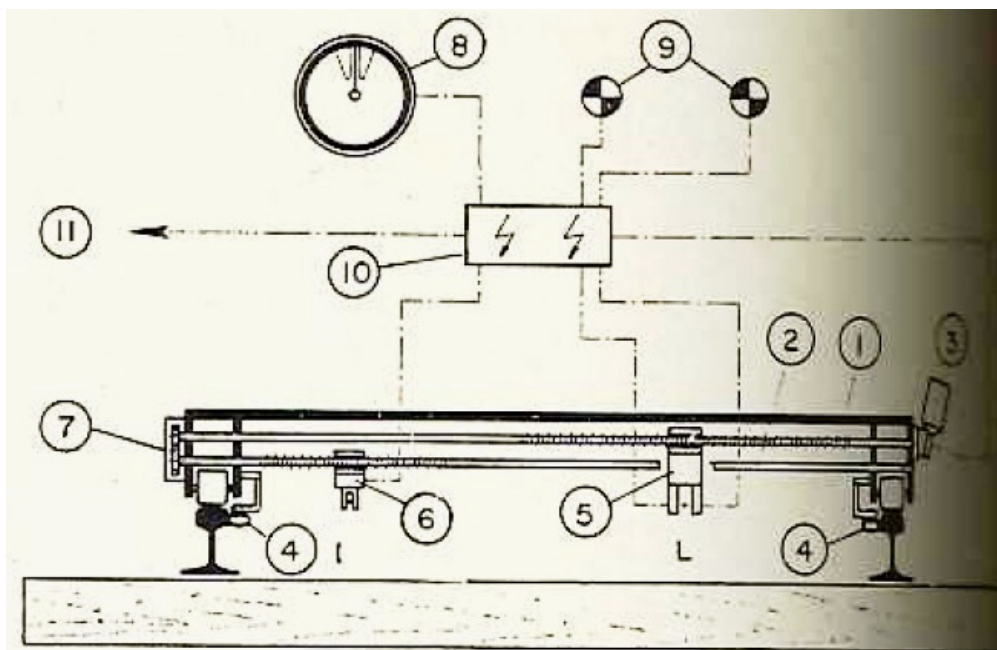
Kuva 5.5. Tukemiskoneen 09-32 CSM nostojärjestelmän työvaa'an linkittyminen koneen läpi kulkeviin mittalankoihin. Järjestely on samanlainen molemmin puolin tukemiskonetta.

Plasser & Theurerin tukemiskoneiden sivuttaissiirron mittausperiaatetta kutsutaan kahden langan menetelmäksi, sillä itse asiassa mittalankoja kulkee koneen alapuolella kaksi. Näistä pidempi on RIL:n ”Rakennuskoneet” -kirjassa [72] esitellyssä neljän mittapyörästön tapauksessa pingotettu äärimmäisten mittapyörästöjen välille kuvan 5.6 mukaisesti. Lyhyempi lanka on pingotettu työpisteen läheisen mittapyörästön (3) ja taaimmaisen mittapyörästön (1) välille.



Kuva 5.6. Plasser & Theurerin tukemiskoneiden sivuttaissiirron kahden langan mittausmenetelmän periaate. Kuvan mittakaava on vain suuntaantava.

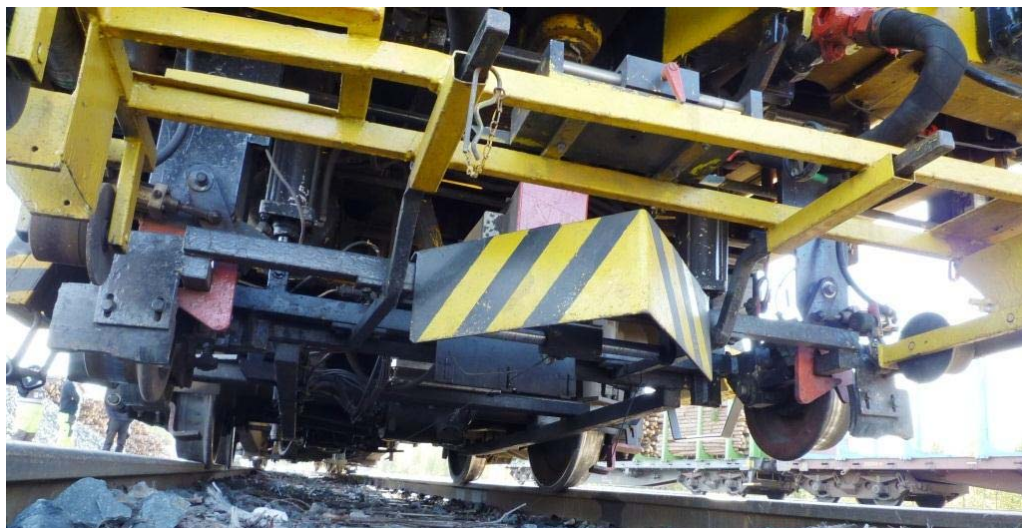
Kuvassa 5.6 esitetyn mittapyörästön 2 kohdalla sijaitsee kiskoihin nähden poikittainen kahdesta kierreosasta koostuva liikeruuvi, jonka kummassakin päässä kierteen nousu on erisuuruinen kuvan 5.7 mukaisesti. Kummassakin kierreosassa on ruuvin suunnassa liikkuva mutteri, johon suurinuousuisella osalla (1) on kiinnitetty reunoi-staan sähköä johtava hahlo (5). Pieninuousuisen ruuvin (2) mutteriin on kiinnitetty hammaspyörävaihteella varustettu potentiometri, jota kiertävän kammen päässä on hahlo (6). [72]



Kuva 5.7. Plasser & Theurerin tukemiskoneiden sivuttaissiirtolaitteen periaate. [72]

Kierreruuvien (kuvan 5.7 osat 1 ja 2) nousujen suhde on sama kuin mittalankojen muodostamien jänteiden ja ympyränkaaren välisten etäisyyksien suhde, kun mittaus tehdään kuvan 5.6 mittapyörästä 1 ja 2 välisen etäisyyden päässä toisesta päätepisteestä. Tämä suhde on riippumaton ympyränkaaren säteestä. Tukemiskoneen ollessa suoralla radalla on potentiometri keskiasennossa ja hahlojen läpi kulkevat mittalangat eivät kosketa hahloihin. Kun pitkän langan etupää siirtyy jompaankumpaan suuntaan esimerkiksi kaareen tullessa, niin lanka vastaa hahlon jompaankumpaan reunaan. Syntynyt kosketus käynnistää liikeruuvia pyörittävän sähkömoottorin (3). Moottori siirtää molempia hahloja samanaikaisesti oikeaan suuntaan kunnes kosketus pitkällä langalla katkeaa. Hahlojen siirtyessä syntyy lyhyen langan hahlon ja langan välille kosketus. Tällöin potentiometri kiertyy ruuvien siirtäessä sitä lankaan nähden, jolloin sivuttaissiirtosylinteri siirtää lyhyen langan etupäätä työpisteessä niin, että potentiometri on jälleen keskiasennossaan. Kierteiden noususuhteesta johtuen lyhyen langan etupää siirtyy tällöin kolmen muun pisteen kautta kulkevalle ympyränkaarelle. [72]

Nykyaikaisessa tukemiskoneessa mittalangat jatkuvat tyypillisesti koneen peräpäähän viidennelle mittapyörästä asti mahdollistaen esimerkiksi työnjäljenpiirturin toiminnan. Kuvassa 5.8 on esitetty esimerkki pitkän langan kiinnittämisestä Plasser & Theurerin 09-32 CSM -tukemiskoneen etupään mittapyörästä. Pitkän langan etupää on nähtävissä keltamustan ”auran” takana koneen keskellä. Esimerkki kahdesta langasta on esitetty kuvassa 5.9, joka on otettu saman tukemiskoneen neljännen mittapyörästä etupuolelta kohti koneen keulaa. Vaijerit kiristetään vasta laskettaessa mittapyörästä kiskoja vasten laitettaessa tukemiskonetta tuentakuntoon ja ne ovat siirtoajotilassa kuvien 5.8 ja 5.9 kaltaisesta löysällä.

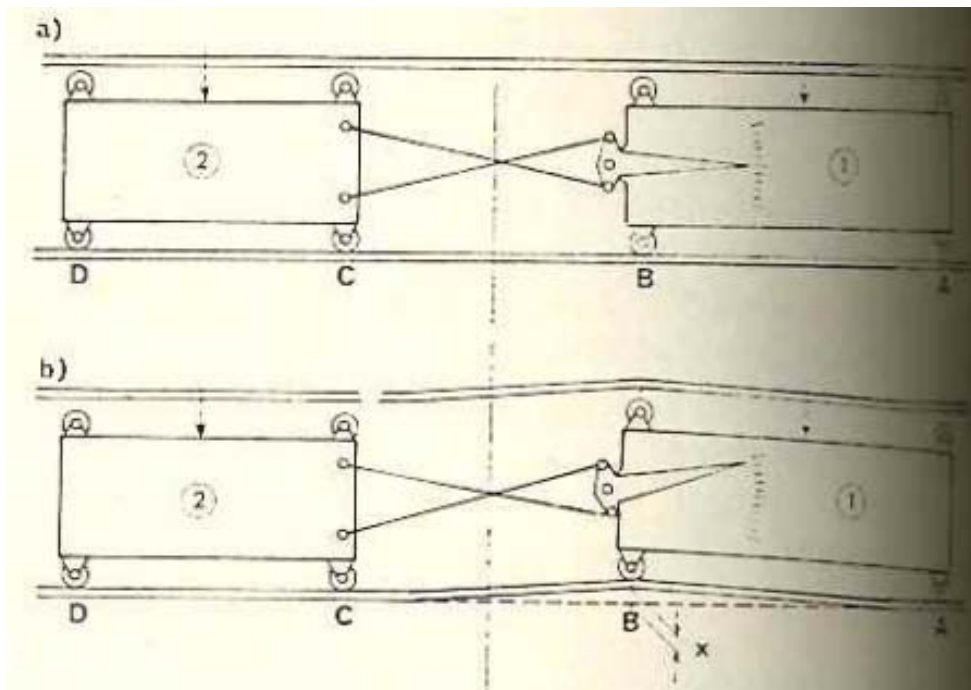


Kuva 5.8. Sivuttaissiirron mittausjärjestelmään kuuluvan pitkän mittalangan kiinnittyminen tukemiskoneen P&T 09-32 CSM etummaiseen mittapyörästä.



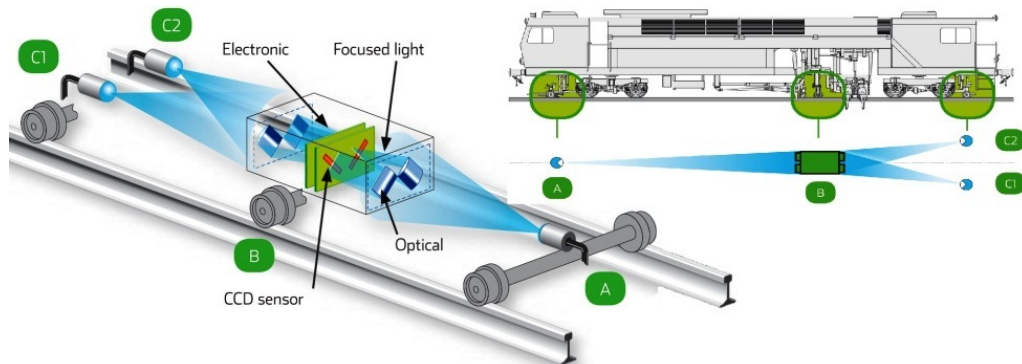
Kuva 5.9. Tukemiskoneen P&T 09-32 CSM sivuttaissiirron mittalangat koneen neljänneksen mittapyörästä etupuolelta koneen keulaa kohti kuvattuna.

Matisan sivuttaissiirron mittausperiaate poikkeaa Plasser & Theurerin vastaavasta. Entisaikaan Matisan sivuttaissiirron mittausperiaate oli kuvassa 5.10 havainnollistettu ns. kulmien vertausmenetelmän mukainen. Menetelmä koostuu kahdesta toisiinsa nähden liikkuvasta mittausrungosta, joista toinen kulkee oikaistulla ja toinen oikeaisemattomalla radalla. Rungot on yhdistetty toisiinsa risteävillä langoilla, jotka on kiinnitetty etummaisesta vaunun taka-akselin keskikohtaan asennetun pystysuoran akselin alapäähän kiinnitettyyn poikittaisen tangon molempiin päihin (tilanne a). Siten mittausrunkojen siirtyessä tai kääntyessä toisiinsa nähden, kiertävät langat akselia (tilanne b) ja kiertymisen suuruuden perusteella raiteen sivusuuntaista asentoa voidaan korjata oikea määrä. [72]



Kuva 5.10. Matisan vanhan sivuttaissiirron mittausjärjestelmän, ns. kulmien vertausmenetelmän, periaate. [72]

Nykyään Matisan koneissa erilaiset mittalangat on korvattu led-valoihin perustuvalla optisella NEMO-järjestelmällä (kuva 5.11). Järjestelmä pystyy yhteen paikka sijoituilla CCD-kennoilla (*Charge-Coupled Device*) mittaamaan sekä noston ja sivuttaissiirron että kallistuksen. [39] Järjestelmän tarkemmasta toiminnasta ei ollut saatavilla lähdekirjallisuutta.



Kuva 5.11. Matisan NEMO-järjestelmän periaate. Muokattu lähteestä [39]

5.4 Linjatukemiskoneet

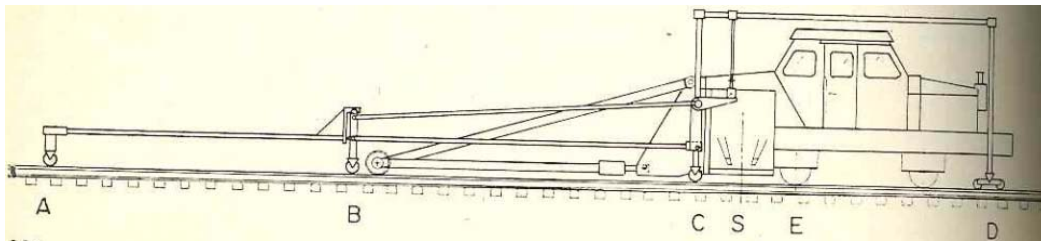
Linjatukemiskoneita käytetään nimensä mukaisesti sellaisilla rataverkon osuuksilla, joilla ei ole niiden käyttöä estäviä erikoisrakenteita, kuten vaihteita tai siltojen suojakiskoja. Linjatukemiskoneiden käyttöä mainitun kaltaisissa erikoiskohteissa rajoittaa koneen tukemishakkujen rajoitettu liikkuvuus, joka on asetettu normaalin päällysrakenteen mittojen mukaiseksi suuremman työskentelynopeuden saavuttamiseksi. [2] Nykyaikaiset linjatukemiskoneet erottaa vaihteentukemiskoneista helpohkosti siitä, että linjakoneissa taaemmassa hytissä työskentelevä operaattori työskentelee kasvot työskentelysuuntaan päin ja vaihekoneissa selkä työskentelysuuntaan päin. Lisäksi linjatukemiskoneiden kalustotunnus on yleisesti Ttk1-alkuinen.

Linjatukemiskoneet voidaan edelleen jakaa kahteen luokkaan sen mukaan onko niiden tukemisyksikkö (ks. luku 3.2.1) kiinteä vai satelliittitoiminen. Kiinteätoimisen tukemisyksikön omaavan tukemiskoneen on pysähdyttävä jokaisen tuettavan ratapölkyn/ratapölkkyjen kohdalla erikseen, kun taas uudemmissa satelliittitoimisissa tukemiskoneissa tukemisyksikkö on sijoitettu erilliseen ”satelliittiin”, joka liikkuu itsenäisesti suhteessa tukemiskoneeseen ja rataa. Näin tukemiskone voi liikkua koko ajan tasaisella nopeudella tukemissuuntaan, kun ainoastaan tukemisyksikköä siirretään tukemisväli kerrallaan eteenpäin. [2] Satelliittitoimisuuden perusidea on pienemmän massan pysäyttämisen- ja kiihdyttämistarve ja näin saavutettavia etuja ovat muun muassa suurempi työsaavutus, pienempi energiankulutus ja parempi työskentelymukavuus koneen ohjaustiloissa [13].

5.4.1 Linjatukemiskoneet Suomessa

Ensimmäiset kaksi tukemiskonetta Suomeen hankki VR 1950-luvun puolivälissä. Koneet olivat mallia Matisa Standard. Kyseinen malli soveltui ainoastaan raiteen tukemiseen ja raiteen nosto täytyi tehdä erillisillä nostokoneilla. [21] Alla on luettelonomaisesti listattu pääosin VR:n ja sen myöhempien yhtiömuotojen Suomeen 1950-luvulta lähtien 1980-luvun puoliväliin asti hankkimia linjatukemiskonetyyppejä ja niiden määriä niiltä osin kun määrät ovat tiedossa. On korostettava, että luettelo ei

todennäköisesti ole aukoton listaus Suomeen vuoteen 1985 mennessä hankituista linjatukemiskoneista ja varsinkin koneiden lukumäärät ovat paikoin epävarmoja. Yleisesti kuvaava yleispiirre kyseisen aikavälin alun tukemiskoneille oli nykyaikaisiin koneisiin verrattuna varsin rajallinen mittakannan pituus. Mittakantaa pyrittiinkin laajentamaan erilaisin vaaitusisälaittein, jollaisia olivat muun muassa ulokevarsivaaituslaite (kuva 5.12) sekä kiikari-, infrapuna- ja köysivaaituslaitteet [72]. Lisäksi on huomautettava, että tiedot koneiden käytöstäpoisto- tai romutusajankohdista ovat vain melko viitteellisiä rekisteritietoja ja koneiden säännöllinen ja epäsäännöllisempikin käyttö on saattanut loppua jo huomattavasti aikaisemmin.



Kuva 5.12. Esimerkkikuva Matisa BNRI-85 tukemiskoneeseen kiinnitetystä ulokevarsivaaituslaitteesta. [72]

- ~1955: Matisa Standard, 2 kpl. Koneen paino työkunnossa 1,5 tonnia ja suurin liikkumisnopeus siirtoajossa 30 km/h. [24]



Kuva 5.13. Maailman ensimmäinen tukemiskonetyyppi Matisa Standard. [24]

- 1958–1959: Matisa B-27, 2 tai 3 kpl. Edellisten tavoin vaativat erilliset raitteennostokoneet. Viimeinen kone poistui käytöstä vasta vuonna 1984, muut huomattavasti tätä aiemmin. [21]



Kuva 5.14. *Tukemiskone Matisa B-27 Lahden liikennepaikalla vuonna 1974. Muokattu lähteestä [30]*

- 1958, 1961–1962: Plasser & Theurer VKR 04, todennäköisesti 3 kpl. Ensimmäiset automaattiset tukemiskoneet maassamme, jotka pystyivät vaaitsemaan, tukemaan yhden ratapölkyn kerrallaan ja nostamaan raidetta. Pienen nostovaransa takia soveltuivat lähinnä viimeistelytyöhön. [21] Konetyypin työsaavutus oli noin 300 raidemetriä tunnissa [13].



Kuva 5.15. *Tukemiskone Plasser & Theurer VKR 04. [25]*

- 1962, 1964: Matisa BNR-60, todennäköisesti 2 kpl. Automaattisia tukemiskoneita, joiden vaaitusominaisuudet olivat aiempia konetyyppejä paremmat. Lisäksi oli valittavissa tuetaanko yhden ratapölkyn kohta kerran, kahdesti vai kolmesti peräkkäin. [21]
- 1966: Plasser & Theurer VKR 06-16, 1 kpl. Suurten nostokorkeuksien takia tämä ja edelliset Matisan BNR-60:t soveltuivat parhaiten perusparannustyömaille ja niiden työsaavutus oli laadusta riippuen 200 - 400 raidemetriä tunnissa. [21]

- 1965–1966: Matisa BNR-50, 2 kpl. Ensimmäiset monitoimikoneet, joilla voitiin tehdä sekä vaaitus, sivuttaisoikomien että tukeminen samanaikaisesti joko automaattisesti tai käsiohjauksella. Koneiden oikaisuvoima oli kolme tonnia, mikä teki raskaan raiteen oikomisesta hidasta. Koneet poistettiin käytöstä 1981 ja 1983. [21]
- 1972: Plasser & Theurer Mainliner-Duomatic 07-32 (kalustotunnus Ttk1 806), todennäköisesti 1 kpl. Kahden ratapölkyn tukemiskone, joka poistettiin käytöstä vuonna 1995 [33]. Koneen työsaavutus tunnissa oli jopa 800–1000 raidemetriä [13].



Kuva 5.16. Tukemiskone Plasser & Theurer MD 07-32 Kotkassa vuonna 1974. Kirjaimet MD tulevat sanoista Mainliner-Duomatic. Muokattu lähteestä [33]

- ~1974: Plasser & Theurer 07-16 Mainliner Universal, 1 kpl. Tämä kone ei vielä todennäköisesti sisältänyt automatiikkaa kahden myöhemmän samantyyppisen koneen tapaan.
- 1970-luku: Matisa BNRI-85 (kalustotunnukset Ttk1 811–812), ainakin 2 kpl.



Kuva 5.16. Tukemiskone Matisa BNRI-85 (Ttk1 812) ulokevarsivaaituslaitteineen. [21]

- ~1977: Plasser & Theurer 08-Quatromatic, 1 kpl. Tämä kone mahdollisti neljän ratapölkyn tukemisen yhdellä pysähdyksellä siten, että varsinaisessa tukemiskoneosassa oli kahden ratapölkyn tukemislaitteet ja perävaunussa kahden pölkyn tukemislaitte. Suomen rataverkon ratapölkkyjaon oltua vielä tuolloin hyvin epätasainen, ei koneen kapasiteettia voitu täysin hyödyntää ja pe-

rävaunu irrotettiin koneesta, minkä jälkeen kone toimi normaalina 32 ha-
kun kahden ratapölkyn tukemiskoneena. [21]



Kuva 5.17. Havainnekuva neljän ratapölkyn tukemiskoneesta Plasser & Theurer 08-Quatromatic. [22].

- 1981 ja 1981: Plasser & Theurer 07-16 Mainliner Universal (kalustotunnukset Ttk1 802–803), 2 kpl. Yhden ratapölkyn monitoimitukemiskoneet, joissa oli edistyneistä RVA-kaarreautomaattia verrattuna aiempiin koneisiin. Kone teki raiteen poikittais- ja/tai pitkittäisvaaituksen joko automaattisesti tai käsinohjauksella ja koneessa oli myös YVA-korjausautomaatti, jolla saatiin raidegeometrian mukainen kaltevuus siirtymäkaaren ja ympyräkaaren osalle. Lisäksi koneessa oli reunatiivistäjät ratapölkyn päiden alueelle. [21] Koneen työsaavutus oli jopa 900 raidemetriä tunnissa [22]. Tämän tyyppiset tukemiskoneet on poistettu käytöstä tai romutettu vuosina 2008–2012 [31], [32]. Myös kalustotunnuksilla Ttk1 804–805 lienevät olleet tätä konetyyppiä, mutta jonkin verran uudempia.



Kuva 5.18. Tukemiskone Plasser & Theurer 07-16 Universal Lahden liikennepaikal-
la vuonna 1998. Muokattu lähteestä [35]

- 1983: Plasser & Theurer 08-16 Unomatic (kalustotunnus Ttk1 801), todennäköisesti 1 kpl. Työsaavutus on parhaimmillaan noin 500–600 raidemetriä tunnissa. Kone sisälsi edistyneen jatkosnostimen vahingoittuneiden jatkosten suoristamiseen. Kone poistettiin käytöstä vuonna 2012 [73].



Kuva 5.19. Tukemiskone Plasser & Theurer 08-16 Unomatic Ylivieskassa vuonna 2003. Muokattu lähteestä [74]

- 1980-luvun alku: Enerco RT40 (kalustotunnukset Ttk1 817-820), todennäköisesti 4 kpl. Pieniin tuentatöihin tarkoitettu Konepaja Mankisen valmistama tukemiskonetyyppi. Konetyypin suurin sallittu nopeus hinattaessa 50 km/h ja työssä 25 km/h [73]. Nykyään kyseinen valmistaja on keskittynyt kaivinkoneisiin kiinnitettävän ja pienemmän tukemiskaluston valmistukseen. Kuvan 5.20 kone (kalustotunnus 818) on ilmeisesti edelleen museo- tai muussa käytössä, kun taas muut on poistettu rekisteristä vuonna 2008 [73].



Kuva 5.20. Tukemiskone Enerco RT40 (Ttk1 818) Huutokoskella vuonna 1996. [75]

Edellä luettelottiin Suomen rataverkolla aikojen saatossa toimineita linjatukemiskoneita, jotka ovat tähän päivään mennessä poistuneet käytöstä tai niitä ei enää ainakaan aktiivisesti käytetä. Seuraavassa esitellään nykyään Suomessa käytössä olevia puhtaita linjatukemiskoneita hieman edellisiä yksityiskohtaisemmin. Suomen rataverkolla toimivat linjatuentaankin pystyvät vaihtentukemiskoneet esitellään luvussa 5.5.1. Ehdottomasti suurin tukemiskonekanta Suomessa on nykyisellä VR Track Oy:llä ja sen omistamat koneet esitellään ensin, minkä jälkeen esitellään pienempien toimi-

joiden omistamia tukemiskoneita. Uusia tukemiskoneita hankitaan Suomeen suhteellisen harvoin niiden hankintahinnan ollessa varsin korkea, arviolta noin 3..5 miljoonaa euroa hieman konetyypistä ja varustetasosta riippuen.

Vuonna 1986 Suomeen saatiin ensimmäinen satelliittitoiminen tukemiskone, Plasser & Theurer 09-16 CSM (kalustotunnus Ttk1 821). Jo tuolloin Plasser & Theurerilla oli tarjolla myös kahden ratapölkyn 09-32 CSM -konetyyppi, mutta Suomen rataverkon ratapölkkyjaon oltua vielä tuolloin melko vaihteleva päädyttiin yhden ratapölkyn tukemiskoneeseen. Kyseinen tukemiskone oli ensimmäinen, jossa kokeiltiin suomalaisen kehittämää kaarilaser-työskentelyohjausta. [21]



Kuva 5.21. Tukemiskone Plasser & Theurer 09-16 CSM (Ttk1 830) liikennepaikkavälillä Murtomäki–Talvivaara syksyllä 2008. Muokattu lähteestä [36]

Edeltäjiinsä verrattuna 09-16 CSM -tyypin tukemiskone oli huomattavasti tehokkaampi ja parhaimmillaan sen työsuoritus on 1200 raidemetriä tunnissa. Myös työturvallisuus ja -mukavuus ovat varsin kehittyneitä esimerkiksi melusuojauksen osalta ja kone sisälsi lisäksi reunatiivistäjät ratapölkkyjen päiden alueelle. Konetyypille sallitaan 80 km/h siirtoajonopeus. Lisäksi koneen työskentelyvalmiuteen saattaminen on varsin nopeaa. [21] Kyseisen koneen rekisteröinti päättyi vuonna 2011. Tämän tyypin tukemiskoneita on Suomessa vuonna 1986 tulleen koneen lisäksi ainakin yksi vuonna 1995 hankittu kone (Ttk1 830) [36], joka on edelleen käytössä [73]. Ainakin jälkimmäisenä hankittu 830-kone on varustettu sekä nosto- että sivuttaissiirtolaserin käytömahdollisuudella.

Ensimmäinen Plasser & Theurerin 09-32 CSM -tyypin kahden ratapölkyn satelliittitoiminen tukemiskone (Ttk1 823) hankittiin Suomeen vuonna 1992 VR:n toimesta. Kyseinen tukemiskone oli ensimmäisenä Suomessa varustettu ALC-ohjaustietokoneella ja työlajen piirturilla [23] ja sen työsaavutus jopa 1600 raidemetriä tunnissa [13]. Tämän konetyypin suurin sallittu siirtoajonopeus on 80 km/h. Tämän tyyppisiä tukemiskoneita on hankittu Suomeen lisää vuosina 1998, 2010 ja 2014 (kalustotunnukset Ttk1 831, 836 ja 837 vastaavassa järjestyksessä), joiden lisäksi Suomessa toimii tai on toiminut myös nykyään VolkerRail Suomi Oy:n omistuksessa oleva Ttk1 91042.

Vuosina 2010 ja 2014 hankitut koneet poikkeavat jonkin verran peräosan rakenteeltaan aiemmin hankituista koneista, kuten kuvista 5.22 ja 5.23 on havaittavissa. Lukuun ottamatta ensimmäistä 823-konetta, jossa on valmius vain sivuttaissiirtolaserin käyttöön, on koneet varustettu sekä nosto- että sivuttaissiirtolaserin käyttömahdollisuudella. VR Track Oy:n vuonna 2014 hankkima kone lienee tällä hetkellä uusin Suomen rataverkolla toimiva tukemiskone.



Kuva 5.22. Tukemiskone Plasser & Theurer 09-32 CSM (Ttk1 831) Joensuussa vuonna 2007. Työskentelysuunta kuvassa vasemmalle. Muokattu lähteestä [76]



Kuva 5.23. Tukemiskone Plasser & Theurer 09-32 CSM (Ttk1 836) Ilmalan rata-pihalla vuonna 2010. Työskentelysuunta kuvassa vasemmalle. Muokattu lähteestä [77]

Vuosituhaten vaihteessa vuonna 1999 Suomeen saatiin ensimmäinen kolmen ratapölkyn tukemiskone, Plasser & Theurerin Dynamic Tamping Express 09-3X (Ttk1 832) ja vuonna 2006 toinen samaa konetyyppiä oleva kone (Ttk1 833). Kolmen ratapölkyn satelliittitoimisella tukemisyksiköllä on mahdollista tukea myös yhtä ratapölkkyä kerrallaan, mikäli ratapölkkyjaossa esiintyy epätasaisuuksia. [21] Tukemiskonetyypin 09-3X työsaavutus on parhaimmillaan huikeat 2200 - 2400 raidemetriä tunnissa hie-man lähteestä riippuen [13], [23]. Näistä kahdesta koneesta ainakin uudempi Ttk1 833 on varustettu koneen peräosan harjakoneella ja se on Suomen rataverkolla toimivista tukemiskoneista painavin 108 tonnin työpainollaan [73]. Lisäksi ainakin uudemmassa koneessa on mahdollisuus käyttää automaattista kiskonkiinnitysten metalliosien sijaintiin perustuvaa ratapölkkyjen tunnistusta, mutta tukikerroksessa mahdollisesti olevien metallipalasten takia automatiikkaa ei läheskään aina käytetä. Molemmat koneet omaavat mahdollisuuden sekä nosto- että sivuttaissiirtolaserin käyttöön.



Kuva 5.24. Tukemiskone Plasser & Theurer Dynamic Tamping Express 09-3X (Ttk1 833) Kouvolan liikennepaikalla vuonna 2007. Muokattu lähteestä [38]

Vuonna 2008 VR Track Oy hankki Suomeen vielä yhden uuden konetyypin tukemiskoneen, joka oli Plasser & Theurerin Duomatic 08-32 C (Ttk1 834) [26]. Aikaisemmasta suuntauksesta poiketen tämä konetyyppi ei ollut satelliittitoiminen, vaan se sisältää kiinteän kahden ratapölkyn tukemisyksikön. Koneessa on mahdollisuus sekä nosto- että sivuttaissiirtolaserin käyttöön. Keväällä 2010 hankittiin myös toinen samaa konetyyppiä oleva tukemiskone (Ttk1 835), mutta se siirrettiin Ruotsiin jo samana vuonna [78]. Koneen suurin sallittu nopeus työssä on 80 km/h [73].



Kuva 5.25. Tukemiskone Plasser & Theurer Duomatic 08-32 C Torniossa vuonna 2010. Muokattu lähteestä [79]

Edellä esiteltiin VR Track Oy:n omistamia linjatukemiskoneita. Toinen merkittävä ratojen kunnossapitäjä Suomen rataverkolla on Destia Rail Oy viidellä kunnossapitoalueellaan. Seuraavassa esitellään Destia Rail Oy:n omistamat kaksi linjatukemiskonetta.

Destian vanhempi linjatukemiskone on ainakin 2000-luvulta alkaen ensin Maanrakennus Veli Hyyryläinen Oy:n käytössä ollut Plasser & Theurer Unomatik 08-16 ZZ (kalustotunnus Ttk1 91041), joka siirtyi Destialle yritystoston myötä vuonna 2010. Kyseisessä koneessa on kiinteä tukemisyksikkö yhden ratapölkyn tukemista varten. Koneita käytetään pääasiassa kunnossapitotöissä [27] ja siinä on mahdollisuus sivuttaissiirtolaserin käyttöön.



Kuva 5.26. Tukemiskone Plasser & Theurer Unomatik 08-16 ZZ Siurossa vuonna 2011. Muokattu lähteestä [80]

Destian uudempi linjatukemiskone on ominaisuuksiltaan jo edellä esitelty Plasser & Theurer Duomatic 08-32 C (Ttk1 90109122003-7), jota Destian internetsivujen [27] mukaan käytetään sekä radan rakentamis- että kunnossapitotöissä.



Kuva 5.27. Destia Rail Oy:n tukemiskone Duomatic 08-32 C Simpeleellä kesällä 2013. Muokattu lähteestä [81]

Tämän tutkimuksen yhteydessä lähetettiin myös sähköpostikysely kummankin kunnossapitoa laajemmassa mittakaavassa tekevän yhtiön kalustovastaaville. Kyselyn avulla pyrittiin selvittämään Suomen rataverkolla olemassa olevan tukemiskaluston ominaisuuksia ja kaluston käyttömääriä. Kyselyn tulos oli lopulta hyvin suppea, sillä vain toiselta yhtiöltä saatiin lyhyt vastaus. VR Track Oy:stä kuitenkin kerrottiin, että linjaosuuksien kunnossapidon tukemistöitä tehdään pääasiassa kahdella P&T 09-3X-satelliittikoneella ja muulla kalustolla (P&T 09-16 CSM ja sitä uudemmat koneet) tehdään vaihtelevasti rakentamis- ja kunnossapitotöitä. Muiden haastatteluiden perusteella on todettava, että ominaisuuksiltaan erilaiset tukemiskonetyypit luonnollisesti soveltuvat vaihtelevasti käytettäväksi eri kohteissa. Esimerkiksi 09-3X-konetyyppi soveltuu parhaiten nimenomaan raidegeometrian vähäisten virheiden

korjaamiseen kunnossapidossa, kun taas vaikkapa 09-16 CSM soveltuu edellistä paremmin käytettäväksi esimerkiksi sepelinpuhdistuskoneen jäljessä.

5.4.2 Linjatukemiskoneet maailmalla

Tässä luvussa tarkastellaan joitain maailmalla käytettyjä linjatukemiskoneita keskityen esimerkinomaisesti erikoisempiin ratkaisuihin ja linjatukemiskoneteknologian kehittyneimpiin koneisiin. Yksittäisenkin tukemiskoneen ollessa hyvin merkittävä investointi, voidaan sen personointiin käyttää paljon resursseja ja samasta tukemiskonetyypistä saatetaan tehdä lukuisia hieman toisistaan poikkeavia versioita tilaajien toiveiden mukaisesti. Yleisesti kehitys vaikuttaa kulkevan enenevässä määrin kohti yhä monipuolisempia tukemiskoneita siten, että tukemiskoneeseen sisällytetään tarvittavat laitteet esimerkiksi sekä tukemistyötä, stabilisointia (ks. luku 5.6) että sepelin harjausta varten. Näiden toimintojen yhdistämisen ensisijaisena tavoitteena lienee tukemistyön vaatiman ratakapasiteetin minimoiminen.

Plasser & Theurer Dynamic Tamping Express 09-4X (kuva 5.28) on neljän ratapölkyn satelliittitoiminen tukemiskone, jonka perään on usein liitetty myös stabilisaattori ja/tai sepeliharja. Kone pystyy myös tukemaan yhden tai kaksi ratapölkkyä kerrallaan. Kyseisen konetyypin työsaavutus on parhaimmillaan 2600 raidemetriä tunnissa [82]. Eräs sovellus samasta konetyypistä on Ranskassa suurnopeusradoilla käytössä oleva 109-4X, joka muun muassa tunnistaa ratapölkkyt automaattisesti ja vaihtaa tarvittaessa neljän pölkyn tuennasta yhden tai kahden pölkyn tuentaan. Lisäksi kyseisen koneen harjausjärjestelmä koostuu lukuisista harjoista yhden sijaan. Harjat huolehtivat pölyn ja sepelin poistamisesta sekä kiskoista, kiinnityksistä että pölkkyjen päältä. [84]



Kuva 5.28. Plasser & Theurerin tukemiskone 09-4X. Muokattu lähteestä [83]

Japanissa Tokaido – Shinkansen -linjalla on käytössä Plasser & Theurer 09-2X/SD, joka on kahden ratapölkyn satelliittitoiminen tukemiskone. Konetta on mahdollista käyttää myös yhden ratapölkyn satelliittitoimisena tukemiskoneena. Erityiseksi kyseisen koneen tekee sen tukemisyksikön melu- ja pölysuojaus yksikön ollessa vahvasti koteloitu (kuva 5.29). Tukemiskoneen operaattorin näkyvyyden takaamiseksi kone on varustettu koteloinnin sisäisellä vesisuihkujärjestelmällä, jolla voidaan ehkäistä pölyämistä tuettaessa. [85]



Kuva 5.29. Havainnekuva Plasser & Theurer 09-2X/SD tukemiskoneen tukemisyksikön pöly- ja melusuojauskoteloinnista. Muokattu lähteestä [85]

Pohjois-Amerikassa on käytössä Plasser & Theurerin tukemiskonetyyppi 09-2X C.A.T, missä C.A.T tulee sanoista *Continuous Action Tamping*. Kyseinen konetyyppi on rakenteeltaan hieman poikkeava, sillä kone koostuu yksinkertaistettuna tavanomaisesti yhden ratapölkyn satelliittitoimisesta tukemiskoneesta, joka hinaa perässään vaunua, jossa on toinen yhden pölkyn satelliittitoiminen tukemisyksikkö. Tuettaessa etummaisella tukemisyksiköllä siirretään raide haluttuun asentoon ja tuetaan joka toinen ratapölkky siten, että perässä tuleva vaunu tukee ne ratapölkkyt, jotka etummainen vaunu jätti tukematta. Taaimmainen vaunu ei sisällä nostokelkkaa eli sen kohdalla raidetta ei enää nosteta, vaan ainoastaan tuetaan siihen kohtaan mihin etummainen vaunu on raiteen jättänyt. P&T 09-16 C.A.T on periaatteessa sama tukemiskone ilman taempaa vaunua ja se muistuttaa ominaisuuksiltaan 09-16 CSM -koneetta. [86]



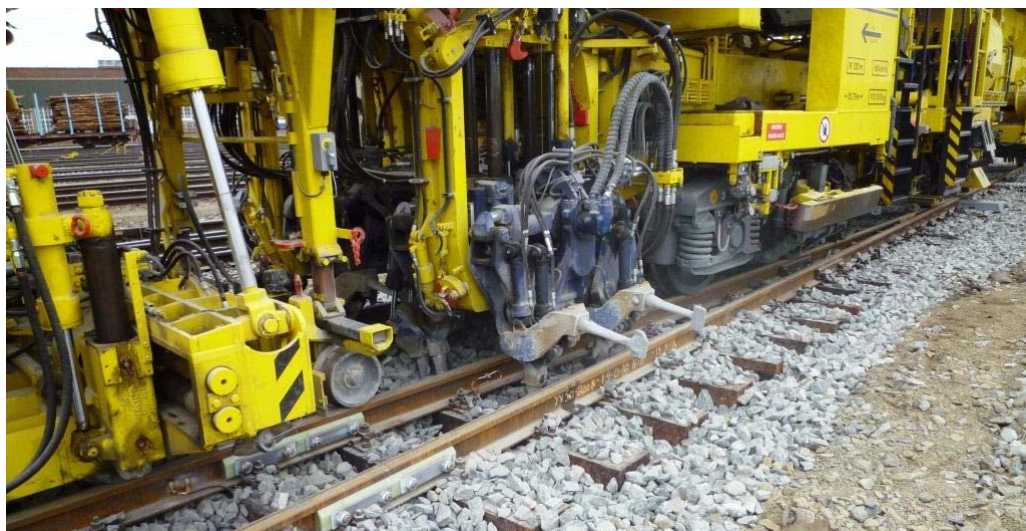
Kuva 5.30. Plasser & Theurer 09-2X C.A.T tukemiskone. Muokattu lähteestä [86]

5.5 Vaihteentukemiskoneet

Ensimmäiset yhden ja kahden miehen käytettävät vaihteentukemiskoneet (Plasser & Theurer WE75 ja WE275) tulivat markkinoille 1962 [20], [21]. Vuonna 1965 rakennettiin ensimmäinen vaaituslaitteella varustettu tukemiskone ja heti vuonna 1966 ensimmäiset sekä vaaitus- että oikaisulaitteistolla varustetut vaihteentukemiskoneet. [21]

Vaihteentukemiskoneille ominaisimmat käyttökohteet ovat nimensä mukaisesti vaihteet ja muut päällysrakenteen erikoisrakenteet, mutta niitä voidaan käyttää myös linjatuennassa. Linjatuennassa vaihteentukemiskoneiden työsaavutus on kuitenkin yleensä melko vähäinen verrattuna esimerkiksi satelliittitoimisiin kolmen ratapölkyn linjatukemiskoneisiin. Haastatteluiden perusteella vaihdetukemiskoneen työsaavutukseksi linjatuennassa voidaan arvioida noin 600–650 raidemetriä tunnissa.

Suurimmat erot linja- ja vaihteentukemiskoneiden välillä liittyvät niiden tukemisyksiköihin. Siinä missä linjatukemiskone saattoi pystyä jopa kolmen tai neljän ratapölkyn samanaikaiseen tukemiseen, on linjatukemiskoneessa tyypillisesti 16 tukemishakua yhden ratapölkyn tukemiseen, mutta nämä hakut ovat hyvin vapaasti liikuteltavissa ja käännettävissä toisistaan riippumatta kuten kuvasta 5.31 on havaittavissa. Lisäksi ainakin uudemmissa vaihteentukemiskoneissa on nostopuomi poikkeavan raiteen kolmannen kiskon nostamiseksi tuennan yhteydessä kuvan 5.32 mukaisesti. Aiemmin, kun koneiden omat nostopuomit olivat harvinaisia, poikkeavan raiteen tuennassa käytettiin apuna erillistä työryhmää ja hydraulista tunkkia. [2] Poikkeavan nostolaitteen käyttö, erityisesti pitkien vaihdetölkkyjen kohdalla, vähentää sekä raiteen/vaihteen nostamiseen tarvittavaa voimaa yksittäisessä nostopisteessä että radan komponenttien rasituksia nostettaessa. Nostopuomin maksiminostovoima on suunnilleen 60 kN. [3]



Kuva 5.31. Havainnekuva vaihteentukemiskoneen tukemishakkujen liikuteltavuudesta ja muunneltavuudesta. Työskentelysuunta on kuvassa vasemmalle.



Kuva 5.32. Etualalla vaihteentukemiskoneen nostopuomi poikkeavan kiskon nostamiseen. Taustalla sivusuunnassa siirretyt tukemishakut poikkeavan raiteen tukemiseen vaihteen suoraan raidetta tuettaessa. Työskentelysuunta on kuvassa oikealle.

Tukemiskoneen mittauslaitteistojen sekä nosto- ja oikaisulaitteistojen osalta, vaihteentukemiskoneen poikkeavan kiskon nostolaitetta lukuun ottamatta, linja- ja vaihteentukemiskoneet ovat samankaltaisia. Tukemistyötä vaihteissa voidaan tehdä joko yhdellä tai kahdella operaattorilla ainakin uudempien vaihteentukemiskoneiden sisältäessä ohjaimet kahdelle operaattorille. Kahdella operaattorilla työskenneltäessä kumpikin tukee oman puolen kiskonsa ympäristön.

5.5.1 Vaihteentukemiskoneet Suomessa

Suomeen kaksi ensimmäistä vaihteentukemiskonetta, tyypiltään Plasser & Theurer WE75, hankki VR vuonna 1964 ja seuraavat kaksi tyypiltään samaa tukemiskonetta vuosina 1967 ja 1970. Kyseinen tukemiskonetyyppi oli toinen ensimmäisistä markkinoille vuonna 1962 tulleista nimenomaan vaihteentukemiseen tarkoitetuista koneista, jotka oli tarkoitettu yhden ja kahden miehen käytettäväksi. Konetyyppi sisälsi yhden tukemisaggregaatin ilman muita toimintoja, mutta siitä oli silti suuri hyöty siihen asti käsityönä tehtyyn vaihteiden tukemiseen verrattuna. [21]



Kuva 5.33. Maailman ensimmäinen vaihteentukemiskonemalli Plasser & Theurer WE75. Muokattu lähteestä [20]

Vuonna 1966 markkinoille tuli ensimmäinen vaaitus- ja oikaisulaitteistolla varustettu vaihteentukemiskone ja seuraavat VR:lle hankitut vaihteentukemiskoneet olivatkin ns. monitoimikoneita [21]. Vuonna 1975 Suomeen hankittiin Matisa B133 (kuva 5.34), joka oli varustettu kiikarilaittein [21]. Kuvan 5.34 tukemiskone Matisa B133 (kalustotunnus Ttk2 91051) on ainakin 2000-luvulla ollut Maansiirto Veli Hyryläinen Oy:n (MVH) omistuksessa ja sittemmin vuodesta 2010 lähtien Destia Rail Oy:n omistuksessa. Kyseinen tukemiskone, joka on esitetty sivusuunnasta kuvattuna kuvassa 5.35, on edelleen merkitty kalustorekisteriin käytössä olevaksi [73]. Kyseinen vaihteentukemiskonemalli B133 sisälsi ainoastaan 16 tukemishakua eli 8 hakua kiskoja kohden.



Kuva 5.34. Tukemiskone Matisa B133 työkunnossa Kontiolahden liikennepaikalla. Muokattu lähteestä [28]



Kuva 5.35. Tukemiskone Matisa B133 (Ttk2 91051) siirtoajokunnossa Oulun tavararata-alueella vuonna 2007. Työskentelysuunta kuvassa vasemmalle. Muokattu lähteestä [29]

1980-luvun puolivälin molemmin puolin Suomeen hankittiin ainakin viisi Plasser & Theurerin Plassermatic 08-275 tai 08-275 Unimat vaihteentukemiskonetta (kuva 5.36), joiden kalustotunnuksia ovat ainakin Ttk2 841-844 ja 849. Ainakin osa näistä koneista on varustettu GVA-ohjaustietokoneella ja useimmissa on mahdollisuus sirtaissa siirtolaserin käyttöön. Tyypin 08-275 koneet oli jo varustettu 32 tukemishakulla eli 16 hakulla kisko kohden sekä ratapölkkyjen päiden alueen tiivistäjällä. Näistä koneista osa on romutettu, yksi siirretty käyttöön muualle ja kaksi (Ttk2 844 ja 849) edelleen käytössä [73].



Kuva 5.36. Plasser & Theurer Unimat 08-275 vaihteentukemiskone (Ttk2 844) Kruunupyssä kesällä 2009. Työskentelysuunta kuvassa oikealle. Muokattu lähteestä [29]

Vuonna 1993 Suomeen saatiin kaksi uutta vaihteentukemiskonetyyppiä [73]. Ensimmäinen näistä oli Plasser & Theurerin 08-16 SNA (Ttk2 851), joita hankittiin seuraavana vuonna neljä kappaletta lisää (Ttk2 852-855). Kyseinen vaihteentukemiskonetyyppi on hyvin kevyt (paino työkuormassa vain 26,5 tonnia) 32 hakulla varustettu tukemiskone ilman laserlaitevalmiuksia. Konetyypin rakenne on sinällään mielenkiintoinen, sillä koneessa ei ole erillistä operaattorin hyttiä, vaan tukemisyksikköä operoidaan samasta hytistä kuin konetta ohjataan muuten. Näistä viidestä tukemiskoneesta yksi on poistettu rekisteristä vuonna 2011 ja ainakin kolme (851-852 ja 855) ovat edelleen käytössä [73].



Kuva 5.37. Plasser & Theurer 08-16 SNA vaihteentukemiskone (Ttk2 851) Toijlassa syksyllä 2013. Työskentelysuunta kuvassa oikealle. Muokattu lähteestä [87]

Toinen vuonna 1993 hankittu vaihteentukemiskonetyyppi oli edistyksellinen Plasser & Theurer Unimat 08-475/4S (Ttk2 850). Kone sisälsi sivuttaissiirtolaser mahdollisuuden lisäksi mahdollisuuden seurata työn jälkeä työskenneltäessä sekä sepeliharjalaitteiston koneen takaosassa. Samantyyppisiä koneita (Ttk2 856-859) hankittiin lisää vuosina 1995, 2000, 2003 ja 2006 uusimpien koneiden sisältäessä mahdollisuuden myös nostolaserin käyttöön. Ensimmäisenä hankittu kone on sittemmin siirretty Ruotsiin ja neljä jälkimmäisenä hankittua ovat edelleen käytössä [73]. Uusimman tämän tyyppisen vaihteentukemiskoneen ”Paten” (Ttk2 90109424101-4) Suomeen on hankkinut Komsor Oy vuonna 2013 (kuva 5.38). Komsor Oy:llä on lisäksi käytössään vuonna 1987 valmistettu Plasser & Theurer VPRS-500 vaihteentukemiskone ”Iikori” (kuva 5.39), jota siirrellään myös tieyhteyksiä pitkin lavetilla työmaalta toiselle.



Kuva 5.38. Nykyaikainen Plasser & Theurer 08-475/4S vaihteentukemiskone Joensuussa vuonna 2013. Muokattu lähteestä [88]



Kuva 5.39. Plasser & Theurer VPRS-500 vaihteentukemiskone Paltamossa vuonna 2014. Muokattu lähteestä [89]

VR Track Oy:n uusin vaihteentukemiskone on vuonna 2012 hankittu Plasser & Theurerin Unimat Compact 08-16/3S (Ttk2 845), joka on nykyaikaisesti varustettu sekä sivuttaissiirto- että nostolasermahdollisuudella. Erona edellä esiteltyyn 4S-koneeseen on sepeliharjan puuttuminen, minkä ansiosta 3S-kone on lyhyempi ja kevyempi ja kone onkin modifioitu sopimaan erityisesti Helsingin metron vaihteiden tukemiseen [90].



Kuva 5.40. Plasser & Theurer Unimat Compact 08-16/3S vaihteentukemiskone. Muokattu lähteestä [91]

Hieman Suomen muusta vaihteentukemiskalustosta poikkeavan vaihteentukemiskoneen, Matisan valmistaman B 66 UC -tyypin koneen ”Masan”, hankki Destia Rail Oy vuonna 2010 (kuva 5.41). Koneen kalustotunnus on Ttk5 90109422001-8. Pituudeltaan 36 metrinen ja työpainoltaan 105 t tukemiskone sisältää luvussa 5.3 esitellyn optisen NEMO-mittausjärjestelmän. Kyseistä konetta voidaan käyttää linjatuennassa yhden ratapölkyn satelliittitoimisena tukemiskoneena, mikä eroaa muista Suomen rataverkon vaihteentukemiskoneista niiden ollessa tukemisyksiköltään kiinteitä. [27]



Kuva 5.41. Matisa B 66 UC vaihteentukemiskone Suomenjoella syksyllä 2014. Muokattu lähteestä [92]

Destia Rail Oy:llä on myös käytettävissä lavetilla maanteitse siirreltävä vaihteentukemiskone Plasser & Theurer 08-275 ZW (kuvat 5.42 ja 5.43), jonka kalustotunnus on Ttk4 91501. Koneen paino työkunnossa on 30 t ja suurin sallittu nopeus 40 km/h. [27]



Kuva 5.42. Plasser & Theurer 08-275 ZW vaihteentukemiskone Kouvolassa vuonna 2007. Muokattu lähteestä [93]



Kuva 5.43. Vaihteentukemiskone 08-275 ZW siirtokunnossa lavetilla. Muokattu lähteestä [94]

5.5.2 Vaihteentukemiskoneet maailmalla

Linjatukemiskoneiden tavoin tukemiskonevalmistajat ovat personoineet vaihteentukemiskoneita eri rataverkoille, joten erilaisia koneita on lukemattomia. Niinpä tässä luvussa keskitytään vaihteentukemiskoneiden kehittyneimpiin malleihin. Matisan konetyyppi B 66 UC edustaa Matisan viimeisintä tekniikkaa, joka on siis käytössä myös Destian kyseisen konetyypin vaihteentukemiskoneessa.

Plasser & Theurerin viimeisimmät vaihteentukemiskonetyypit ovat Unimat 09-sarjan 09-4x4/4S, 09-4x4/4S Dynamic ja 09-475/4S-N Dynamic. Näistä ensinnä mainittu on yhden ratapölkyn 32-hakkuinen vaihteentukemiskone, joka pystyy satelliittitoimiseen tuentaan myös vaihdetta tuettaessa. Keskimäinen Dynamic-malli on Ison-Britannian rataverkolle kehitetty tukemiskone, jossa on 4S-koneen ominaisuuksien lisäksi koneen yhteyteen liitetty stabilisaattori, jolloin tuenta ja stabilisointi voidaan tehdä samalla ajolla. Jälkimmäisessä 4S-N Dynamic-koneessa (kuva 5.44) on satelliittitoimisuuden ja stabilisaattorin lisäksi mahdollisuus myös sepelöidä raide tukemiskoneella ennen tuentaa. Lisäksi konetyypin keskiosassa on sepeliharja. [95]

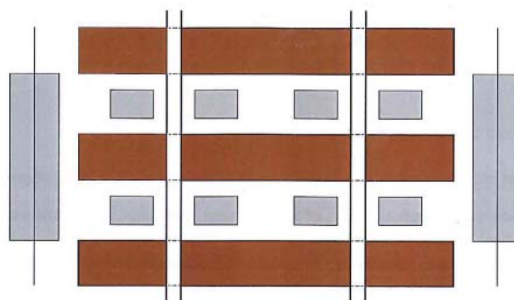


Kuva 5.44. Plasser & Theurer Unimat 09-475/4S-N vaihteentukemiskone. Työkentelysuunta kuvassa vasemmalle. Muokattu lähteestä [96]

5.6 Stabilisaattorit ja muut tiivistäjät

Kuten jo aiemmin tässä raportissa on käynyt ilmi, on tukemistyöllä tukikerrosateriaalia löyhdyttävä vaikutus, mikä johtaa erityisesti radan sivuttaissuuntaisen stabiiliiteetin heikkenemiseen. Lichtbergerin [3] ja Esveldin [13] mukaan radan sivuttaissuuntainen vastus heikentyy noin 40...50 % tukemisen johdosta. Myös huomattavat radan pystysuuntaiset painumat ovat tyypillisiä heti tukemisen jälkeen. Edellä mainituista tukemisen vaikutuksista johtuen on sekä Plasser & Theurerin että Matisan tukemiskoneiden yhteyteen kehitetty ratapölkkyjen päiden alueen tiivistäjiä (*sleeper-end consolidator*) eli niin kutsuttuja reunatiivistäjiä (ks. kuva 5.4), joiden toiminta perustuu tukikerrosateriaalin tiivistämiseen pölkkyjen päiden vierestä radan suuntaisten värähtelevien levyjen avulla. Maailmalla on käytössä myös erityisiä ratapölkkyjen, usein erityisesti niiden päiden, välien (*ballast crib consolidator*) ja tukikerroksen palteen taustan (*ballast shoulder consolidator*) tiivistämiseen tarkoitettuja koneita, jotka reunatiivistäjien tavoin tiivistävät suoraan tukikerrosateriaalia. Ratapölkkyjen välien tiivistämisellä pyritään erityisesti tiivistämään tukemishakkujen löyhdyttämä tuki-

kerrosmateriaali. UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaan [45] mukaan menetelmällä saavutetaan 7 % lisäys sivuttaissuuntaiseen vastukseen. Palteen taustan tiivistämisen vaikutukseksi opas mainitsee 4 % lisäyksen raiteen sivuttaissuuntaisessa vastuksessa. Tämänkaltaisia tiivistyskoneita on käytössä ainakin Sveitsissä ja Unkarissa siten, että Sveitsissä satelliittitoiminen tiivistäjä on liitetty sepeliauran yhteyteen ratakapasiteetin käytön tehostamiseksi. Sveitsissä tiivistäjät on järjestetty kuvan 5.45 mukaisesti ja työskenneltäessä tukikerrosta tiivistetään kussakin kohdassa neljän sekunnin ajan tiivistäjien värähtelytaajuuden ollessa 45–50 Hz ja dynaamisen kuormituksen ollessa 12 N/cm². Menetelmällä voidaan samanaikaisesti harjata/aurata ja tiivistää noin 450 raidemetriä tunnissa. Tiivistystyön vaikutuksia raidegeometriaan ei mitata työn aikana. [45]



Kuva 5.45. Sveitsissä käytettävien tiivistäjien (harmaalla) sijoittuminen ratapölkkyjen väleihin ja palteeseen. [45]

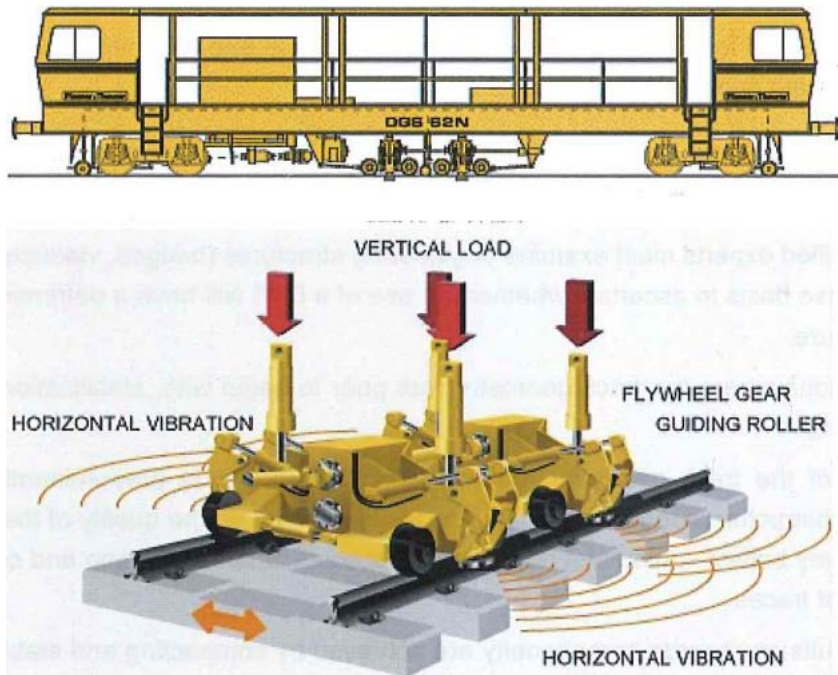
Unkarissa tiivistämiseen käytetään tukemiskoneen perässä työskenteleviä erillisiä, sekä itse kehitettyjä että Plasser & Theurerin valmistamia VDM-sarjan, tiivistyskoneita [45]. Myös Suomeen on hankittu vuonna 1977 kuvassa 5.46 esitetty Plasser & Theurerin valmistama VDM-800 tiivistyskone (Ttk3 861), mutta sen varsinaisesta käytöstä ei ole tarkempaa tietoa.



Kuva 5.46. Tiivistyskone Plasser & Theurer VDM-800. Muokattu lähteestä [97]

Vuonna 1975 Plasser & Theurer esitteli uudentyyppisen ”tiivistyskoneen” – stabilisaattorin (*Dynamic Track Stabiliser, DTS*), joka tukikerrosmateriaalin sijaan aiheuttaa värähtelevän kuormituksen suoraan raiteeseen stabilisaattorin keskellä sijaitsevan pyörästön välityksellä kuvan 5.47 mukaisesti. Lisäksi stabilisaattori sisältää koneen päissä ja keskellä mittapyörästöt mittakantamittausta varten, jolloin stabilisoinnin

vaikutuksien suuruutta radan geometriaan voidaan seurata työn aikana. Stabilisaattorien käyttö on ainakin eurooppalaisilla rataverkoilla varsin yleistä [45].

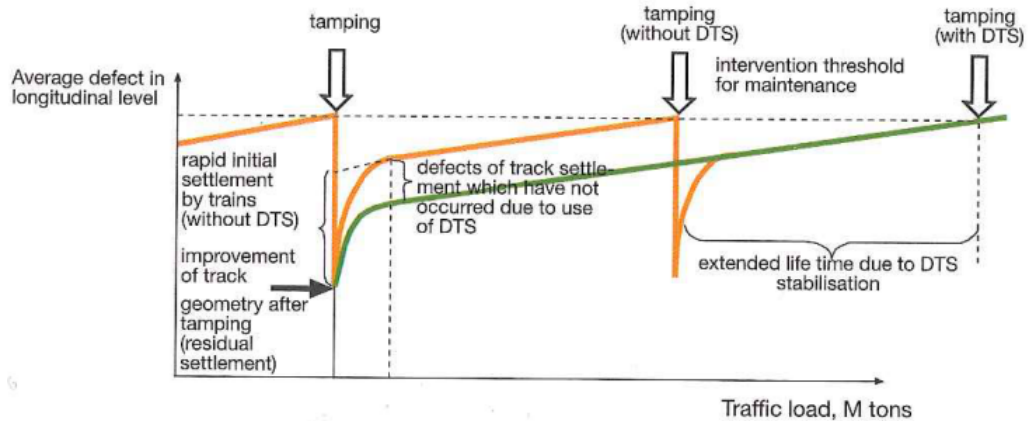


Kuva 5.47. Stabilisaattorin rakenne ja toimintaperiaate. [45]

Stabilisaattorin käytöllä on kolme päätavoitetta: [45]

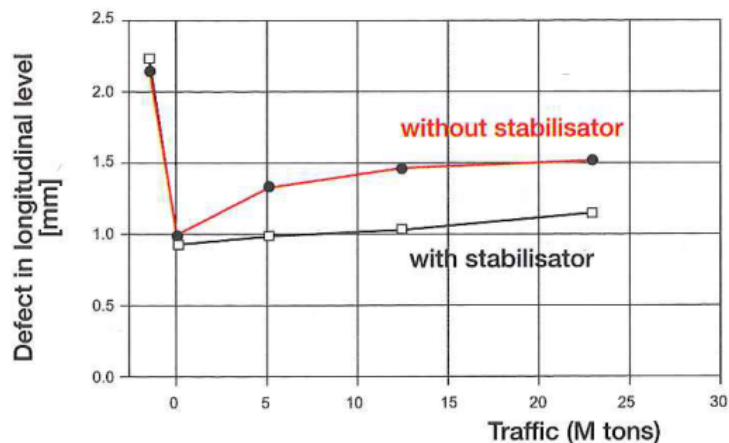
- Tukemisen jälkeisen liikennöinnin aiheuttaman, epäsuotuisassa tapauksessa epätasaisen, painumisen hallittu ennakoiminen. Tämä tavoite korostuu erityisesti perusparannuksissa ja uudisrakentamisessa, joissa käytetään suuria määriä uutta raidesepeliä. Valmistajan mukaan stabilisointi vastaa vaikutuksiltaan noin 100 000 bruttotonnin liikennekuormitusta. Tunnisen [2] mukaan kunnossapidossa stabilisointi voi tulla kyseeseen esimerkiksi suurilla, yli 50 mm nostoilla tehtäessä.
- Raiteen sivuttaissuuntaisen stabiliteetin parantaminen tuennan jälkeen. Stabilisointi palauttaa vain osan, Esveldin [13] mukaan noin puolet, tukemisen aiheuttamasta stabiliteettihäviöstä, mutta mahdollistaa kuitenkin samalla suuremman nopeuden sallimisen vastatuettulle raiteelle heti tuennan jälkeen.
- Oikein käytettynä stabilisoinnilla voidaan raidegeometrian paremman pysyvyyden kautta vähentää tukemistarvetta ja edelleen elinkaarikustannuksia.

Lichtberger [3] on havainnollistanut stabilisoinnin kunnossapitosykliä pidentävää vaikutusta kuvan 5.48 mukaisesti. Kuvassa esitetyn periaatteen mukaan kunnossapitosyklin pitenemisen tärkein tekijä on stabilisoinnin tuennan jälkeistä nopeaa painumaa pienentävä vaikutus heti kunnossapitosyklin alussa. Lichtberger [3] lisää, että teoreettisten ja käytännön tulosten perusteella kunnossapitosyklin piteneminen jopa 30 % on mahdollista.



Kuva 5.48. Periaatekuva stabilisoinnin vaikutuksesta kunnossapitosyklin pituuteen. [3]

Natal Coal Linella Etelä-Afrikassa on tarkasteltu stabilisaattorin käytön vaikutuksia kunnossapitosyklin pituuteen radan pituussuuntaisen geometrian keskihajonnan kehittymisen perusteella. Kuvan 5.49 tuloksista nähdään, että varsinkin ensimmäisten 5-10 megabruttotonnin ero stabilisoidun ja stabilisoimattoman osuuden keskihajonnan kehittymisessä on selkeä, mikä Lichtbergerin [3] mukaan on edelleen jopa kolminkertaistanut kunnossapitosyklin pituuden. Tutkimuksen tarkemmat yksityiskohdat ja siinä käytetyn testirataosuuden ominaisuudet eivät käyneet ilmi tulosten yhteydestä.



Kuva 5.49. Stabilisoinnin vaikutus radan pituussuuntaisen geometrian keskihajonnan kehittymiseen Natal Coal Linella Etelä-Afrikassa. [3]

Myös UIC [45] on tutkinut sekä erilaisten tiivistäjien että stabilisoinnin ja yleisemmän tukemisen vaikutuksia laajassa tutkimusohjelmassa, jossa käytettiin kolmea Itävallassa, Belgiassa ja Sveitsissä sijainnutta testiosuutta. Osuudet valittiin kaksoisraiteellisilta rataosuuksilta siten, että 0,5-2 km pitkät osuudet sisälsivät sekä heikosti että hyvin kantavan pohjamaan alueita. Lisäksi varmistuttiin raiteiden komponenttien, kunnossapitohistorian ja liikennöinnin luonteen olevan samankaltaisia vierekkäisillä raiteilla, mikä mahdollisti stabilisoinnin vaikutuksen arvioimisen ainoana muuttujana. On huomautettava, että kun Suomessa stabilisointia käytetään pääosin uudelle tukikerros materiaalille, niin UIC:n tutkimuksen ainakin kahdella testiosuudel-

la tukikerrosmateriaali oli jo lähempänä käyttöikänsä loppua. Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan yleisesti kunnossapitosyklin pituuden määräytyvän useimmissa tapauksissa radan pystysuuntaisen geometrian heikkenemisen perusteella. UIC ei havainnut tuennan jälkeisen stabilisoinnin juuri parantavan radan vaakageometriaa. Itse asiassa reunatiivistäjättömän tukemiskoneen ja stabilisaattorin yhdistelmän käytöllä saattaa olla jopa negatiivisia vaikutuksia radan vaakageometriaan. Tarkasteltaessa sekä vaaka- että pystysuuntaisen geometrian heikkenemisnopeutta erilaisilla tukemiskoneen, tiivistäjien ja stabilisaattorin yhdistelmillä, ei eri yhdistelmien välillä havaittu merkittäviä eroja sillä oletuksella, että käytetyt nostot ja sivuttaissiirrot olivat samansuuruisia. Lisäksi todetaan, että jotta stabilisoinnin vaikutusta elinkaarikustannuksiin voitaisiin pitää merkittävänä, pitäisi sen käytöllä pystyä säästämään kokonainen tukemissykli. Nyt saatujen tulosten perusteella tätä ei voida pitää todennäköisenä. Sitä vastoin stabilisoinnin noin 100 000 tonnin liikennekuormitusta simuloiva raiteen sivuttaissuuntaista stabiliteettia parantava vaikutus on selkeä ja tämä mahdollistaa suuremman nopeuden sallimisen raiteelle heti tuennan ja stabilisoinnin jälkeen. Sekä Tunninen [2] että UIC:n opas [45] huomauttavat, että paras tulos rakennettaessa tukikerros kerroksittain saadaan aikaan myös stabilisoimalla tukikerros kerroksittain, sillä stabilisoinnin maksimivaikutussyvyys on noin 150 mm.

Suomen rataverkolla toimii kaksi VR Track Oy:n omistamaa stabilisaattoria, jotka ovat molemmat kuvan 5.50 koneen kaltaista stabilisaattorityyppiä Plasser & Theurer DGS 62 N. Ensimmäinen niistä on hankittu vuonna 1992 ja toinen vuonna 1998. [73]



Kuva 5.50. Plasser & Theurer DGS 62 N stabilisaattori. Muokattu lähteestä [98]

DGS 62 N-mallin stabilisaattorin pystysuuntainen kuormitus on säädeltävissä välillä 0–356 kN ja vaakasuuntaisen värähtelyn taajuus välillä 0 - 42/45 Hz [45]. Aalto [4] on vuonna 1999 esittänyt tiivistelmän Suomessa käytettävästä stabilisaattoreiden työohjeesta, joka on sittemmin saattanut päivittyä käyttökokemuksen lisääntyessä. Työohjeessa stabilisointikohteet jaotellaan uudisrakentamiseen ja kunnossapitoon siten, että uudisrakentamisen ja perusparannuksien yhteydessä tukikerrosmateriaalin oletetaan olevan melko löyhässä tilassa ja kunnossapidon yhteydessä tukikerrosmateriaalin oletetaan tiivistyneen liikennekuormituksen vaikutuksesta. Uudisrakentamisen yhteydessä käytettävät ohjausarvot on esitetty taulukossa 5.1. Kunnossapi-

dossa käytettävät arvot ovat kolmannen tai viimeisen tukemiskerran jälkeen käytettäviä arvoja vastaavat.

Taulukko 5.1. Stabilisaattorin ohjausarvot uudisrakentamisessa

Työvaihe	Työskentelynopeus [raidemetriä/h]	Pystysuuntaisen kuormitus-sylinterin maksimipaine [bar]	Vaakasuuntaisen värähtelyn taajuus [Hz]	Kiskojen puristussylinterin maksimipaine [bar]	Stabilisaattorin mittausjärjestelmä käytössä
1. tukemiskerran jälkeen	600...1000	80	30...35	50	Ei
2. tukemiskerran jälkeen	600...1000	100	30...35	50	Ei
3. tai viimeisen tukemiskerran jälkeen	600...1000	Sovitettava erikseen kummallekin kiskolle, maksimissaan kuitenkin 120	30...35	50...60	Kyllä

Tukemista vastaavasti stabilisoitavan alueen päihin on tehtävä 15...30 metriä pitkät alku- ja loppuviisteet. Viisteet on tehtävä myös aina, kun työ on jouduttu keskeyttämään keskelle stabilisoitavaksi suunniteltua aluetta. Alkuviihettä tehtäessä mittausjärjestelmä kytketään pois päältä, stabilisaattori nostetaan työskentelynopeudelle ja asetetaan pystysuuntaisen kuormituksen työskentelypaine, minkä jälkeen nostetaan hitaasti vaakasuuntaisen värähtelyn taajuutta työskentelytaajuuteen asti ja kytketään mittausjärjestelmät päälle. Tarvittaessa kuormitus on sovitettava erikseen kummallekin kiskolle. Loppuviisteiden kohdalla kytketään mittausjärjestelmät pois päältä, jatketaan ajamista työskentelynopeudella ja alennetaan hitaasti värähtelytaajuutta ja pystykuormitusta nolnaan saakka. [4]

Vaihteissa stabilisointi koskee vain vaihteen suoraa tai vähemmän käyrää osaa. Työ aloitetaan ja lopetetaan noin 30...50 metriä ennen vaihdetta ja sen jälkeen. Kielisovitusalueella kiskopihtejä ei suljeta ja pitkien vaihderatapölkkyjen alueella kiskopihdit avataan, jos se on välttämätöntä. Yleisesti, jos kiskopihtejä ei voida sulkea, työskennellään molemmin puolin avoimilla kiskopihteillä. Vaihteessa poikkeavan kiskon puolen pystysuuntainen kuorma asetetaan maksimiarvoon 120 bar ja toisen puolen kiskon noin kolmannekseen siitä. Näin työskennellään viimeiseen läpimenevään pitkään vaihdepölkkyyn saakka, jonka jälkeen työskennellään kuten linjaosuudella. [4]

Silloilla työskennellään varmuuden vuoksi 40–45 Hz värähtelytaajuudella, millä vältetään varmasti siltojen ominaistajuuden alueella työskentely. Silloilla työskennellään ensin korotetun taajuuden lisäksi puolella kuormituksella ja seurataan siltarakenteen käyttäytymistä. Jos poikkeavia havaintoja ei tehdä, toistetaan stabilisointi samoilla asetuksilla. Stabilisointia ei saa aloittaa sillalta tai lopettaa sillalle. Jos työ joudutaan keskeyttämään sillalle, on kuormitus ja värähtelytaajuus laskettava heti nolnaan ja työtä jatkettaessa aloitettava uudelleen aloitusviisteellä sillan ulkopuolelta. [4]

Stabilisointi tukimuurien, asemalaitureiden ynnä muiden lähistöllä ei välttämättä vaadi toimenpiteitä, mutta 20 metrin säteellä niistä voidaan työskennellä myös kuten silloilla. Työtä ei saa aloittaa eikä lopettaa kyseisillä alueilla. Rakennusten läheisyydessä menetellään samoin kuin silloilla. Vuonna 1999 kokemusta sepelitukikerroksellisten tunneleiden stabilisoinnista oli niin vähän kokemusta, että sitä ei tuolloin tehty lainkaan. [4] Nykytilanteesta ei ole tarkempaa tietoa.

5.7 Muu tukemistyöhön liittyvä kalusto

Tukemiskoneiden ja stabilisaattoreiden lisäksi tukemistyöhön liittyy erityisesti tukikerroksen täydentämiseen ja muotoiluun tarkoitettua kalustoa. Jo aiemmin tässä raportissa esiteltyjä radan geometrian mittausmenetelmiä sekä radantarkastusvaunua voidaan myös pitää varsin tiiviisti tukemistyöhön liittyvinä, vaikka varsinkin geometriamittauksia tehdään paljon myös muiden kuin tukemistöiden yhteydessä.

Seuraavassa on esimerkinomaisesti esitelty joitain tukikerroksen täydentämiseen ja muotoiluun liittyviä vaunuja ja koneita. Maailmalla on joillain rataverkoilla käytössä ainakin Plasser & Theurerin markkinoimia erillisten koneiden tai koneyhdistelmien muodostamia ”järjestelmiä” (esimerkiksi MDZ 2000 ja MDZ 3000), joissa useita työvaiheita (tukeminen, stabilisointi ja lisäsepelöinti sekä tukikerroksen muotoilu) toteutetaan yhdellä yliajokerralla ratakapasiteetti tehokkaasti hyödyntäen. Ei ole tarkkaan tiedossa, minkä verran Suomessa on pyrkimyksiä tämänkaltaiseen koneyhdistelmien käyttöön, mutta se lienee mahdollista ainakin uudisrakentamisessa. Vilkkaasti liikennöityjen ratojen kunnossapidossa esimerkiksi lisäsepelöinti ja tukikerroksen muotoilu saatetaan kuitenkin joutua tekemään erillisinä työvaiheina vasta useiden päivien tai viikkojen kuluttua tukemisesta.

5.7.1 Sepelöintiyksiköt

Sepelöintiyksiköllä voidaan käsittää niin sepelin kuljetukseen kuin sen raiteeseen levittämiseen tarkoitettuja yksiköitä, joiden vetävänä kalustoyksikkönä voidaan käyttää esimerkiksi vetureita tai ratakorma-autoja (Tka). Tämänkaltaisia vaunuja on Suomessa lukuisia eri kalustotyyppisiä, joiden ominaisuudet vaihtelevat tyypistä riippuen. Seuraavassa on esitelty joitain näistä vaunutyypeistä. Sepelöintiyksiköitä on Suomen rataverkolla käytettävissä VR Track Oy:n lisäksi ainakin Destia Rail Oy:llä.

Bmo-vaunu on kuvan 5.51 mukainen sepelin kuljetukseen käytetty vaunu. Vaunuja voidaan liittää peräkkäin muutamia tai jopa useita kymmeniä työkohteen laajuudesta riippuen. Sepelinjakelu raiteeseen Bmo-vaunulla ei ole kovin optimoitua jakelun tapahtuessa luukkujen avulla suoraan vaunun alapuolelle.



Kuva 5.51. Raidesepelin kuljetukseen ja jakamiseen tarkoitettuja Bmo-vaunuja Mäntyharjulla vuonna 2006. Muokattu lähteestä [99]

Etvsa-vaunu (kuva 5.52) on hyvin Bmo-vaunun kaltainen yksikkö sillä erotuksella, että kyseisen vaunutyyppin päissä on lisäksi yksinkertaiset sepeliaurat tukikerrosmateriaalin tasaisempaa levittämistä varten.



Kuva 5.52. Etvsa-vaunu Joensuussa vuonna 2007. Muokattu lähteestä [100]

Parhaat sepelinjakeluominaisuudet omaava sepelöntiyksikkö lienee Uad-vaunu (kuva 5.53), sillä sen avulla tukikerrosmateriaali voidaan jakaa hihnakuuljettimilla tasaisesti ja hallitusti sekä raiteen keskelle että sen reunoille.



Kuva 5.53. Uad-sepelöntivaunu Pitäjänmäellä vuonna 2000. Vaunun alta kääntyvä hihnakuuljetin näkyvissä vaunun keskellä. Muokattu lähteestä [101]

5.7.2 Sepeliaurat

Sepeliauroilla, hieman konetyypistä riippuen, voidaan muotoilla tukikerroksen poikkeileikkaus vaatimusten mukaiseksi. Nykyaikainen sepeliaura sisältää varsinaisten aurojen lisäksi usein myös sepeliharjan tai -harjoja sekä mahdollisesti myös esimerkiksi 4–10 m³ siilon, jonka avulla ylimääräinen sepeli voidaan kerätä talteen tai sepeliä voidaan toisaalta myös lisätä vajaisiin kohtiin. Osa sepeliauroista soveltuu ainoastaan linjaraitteen tukikerroksen muotoiluun ja osa sekä linjaosuuksien että vaihteiden tukikerroksen muotoiluun siten, että koneissa on omat vaihdettavat harjansa linjaraitteille ja vaihteille. Suomen rataverkolla sepeliauroja on käytettävissä VR Track Oy:n lisäksi ainakin Destia Rail Oy:llä (kuva 5.54.) ja Komsor Oy:llä (kuva 5.55).



Kuva 5.54. Destia Rail Oy:n sepeliäura Plasser & Theurer SSP 110 SW (Tsl 91021) Kouvolassa vuonna 2006. Koneen työskentelysuunta kuvassa oikealle. Muokattu lähteestä [102]



Kuva 5.55. Komsor Oy:n sepeliäura Plasser & Theurer SSP 203 (Tsl 99109425001) Kontiomäellä vuonna 2014. Koneen työskentelysuunta kuvassa oikealle. Muokattu lähteestä [103]

VR Track Oy:llä on käytössä ainakin 7 sepeliäuraa, joista yleisimmät konetyypit ovat Plasser & Theurer PBR 400U RS (kuva 5.56) ja Plasser & Theurer USP 2000 SWS (kuva 5.57).



Kuva 5.56. Sepeliaura Plasser & Theurer PBR 400U RS (Tsl 890) Tampereella vuonna 2014. Koneen työskentelysuunta kuvassa oikealle. Muokattu lähteestä [104]



Kuva 5.57. Sepeliaura Plasser & Theurer USP 2000 SWS (Tsl 884) Jyväskylässä vuonna 2003. Koneen työskentelysuunta kuvassa vasemmalle. Muokattu lähteestä [105]

Kunnossapitotuntojen yhteydessä, kun ei tehdä suuria nostoja tai lisäsepelöintiä, myös pelkkä harjaus tukemiskoneen tai sepeliauran harjalla voi olla riittävä toimenpide. Suurempien nostojen ja tukikerroksen muotoilun yhteydessä on lisäksi aurattava. [2]

6 Yhteenveto ja päätelmät

Radan geometrisen kunnan arviointi ja tukemistarpeen määrytyminen

Tämän raportin aluksi tarkasteltiin radan geometrisen kunnan mittaamenetelmiä, radan geometrisen kunnan arvioinnissa käytettyjä suureita sekä tukemistarpeen määrytymistä suureille määritettyjen virheluokkien ja raja-arvojen perusteella. Radan absoluuttisen geometrian mittaamiseksi on maailmalla kehitetty lukuisia erilaisia mittaavaunujen ja kiintopistejärjestelmien yhdistelmiä. Suomessa ehdottomasti käytetyin absoluuttisen raidegeometrian mittaamenetelmä on takymetri, mutta ainakin yhdellä toimijalla Suomessa on käytössään myös radalla työnnettävä mittavaunu. Takymetrimittausta käytetään erityisesti nuotitusmittauksissa ja radan rakentamisessa. Tukemistarpeen toteuttamisen näkökulmasta tärkein menetelmä ovat VR Track Oy:n radantarkastuspalveluiden radantarkastusvaunu EMMALLA (P&T EM 120) tekemät radantarkastusajot, joita tehdään pääraiteilla 2–6 kertaa vuodessa. Radantarkastusvaunu mittaa radan geometriaa suhteellisena mittakantamittauksena 12 metrin (5+7) mittakannalla. Tarkastustuloksia voidaan laskennallisesti tarkastella myös kyseistä mittakantaa lyhyemmällä tai pidemmällä aallonpituusalueilla, mutta tarkasteltavien aallonpituuksien laajentamisessa käytetyt laskentamenetelmät eivät ole yleisesti tiedossa. Suomessa ei raidegeometrian suureille ole, standardista EN 13848-5 poiketen, määritetty raja-arvoja aallonpituusalueittain, vaan tarkastelu keskittyy lähinnä lyhyemmän aallonpituuden virheisiin. Kuitenkin liikennöintinopeuksien kasvaessa myös aallonpituudeltaan pidempien virheiden tarkastelu olisi varsinkin matkustusmukavuuden näkökulmasta suositeltavaa. Suomen rataverkolla tukemistarvetta syntyy sekä uudisrakentamisen ja perusparannusten vaatiman tukemistyön kautta että radantarkastusajoissa todettujen virheiden korjaamistarpeen myötä. Erityisesti uudisrakentamisesta, perusparannuksista ja sepelinpuhdistuksista syntyvä tukemistarve saattaa vaihdella vuosittain huomattavasti. Myös kunnossapitotulojen vuosittaisen määrän arviointi on hankalaa.

Tuottojen dokumentointi

Tämän raportin yhteydessä ei saavutettu täyttä selvyyttä siitä, miten ja millä tarkkuudella tehdyt tuennat dokumentoidaan ja arkistoidaan. Koko rataverkon tuentatietoja ei ainakaan systemaattisesti kerätä rekisteriin. Ainakin tukemiskoneiden työnjäljenpiirturitulosteita kerätään kunnossapitäjien toimesta siltä osin, kun niitä on uudempien tukemiskoneiden osalta saatavilla, mutta tulosteiden jatkokäytöstä ei ole tarpeeksi tietoa. Lisäksi rataosien läpituontitarvetta arvioidaan radantarkastustulosten pidemmän aikavälin tarkasteluun perustuen. Tämän tutkimusprojektin raideosien kunnan ja tukemistyön vaikutusten pysyvyyden yhteyttä tarkastelevaa osuutta varten kerättiin kunnossapitotiedot eräältä rataosalta suunnilleen viimeksi kuluneen vuosikymmenen ajalta. Saatujen tietojen perusteella dokumentointia tehdään ainakin jollain tasolla, mutta valtaosin dokumentointi käsittää vain tiedon tuetusta raideosuudesta ratakilometreihin perustuen ja tukemisajankohdan. Aidosti suunnitelmallisen ja elinkaarialoudellisen kunnossapitotoiminnan näkökulmasta tulisi kaikki tukemistyöhön liittyvät tekijät dokumentoida koko rataverkon laajuudessa. Tällaiseen rekisteriin tulisi yleisellä tasolla sisällyttää kultakin tukemiskerralta ainakin alla luetellut asiat. Esitellyn kaltainen rekisteri yhdistettynä esimerkiksi päällysrakenteen komponenttien tyyppi-, ikä- ja kulumistietoihin sekä alusrakenteen ja pohjamaan ominaisuustietoihin mahdollistaisi ideaalitapauksessa ja pitkällä aikavälillä jo varsin sofistikoituneen kunnossapitotietojärjestelmän olemassaolon ja kunnossapitotoiminnan ennakointivuuden ja suunnitelmallisuuden kehittämisen koko ratarakenteen elinkaaren ajan koko rataverkon laajuudessa.

- Tiedot tukemistarpeen toteamisessa käytetyistä menetelmistä ja valistunut arvio tukemistarpeeseen johtaneista syistä eli käytännössä vähintään radan-tarkastustulokset.
- Valittu ja käytetty tukemistyömenetelmä sekä perusteet sen valinnalle.
- Tarkkuusmenetelmän tapauksessa absoluuttisen geometrian sisältävä nuotitusmittaustiedosto sekä sen pohjalta tehty nuotitus tukemista varten. Lisäksi tulisi ilmetä mihin geometriaan tehty nuotitus pohjautuu.
- Käytetty tukemiskone, sen tyyppi ja käytetyt tukemisparametrit sekä perusteet parametrien valinnalle.
- Tukemiskoneen työnjäljenpiirturin tuloste ja jonkinasteinen tulkinta tuloksista.
- Tukemistyön tehon todentaminen, vähintään seuraavan radantarkastuskerran tulokset ja mahdollisesti erilliset tarkemittaustulokset,
- Tiedot mahdollisesta lisäsepelöinnistä ja tukikerroksen muotoilusta.

Tukemisen peruserä ja tukemisparametrit

Luvun 3 aluksi esiteltiin tukemistyön peruserä sen eri vaiheineen. Kirjallisuustutkimuksen perusteella tukemishakkujen puristusvaihe on tukemisella saavutettavan hyödyn näkökulmasta merkittävien. Kahden suurimman tukemiskonevalmistajan, Plasser & Theurerin ja Matisan, tukemisyksiköiden toimintaperiaatteet poikkeavat toisistaan siten, että P&T:n tukemiskoneissa tukemishakut värähtelevät vaakasuunnassa 35 Hz:n taajuudella ja Matisan koneissa hakkujen liike on elliptinen värähtelytaajuuden ollessa 42 Hz. Kirjallisuustutkimuksen perusteella ei voitu todeta kummankaan periaatteen olevan ylivoimainen toiseen nähden. Yleisesti voidaan nyt tehtyyn kirjallisuustutkimukseen perustuen todeta, että melko korkeiden, 35...45 Hz, tukemishakkujen värähtelytaajuuksien käytöllä saavutetaan paras lopputulos. Tukemisparametrien optimoinnin näkökulmasta mielenkiinto kohdistuu tukemispaineeseen, puristusajkaan ja tukemissyvyyteen sivuttaissiirto- ja nostoarvojen määräytyessä raiteessa olevien virheiden kautta. Nostoarvoja tarkasteltaessa tulisi kuitenkin huomioida, että noin alle 20 mm nostojen ei kirjallisuustutkimuksen perusteella voi ennakoita olevan kovin pysyviä. Haastatteluiden ja kirjallisuuslähteiden perusteella tämä on myös Suomen rataverkon kunnossapidossa varsin hyvin tiedostettu. Kotimaisten kirjallisuuslähteiden perusteella uudella tai puhdistetulla tukikerroksella voidaan ja tulisi käyttää pienempiä tukemispaineen (95–110 bar) ja puristusajan (noin 0,8 s) arvoja ja hienontuneemmalle raidesepeleille jonkin verran suurempia (115–125 bar ja noin 1,2 s) arvoja, joista varsinkin tukemispaineen arvot ovat varsin hyvässä yhteisymmärryksessä UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaassa esitettyjen (ks. liite 1, sivut 4–5) Euroopan rataverkoilla käytössä olevien arvojen kanssa. On kuitenkin käynyt ilmi, että tukemispainetta ja puristusajaa ei Suomen rataverkon kunnossapidossa huomioida tai ainakaan yritetä optimoida läheskään kaikissa tapauksissa. Tosin tämä voi johtua myös puutteellisista tiedoista sepelin kuntoon liittyen. Ylläesitellyn kaltainen dokumentointijärjestelmä mahdollistaisi vähintään sepelin kunnan karkean arvioimisen sen iän sekä siihen kohdistettujen bruttotonnimäärien ja tukemiskertojen perusteella. Toinen mahdollisuus selvittää sepelitukikerroksen kunto laajemmassa mittakaavassa voisi olla maatumauksen hyödyntäminen tähänkin tarkoitukseen. Suomen käytännössä tukemissyvyyteen kiinteästi liittyvänä välyksenä ratapölkyn alapinnan ja tukemislappujen yläreunan välillä käytetään 15–20 mm, mikä on hyvin linjassa kirjallisuudessa esitettyjen arvojen kanssa. Tosin UIC:n parhaiden käytäntöjen oppaassa on joidenkin eurooppalaisten rataverkkojen osalta esitetty huomattavasti suurempiakin välyksen arvoja, mutta julkaisusta ei käy yksiselitteisesti ilmi mistä välyksellä tapauksessa mitataan. Tukemissyvyyden näkökulmasta Suomen rataverkon kunnossapidossa tulisi ennen kaikkea kiinnittää erityistä huomiota täsmälliseen tiedottamiseen kisko- tai

ratapölkkytyypin muutoksista tuettavalla alueella siten, että tukemiskoneen miehistö voi ennakoida nämä työskennellessään. Tämänhetkisessä Suomen käytännössä aina-kaan tarkat muutoskohdat eivät välttämättä ole tukemiskoneen miehistön tiedossa. Erityisesti tukemisyksikön operaattori ja miehistön kolmas jäsen tarkkailevat kyllä jatkuvasti päällysrakenteen komponentteja ja useimmiten huomaavat muutokset ajoissa, mutta hetkellisesti saatetaan, varsinkin pimeissä ja pölyisissä olosuhteissa, työskennellä virheellisellä tukemissyvyydellä komponenttityyppien muutosalueen lähistöllä, mikä pahimmillaan johtaa tukemishakkujen osumiseen ratapölkkyihin ja pölkkyjen vaurioitumiseen. Nyt tehdyn kirjallisuustutkimuksen perusteella suuremman kuin 15 - 20 mm välyksen käyttämisellä voitaisiin saavuttaa pysyvämpi tukemistyön lopputulos. Suuremman välyksen käytön vaikutusten tarkastelemiseksi tämän tutkimusprojektin yhteydessä tullaan aloittamaan koeosuusseuranta, jonka puitteissa suunnitellun 1200 metrin pituisesta koeosuudesta noin puolet tuetaan 20 mm välystä käyttäen ja puolet tätä suuremmalla välyksellä. Koeosuudella voidaan samalla seurata myös sepelin kunnan ja välyksen suuruuden yhteisvaikutusta, sillä koeosuuden alkuosassa tukikerroksen raidesepeleli on vuodelta 2005 ja loppuosassa vuodelta 1995. On huomioitava, että välystä ei voida kasvattaa loputtomiin tukemiskoneen rakenteesta ja tukikerroksen aiheuttaman hakkujen puristumisvastuksen kasvamisen takia.

Tukemistavat ja tukemistyömenetelmät

Suomen rataverkolla tehtävät tuennat on kunnossapidon organisoinnin helpottamiseksi jaettu kunnossapitotuentoihin ja läpituentoihin. Kunnossapitotuennalla käsitetään radantarkastuksissa havaittujen pistemäisten geometriavirheiden korjaamista siten, että varmistetaan turvallinen liikennöinti raiteella. Kunnossapitotuennassa tuettavan rataosuuden pituus on tyypillisesti alle 200 metriä, mutta alue voi olla pidempikin, jos korjataan esimerkiksi useampia lähekkäin sijaitsevia pistemäisiä virheitä tai jos virhe sijoittuu kaarteeseen alueelle. Kunnossapitotuennat tehdään tyypillisesti tukemiskoneen omaan mittakantaan perustuvalla suhteellisella tukemistyömenetelmällä. Myös tarkkuustyömenetelmää voidaan käyttää suurempien tarkkuusvaatimusten myötä geometrian pakkopisteiden, kuten esimerkiksi sillan, laiturin tai vaa'an, kohdalla. Läpituennalla tarkoitetaan vähintään 200 metrin mittaisen, usein merkittävästi tätä pidemmän, rataosuuden yhtäjaksoista tukemista, jossa raiteen nosto- ja sivuttaissiirtoarvot on suunniteltu eli ns. nuotitettu ennen tukemistyötä eli läpituenta tehdään aina tarkkuusmenetelmää käyttäen. Molempiin tukemistyömenetelmiin liittyy korjausarvojen syöttämistä esimerkiksi siirtymä- ja pystygeometrian pyöristyskaarissa. Nykyaikaisille tukemiskoneille voidaan syöttää jo ennakoon ratageometria-tiedot, joiden perusteella kone laskee korjausarvot ja syöttää ne tuettaessa automaattisesti. Tukemistyömenetelmällä saavutettavaan työnjälkeen liittyy perustavanlaatuisen ero. Luvuissa 3.4.1 ja 3.4.2 esitettyyn perustuen suhteellisella menetelmällä työskenneltäessä raiteen vaaka- ja pystygeometriaan jää jäännösvirheitä, joiden suuruus riippuu alkuperäisten virheiden suuruudesta. Tarkkuusmenetelmällä työskenneltäessä nosto- ja sivuttaissiirtoarvot on määritetty ennakoon nuotitusmittaukseen perustuen ja tarkkuusmenetelmän tuloksena saadaan nuotituksen mukainen virheetön raidegeometria. Suhteellisen menetelmän perustuen mittakantamittaukseen, sillä saadaan kunnollisesti korjattua virheitä vain tietyltä aallonpituusalueelta. Tarkkuusmenetelmällä työskenneltäessä myös pidemmän aallonpituuden virheet tulevat korjatuiksi. Nykykäytännössä on varsin perustellusti suhteellisen menetelmän käyttö sallittua pistemäisissä kunnossapitotuennoissa muilla kuin kunnossapitotasojen 1, 1A ja 1AA alaisilla rataosilla ja laajemmissa läpituennoissa myös alempien kunnossapitotasojen 5 ja 6 radoilla, muut linjaraiteiden ja vaihteiden sekä muiden pakkopisteiden läheiset tukemistyöt on tehtävä tarkkuusmenetelmää käyttäen.

Suunnitellun ylinoston käyttö kunnossapidossa

Luvussa 4.1.5 esiteltiin ns. suunnitellun ylinoston periaate, jossa ns. radan muistin mukaisesti enemmän painuneita raideosuuksia nostetaan yli tavoitegeometrian tason. Näiden ylinostettujen osuuskien oletetaan painuvan enemmän tukemisen jälkeisen liikennöinnin myötä, jolloin tuloksena saadaan tasainen raidegeometria. Suomessa Tunninen [2] on sivunnut suunniteltua ylinostoa stabilisaattorin käytön yhteydessä. Haastatteluiden perusteella suunniteltu ylinosto on kuitenkin kunnossapitokentässä jo käsitteenä vieras eikä sitä käytetä ainakaan stabilisointiin liittymättömissä tapauksissa, mikä voi osin johtua myös radan absoluuttisen geometrian kehittymistiedon puutteesta, jolloin ylinoston suuruuden suunnittelu on vaikeaa. Tuennan jälkeen nopeasti painuvien raideosuuksien kohdalla periaatetta voisi olla mahdollista kokeilla käytännössä siten, että tarvittavan ylinoston suuruus arvioitaisiin peräkkäisten tuentojen nuotitusmittaustiedoista sikäli kuin ne ovat saatavilla.

Vaihteiden tukeminen

Vaihteiden tuentaan liittyvät haasteet nousevat usein esiin keskusteluissa ja eri osapuolilta voi kuulla toteamuksia, kuten ”vaihteita ei osata tukea” tai ”vaihteita ei voi tukea hyvin”. On selvää, että vaihteiden tukeminen on linjaraiteiden tukemista haasteellisempää. Kokeilussa oleva uusi vaihdetyyppikään ei tuo ongelmiin nopeaa ratkaisua valtaosan rataverkkomme vaihteista säilyessä vielä pitkään vanhemman tyyppisinä. Luvussa 4.2 esitetyn lisäksi ja siihen perustuen harkitsemisen arvoista voisi olla eräänlaisen yleisesti julkaistavan ”Vaihteiden tukemisen parhaat toimintatavat ja käytännöt” -julkaisun kokoaminen. Julkaisuun tulisi kerätä parhaat kokemukset, käytännöt ja toimintatavat parhaan tietotaidon ja kokemuksen omaavilta radanpitäjän, kunnossapitajien, mittaajien ja vaihdevalmistajien sekä muiden sidosryhmien edustajilta.

Tukemiskalusto ja stabilisaattorit

Luvussa 5 esiteltiin tukemiskonetta yleisesti sekä yksityiskohtaisemmin Suomen rataverkolla toimivia linja- ja vaihteentukemiskoneita. Tukemiskonekanta Suomessa on VR:n 1950-luvulla hankkimien ensimmäisten linjatukemiskoneiden jälkeen kehittynyt siten, että nykyään rataverkollamme työskentelee pitkälti toistakymmentä linjatukemiskonetta ja toistakymmentä vaihteentukemiskonetta, jotka ovat kolmen eri toimijan omistuksessa. Valtaosa kyseisistä tukemiskoneista on hankittu tämän vuosikymmenen puolella. Käytettävän tukemiskonetyypin valintaan tukemistyötä suunniteltaessa kannattaa kiinnittää huomiota toisten koneiden soveltuessa paremmin esimerkiksi suurien nostojen tekemiseen sepelinpuhdistuskoneen jäljessä ja toisten kyteessä, suuremman työsaavutuksen lisäksi, vaivattomammin nostamaan raskasta nykyaikaista betonipölkkyraidetta esimerkiksi kunnossapitotöissä. Maailmalla on paikoin käytössä jonkin verran Suomessa olevia koneita kehittyneempiä tukemiskoneita, mutta niiden edut verrattuna Suomen koneisiin liittyvät pääosin suurempaan työsaavutukseen ja esimerkiksi parempaan työskentelymukavuuteen. Tukemistyön tulosten laadun näkökulmasta Suomen uusimmat tukemiskonetyypit lienevät samantasoisia luvuissa 5.4.2 ja 5.5.2 esiteltyjen viimeisimpien konetyyppien kanssa. Raportin loppupuolella esiteltiin lisäksi stabilisaattorin käytön periaatteita ja vaikutuksia. Suomessa Plasser & Theurerin valmistamia DGS 62 N -stabilisaattoreita on käytössä kaksi 1990-luvulla hankittua kappaletta ja ne molemmat omistaa VR Track Oy. Kirjallisuustutkimuksen perusteella stabilisaattorin käytön hyödyt eivät kaikissa tapauksissa ole täysin yksiselitteisiä, mutta stabilisoinnin tukemisen aiheuttamaa raiteen sivuttaisuuntaisen vastuksen alentumista palauttava vaikutus on kiistaton.

Loppupäätelmät ja tutkimusprojektin seuraava vaihe

Tämän kirjallisuustutkimuksen loppupäätelmänä voidaan todeta optimaalisen tukemistyöprosessin perustuvan ennen kaikkea tukemiskoneiden virheettömään toimintaan ja sekä geometria- että nuotitusmittausten oikeellisuuteen. Takymetrimittausten kohdalla oikeellisuus on vahvasti riippuvainen käytettyjen kiintopisteiden laadusta. Radantarkastusajoilla on niin merkittävä, jopa hallitseva, vaikutus vuosittain tehtävien tuentojen kohdentamiseen, että mittakantaperusteisen mittauksen tulostenkäsittelyn yhteydessä käytettävän laskennallisen muuntofunktion tulisi kyetä korjaamaan mittakantamittauksessa muodostuvat vääristymät. Tukemiskoneiden toiminnan oikeellisuus on jo nyt pyritty varmistamaan vuosihuolloilla ja -kalibroinneilla. Tämän lisäksi tulisi aina pyrkiä valitsemaan kulloiseenkin kohteeseen parhaiten soveltuva tukemiskonetyyppi. Vasta edellä mainittujen tekijöiden ollessa kunnossa on järkevää kiinnittää huomiota tukemisparametritason tekijöihin. Tukemisparametrien, erityisesti tukemispaineen ja puristusajan sekä mahdollisesti myös tukemissyvyyden optimoinnin mahdollistamiseksi tulisi päällysrakenteen ominaisuustietojen olla käytettävissä tukemiskoneessa. Samalla on pyrittävä varmistamaan riittävän suuren minimoston käyttämisestä niissä kohdin kuin se on mahdollista.

Tämän tutkimusprojektin seuraava vaihe tulee olemaan raideseppelin kunnan ja tukemistoimien vaikutusten pysyvyyden välisen yhteyden selvittäminen mittavin kenttäkoejärjestelyin. Kyseisen koeosuusseurannan tarkemmat tiedot ja sen tulokset julkaistaan aikanaan omana raporttinaan.

Lähteet

1. Selig, E. T. & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. 407 p.
2. Tunninen, N. (2010). Raiteen ja vaihteen tukemisen parhaat tukemistavat, Luonnos 01/2010. Liikennevirasto, Rautatieosasto, Rataverkkoyksikkö. Helsinki 2010. 59 s.
3. Lichtberger, B. (2011). Track Compendium. 2nd edition. Hamburg, Germany 2011, DW Media Group GmbH. 621 p.
4. Aalto, P. (1999). Raiteen tukemisen yleiset laatuvaatimukset. Insinöörityö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. 31 s. + liitt. 8 s.
5. Marbach, J. (2000). Improving the durability of railway track structures. Rail Engineering International, Volume 29, Issue 3. pp. 4-7.
6. Liikennevirasto. (2013). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 14, vaihteiden tarkastus ja kunnossapito. Liikenneviraston ohjeita 7/2013. Helsinki 2013. 27 s. + liitt. 20 s.
7. Ratahallintokeskus. (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 15, radan kunnossapito. Helsinki 2002. 63 s.
8. Liikenneviraston www-sivut. Rataverkon kunnossapito. Saatavissa: http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/kunnossapito/rataverkon_kunnossapito/P%0E4%0E4ratojen%20kunnossapitotasot%20vuonna%202013.pdf Viitattu: 11.10.2013
9. Ratahallintokeskus. (2006). Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 13, radan tarkastus. Helsinki 2006. 51 s. + liitt. 23 s.
10. Ratahallintokeskus. (2005). Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. Helsinki 2005. 22 s. + liitt. 4 s.
11. VR Track Oy:n www-sivut. Radantarkastus. Saatavissa: <http://www.vrtrack.fi/fi/index/kalusto/radantarkastus.html> Viitattu: 14.10.2013
12. Levomäki, Matti. Radantarkastusjärjestelmä. Helsinki 2.5.2013. Liikennevirasto. Rautatiesuunnittelun erikoisopinjakson (RASU II) luentoaineisto. Julkaisematon. 49 s.
13. Esveld, C. (2001). Modern railway track. 2nd edition. Delft, The Netherlands 2001, MRT-Productions. 654 p.
14. Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. (2013). Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. 190 s. + liitt. 4 s.

15. SFS-EN 13848-1. Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 1: Ratageometrian kuvaus = Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 1: Characterisation of track geometry. Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto. 19 s. + liitt. 6 s.
16. SFS-EN 13848-4. Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 4: Measuring systems. Manual and lightweight devices. Helsinki 2012, Suomen standardisoimisliitto. 19 p. + 10 app.
17. SFS-EN 13848-5 + A1. Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 5: Geometric quality levels. Plain line. Helsinki 2010, Suomen standardisoimisliitto. 15 p. + 7 app.
18. Ratojen tarkastusta tehostetaan uudella mittausvaunulla. Rautatietekniikka 19(2007)3, s. 6-7.
19. Liikenneviraston www-sivut. Rautatiet. Saatavissa: http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/liikenneverkko/rautatiet/Suurimmat_sallitut_nopeudet_31122010.jpg Viitattu: 28.10.2013
20. Plasser & Theurer www-sivut. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/en/company/history.html> Viitattu: 8.1.2014.
21. Topparoikasta satelliittikoneeseen. Rautatietekniikka 3/2011. s. 22-26.
22. Moore, K. A. (1982). Commonly used mechanised track maintenance equipment and its possible application in the sugar industry. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists. pp. 373-381.
23. Noranta, V. VR-Rata Oy:n uusi Plasser&Theurer 09-3X linjatukemiskone. Rautatietekniikka 4/2006. s. 8-9.
24. Suomen Raitiotiesseura Ry:n www-sivut. Metro Helsinki, Metrokalusto. Saatavissa: <http://www.raitio.org/metro/kalusto/matisa/matisa.htm> Viitattu: 24.1.2014
25. Plasser & Theurer www-sivut. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/es/newsletter/1309-01.htm> Viitattu: 24.1.2014
26. Resiina-lehden Tasoristeys-palsta 3/2008. Saatavissa: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/13> Viitattu: 24.1.2014
27. Destia Oy:n www-sivut. Rata, Ratakalustomme, Linja- ja vaihdetukemiskoneet. Saatavissa: <http://www.destia.fi/fi/palvelut/rata/ratakalustomme/linja-ja-vaihdetukemiskoneet.html> Viitattu: 24.1.2014
28. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja: Olavi Huotari. Julkaistu: 17.8.2005. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/16016> Viitattu: 28.1.2014
29. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja: Robert Sand. Julkaistu: 7.7.2009. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/57226> Viitattu: 27.11.2014

30. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Jarmo Pyytövaara. Julkaistu: 2.10.2008. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/52245> Viitattu: 30.1.2014
31. Resiina-lehden Tasoristeys-palsta 1/2009. Kalustomuutokset VR:llä marras-tammikuussa 2008-2009, poistettu kalusto. Saatavissa: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/15> Viitattu: 30.1.2014
32. Resiina-lehden Tasoristeys-palsta 1/2012. Kalustomuutokset marras-tammikuussa 2011-2012, romutetut. Saatavissa: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/79> Viitattu: 30.1.2014
33. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Pauli Ruonala. Julkaistu: 30.12.2008. Saa-tavissa: <http://vaunut.org/kuva/54100> Viitattu: 30.1.2014
34. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Esa Keski-Petäjä. Julkaistu: 3.11.2006. Saa-tavissa: <http://vaunut.org/kuva/30977> Viitattu: 30.1.2014
35. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Esa Keski-Petäjä. Julkaistu: 4.11.2006. Saa-tavissa: <http://vaunut.org/kuva/31044> Viitattu: 30.1.2014
36. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Itävuori. Julkaistu: 18.9.2008. Saa-tavissa: <http://vaunut.org/kuva/51890> Viitattu: 31.1.2014
37. Liikennevirasto. (2013). Rataverkon kuvaus 1.1.2014. Liikenneviraston väylä-tietoja 5/2013. Helsinki 2013. 72 s.
38. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Kari Syrjänen. Julkaistu: 9.8.2007. Saa-tavissa: <http://vaunut.org/kuva/40270> Viitattu: 31.1.2014
39. MATISAn www-sivut. Tamping technologies. Saatavissa: http://www.matisa.ch/brochure/en/technologie_bourreuses_en.pdf Viitattu: 26.2.2014
40. Perales, R., Saussine, G., Milesi, N. & Radjai, F. (2011). Numerical investiga-tion of the tamping process. 9th World Congress on Railway Research. May 22-26, 2011, Lille, France. 10 p.
41. Saussine, G., Azéma, E., Gautier, P.E., Peyroux, R. & Radjai, F. (2008). Numeri-cal modeling of the tamping operation by Discrete Element Approach. 8th World Congress on Railway Research, May 18-22, Seoul, Korea. 9 p.
42. Riessberger, K. & Wentz, R. (1993). Track Quality – Key to Load Bearing Ca-pacity and Efficient Maintenance. The Proceedings of 5th International Heavy Haul Railway Conference. June 1993, Beijing, China. pp. 349-361.
43. Saussine, G., Azéma, E., Perales, R. & Radjai, F. (2009). Compaction of Rail-way Ballast During Tamping Process: a Parametric Study. Powders and Grains 2009: Proceedings of the 6th International Conference on Microme-chanics of Granular Media, Volume 1145. pp. 469-472.

44. Kronenberg, G. (1961). Untersuchungen über die Verdichtungswirkung und das Arbeitsverhalten eines Einmassenrüttlers auf Schotter und Kiessand zur Ermittlung der maßgeblichen Einflußgrößen bei der Rüttelverdichtung. Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen 977. 96 s.
45. International Union of Railways (UIC). (2008). Best practice guide for optimum track geometry durability. Infrastructure Department, Track experts group. 64 p. + 48 app.
46. Paderno, C. (2010). Comportement du ballast sous l'action du bourrage et du trafic ferroviaire. Thesis No. 4697. École Polytechnique Fédérale De Lausanne (EPFL), À La Faculté Environnement Naturel, Architectural Et Construit. 143 p. + 18 app.
47. Paderno, C. (2012). Improving ballast tamping process. Julkaisematon esitysmateriaali. 18 p.
48. Paderno, C. (2011). Improving ballast tamping process. 9th World Congress on Railway Research. May 22-26, 2011, Lille, France. 6 p.
49. Paderno, C. (2009). Simulation of ballast behaviour under traffic and tamping process. 9th Swiss Transport Research Conference (STRC). Monte Verità / Ascona, September 9-11, 2009. 22 p.
50. Kearsley, E. P. & Van As, S. C. (1993). The Effect of Heavy Haul Traffic on Track Geometry Deterioration. The Proceedings of 5th International Heavy Haul Railway Conference. June 1993, Beijing, China. pp. 369-378.
51. Ratahallintokeskus. (1998). Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 19, jatkuvakiskoraiteet ja -vaihteet. Helsinki 1998. 34 s. + liitt. 3 s.
52. Fischer, J. (1983). Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter. PhD Thesis, Technische Universität Graz, Österreich.
53. Esveld, C. (1979). The performance of lining and tamping machines. Rail International, Volume 10, Issue 12. pp. 881-892.
54. Esveld, C. (1978). Comparison between Theoretical and Actual Transfer Functions of Track Maintenance Machines. Sc.D. Thesis. Department of the Civil Engineering, Warsaw Technical University. 99 p. + 40 app.
55. Ratahallintokeskus. (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11, radan päällysrakenne. Helsinki 2002. 87 s. + liitt. 26 s.
56. SFS-EN 13450 + AC. Raidesepelikiviainekset = Aggregates for railway ballast. Helsinki 2002, Suomen standardisoimisliitto. 11 s. + liitt. 20 s.
57. Ratahallintokeskus. (2004). Standardin SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje. Helsinki 2004. 7 s.

58. Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskus. Kunnossapitoyksikkö. Helsinki 2004. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. 193 s.
59. Australian Rail Track Corporation Ltd (ARTC). (2007). Ballast Specification. Engineering Standard. 6 p.
60. RailCorp. (2013). Engineering Specification, Ballast. 7 p.
61. Ratahallintokeskus. (2008). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 13, radan rakenne. Helsinki 2008. 50 s. + liitt. 35 s.
62. Fair, P. I. & Anderson, W. F. (2003). Railway track maintenance using the Stoneblower. Proceedings of the ICE, Volume 156, Issue 3. pp. 155-167.
63. Proacon Oy:n www-sivut. Mobiili radanmittaus. Saatavissa: <http://www.proacon.fi/palvelumme/radanmittaus/> Viitattu: 7.10.2014.
64. SFS-EN 13848-6. Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 6: Characterisation of track geometry quality. Helsinki 2014, Suomen standardisoimisliitto. 18 p. + 11 app.
65. Plasser India www-sivut. Machines. Saatavissa: <http://www.plasserindia.com/en/machines/09-32-csm.htm> Viitattu: 15.10.2014
66. Liikennevirasto. (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 2, Radan geometria. Liikenneviraston ohjeita 3/2010. Helsinki 2010. 73 s. + liitt. 9 s.
67. Ratahallintokeskus. (2009). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 17, Radan merkit. Helsinki 2009. 110 s. + liitt. 7 s.
68. Ratahallintokeskus. (1999). Päälysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset (PYL), osa 3, Vaihdetyöt. Ratahallintokeskuksen julkaisuja D 5. Helsinki 1999. 23 s.
69. Prud'Homme, A. (1975). Forces and behavior of railroad tracks at very high train speeds; standards adopted by SNCF for its future high speed lines (250 to 300 km/h). Proceedings of Symposium on Railroad Track Mechanics and Technology, Princeton, NJ, USA, 21-23 April 1975. pp. 79-108
70. Esveld, C. (1978). Comparison between theoretical and actual transfer functions of track maintenance machines. Doctoral thesis. Department of Civil Engineering, Warsaw Technical University, Poland. 99 p. + 41 app.
71. Nippon Plasser www-sivut. Machine Control. Saatavissa: <http://www.nipponplasser.co.jp/en/production/elektronik.htm> Viitattu: 6.11.2014
72. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). (1972). Rakennuskoneet. 948 s.
73. Liikenteen turvallisuusvirasto (Trafi). Kalustorekisteriote. Tilanne 20.5.2014.

74. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Itävuo. Julkaistu: 11.12.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/31905> Viitattu: 11.11.2014
75. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Esa Keski-Petäjä. Julkaistu: 4.11.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/31050> Viitattu: 11.11.2014
76. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Piirainen. Julkaistu: 17.8.2007. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/40710> Viitattu: 11.11.2014
77. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Jorma Rauhala. Julkaistu: 4.11.2010. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/66410> Viitattu: 11.11.2014
78. Resiina-lehden Tasoristeys-palsta 3/2010. Saatavissa: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/55> Viitattu: 12.11.2014
79. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Mikko J. Putkonen. Julkaistu: 7.12.2013. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/88360> Viitattu: 12.11.2014
80. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Ari Lindroos. Julkaistu: 16.10.2011. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/71970> Viitattu: 12.11.2014
81. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Simo Toikkanen. Julkaistu: 13.9.2013. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/86223> Viitattu: 12.11.2014
82. Plasser American www-sivut. Machines & Systems. Saatavissa: <http://www.plasseramerican.com/en/machines-systems/tamping-09-4x-dynamic-tamping-express.html> Viitattu: 12.11.2014
83. Plasser & Theurer www-sivut. Continuous-action tamping machines for tracks. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/es/newsletter/1409-02.htm> Viitattu: 12.11.2014
84. Plasser & Theurer www-sivut. Machines & Systems. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/en/machines-systems/tamping-109-4x-dynamic.html> Viitattu: 12.11.2014
85. Plasser & Theurer www-sivut. Machines. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/iaf2013/en/092xsd.html> Viitattu: 13.11.2014
86. Plasser American www-sivut. Machines & Systems. Saatavissa: <http://www.plasseramerican.com/en/machines-systems/tamping-09-2x-cat.html> Viitattu: 13.11.2014
87. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Timo Keski-Petäjä. Julkaistu: 28.9.2013. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/86570> Viitattu: 27.11.2014
88. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Perttu Karttunen. Julkaistu: 10.7.2013. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/84425> Viitattu: 27.11.2014
89. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Itävuo. Julkaistu: 26.5.2014. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/92881> Viitattu: 27.11.2014

90. Resiina-lehden Tasoristeys-palsta 2/2012. Saatavissa: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/80> Viitattu: 27.11.2014
91. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Miitre Timonen. Julkaistu: 29.9.2014. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/96229> Viitattu: 27.11.2014
92. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Mikael Falin. Julkaistu: 7.10.2014. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/96370> Viitattu: 27.11.2014
93. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Kari Syrjänen. Julkaistu: 9.8.2007. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/40268> Viitattu: 27.11.2014
94. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Jani Niemelä. Julkaistu: 4.10.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/30087> Viitattu: 27.11.2014
95. Plasser & Theurer www-sivut. Machines & Systems. Universal Tamping Machines. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/en/machines-systems/tamping-unimat-09-475-4s-n-dynamic.html> Viitattu: 27.11.2014
96. Plasser & Theurer www-sivut. Saatavissa: <http://www.plassertheurer.com/pics/nl/1309-02-04-big.jpg> Viitattu: 27.11.2014
97. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Esa Keski-Petäjä. Julkaistu: 3.11.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/30980> Viitattu: 28.11.2014
98. Strabag Rail www-sivut. Equipment. Track Stabilisation. Saatavissa: http://www.strabag-rail.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGBAHNBAU.COM-gleisstabilisierung.html#?men1=3&sid=365&h=3 Viitattu: 28.11.2014
99. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Mika T. Polamo. Julkaistu: 15.8.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/28384> Viitattu: 1.12.2014
100. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Piirainen. Julkaistu: 15.4.2007. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/35789> Viitattu: 1.12.2014
101. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Jukka Tölkö. Julkaistu: 21.1.2008. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/45272> Viitattu: 1.12.2014
102. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Pasi Seppälä. Julkaistu: 5.5.2006. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/24767> Viitattu: 1.12.2014
103. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Heikki Itävuo. Julkaistu: 21.8.20014. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/95417> Viitattu: 1.12.2014
104. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Timo Keski-Petäjä. Julkaistu: 6.6.2014. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/93202> Viitattu: 2.12.2014
105. Vaunut.org www-sivusto. Kuvaaja Mika Hirvonen. Julkaistu: 23.6.2003. Saatavissa: <http://vaunut.org/kuva/1696> Viitattu: 2.12.2014

106. Plasser & Theurer www-sivut. Publications. The EM-SAT 120 Track Survey Car, an intergrated part of the track geometry data base of the Austrian Federal Railways ÖBB. Saatavissa:
http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/rtr_0402.pdf Viitattu: 8.12.2014
107. Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. "Mechanism & effects of railway ballast degradation", EURAILmag, Issue 24, Blue Line & Bro, Paris, France. 128-134, 2011.
108. ERRI, European Rail Research Institute, "Determining the criteria for ballast durability using triaxial tests", ERRI Report D182/ RP3, Utrecht, 71 p., 13 app., 1994.
109. Han, X. & Selig, E.T. "Effects of fouling on ballast settlement", in "Proceedings of the 6th International Heavy Haul Railway Conference", Cape Town, South Africa, April, 257-268, 1997.

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
SPEED	CONVENTIONAL	< 160kph	< 200kph	< 160kph	< 200kph	< 160kph	< 220kph	< 200kph	< 160kph	< 220kph	< 160 kph
	HIGH	> 160kph	> 200kph	> 160kph	> 200kph		> 220kph	= 200kph	> 160 kph	> 220kph	= 210 kph
GEOMETRY VALIDATION	RECORDING COACH	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	BLACK BOX									YES	
	INSPECTION ENGINEER		YES	YES	YES	YES		YES	YES		
	INSPECTION SUPERVISOR		YES	YES	YES	YES		YES	YES		YES
	INSPECTION PATROLMAN		YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES		
TRACK QUALITY VALIDATION	RECORDING COACH	YES	YES		YES	YES		YES	YES		YES
	BLACK BOX		YES				YES			YES	
	INSPECTION ENGINEER		YES		YES	YES		YES	YES	YES	
	INSPECTION SUPERVISOR		YES		YES	YES		YES	YES	YES	
	INSPECTION PATROLMAN		YES		YES	YES		YES	YES	YES	
TRACK POSITION VALIDATION	RECORDING COACH		YES	YES	YES	YES			YES		YES
	MEASURING TRAIN	YES	YES	YES	YES						
	MANUAL SURVEY		YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	
TRACK STANDARDS CONVENTIONAL SPEED	BALLAST DEPTH	300 mm	250 - 300 mm	300 mm	300 mm	350 mm	250 mm	300 mm +	450 - 550 mm	300 mm	350 mm
	SLEEPER SPACING	600 mm	600 mm	600 mm	600 mm	600 mm	600 mm	610 mm to 760 mm		600 mm	600 mm
	RAIL SECTIONS	54 - 60 kg/m ²	UIC 54 - 60	UIC 60 E2	UIC 54-60	UIC 48,54,60	SNCF U50	95BH, 98 - 113lbs FB	49 E1, 54 E2, 60 E1	UIC 60, 50 T, 60 E1, 50 E2	49E1, 54E3, 60E1

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
TAMPING FREQUENCY /yr	CONVENTIONAL	0.16 - 0.2	0.4 - 1 PER Km	WHEN REQUIRED	WHEN REQUIRED		15%	0.5 - 1	0.05 - 0.3	66%	0.3
	HIGH SPEED	WHEN REQUIRED	WHEN REQUIRED	WHEN REQUIRED	WHEN REQUIRED		60%	0.25	0.05 - 0.3	30%	0.2
TAMPING INTERVEN- TION TRIGGERS	% PLANNED	90 - 95%	93 - 94%	MOSTLY		90%	80%	75%	99%	80%	80 %
	% NOT PLANNED	5 - 10%	6 - 7%	SOME		10%	20%	25%	1%	20%	20 %
SITE PREP FOR TAMPING SHIFT	PRE SURVEY	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	BALLAST DROP	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	REMOVAL OF OBSTACLES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
SITE SURVEY	FULL SURVEY, TOTAL STATION	YES	YES	YES	YES	SOME	YES	SOME	YES		SOME LINES
	ABSOLUTE, CO-ORDINATE BASED	YES	YES	YES	YES	SOME	YES	WCML ONLY	YES		SOME LINES
	RELATIVE, OFFSET VALUES TO DATUM RAIL		YES	YES	YES	YES		YES	NO	YES	YES
	CLEARANCES						YES	YES			
	ALC							YES			
	EM-SAT							YES	YES		

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
TAMPING METHODO- LOGY CONVEN- TIONAL LINE SPEED	<i>NORMAL METHOD OF TAMPING</i>	ABSOLUTE	ABSOLUTE	RELATIVE	ABSOLUTE AND RELATIVE	RELATIVE	RELATIVE	RELATIVE	ABSOLUTE	Relative	ABSOLUTE OR RELATIVE
	<i>SINGLE / DOUBLE TAMP</i>	DOUBLE	DOUBLE	DEPENDS ON LIFT	DOUBLE	NORMALLY SINGLE	SINGLE	SINGLE	ABSOLUTE AND RELATIVE	SINGLE	DEPENDS ON LIFT
	<i>ABSOLUTE TAMP FOLLOWED BY SMOOTH TAMP</i>	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		NO
	<i>MINIMUM TRACK LIFT</i>	15mm	20mm	10mm	10mm	10mm	2 - 5mm	10mm	8mm	5 - 10mm	20 mm
	<i>MAXIMUM TRACK LIFT</i>	50mm	60mm	25 mm SINGLE 40 mm DOUBLE	50mm	50mm	50mm	25mm	60mm	AROUND MINIMUM VALUES	30 mm
	<i>DTS USE</i>	NO	NOT NORMALLY USED	NO	AFTER TAMP	Occasionnaly	AFTER RENEWALS	NOT NORMALLY USED	BEFORE RENEWALS	after renewals	NOT NORMALLY USED
	<i>DTS EFFECT ANALYSED?</i>	NO	YES	YES	20,000 / 100,000 TONNES	YES		YES	YES	NO	NO (~ 50 000 TONNES)
	<i>WHEN IS EXTRA BALLAST DROPPED</i>	BEFORE TAMP	BEFORE TAMP	YES	BEFORE & AFTER TAMP	BEFORE AND AFTER TAMP	BEFORE TAMP	AFTER TAMP	BEFORE TAMP	BEFORE AND AFTER TAMP	BEFORE OR AFTER TAMP
	<i>SQUEEZE TIME</i>	1sec	3sec		VARIABLE	1.5 - 2 sec	1.2 - 1.6 sec	1 - 3 sec		0.8 - 1.2 sec	1 - 3 sec
	<i>SQUEEZE PRESSURE</i>		110 - 120 bar		90 - 140 bar	15 - 20 kN	Little significant	95 - 130 bar		110 bar	90 - 110 bar
	<i>TINE PENETRATION DEPTH</i>	30 mm BELOW SLEEPER	280 - 310 mm	20 mm BELOW SLEEPER	10 - 15 mm BELOW SLEEPER	10 - 20 mm BELOW SLEEPER	Great importance	350 mm "WOOD" 390 mm "concrete"	30 - 40 mm BELOW SLEEPER BOTTOM	70 mm + 10 mm	~ 80 mm BELOW SLEEPER BOTTOM
	<i>TINE WEAR LIMITS</i>		25% WEAR OF ORIGINAL TINE SURFACE	YES			Great importance		Visual inspection	VISUAL inspection	ESTIMATED (AFTER 20 % WEAR)
	<i>VIBRATION FREQUENCY</i>	35 - 45 Hz	35 - 40 Hz				35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
TAMPING METHODO- LOGY HIGH LINE SPEED	<i>NORMAL METHOD OF TAMPING</i>	ABSOLUTE	ABSOLUTE	RELATIVE	ABSOLUTE AND RELATIVE		Absolute and relative	Absolute and relative	Absolute	Absolute	Absolute
	<i>SINGLE / DOUBLE TAMP</i>	DOUBLE	DOUBLE	DEPENDS ON LIFT	DOUBLE		SINGLE	SINGLE	SINGLE AND DOUBLE	SINGLE AND DOUBLE	DEPENDS ON LIFT
	<i>ABSOLUTE TAMP FOLLOWED BY SMOOTH TAMP</i>	NO	NO	NO	NO		NO	Only on installation	NO	ONE POINT ABS	NO
	<i>MINIMUM TRACK LIFT</i>	15 mm	20 mm	10 mm	10 mm		2 - 5 mm	10 mm	8 mm	2 - 5 mm	20 mm
	<i>MAXIMUM TRACK LIFT</i>	50 mm	60 mm	25 mm	50 mm		50 mm	25 mm	60 mm	35 mm	50 mm
	<i>DTS USE</i>	NO	AFTER	YES	AFTER TAMP		AFTER TAMPING	after plain line renewals	before, renewals	after renewals	YES
	<i>DTS EFFECT ANALYSED?</i>	NO	YES	YES	20,000 /100,000 TONNES			YES	YES	NO	NO (~ 50 000 TONNES)
	<i>WHEN IS EXTRA BALLAST DROPPED</i>	BEFORE TAMP	BEFORE TAMP	YES	BEFORE & AFTER TAMP		BEFORE TAMP	AFTER TAMP	BEFORE TAMP	BEFORE AND AFTER TAMP	BEFORE OR AFTER TAMP
	<i>SQUEEZE TIME</i>	1sec	3sec		VARIABLE		1.2 - 1.6 sec	1 - 3 sec		0.8 - 1.2 sec	1 - 3 sec
	<i>SQUEEZE PRESSURE</i>		175 bar		90 - 140 bar		LITTLE SIGNIFICANT	95 - 130 bar		110 bar	90 110 bar
	<i>TINE PENETRATION DEPTH</i>	30 mm BELOW SLEEPER	280 - 310 mm	20 mm	10 - 15 mm BELOW SLEEPER		GREAT importance	350 mm "WOOD" 390 mm "concrete"	30 - 40 mm BELOW SLEEPER BOTTOM	70 mm + 10mm	~ 80 mm BELOW SLEEPER BOTTOM
	<i>TINE WEAR LIMITS</i>		25% WEAR OF ORIGINAL TINE SURFACE				GREAT importance		Visual inspection	Visual inspection	Estimated (AFTER 20 % WEAR)
<i>VIBRATION FREQUENCY</i>	35 - 45 Hz	35 - 40 Hz				35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	35 - 45 Hz	

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
WHAT SPECIFIES TYPE OF TAMPING MACHINE	COMPANY ALLIANCE					YES					
	STANDARDS / MACHINE SPECIFICATION	YES	YES				YES			YES	YES
	QUALITY OF OUTPUT										
	MANUFACTURER REPUTATION									YES	
MAINTENANCE TAMPING BY	CONTRACTORS	YES	YES	YES		YES	YES	YES	YES		YES
	SUB-CONTRACTORS							YES			
	IN-HOUSE		YES	YES	YES	YES	YES		YES	YES	YES
RENEWALS TAMPING BY	CONTRACTORS	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	SUB-CONTRACTORS							YES			
	IN-HOUSE		YES	YES		YES	YES		YES		
TAMPER CREW DUTIES	SPECIFIC CREW FOR TAMPER	YES	YES		NO	YES	YES	NO	NO	YES	YES
	MACHINE OPERATOR / MAINTAINER	Operator	Operator	Operator		Operator and maintainer	Operator and maintainer	Operator	Operator and maintainer	Operator and maintainer	Operator and maintainer
	INVOLVEMENT WITH REPAIRS	SOME	1ST LEVEL	SOME	NO	YES	YES	NO	YES	YES	YES
	INVOLVEMENT WITH SERVICES	SOME	YES	THINK SO	NO	YES	YES	NO	YES	YES	YES
	MONITORING OF THE CREWS	Contractor	DAILY TASK STATEMENTS	DAILY CHECKLIST		ISO 9000, ISO 14001	LOCAL MANAGERS	TRACK QUALITY supervisors	Supervisor		

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
IN-HOUSE TAMPING IS ACCEPTED BY	AS-BUILT RECORDS		YES	YES		YES	YES		YES	YES	YES
	QUALITY SUPERVISION		YES	YES	YES	YES	YES		YES	YES	
	RECORDING CAR DATA			YES	YES	YES	YES			YES	
	TAMPER RECORDING RUN			YES		YES	YES				
	VISUAL INSPECTION		YES	YES	YES	YES	YES			YES	YES
	CAB RIDE										
	PENALTY CLAUSE FOR POOR RESULTS		YES	YES			YES				
CONTRACT TAMPING IS ACCEP- TANCE BY	AS-BUILT RECORDS	YES	YES	YES		YES	YES		YES		YES
	QUALITY SUPERVISION	YES	YES	YES		YES	YES	YES	YES		
	RECORDING CAR DATA	YES		YES		YES	YES	YES	YES		
	TAMPER RECORDING RUN	YES	YES	YES		YES	YES	YES	YES		
	VISUAL INSPECTION	YES	YES	YES		YES	YES	YES	YES		YES
	CAB RIDE							YES			
	PENALTY CLAUSE FOR POOR RESULTS	YES	YES	YES		YES	YES		YES		

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
CONTRACT TAMPING	CONTRACTOR IS CHOSEN BY	COST	COST	Performance cost			Commercial criteria cost	QUALITY AND COST	COST		COST AND QUALITY
	DURABILITY / HOW IS QUALITY CONTROL ENSURED THROUGH	Homologation of mach parameters	BUSINESS STANDARDS	Inspection	Measurement	Measurement	Measurement	Measurement	Measurement		Measurement
	WHO OWNS THE TAMPING MACHINE	Contractors	Contractors	Contractors	Contractors	Administration	Contractor	Contractor	Contractor		Contractors
	COMPENSATION OR ACTION ON LATE POSSESSIONS				CONTRACTOR PENALISED	EXTENT POSSESSION	PAYMENT MADE BY METER TAMPED	NONE	PENALTIES		PAYMENT
	COMPENSATION OR ACTION ON CANCELLED POSSESSIONS	<24 HRS COST PAID TO CONTRACTOR	Speed restrictions when required		CONTRACTOR PENALISED	NONE	PAYMENT MADE BY METER TAMPED	NONE	PENALTIES		PAYMENT
CONTRACTOR OUTPUT SHORT-FALLS DUE TO	LATE IN FINISHING WORK	CONTRACTOR PENALISED WHEN >30min DELAY	Speed restrictions			New possession		REVERT TO SMOOTH TAMP	No regimentations		New possessions
	CANCELLED POSSESSIONS	NONE	PENALTIES			New possession	Re programmed	Re programmed	Re programmed		NONE
	WEATHER		Speed restrictions			New possession	Re programmed	No administration involvement	No regimentations		New possessions JBV pays
	TAMPER BREAKDOWNS		MANUAL TAMPERS			New possession	Re programmed	No administration involvement	PENALTIES		New possessions Con. pays
	INADEQUATE SITE PREP	DISCUSSIONS	DELAYS			Discussions	compensation TO EFFECTED PARTY	TRACK QUALITY CLAUSES / PENALTIES	PENALTIES		New possessions JBV pays
	NO DESIGN	<24 HRS COST PAID	SMOOTH TAMP			Discussions	compensation to effected party	SMOOTH TAMP	SMOOTH TAMP		New possessions JBV pays

		SWITZERLAND	SPAIN	GERMANY	GREECE	HUNGARY	FRANCE	BRITAIN	AUSTRIA	BELGIUM	NORWAY
WHO IS RESPONSIBLE FOR	PLANNING POSSESSION	Administrtator	Administrtator			Administrtator	Administrtator	Contractor	Administrtator		Administrtator
	TAKING POSSESSIONS	Administrator	Administrator			administrator and contractor	Administrator	Contractor	Administrator		Administrtator
	SITE PREP	administrator and contractor	Administrtator			Engineering office	administrator and contractor	Contractor	Administrtator		Administrtator
	PROVIDING DESIGN	Administrator	Administrator			DESIGNERS	administrator and contractor	Maintainer	Administrtator		Administrtator
	TAMPING ON SITE	Contractor	contractor and administrator			Contractor	Contractors	Contractor	Contractor		administrator and contractor
	FOLLOW UP WORK	Administrator	contractor and administrator			Contractor	Contractors	Maintainer	administrator and contractor		contractor and administrator

Tukemissyvyydet päällysrakenteen eri komponenteilla

Linjatuenta

Kisko- tyyppi	Pölkkytyyppi	Tukikerros- materiaali	Kiskon korkeus	Pölkyn korkeus	Aluslevy	Vällys	Tukemissyvyy- s kiskon yläpinnasta	Tukemissyvyy- s, jos hakku on perustilassa 15 mm kiskonselän alapuoella
K 30	Puu	Sora	120	160	20	10	310	295
K 43	Puu	Sora	140	160	22	10	332	317
K 43	Puu	Sepeli	140	160	22	15	337	322
K 43	Betoni	Sepeli	140	200	6	15	361	346
54 E1	Puu	Sepeli	159	160	22	15	356	341
54 E1	Betoni	Sepeli	159	200	6	15	380	365
54 E1	B86, B88, BP89, B97, BP99	Sepeli	159	225	10	15	409	394
K 60	Puu	Sepeli	165	160	22	15	362	347
60 E1	B86, B88, BP89, B97, BP99	Sepeli	172	225	10	15	422	407

Lisäksi on huomioitava pölkyn alapintaan mahdollisesti asennetun pohjaimen vaikutus + 7 - 13 mm

Vaihteen tuenta

Kisko- tyyppi	Pölkkytyyppi	Tukikerros- materiaali	Kiskon korkeus	Pölkyn korkeus	Aluslevy	Vällys	Tukemissyvyy- s kiskon yläpinnasta	Tukemissyvyy- s, jos hakku on perustilassa 15 mm kiskonselän alapuoella
K 30	Puu	Sepeli	120	160	20	15	315	300
K 43	Puu	Sepeli	140	160	22	15	337	322
54 E1	Mänty tai Azobe	Sepeli	159	160	22	15	356	341
60 E1	Azobe	Sepeli	172	160	22	15	377	362
60 E1	Betoni	Sepeli	172	225	10	15	437	422

