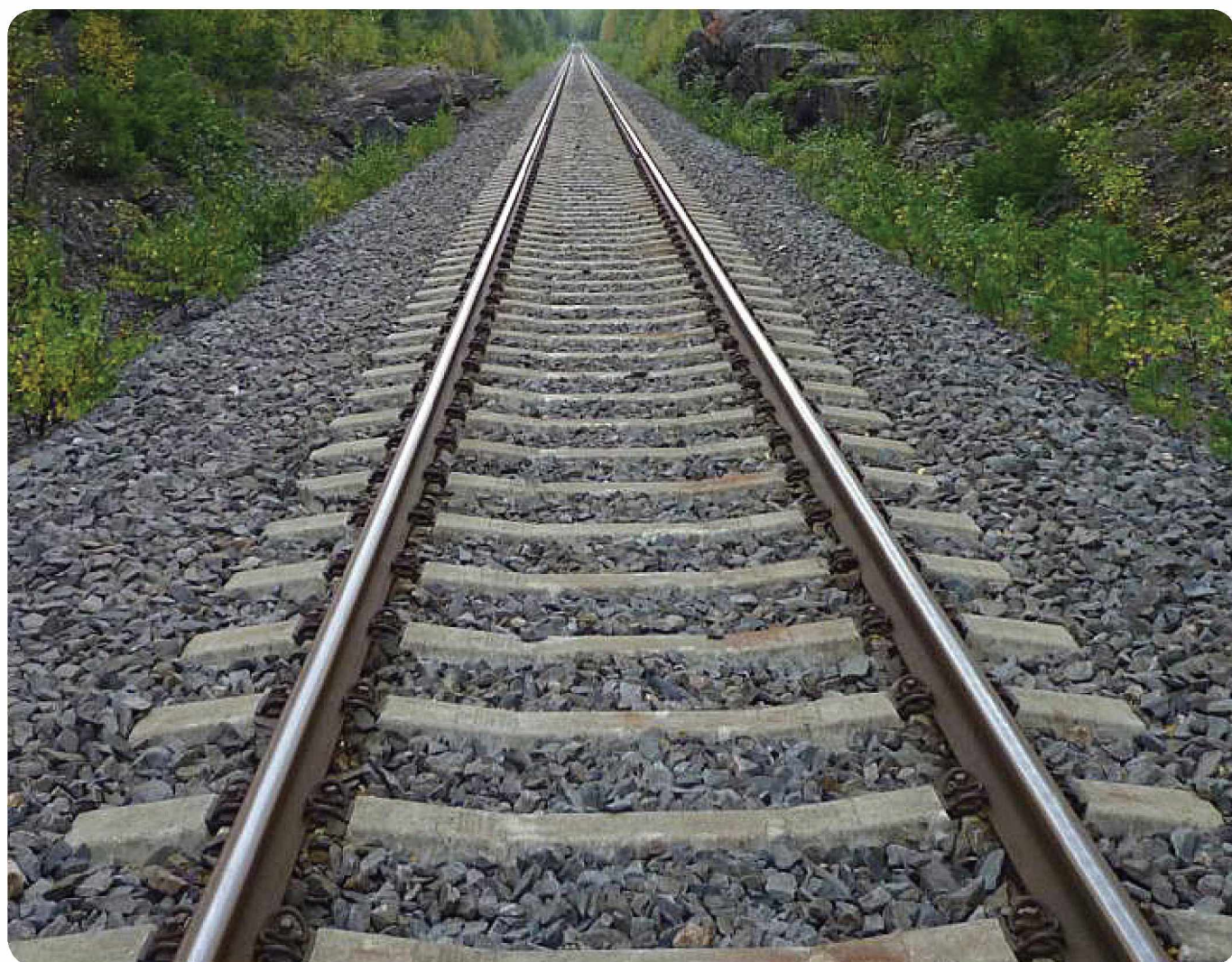


TOMMI RANTALA
OLLI KEROKOSKI
ANTTI NURMIKOLU

Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit

KIRJALLISUUSSELVITYS



Tommi Rantala, Olli Kerokoski, Antti Nurmikolu

Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit

Kirjallisuusselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013

Liikennevirasto

Helsinki 2013

Kannen kuva: Ossi Peltokangas

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-301-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tommi Rantala, Olli Kerokoski, Antti Nurmikolu: Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013. 156 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-301-0.

Avainsanat: Betoninen ratapölkky, kuormitus, vaurio, halkeama, rapautuminen

Tiivistelmä

Osana tutkimusohjelmaa Elinkaaritehokas rata (TERA) Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella on vuosien 2009-2012 aikana tarkasteltu betoniratapölkkyjen vaurioitumismekanismeja. Työ on raportoitu kahdessa osaraportissa. Tämä raportin ensimmäinen osa sisältää haastattelu- ja kirjallisuustutkimusosion havainnot.

Tutkimuksen päätavoitteena oli saavuttaa koti- ja ulkomaisiin tutkimushavaintoihin ja kokemuksiin perustuen käsitys betoniratapölkkyjen vaurioitumisen kannalta määräävistä tekijöistä. Teemaan sisältyy betoniratapölkkyihin liittyvä nykytilanne käsittäen mitoituksen, valmistuksen, radan kuormitusympäristön vaikutukset, havaitut ongelmat sekä ulkomaiset tutkimustulokset.

Kirjallisuustutkimusosuudessa perehdytään ratapölkkyjen toiminnan perusteisiin ja suomalaiseen ja ulkomaiseen ohjeistukseen. Päähuomio on kiinnitetty jännitettyihin yksiosaisiin betoniratapölkkyihin, jotka ovat Suomen rataverkolla käytännössä ainoa betoninen ratapölkkytyyppi.

Suomessa on betoninen ratapölkky ollut käytössä 1960-lujen alkupuolelta asti. Tuolloin pölkky oli jälkijännitetty ja nykyisiä pölkkyjä kevyempi. Hyvien kokemusten ja betonipölkyn niihin suhteutettuna kilpailukykyisen hinnan myötä betonipölkkyjen tuotantomäärä kasvoi merkittävästi 1990-luvun alussa, jolloin Parma Oy aloitti ratapölkkyjen valmistuksen Forssassa VR:n järjestämän tarjouskilpailun jälkeen. Nykyisin Suomessa valmistetaan betoniratapölkkyjä kahdessa tehtaassa. Parma Oy:n Forssan tehtaalla on ratapölkkyjä valmistettu yhteensä noin viisi miljoonaa kappaletta ja Lujabetoni Oy:n Siilinjärven tehtaalla viimeisten 13 vuoden aikana noin kolme miljoonaa kappaletta.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella betoniratapölkkyjen halkeamien aiheuttajiksi osoittautui yksittäiset ratapölkkyihin kohdistuvat dynaamiset huippukuormat, jotka aiheutuvat kisko- ja kalustovioista. Myös tukikerroksen laadulla nähtiin olevan keskeinen rooli laaja-alaisissa pölkkyvaurioissa. Lisäksi betoniratapölkkyjen rapautuminen havaittiin merkittäväksi ajatellen ratapölkyn käyttöikä. Kuitenkin Suomessa 1960-1980-luvuilla joissain ratapölkkytyypeissä havaitut rapautumisongelmat on saatu hallintaan rajoittamalla betonin kovettumislämpötilaa.

Kirjallisuustutkimuksessa käsiteltiin lyhyesti myös muita pölkkyateriaaleja kuin betoni. Tutkimuksen perusteella vaihtoehtoisten pölkkyateriaalien suurin ongelma on niiden betonia korkeampi hinta ja pienet tuotantomäärät. Ainoastaan puuratapölkkyjen hinta on usein kilpailukykyinen betoniratapölkkyihin verrattuna, mutta lisääntynyt ympäristötietoisuus ja tätä kautta näköpiirissä oleva kreosoottiöljyn kieltäminen kyllästysaineena alentavat puuratapölkkyjen käyttöikä samalla heikentäen puun kilpailukykyä betoniin verrattuna.

Laaja kokeellinen betoniratapölkyn rapautumisen ja kuormituskäyttötymisen tarkastelu koskien muun muassa betoniratapölkyn väsymistä ja halkeamien merkitystä ratapölkyn toimintaan sisältyy tutkimuskokonaisuuden toiseen osaraporttiin.

Tommi Rantala, Olli Kerokoski, Antti Nurmikolu: Betongsliperns strukturella funktion och skademekanismer. Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 36/2013. 156 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-301-0.

Sammanfattning

På Institutionen för byggnadsteknik vid Tammerfors tekniska universitet har man 2009-2012 undersökt betongsliprarnas skademekanismer som en del av forskningsprogrammet TERA (järnväg med kostnadseffektiv livscykel). Undersökningen har resulterat i två delrapporter. Denna första delrapport innehåller resultaten av intervju- och litteraturstudiedelen.

Det huvudsakliga syftet med undersökningen var att på basis av inhemska och utländska forskningsresultat och erfarenheter bilda en uppfattning om de faktorer som är av avgörande betydelse i fråga om skador på betongsliprar. Ämnet omfattar nuläget vad gäller betongsliprar, inklusive dimensionering, tillverkning, inverkan på banans belastningsmiljö, konstaterade problem och utländska forskningsresultat.

I litteraturstudien undersöktes betongsliprarnas funktionella grunder samt finländska och utländska anvisningar. Studien fokuserar på förspända helgjutna betongsliprar, som är den enda typen av betongsliper som används i Finlands bannät.

I Finland har man använt betongsliprar sedan början av 1960-talet. Då var sliprarna efterspända och lättare än dagens sliprar. Tack vare de goda erfarenheterna och betongsliperns förhållandevis konkurrenskraftiga pris, ökade betongsliprarnas produktionsmängd märkbart i början av 1990-talet. Då började Parma Oy tillverka sliprar i Forssa efter en anbudstävling som ordnats av VR. Numera tillverkas betongsliprar i två olika fabriker i Finland. Vid Parma Oy:s fabrik i Forssa har man tillverkat sammanlagt cirka fem miljoner och vid Lujabetoni Oy:s fabrik i Siilinjärvi har man under de senaste 13 åren tillverkat cirka tre miljoner sliprar.

Litteraturstudien visade att orsaken till sprickor i betongsliprarna är enskilda dynamiska toppbelastningar av slipern till följd av fel i rälen eller materielen. Kvaliteten på ballasten anses också spela en viktig roll vid omfattande betongsliperskador. Dessutom upptäckte man att betongens söndervittring var påtaglig med tanke på sliperns livslängd. I Finland har man emellertid under 1960- och 1980-talen lyckats minska söndervittringsproblemen som påträffats i vissa slipertyper genom att sänka betongens härdningstemperatur.

I litteraturstudien behandlades kort också andra slipermaterial än betong. Undersökningen visade att det största problemet med alternativa slipermaterial är att de är dyrare och produceras i små mängder. Bara priset på träsliprar är konkurrenskraftigt i förhållande till betongsliprarna. Den ökade miljömedvetenheten och därigenom det kommande förbudet att använda kreosotolja som impregneringsmedel förkortar träsliprarnas livstid samtidigt som det försämrar träets konkurrenskraft gentemot betongen.

Den andra delrapporten, som ingår i forskningshelheten, innehåller en omfattande empirisk undersökning om söndervittringen av betongsliprar och hur dessa beter sig vid belastning i fråga om bland annat utmattning och hur sprickor inverkar på sliperns funktion.

Tommi Rantala, Olli Kerokoski, Antti Nurmikolu: Structural behaviour and failure mechanisms of concrete sleepers. Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 36/2013. 156 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-301-0.

Summary

The Department of Civil Engineering at Tampere University of Technology (TUT) studied the failure mechanisms of concrete sleepers as part of the Life Cycle Cost Efficient Track (TERA) research programme in 2009–2012. The work has been presented in two partial reports. This first part contains the findings of the interviews and literature survey.

The main objective was to get an understanding of the determining factors in the failure of concrete sleepers based on domestic and foreign research findings and experiences. The scope includes the present situation pertaining to concrete sleepers including dimensioning, manufacture, effects of the loading environment of the track, identified problems, and foreign research results.

The literature survey deals with basic sleeper behaviour and Finnish and foreign guidelines. The main focus is on prestressed monoblock concrete sleepers, which are practically the only concrete sleeper type of Finnish railways.

Concrete sleepers have been used in Finland since the early 1960s. Then, sleepers were post-tensioned and lighter than today's sleepers. The good experiences from concrete sleepers and their relatively competitive price increased production volumes significantly in the early 1990s, when Parma Oy started manufacturing concrete sleepers in Forssa after winning the competitive bidding organised by the State Railways. At present, concrete sleepers are manufactured in two plants in Finland. Parma Oy's plant in Forssa has manufactured a total of about five million and the Siilinjärvi plant of Lujabetoni Oy about three million sleepers in the past 13 years.

Based on the literature survey, fractures in concrete sleepers are caused by individual dynamic peak loads on them due to defects in tracks and rolling stock. The quality of the ballast was also found to play a central role in sleeper damage. The weathering of concrete sleepers also proved a significant factor, considering their long service life. However, the weathering problems detected in some sleeper types in Finland from the 1960s to 1980s have been brought under control by limiting the curing temperature of concrete.

Other sleeper materials besides concrete were also dealt with briefly in the literature survey. In the light of the survey, the biggest problem with the alternative sleeper materials is their higher price and small production volumes. Only wooden sleepers are competitively priced compared to concrete sleepers, but increased environmental awareness and the consequent ban on the use of creosote oil as an impregnating agent shorten the service life of wooden sleepers, thus reducing wood's competitiveness compared to concrete.

An extensive empirical survey on the weathering and loading behaviour of concrete sleepers, focussing on issues such as concrete sleeper fatigue and the impact of fractures on sleeper performance, is included in the second partial report.

Esipuhe

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksessa on Liikenneviraston toimeksiannosta vuodesta 2009 lähtien ollut käynnissä ratarakenteen toimintaa käsittelevä tutkimusprojekti, Elinkaaritehokas rata (TERa). Betonisia ratapölkkyjä koskeva osuus on Liikenneviraston ja TTY:n tutkimussopimuksessa otsikoitu ”Betoniratapölkkyjen vaurioitumismekanismit”. Tutkimushankkeen sisältö ja tulokset julkaistaan kahdessa osassa: tämä osa 1 sisältää kirjallisuustutkimus- ja haastatteluosuudet ja 2-osa ratapölkkyjen kokeellisen ja laskennallisen tutkimuksen osuudet.

Julkaisun ovat TTY:n Rakennustekniikan laitoksessa kirjoittaneet dipl.ins.Tommi Rantala, tekn.toht. Olli Kerokoski ja tekn.toht. Antti Nurmikolu. Tutkimusta ovat ohjanneet dipl.ins. Tuomo Viitala ja dipl.ins. Ville-Pekka Lilja Liikennevirastosta.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto
Infra- ja ympäristöosasto

Sisältö

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	10
1 JOHDANTO	11
2 BETONIRATAPÖLKKY	12
2.1 Tehtävät radan rakenneosana	12
2.2 Mitat ja muoto	13
2.3 Materiaalit	14
2.3.1 Betoni	14
2.3.2 Jänneteräket	15
2.4 Pölkkytyypit	16
2.4.1 Yksiosainen ja kaksiosainen betoniratapölkky	16
2.4.2 HDS-ratapölkky	17
2.4.3 Twin sleepers	18
2.4.4 Leveä betoniratapölkky	18
2.4.5 Kehäpölkky	19
2.4.6 Tikapuuratapölkky	20
2.5 Kiskonkiinnitys	21
2.5.1 Tehtävät ja vaatimukset	21
2.5.2 Kiskonkiinnitykset Suomessa	22
2.6 Ratapölkky pohjaimet	23
2.7 Betoniratapölkkyjen valmistus ja varastointi	24
2.7.1 Betoniratapölkkyjen kehitys ja käyttö Suomessa	24
2.7.2 Ruotsalaisen Abetong AB:n tuotanto	26
2.7.3 Betoniratapölkkyjen valmistus	27
2.7.4 Betoniratapölkkyjen varastointi	30
2.8 Vaihtoehtoiset materiaalit betoniratapölkylle	30
2.8.1 Puinen ratapölkky	30
2.8.2 Teräksinen ratapölkky	32
2.8.3 Synteettinen ratapölkky	33
3 RATAPÖLKYN RASITUKSET JA TOIMINNAN PERUSTEET	36
3.1 Ratapölkkyyn liikennekuormasta kohdistuvarasitus	36
3.1.1 Liikennekuormitus	36
3.1.2 Pyöräkuorman jakautuminen ratapölkylle raiteen pituussuunnassa	37
3.1.3 Puutteellinen kontakti tukikerrokseen	40
3.1.4 Pohjapaineen jakautuminen ratapölkyn pituussuunnassa	42
3.1.5 Taivutusrasitus	44
3.1.6 Leikkaus- ja vääntörasitus	46
3.1.7 Toistokuormituksen vaikutus	47
3.1.8 Dynaaminen käyttäytyminen	48
3.1.9 Ratapölkky ja raiteen vaakasuuntainen toiminta	51
3.2 Esijännityspunosten toiminta	54
3.3 Ilmaston vaikutus	56
3.3.1 Terästen korroosio	56
3.3.2 Betonin huokosrakenne ja veden liikkuminen betonissa	56
3.3.3 Betonin pakkasenkestävyys	60
3.3.4 Betonin suola-pakkasenkestävyys	61
3.3.5 Betonin pakkasenkestävyyden testaus	62

4	BETONIRATAPÖLKKYJEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	64
4.1	Suunnittelun lähtökohdat	64
4.2	Ohjeistus Suomessa.....	64
4.2.1	Liikenneviraston ohjeet RATO 1 ja RATO 11.....	64
4.2.2	Esijännitetyt betoniratapölkkyt. Tekniset toimitusehdot.....	67
4.3	Ohjeistus Ruotsissa.....	69
4.4	Ohjeistus Norjassa	70
4.4.1	Päällysrakenneluokka	70
4.4.2	Raiteet	71
4.5	Ratapölkkyjen kuormitukseen liittyvä eurokoodiohjeistus.....	72
4.5.1	SFS-EN 1991-2 Siltojen liikennekuormat	72
4.5.2	EN 15528	76
4.6	Eurooppalainen YTE.....	77
4.7	UIC Code 713.....	77
4.7.1	Lähtöarvoja.....	77
4.7.2	Kuormitus	78
4.7.3	Taivutusmomentin laskeminen.....	78
4.8	Yhteenvedo suunnitteluperusteista ja eri maiden käytäntöjen väliset vertailut	80
5	KIRJALLISUUSHAVAINTOJA VAURIOITUMISMEKANISMEISTA	82
5.1	Halkeamien synty ja merkitys	82
5.1.1	Heikentyneessä tuentatilassa liikennekuormituksesta aiheutuva halkeilu.....	82
5.1.2	Iskukuormien aiheuttama halkeilu.....	84
5.1.3	Jänneteräspunosten korroosio.....	87
5.2	Väsyminen.....	89
5.3	Betonin rapautuminen	90
5.3.1	Pakkasrapautuminen	90
5.3.2	Kemiallinen rapautuminen	93
5.4	Kiskon kiinnityksen irtoaminen.....	96
5.5	Muut	99
5.5.1	Valmistuksen aikaiset vauriot.....	99
5.5.2	Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset vauriot.....	100
5.5.3	Kiskon lepopinnan kulumisvauriot.....	101
5.6	Konenäkö ratapölkyn kunnon arvioinnissa	103
5.6.1	Johdanto.....	103
5.6.2	Konenäköjärjestelmä	103
5.6.3	Konenäkö rautatieympäristössä	107
5.6.4	Yhteenvedo.....	120
6	KREOSOOTTIKYLLÄSTETYN PUURATAPÖLKYN KORVAAVAT VAIHTOEHDOT	122
6.1	Johdanto.....	122
6.2	Puu.....	123
6.2.1	Puisen ratapölkyn ominaisuudet ja toiminta radassa	123
6.2.2	Puun kyllästäminen.....	126
6.2.3	Kyllästysaineen tunkeutuvuus	129
6.3	Synteettiset materiaalit.....	131
6.4	Betoni.....	140

7	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARPEET.....	142
8	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	145
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	146

LIITTEET

Liite 1 Haastattelututkimus

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

F_b	Pölkyn alapinnan ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa
F_e	Pölkyn päätypinnan ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa
F_s	Pölkyn sivupintojen ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa
$f_{c,cube}$	Betonin puristuslujuus, suomalainen K-lujuus
f_{ck}	Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
f_{ctk}	Betonin vetolujuuden ominaisarvo
f_{sy}	Jännepunoksen myötölujuus
M_k	Taivutusmomentti, ominaisarvo
M_r	Taivutusmomentti kiskon kohta
M_c	Taivutusmomentti keskikohta
Φ_v	Sysäyskerroin
Q_{vk}, q_{vk}	Mitoituskaavion LM71-35 pistekuorma ja metrikuorma
	Julkaisun UIC Code 713 “Desing of monoblock concrete sleepers” merkintöjä (luku 4.7):
Y_p	Kerroin kiskonkiinnitysten iskukuormien vaimennuskyvyille.
Y_v	Dynaaminen junan nopeuden mukaan määräytyvä kerroin, jolla huomioidaan radan ja kaluston poikkeavuuksia.
Y_d	Kerroin kuormien jakautumiselle ratapölkkyjen kesken.
Y_r	Kerroin ratapölkyn tukireaktiolle. Kertoimella huomioidaan tuennan vaihteluita.
k_1 ja k_2	Poikkeus- ja onnettomuustilanteiden dynaamiset kuormakertoimet
P_k	Ratapölkkyyn kohdistuva kuorma

1 Johdanto

Esijännitetty betoniratapölkky on maailmalla laajalti käytetty ratapölkkytyyppi ja Suomen rataverkon pääradoilla pääasiallinen ratapölkkytyyppi. Ratapölkky on yksi merkittävimmistä komponenteista radan toiminnan kannalta. Sen tärkeimpiä tehtäviä ovat voimien välittäminen tukikerrokseen, kiskon tukeva kiinnittäminen ja raideleveyden säilyttäminen.

Betoniratapölkkyistä saadut käyttökokemukset ovat pääasiassa hyviä. On kuitenkin selvää, että useat tekijät vaikuttavat siihen, saavuttaako ratapölkky sille asetetun käyttöikätaavoitteen. Tällä hetkellä ratapölkkyjen vaihtotarvetta arvioidaan usein silmämääräisesti, mikä toki on selkeissä vauriotapauksissa hyvä ja nopea tapa. Monissa tapauksissa on kuitenkin epäselvää, onko ratapölkky todella sellainen, että se ei enää pysty täyttämään sille asetettavia vaatimuksia. Tässä vaiheessa on hyvä muistaa se, että monet vauriotapaukset, joita esiintyy nykyaikaisilla betoniratapölkkyjä sisältävillä radoilla, eivät sinänsä johdu ratapölkkyjen puutteista. Esimerkiksi heikko pohjamaa, puutteellinen kuivatus, vajavainen sepelöinti sekä erilaiset kalusto- ja kiskoviat voivat olla potentiaalisia syitä ratapölkkyjen vaurioihin.

Betoninen ratapölkky on ollut Suomessa käytössä 1960-luvun alkupuolelta asti. Tuolloin pölkky oli jälkijännitetty ja nykyisiä pölkkyjä lyhyempi ja kevyempi. Hyvien kokemusten ja betonipölkyn kilpailukykyisen hinnan myötä betonipölkkyjen tuotantomäärä kasvoi merkittävästi 1990-luvun alussa. Vuoden 2012 loppuun mennessä betonisia ratapölkkyjä on valmistettu Suomessa noin 10000000 kpl.

Yleisimpiä betoniratapölkkyissä esiintyviä vauriotyyppejä ovat eri syistä johtuvat halkeamat ja kiskonkiinnitysten irtoaminen. Kemiallisen rapautumisen ja pakkasrapautumisen merkitys on pienentynyt merkittävästi tiukentuneiden vaatimusten ja uusien ratapölkky mallien markkinoille tulon myötä. Yli 20 vuoden käyttökokemukset uuden mallisista ratapölkkyistä eivät ole juurikaan antaneet merkkejä betonin rapautumisesta. Kysymykseksi onkin muodostunut se, mitkä tekijät vaikuttavat ratapölkkyjen vaurioitumiseen ja mikä merkitys vaurioilla on ratapölkyn käyttöikänsä. Toisin sanoen milloin vauriot ovat niin vakavia, että ratapölkky ei pysty enää täyttämään sille asetettavia vaatimuksia.

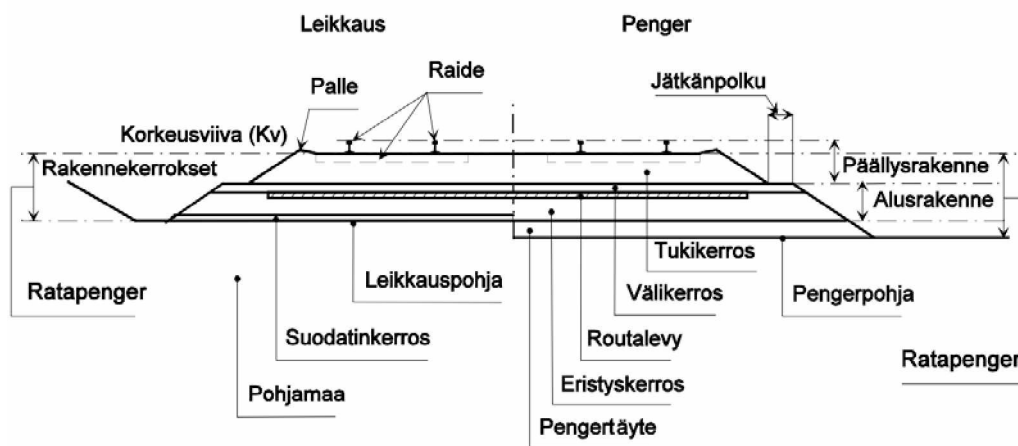
Tässä tutkimustyössä ongelmaa lähestytään kirjallisuus- ja haastattelututkimuksen keinoin. Luvussa 2 esitetään betoniratapölkkyjen käytön ja valmistuksen historiaa Suomessa ja ulkomailla. Lisäksi luvussa on käsitelty vaihtoehtoisia pölkkytyyppejä. Luvussa 3 on esitetty ratapölkyn toiminnan perusteita ja ratapölkkyyn kohdistuvia rasituksia. Luvussa 4 on esitetty ratapölkyn suunnittelun ja mitoituksen perusteita, sekä vertailtu eri maiden mitoituksen ohjeistusta. Luvussa 5 on käsitelty yleisimpiä betoniratapölkkyissä esiintyviä vaurioita ja niiden aiheuttajia. Luvussa 6 on esitetty näkökulmia yleisimpänä puuratapölkkyjen kyllästysaineena käytetyn kreosoottiöljyn kieltämisen johdosta syntyvien ongelmien seurauksista ja mahdollisista korvaavista rakenne- ja materiaalivaihtoehdoista.

Tutkimushankekokonaisuuteen kuuluva mittava kokeellinen tutkimusosuus on raportoitu yhdessä hankekokonaisuutta koskevien päätelmien kanssa erillisenä raporttina Betoniratapölkyn toiminta ja vaurioitumismekanismi, osa 2/2 (Kerokoski et al. 2013).

2 Betoniratapölkky

2.1 Tehtävät radan rakenneosana

Radan rakennekerroksiin kuuluvat päällysrakenteeseen luettava tukikerros ja alusrakenne. Ratapenkereeseen kuuluu näiden lisäksi myös pengertäyte. Päällysrakenne koostuu kolmesta keskeisestä osasta: kiskoista, pölkkyistä ja tukikerroksesta. Junan kulkee raiteella, jonka osia ovat kiskot, pölkkyt ja kiskonkiinnitykset. Lisäksi raiteeseen kuuluu erikoisrakenteita, joita ovat muun muassa vaihteet ja siltojen suojakiskot. Raitteiden tukeutuu paikalleen raidesepeleistä tai -sorasta koostuvan tukikerroksen avulla. Radan rakenne on esitetty alla olevassa kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Poikkileikkaus radan rakenteesta. (RATO 11 2002)

Ratapölkky on yksi tärkeimmistä komponenteista radan toimintaa ajatellen. Pohjois-Amerikassa esimerkiksi katsotaan, että ratapölkkyt ovat kahden olennaisimman syyn joukossa, kun tarkastellaan radasta aiheutuvia onnettomuuksia. (IHHA 2009.) Tätä arvioitaessa on kuitenkin huomattava, että toisin kuin betoniratapölkkyvaltaisella Suomen rataverkolla, Pohjois-Amerikassa puuratapölkkyt ovat ensisijainen pölkkytyyppi.

Ratapölkyn tärkeimpinä tehtävinä on (Esveld 2001):

- kestää junien synnyttämät kuormitukset ja välittää ne mahdollisimman tasaisesti tukikerrokselle
- antaa kestävä tuki ja kiinnitysmahdollisuus kiskon jalalle ja kiskon kiinnikkeille
- säilyttää raideleveys ja kiskon kallistus
- vastustaa kiskojen pituus-, sivu- ja pystysuuntaisia liikkeitä
- tarjota riittävä sähköinen eristys kiskojen sekä tukikerroksen ja kiskon välillä
- kestää mekaaniset ja sään aiheuttamat rasitukset niin lyhyillä kuin pitkälläkin ajanjaksoilla.

Ratapölkyn pitäisi pystyä täyttämään edellä mainitut tehtävät koko pölkyn käyttöiän ajan. Suomessa käytettävien B63...B75-betoniratapölkkyjen käyttöikätaavoite on noin 30 vuotta. Vuoden 1982 jälkeen valmistettujen betoniratapölkkyjen käyttöiän lasketaan olevan 40 vuotta. (RATO 11 2002.) Esimerkiksi Parma Oy:n valmistamista

ratapölkkyistä arvioidaan 40 vuoden käytön jälkeen 95 % olevan vielä käyttökuntoisia (Parma 2010). Suomessa käytettäviä betoniratapölkkyjä esitellään tarkemmin luvussa 2.7.1

2.2 Mitat ja muoto

Vuonna 1987 ”FIP Commission on Prefabrication” on antanut yleisohjeistuksen yksiosaisen betoniratapölkyn mittojen ja muodon suunnitteluun (FIP 1987). FIP eli International Federation of Prestressing on perustettu vuonna 1955. Vuonna 1998 FIP yhdistettiin CEB:n eli Euro-International Committee for Concrete kanssa, jolloin syntyi *fib* eli International Federation for Structural Concrete. (FIP 1987, Menegotto 2005)

”FIP Commission on Prefabrication” antama yleisohjeistus mittojen ja muotojen suunnitteluun (FIP 1987):

- Ratapölkyn alapinnan pinta-alan pitää olla riittävän suuri, jotta keskimääräinen tukikerrokseen kohdistuva pohjapaine jää alle tietyn raja-arvon. Raja-arvon suuruus on tyypillisesti 400–500 kPa. Esimerkiksi Parman ratapölkyn BP89 (ks. luku 2.7.1) pohjan ala on 0,6721 m², joten siihen kohdistuva pystyvoima saa tämän rajoituksen mukaan olla korkeintaan 269–336 kN.
- Päätyjen pitää olla riittävän kokoisia ja sopivan muotoisia tarjoamaan maksimivastus raiteen suhteen poikittaiselle ratapölkyn liikkeelle.
- Koska esijännityspunokset ovat suoria ja samansuuntaisia ratapölkyn pohjan kanssa, poikkileikkaus voidaan suunnitella erilaiseksi ratapölkyn eri kohdilla siten, että punosten epäkeskisyys vastaa parhaiten ko. kohdan taivutusmomentin suuruutta ja suuntaa. Tämä mahdollistaa kiskonkiinnityskohdista alkavan ratapölkyn korkeus- ja joskus myös leveysuunnassa kapenevan muodon.

Ratapölkyn tehtävänä ei siis ole vain siirtää pystysuuntaiset kuormat alapuolisille maakerroksille vaan myös rajoittaa junan ja kiskojen lämpötilamuutosten aiheuttamia raiteen poikittaisia liikkeitä. Poikittaista liikettä vastustaa erityisesti kitka ratapölkyn pohjan ja raideseppelin välillä, mutta myös ratapölkyn päädyn takana sijaitseva raideseppeli ja raideseppelistä koostuva palle sekä tiivistetty ratapölkkyjen välinen raideseppeli (tukikerrosmateriaali). (Gustavson 2002)

Edellä olevassa luettelossa esitettiin tukikerrokseen kohdistuvan keskimääräisen pohjapaineen nimissä, että Parman BP89 pölkkyyn kohdistuva pystyvoima saa olla enintään 269–336 kN. Kyseisen pystyvoiman vastaanottaminen edellyttäisi kuitenkin kuormituksen jakautumista tasaisesti koko ratapölkyn pohjapinta-alalle. Ratapölkyn rasiusten kannalta pohjapaineen tasainen jakautuminen ei kuitenkaan ole toivottua. Yleisesti pohjapaineen tavoitellaan, ja oletetaan, keskittyvän ratapölkyn päihin, jolloin keskiosa ei tukeudu sepeliin.

Maailmalla käytössä olevien yksiosaisen betoniratapölkkyjen pituus on raideleveydeltään 1435 mm olevilla radoilla pääsääntöisesti 2500–2600 mm, joskin pituudeltaan 2300 mm ja 2750 mm ratapölkkyjäkin on käytössä (FIP 1987). Suomessa alkuun käytettyjen betoniratapölkkyjen pituus on 2500 mm, mutta vuonna 1985 tehdyn päätöksen mukaisesti siirryttiin hankkimaan ja käyttämään 2600 mm betonirata-

pölkkypituutta. Pidemmän ratapölkyn eduiksi arvioitiin muun muassa suurempi massa ja isompi pohjapinta-ala, joiden ansiosta kunnossapitokustannusten arvioitiin laskevan (Grundfelt 1985).

Liikenneviraston (v. 2009 asti Ratahallintokeskus) esijännitetyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (Ratahallintokeskus 2008) mukaisesti Suomessa hankittavien ratapölkkyjen pituuden tulee olla 2600 mm, suurimman leveyden 300 ± 5 mm ja suurimman korkeuden 220 ± 3 mm kiskon keskilinjalla. Raideleveyden nimellismitta on 1524 mm. Tarvittaessa myyjä voi esittää tilaajalle pienehköjä valmistusmenetelmän ja rauditusjärjestelmän vaatimia muutoksia. Liikenneviraston rautatieosasto hyväksyy betoniratapölkyn lopullisen muodon ja mitat.

2.3 Materiaalit

2.3.1 Betoni

Ratapölkkyjen valmistuksessa käytettävän betonin tulee olla korkealaatuista ja kestävä. Sen pitää koostua korkealaatuisesta sementistä, laadukkaasta kiviaineesta ja siinä tulee olla alhainen vesi-sementtisuhde (alle 0,45). Maissa, joissa ratapölkkyt joutuvat alttiiksi pakkasrasitukselle, käytetään betonin lisäaineena usein huokostinta. Tällä pyritään parantamaan betonin pitkäaikaiskestävyyttä. Jo alhainen, 3-4 % ilman lisäys betoniin voi aikaansaada erittäin kestävästä betonista ilman merkittävää betonin lujuuden alenemista. (FIP 1987)

Betonissa käytettävän kiviaineksen valinnalla on merkitystä pyrittäessä ehkäisemään rapautumista. Esimerkkinä tällaisesta rapautumisesta on luvussa 5.3.2.2 tarkemmin käsiteltävä alkalikiviainesreaktio, mikä on aiheuttanut ongelmia betonin pitkäaikaiskestävyyteen ympäri maailmaa. Lisäksi kiviaineksen tulee olla hyvin kulutuksen kestävä, mikä ennaltaehkäisee hioutumien muodostumista eritoten kiskon lepopinnalle (FIP 1987). Kiviaines ei myöskään saa sisältää raekooltaan liian suurta kiviainesta. Syynä tähän on sementtipastan kutistuminen kuivuessa. Tällöin kuivumiskutistuma aiheuttaa mikrohalkeamia/säröilyä suurten kiviainesainepartikkelien ympärille, mikä saattaa johtaa pitkäaikaiskestävyyden heikentymiseen (Fib 2006).

Esijännitetyissä betoniratapölkkyissä käytetään usein korkean alkulujuuden omaavaa Portland-sementtiä, jolta vaaditaan, käytettävästä kiviaineksesta riippuen, alhaista alkalipitoisuutta. Jälkijännitetyissä sekä kaksiosaisissa ratapölkkyissä (kohta 2.4.1) voidaan käyttää perinteistä Portland-sementtiä, sillä kyseisissä ratapölkkytyypeissä korkea alkulujuus ei ole yhtä merkittävää kuin esijännitetyissä betoniratapölkkyissä. (FIP 1987)

Suomessa käytettävien betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen mukaisesti betoniratapölkky suunnitellaan ja valmistetaan Suomen ympäristöministeriön rakennusmääräyskokoelman mukaisen rakenneluokan 1, lujuusluokan K60 ja ympäristöluokan Y1, tai vastaavan, kunkin EU-maan viranomaisten määräysten, mukaan. (Ratahallintokeskus 2008)

Betonin puristuslujuuden on oltava 7 vuorokauden ikäisenä vähintään 55 MN/m^2 tai 28 vuorokauden ikäisenä vähintään 60 MN/m^2 . Puristuslujuuden on oltava jännevoimien siirtohetkellä vähintään 30 MN/m^2 . Taivutusvetolujuuden on oltava 7 vuorokauden ikäisenä vähintään 5 MN/m^2 . Pakkaskestävyyssluvun tulee olla vähintään 25.

Mikrosäröilyn halkeamaindeksi saa olla korkeintaan 1,5, kun luku 0 vastaa betonia, jossa mikrohalkeamia on hyvin vähän tai ei lainkaan ja luku 3 betonia, jossa on mikrohalkeamia runsaasti. Uudelleen kiteytynyttä ettringiittiä (kohta 5.3.2.1) ei sallita lainkaan. (Ratahallintokeskus 2008)

Suomessa ratapölkkyjen tuotannon alkuaikoina käytettiin nopeasti lujittuvaa saksalaista PZ 55 -sementtiä. Suomessa haluttiin kehittää oma nopeasti kehittyvä sementti Forssan ratapölkkytarpeeseen. Lohjan Virkkalassa kehitettiin Super Rapid sementti. Laatuvaatimukset olivat korkeat, koska samanaikaisesti piti kaikki seuraavat vaatimukset täyttää: korkea lujuus, pakkas-suola-kestävyys, työstettävyys ja nopea lujittuminen. Näistä pakkas-suola-kestävyys oli haasteellisin. Hyvä pakkas-suola-kestävyys olisi saavutettu huokoistamalla, jolloin lujuus ja työstettävyys olisivat heikentyneet. Silikalla olisi saavutettu korkea lujuus, mutta seosaineita ei saanut käyttää, koska haluttiin välttää haurautta ja kannettiin huolta, että ratapölkyn dynaamiset kuormitusvaatimukset eivät täytyisi. Tällöin luovuttiin huokoistamisesta ja pyrittiin saavuttamaan riittävä pakkas-suola-kestävyys alhaisen vesi-sementti-suhteen (<0,45) avulla. (Mannonen 2010)

Ratapölkkybetonin kehitystyö oli pitkälti kokeellista. Pakkas-suola-kokeita tehtiin paljon. Tehonotkistin SP-3 (naftaleenisulfonaatti) oli käytössä. Jos massasta tuli kitimäistä, niin betoni ei tiivistynyt riittävän hyvin. Vaatimuksia kohdistui myös kiviainekselle. Pakkas-suola-kokeissa havaittiin, että kivirakeet saattoivat olla säröillä. Kiviaineksen valmistuksessa murskaaminen pitää tehdä vaiheittain. Kehitystyö oli tehtaan omaa työtä ja oli erittäin haasteellista. Koko ajan oli myös tiedossa, että toimivaa reseptiä ei ehkä löytyisi lainkaan. (Mannonen 2010)

2.3.2 Jänneteräket

Esijännitetyissä betoniratapölkkyissä käytetään ulkomailla muun muassa halkaisijaltaan 5 mm teräslankoja, \varnothing 9,3 mm seitsemänlankaisia punoksia ja \varnothing 6,3 mm kolmelankaisia punoksia (FIP 1987). Tällä hetkellä Suomessa valmistettavissa ratapölkkyissä halkaisijaltaan 6,5 mm kolmelankaisia jänneteräspunoksia (kuva 2.2). Jänneteräksissä käytettävän teräksen on oltava korkealaatuista (Ratahallintokeskus 2008).



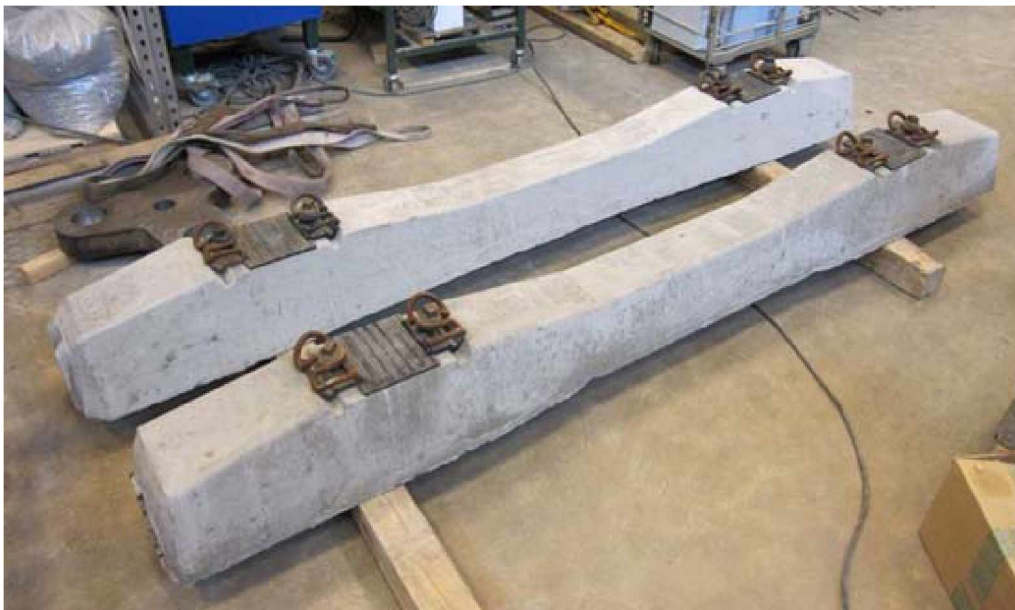
Kuva 2.2 Vasemmalla halkaisijaltaan 6,5 mm kolmilankainen jänneteräspunos ja oikealla halkaisijaltaan 6,4 mm seitsemänlankainen jänneteräspunos.

2.4 Pölkkytyypit

2.4.1 Yksiosainen ja kaksiosainen betoniratapölkky

Ensimmäinen teräsbetoniratapölkky kehitettiin Ranskassa jo 1884. Aikaisesta kehitysajankohdasta huolimatta betoniratapölkkyjen yleistyminen alkoi suuremmissa mittakaavassa vasta esijännitystekniikan kehittymisen myötä toisen maailmansodan jälkeen. (Grundfelt 1982.) Nykyisellään betoniratapölkkyt ovat sarjassa EN 13230 standardoituja tuotteita.

Maailmalla yleisimmin käytetyt betoniratapölkkytyypit ovat yksiosainen betoniratapölkky (monoblock sleeper) ja kaksiosainen betoniratapölkky (twin-block sleeper). Kuvassa 2.3 esitettävä yksiosainen betoniratapölkky on lähtöisin Iso-Britanniasta. Nykyään sitä käytetään laajasti ympäri maailmaa muun muassa Australiassa, Kanadassa, Kiinassa, Japanissa, USA:ssa ja entisen Neuvostoliiton alueilla. Iso-Britanniassa kehitettyjen yksiosaisien betoniratapölkkyjen valmistamiseen on käytetty esijännitystekniikkaa. Toisena yksiosaisen betoniratapölkyn kehittäjämaana voidaan pitää entistä Länsi-Saksaa. Erona Iso-Britanniassa kehitettyyn yksiosaiseen betoniratapölkkyyn on jännitystekniikka, sillä Länsi-Saksassa kehitetyt ratapölkkyt oli valmistettu jälkijännitystekniikkaa hyväksikäyttäen. (Esveld 2001, FIP 1987.) Saksassa valmistetaan ja asennetaan pääradoille yhä 1970-luvun mallin mukaisia betoniratapölkkyjä (Abetong 2010b).



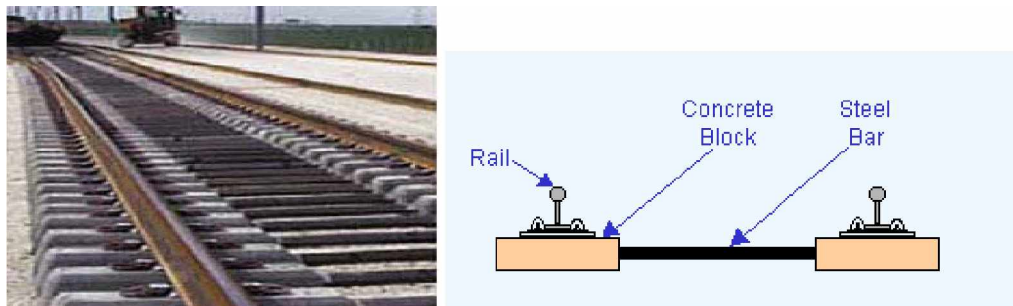
Kuva 2.3 Yksiosaiset betoniratapölkkyt Bg7 ja BP99 (lähimpänä Bg7).

Suomessa käytetty betoniratapölkky malli on yksiosainen, joskin myös kaksiosaisia betoniratapölkkyjä on ollut käytössä 1980-luvun alkupuolelle asti (Grundfelt 1980). Tällä hetkellä Suomen rataverkolla olevat ratapölkkyt on valmistettu sekä esi- että jälkijännitystekniikalla. Uudet Suomen rataverkolle hankittavat ratapölkkyt valmistetaan esijännittämällä. Esi- ja jälkijännitystekniikkaa on käsitelty tarkemmin kohdassa 2.7.

Yksiosaisen betoniratapölkky mallin etuja verrattuna esimerkiksi kaksiosaiseen betoniratapölkkyyn ovat alhaisempi hinta ja hieman pienempi alttius halkeamille kiskon lepopinna kohdalla. Pienempi halkeama-alttius johtuu siitä, että yksiosainen betoni-

ratapölkky pystytään jännittämään. (Esveld 2001, FIP 1987, Mangesh et al.) Esimerkiksi Unkarissa on arvioitu jännitettyjen ratapölkkyjen käyttöiän olevan 50-60 vuotta ja jännittämättömien ratapölkkyjen noin 30 vuotta (Grundfelt 1982).

Kuvassa 2.4 esitettävä kaksiosainen betoniratapölkky, jossa terästanko yhdistää kaksi betonilohkoa, on kehitetty Ranskassa ja sitä käytetään laajalti Euroopassa, Intiassa, Brasiliassa ja Meksikossa. Sen etuina verrattuna yksiosaiseen ratapölkkyyn ovat hyvin määritetyt tukipinnat ja suuri sivuttaissuuntainen vastus tukikerroksessa. Kaksiosaista betoniratapölkkyä ei voida valmistaa jännitettyinä rakenteena, jolloin betonilohkojen halkeiluriski on yksiosaista ratapölkkyä suurempi. Suuremman halkeiluriskin lisäksi kaksiosaisen ratapölkyn valmistuskustannukset ovat hieman suuremmat. (Esveld 2001, FIP 1987, Mangesh et al.)



Kuva 2.4 Kaksiosainen betoniratapölkky (Twin-block sleeper 2010 a, Twin-block sleeper 2010 b).

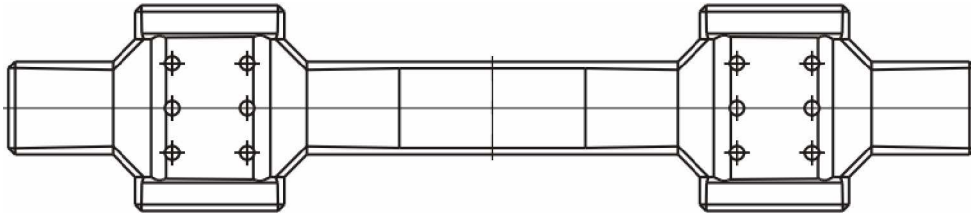
2.4.2 HDS-ratapölkky

Transportation Technology Centerissä, Coloradossa on tutkittu kiskojen kohdilta levennetyn betonisen ratapölkyn toimintaa raiteessa (Korkeamäki 2010). Itävaltalainen Hollitzer Baustoffwerke valmistaa Linzissä SSL-tehtaalla kuvan 2.5 tyyppisiä ratapölkkyjä HDS1-tyyppimerkinnällä.



Kuva 2.5 Itävaltalainen betoninen HDS1-ratapölkky (SSL 2010).

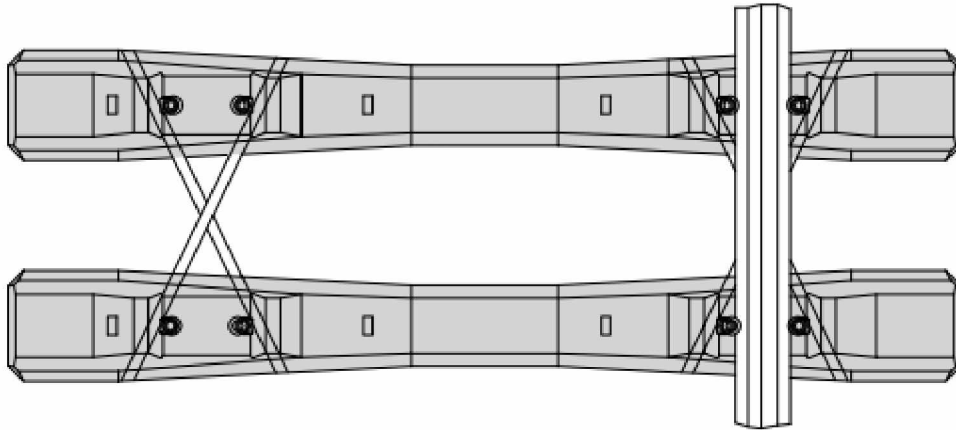
Pölkkytyyppi on suunniteltu raskaille kuormille, korkeille nopeuksille ja pienille radan kaarresäteille. Akselikuormaksi on suunniteltu 250 kN ja maksiminopeudeksi 250 km/h. Pohjapaine jää normaalia pienemmäksi pohjan suurennettun pinta-alan vuoksi. Pölkyn muoto lisää raiteen poikittaista jäykkyyttä. Ratapölkyn pituus on 2,6 m ja leveys 0,55 m. Betoniluokka on K70, mikä osaltaan lisää betonipoikkileikkauksen punosvoimakkestävyyttä. Kuvan 2.6 mukaisesti kiskon tukipinta kiskon suunnassa on pitkä.



Kuva 2.6 *Betoninen itävaltalainen HDS1-ratapölkky, piirustus ylhäältä (SSL 2010).*

2.4.3 Twin sleepers

Saksalainen Leonhard Moll Betonwerke GmbH & Co KG on alkanut valmistaa betonista ZSX-pölkkyä (ZSX Twin sleeper). Kuvan 2.7 ZSX pölkkyssä kaksi tavallista ratapölkkyä on yhdistetty kiskon kohdalta toisiinsa ristikkäin menevien betonin sisään valettujen terästankojen avulla.



Kuva 2.7 *Betoninen Saksassa valmistettu B70 ZSX-ratapölkky (Leonhard 2012).*

Valmistajan mukaan pölkky antaa raiteelle hyvän vaakasuuntaisen jäykkyyden ehkäisten kiskojen lämpölaajenemisen aiheuttamia liikkeitä. Pölkky malli vähentää myös pölkkyjen kiertymistä ja parantaa radan geometrian pysyvyyttä. Pölkky soveltuu erityisesti kaarresäteeltään pieniin (<300 m) kaarteisiin, sekä ratapenkereen ja sillan välisille siirtymäalueille. (European Railway Review 2009)

2.4.4 Leveä betoniratapölkky

Saksassa on kehitetty myös leveä ratapölkky malli kasvavien junakuormien ja junien nopeuden johdosta lisääntyviin tulevaisuuden vaatimuksiin vastaamiseksi. Leveä betoniratapölkky BBS1 on esitetty kuvassa 2.8. Leveän betoniratapölkyn raidesepeleihin aiheuttama pintapaine on havaittu noin 50 % pienemmäksi ja raiteen sivusuuntainen jäykkyys 15 % suuremmaksi perinteiseen ratapölkkyyn verrattuna. Tuotteen leveys on 570 mm ja ratapölkkyvälinä käytetään 600 mm. Ratapölkkyjen väliin asennetaan kuminen suojapäällyys, mikä estää sadeveden ja kasvillisuuden pääsyä ratapölkkyjen väliin ja lisää siten radan rakennekerrosten käyttöikä. (Esveld 2001, Freudenstein & Romstötter 2004, Marx 2003.) Edellä mainituista syistä johtuen myös kunnossapidon tarpeen on todettu vähenevän, joskin radan rakennuskustannukset ovat arviolta noin 10-20 % suuremmat verrattuna perinteiseen rataa (Esveld 2001). Saksaan rakennetulla koeosuudella 200 miljoonan bruttotonnin aikana ei tukemista tarvittu (Marx 2003). Tuentatarpeen ilmettyä pölkkyjen päät voidaan tukea ratapölkkyjen leveydestä huolimatta. Tukemista ei voida kuitenkaan tehdä perinteisillä tukemiskoneilla vaan

tukemiskonetta joudutaan muokkaamaan leveälle ratapölkylle soveltuvaksi (Pfleiderer 2012). Leveän betoniratapölkyn on arvioitu soveltuvan kantavuudeltaan huonolle radalle tavanomaista ratapölkkyä paremmin (Esveld 2001).



Kuva 2.8 Leveä betoniratapölkky BBS1 (RailOne 2010).

2.4.5 Kehäpölkky

Itävallassa on kehitetty kehäpölkky (frame sleeper), joka on suunniteltu kohtaamaan nykypäivän akselipainojen ja nopeuden noston haasteet. Kyseistä kuvassa 2.9 esitetävää ratapölkkyä voidaan ajatella kahtena ratapölkkyä, jotka on yhdistetty toisiinsa kiskon kiinnityskohdista. Kuten leveän ratapölkyn kohdalla, kyseisen mallin pääasiallisena tarkoituksena on kasvattaa ratapölkyn tukipintaa ja tätä kautta pienentää raidesepeleihin kohdistuvaa pintapainetta. Kehäpölkyn raidesepeleihin aiheuttama pintapaine on todettu noin 33 % pienemmäksi tavanomaisiin ratapölkkyihin verrattuna. Kehäpölkky tarjoaa kauttaaltaan paremman tuen kiskolle. Kisko lepää kiskonkiinnitysten välissä olevan betonin päällä aikaansaaden näin näennäisjatkuvan kiskon tuennan. (Esveld 2001, Riessberger 2000)

Ensimmäiset kehäpölkkyt asennettiin rataan Itävallassa 1999 ja ne ovat toimineet moitteettomasti tähän päivään asti. Ensimmäisissä kehitysversioissa pölkyn pituus ja poikkisuuntaiset osat yritettiin jännittää yhtenä kokonaisuutena, mutta kokeilu ei onnistunut, sillä pölkkyjen jännittämättömissä nurkissa alkoi ilmetä halkeamia. Halkeamista johtuen päädyttiin käyttämään perinteisempää raudoitusten sijoittelua. Huomionarvoista on kuitenkin, että halkeilleet pölkkyt ovat yhä käytössä vilkkaasti liikennöidyllä radalla ja ne pystyvät moitteettomasti säilyttämään raiteen geometrian. (Riessberger 2011)



Kuva 2.9 Kehäpölkky (Esveld 2001).

2.4.6 Tikapuuratapölkky

Japanissa on kehitelty tikapuurataa (ladder track), jossa perinteiset ratapölkkyt on korvattu tikapuumallisilla ratapölkkyillä (ladder sleeper). Kyseinen pölkky koostuu kuvan 2.10 mukaisesti kahdesta 6,25 m pituisesta jännitetystä betonielementistä, jotka yhdistetään kolmella teräsputkella toisiinsa. Kyseinen ratapölkkytyyppi soveltuu erityisesti radoille, joilla on käytössä suuret akselipainot. Tikapuumallisten ratapölkkyjen käyttäminen vähentää kunnossapitokustannuksia, sillä Yhdysvalloissa tehdyssä kokeessa 150 miljoonan bruttotonnin jälkeen tikapuurataosuus ei vaatinut kunnossapitoa, kun taas vertailukohteena ollut yksiosaisista ratapölkkyistä rakennettua rataa jouduttiin tukemaan viidesti. Lisäksi kokeessa käytetty peräti 175 kN staattinen pyöräkuorma ei aiheuttanut halkeamia tai muitakaan vaurioita ratapölkkyelementteihin. (Asanuma 2004)



Kuva 2.10 Tikapuuratapölkky (Asanuma 2004).

2.5 Kiskonkiinnitys

2.5.1 Tehtävät ja vaatimukset

Nykyaikaisten kiskonkiinnitysten tehtäviksi voidaan määritellä (Ratahallintokeskus 1993):

- raidelevyden ja kiskon kallistuksen säilyttäminen
- värähtelyn ja iskukuormien vaimentaminen
- raiteesta tulevien pystysuuntaisten, sivuttaissuuntaisten ja pituussuuntaisten kuormien siirtäminen turvallisesti ratapölkkyille
- väsymisestä ja kulumisesta johtuvien vaurioiden välttäminen kiinnityksessä
- riittävän kiskon läpivetovastuksen tarjoaminen, jotta muun muassa vältetään jatkuvaksi hitsatun kiskon murtuessa halkeamaleveyden liiallinen kasvu
- riittävän sähköisen eristyskyvyn tarjoaminen.

Komponentit tulee suunnitella siten, että ne eivät aiheuta suuria lisäkustannuksia itse betoniratapölkyn valmistukseen. Kiskonkiinnitys tulee voida asentaa ja purkaa yksinkertaisesti, sekä koneellisesti että käsin. (Ratahallintokeskus 1993)

Jatkuvakiskoraiteilla betoniratapölkkyillä tarvitaan joustavia kiskonkiinnityksiä, sillä betoniratapölkkyt ovat herkkiä iskukuormille ja dynaamisille kuormille. Joustavuutta kiinnitykselle tuo ratapölkyn ja kiskon välinen välilevy. Sen päätehtävänä on jakaa junista kiskon välityksellä tulevat kuormitukset kiskon lepopinnoille ja ympäröiville ratapölkkyille suodattaen samalla korkeataajuuksisia voimahuippuja. Välilevyn jäykkyydellä on merkitystä ajateltaessa ratapölkkyyn kohdistuvia kuormia. Iskukuormasta aiheutuva venymä ratapölkkyissä on noin 50 % pienempi käytettäessä pehmeitä välilevyjä verrattuna jäykkyydeltään normaaleihin välilevyihin. (Esveld 2001)

Kiskonkiinnityksellä tulee olla riittävän suuri läpivetovastus eli kyky vastustaa kiskojen pituussuuntaista liikettä. Mikäli kiskoihin kohdistuu poikkeuksellisen suuria pituussuuntaisia voimia kiskonkiinnitykset eivät päästä kiskoa liikkumaan, vaan siirtävät voimavaikutuksen ratapölkyn ja tukikerroksen väliseen kontaktiin. (Esveld 2001.) RATO 11 määrittää läpivetovastuksen minimiarvoksi 9 kN/kiinnitys. Läpivetovastuksen minimiarvo täyttyy niin Pandrol e-clip kuin Vossloh Skl 14-kiinnityksellä. (Nummelin & Ojanperä 1996.) Nykyisellään kiskonkiinnitykset ovat sarjassa EN 13481 standardoituja tuotteita. Standardissa pienin sallittu läpivetovastus on 7 kN, kun läpivetovastus määritetään standardin EN 13146-1 mukaisesti. Läpivetovastuksen minimiarvo on 9 kN, mikäli raiteen suurin sallittu nopeus on yli 250 km/h, pienin sallittu kaarresäde 400 m ja suurin sallittu akselipaino 260 kN.

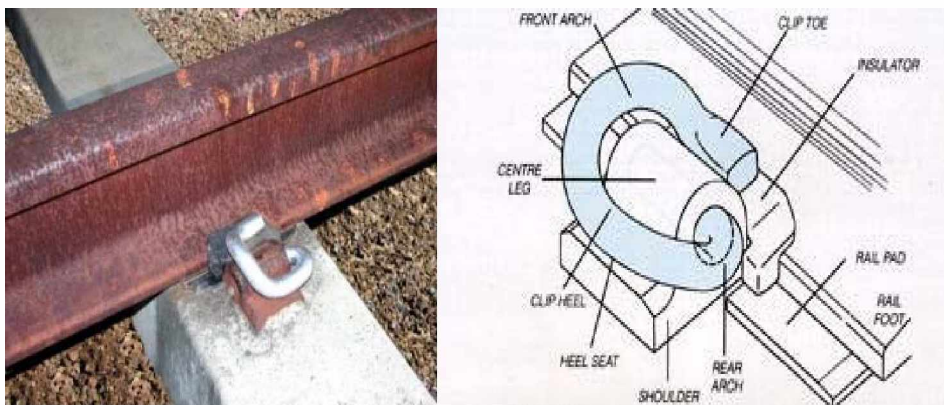
Kiskonkiinnityksen tulee olla myös rakenteeltaan ja materiaaleiltaan sellainen, että se pystyy tarjoamaan riittävän sähköisen eristyskyvyn kiskon ja ratapölkyn välille. Eristyskyvyn vähimmäisvaatimus on 5000 Ohmia (RATO 11 2002). Esimerkiksi Pandrol e-clip tarjoaa 34400 Ohmin eristyskyvyn, kun taas Vossloh Skl 14 eristyskyky on 23000–80000 Ohmia (Nummelin & Ojanperä 1996).

2.5.2 Kiskonkiinnitykset Suomessa

Suomessa betoniratapölkkyissä käytetään pääasiassa kahdentyyppisiä kiskonkiinnityksiä: kuvassa 2.11 esitettävä Vossloh Skl 14 (Vossloh W 14) ja kuvassa 2.12 esitettävä Pandrol e-clip. Näistä ensimmäinen on pääasiallinen kiskonkiinnitys nykyään Suomeen hankittavilla betoniratapölkkyillä. Pandrol e-clip-kiinnityksellä varustettuja ratapölkkyjä valmistetaan vain rataosille, joissa kiskonkiinnityksenä on e-clip ja korvattavia ratapölkkyjä ei ole suuria määriä (Järveläinen 2010). Kesästä 2011 lähtien on alettu käyttää myös Schwihagin valmistamaa W 14 900 NT kiskonkiinnitystä kiskon 60E1 kanssa. Suomessa sallittuja kiskonkiinnityksiä ovat myös Pandrol Fastclip ja Vossloh W 21, mutta tällä hetkellä Suomen rataverkolla ei ole kyseisillä kiinnityksillä varustettuja pölkkyjä. (Viitala 2011.) Aikaisemmin betoniratapölkkyissä on käytetty myös RN-, Fist- ja Vossloh Skl 1-kiinnityksiä (RATO 11 2002).



Kuva 2.11 Vossloh Skl 14-kiinnitys. Oikeanpuoleisessa kuvassa raideruuviholkki, välilevy, raideruuvi, kiinnitysrousu ja kulmakappale (Vossloh 2010).



Kuva 2.12 Pandrol e-clip-kiinnitys (Pandrol 2010).

Vossloh Skl 14-kiskonkiinnityksen etuna on muun muassa sen esiasennettavuus tehtaalla, mikä pienentää asennuskustannuksia työmaalla. Koska kaikki kiinnitysosat ovat valmiiksi kiinni ratapölkkyissä, osien hävikki työmaalla on vähäistä. Lisäksi kiinnitys on rakenteeltaan kestävä ja järeä ja näin ollen kiinnitysosien käyttöikä on sama kuin itse ratapölkkyyn. Vossloh Skl 14 sopii myös erinomaisesti routakiilaukseen aina 9 mm saakka ja normaalia pidemmällä raideruuvilla jopa 20 mm asti. Routakiilauksessa joudutaan kuitenkin käyttämään eri kulmakappaleita verrattuna routakiilaamattomaan ratapölkkyyn. Yli 20 mm routakiilauksella on mahdollista, mutta ei suositeltavaa, sillä tuolloin voimat eivät siirry pölkkyyn kulmakappaleen vaan ruuvin kautta. (Järveläinen 2010, Nummelin & Ojanperä 1996, Ratahallintokeskus 1999)

Pandrol e-clipin etuja ovat mahdollisuus routakiilaukseen standardiosilla aina 20 mm asti, joskin kiilauksen jälkeen kiinnikkeeseen on vaihdettava uudet osat. Valuankkurin käytön johdosta ei kiinnityksen kautta pääse vettä ratapölkkyihin. Kiskonkiinnitysosat eivät kuitenkaan ole esiasennettavia, mikä lisää asennuskustannuksia työmaalla. Lisäksi irto-osia saattaa hävitä työmaalla niiden jaon ja asennuksen yhteydessä. Käytön aikana on todettu, että kiinnitysjousi saattaa irrota tärinän vaikutuksesta ja myös sepeleharja saattaa irrottaa jousia. Kyseisen kiskonkiinnityksen heikkoutena on myös jousen ja kiskon välissä olevan eristimen käyttöikä, mikä on ainoastaan noin 10 vuotta. (Järveläinen 2010, Nummelin & Ojanperä 1996)

2.6 Ratapölkky pohjaimet

Ratapenkereen jäykkyys vaikuttaa yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvan kuormituksen suuruuteen ja ratapölkyn alla olevan raideseppelin kuormitukseen. Raideseppelin kuormitus määräytyy suurelta osin raideseppelin ja ratapölkyn välisen kontaktipinta-alan mukaan. Kontaktipinta-alan kasvattamiseksi on kehitelty erilaisia rakenneratkaisuja, muun muassa ratapölkyn pohjaimet (under sleeper pad, USP), joiden elastinen rakenne mukautuu betonia paremmin raideseppelin epätasaiseen pintaan. (Esveld 2001.) Pohjaimet ovat ratapölkyn pohjaan kiinnitettäviä kimmoisia mattoja ja niiden käytön tavoitteena on lisätä raiteen pystysuuntaista joustavuutta.

Raideseppelin kontaktipinta-alan kasvattamisen lisäksi toinen pohjaimilla tavoiteltava tekijä on niiden joustavuuden myötä pidentyvä raiteen taipumismatka, jolloin kiskojen pystysuuntaisen taipuman kaarevuussäde junakuorman alla kasvaa. Pystykuorma jakaantuu tällöin useammille ratapölkkyille ja siksi pienentää yhden ratapölkyn alapuoliseen tukikerrokseen kohdistuvaa maksimijännitystä. Mainittujen kahden tekijän seurauksena, kun pohjaimien kimmoiset ominaisuudet valitaan oikein, tukikerros kuluu hitaammin kuin se kuluu ilman pohjaimia. (Getzner 2009)

Valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan ratapölkky pohjaimien käytön hyötyjä ovat (Getzner 2009):

- lisää raiteen käyttöikää
- parantaa raidegeometrian laatua
- pienentää vahingollisia värähtelyitä (tätä tarkoitusta varten on erityismateriaali).

Etuna tavoitellaan myös ylläpitokustannusten pienentämistä. Vuosien 2001–2008 seuranta tutkimustulosten perusteella raiteen tukemisvälin kerrotaan kasvavan pohjaimia käytettäessä kaksinkertaiseksi verrattuna raiteeseen, jossa pohjaimia ei käytetä. Pohjaimien vaikutus tukemisvälin pituuteen korostuu raskailla kuormilla ja radan kaarteissa. Myös ratapölkkyjen pitkäaikaiskestävyys on parantunut pohjaimien vaikutuksesta. (Getzner 2009)

Itävaltalainen ÖBB:n antaman tiedotteen mukaan edellä mainittujen etujen lisäksi myös rakoja (tyhjiä tiloja) ratapölkyn päiden alla on vähemmän, välilevyjen kuluminen on vähentynyt ja kiskojen kulkupinnat ovat säilyneet tasaisempina. (Schilder 2009)

Pohjaimien käyttöikä on suunniteltu yhtä pitkäksi kuin ratapölkkyillä. Lisäksi kaikkien radan komponenttien käyttöikä pitenee kun pohjaimia käytetään. Münchenin teknillinen yliopisto on tutkinut Münchenin keskustassa sijaitsevan rautatien alta 17 vuotta asennuksen jälkeen poistettua Sylomer-materiaalia. Materiaalin

ominaisuudet on havaittu uuden materiaalin ominaisuuksia vastaaviksi. (Laitinen 2010)

Pohjoismaissa pohjaimia käyttävät ainakin Bane Denmark Tanskassa ja Jernbane-verket Norjassa. Suomessa ensimmäiset pohjaimet on asennettu Vantaankosken radalle Myyrmäkeen sekä Kauhavalle vaihteeseen vuoden 2009 aikana. (Laitinen 2010)

Ratapölkkipohjaimia käsitellään tarkemmin Tampereen teknillisen yliopiston Elinkaaritehokas rata tutkimushankkeen radan kokonaisjäykkyyttä käsittelevässä osiossa.

2.7 Betoniratapölkkyjen valmistus ja varastointi

2.7.1 Betoniratapölkkyjen kehitys ja käyttö Suomessa.

Suomessa aloitettiin betoniratapölkkyjen käyttökokeilut 1960-luvun alussa. Ulkomaisten pölkkyjen koeosuus oli 850 m pitkä ja sijaitsi välillä Lappila–Järvelä. Betoniratapölkkyjä oli taulukon 2.1 mukaisesti Saksasta, Ranskasta, Hollannista, Ruotsista ja Neuvostoliitosta. Ranskalaiset ja Hollantilaiset pölkkyt eivät olleet jännitettyjä, sillä ne olivat kaksiosaisia. Koeosuudella huonoimmat käyttökokemukset olivat Ruotsalaisista pölkkyistä. Niistä kaikki oli poistettu vuoteen 1982 mennessä kiskon kohdalla läpi pölkyn kulkevan halkeaman johdosta. (Grundfelt 1980)

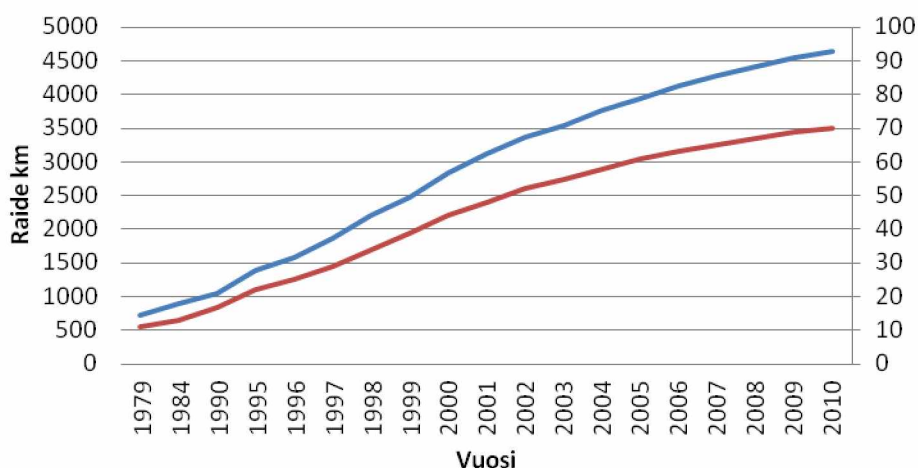
Taulukko 2.1 Suomessa koekäytössä 1960-luvun alussa olleet ulkomailla valmistetut ratapölkkyt (Grundfelt 1980).

Betoniratapölkky malli	Kiskonkiinnitys	Valmistusvuodet	kpl.
Ranskalainen R S	RN	1961	200
Saksalainen D&W	Delta-Spannbügel	1961	100
Saksalainen D&W	K	1961	100
Ruotsalainen 101	Fist	1961	200
Hollantilainen	DE	1961	200
Neuvostoliittolainen C-56-Y	K	1963	250

Ensimmäiset Suomessa valmistetut betoniratapölkkyt asennettiin rataan vuonna 1964 (Grundfelt 1980). Ratapölkkyjen käyttö lisääntyi voimakkaasti vasta 1990-luvun alkupuolella, kuten taulukko 2.2 ja kuva 2.13 osoittaa. Taulukossa on esitetty betoniratapölkkyjen kilometrimäärä raiteessa ja betoniratapölkkyjen prosentuaalinen määrä kaikista rataverkon ratapölkkyistä. Betoniratapölkkyjen yleistymisen selittyy osin niiden halvemmasta kokonaishankintahinnasta, kiskonkiinnitysosat mukaan lukien, verrattuna puuratapölkkyyn. Esimerkiksi vuonna 1987 betonisen ratapölkyn kokonaishankintahinta oli noin 13 % pienempi puuratapölkkyyn verrattuna. Puuratapölkyn korkeaan hintaan vaikuttaa merkittävästi kiskonkiinnityksen teräsosat, jotka muodostavat ison osan ratapölkyn kokonaishinnasta. Hintakilpailu hiljalleen ratkaisi materiaalivalinnan betonin eduksi. (Grundfelt 2010)

Taulukko 2.2 Betoniratapölkkyjen käytön kasvaminen (Grundfelt 1980, LiVi 2010b).

Vuosi	Km	%	Vuosi	Km	%
1979	730	11	2002	3363	52
1984	900	13	2003	3533	55
1990	1050	17	2004	3760	58
1995	1400	22	2005	3941	61
1996	1576	25	2006	4130	63
1997	1866	29	2007	4288	65
1998	2204	34	2008	4419	67
1999	2479	39	2009	4548	69
2000	2827	44	2010	4634	70
2001	3118	48			



— Betoniratapölkkyraiteita km — Betoniratapölkkyraiteita % rataverkosta

Kuva 2.13 Betoniratapölkkyt Suomen rataverkolla.

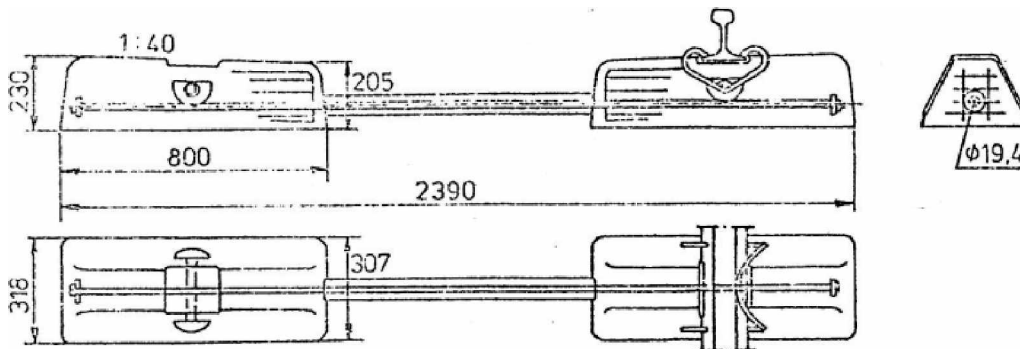
Vuosien saatossa Suomessa ratapölkkyjä on valmistanut muun muassa Kummila Oy (myöhemmin K-Betonia Oy), Oy Partek Ab, Lujabetoni Oy ja Parma Oy, joista nykyisiä betonipölkyn valmistajia ovat Lujabetoni ja Parma. Linjaratapölkkyjen lisäksi Parma valmistaa myös betonisia vaihepölkkyjä.

Taulukko 2.3 esittää B88 pölkkyä lukuun ottamatta vuoteen 2012 mennessä Suomessa valmistetut pölkkytyypit ja valmistusmäärät. Taulukon mukaisilla valmistusmäärillä on yhteenlaskettuna saatu pölkkytettyä yli 6000 kilometriä raidetta. Ruotsalainen VR101 mallin pölkky oli kaksiosainen ja muut pölkkytyypit olivat yksiosaisia. BJ66, BV69 ja BV75 pölkkyt olivat Oy Partek Ab:n ja B63 ja B75 pölkkyt K-Betonian valmistamia. K-Betonia valmisti 80-luvulla myös B82, B86 ja B88 pölkkytyypille. Nykyään Suomen rataverkolla valmistettavia pölkkytyypille ovat Parman BP89 ja BP99 sekä Lujan B97 (Kuva 2.3). (Grundfelt 1980, Järveläinen 2010)

Taulukko 2.3 Suomessa vuoteen 2012 mennessä valmistetut pölkkymallit ja valmistusmäärät B88-pölkkyä lukuun ottamatta (Grundfelt 1980, Grundfelt 2010).

Betoniratapölkkymalli	Kiskonkiinnitys	Valmistusvuodet	kpl.
VR101	Fist	1964-65	32500
B63	Fist	1964-66	100000
B63	RN	1964-67	80000
B63	Pandrol	1965-75	314700
B75	Pandrol	1976-86	671000
B82	Skl 1	1983	17300
B86	Pandrol	1986-88	193000
BJ66	RN	1966-68	55000
BJ66	Pandrol	1969-70	105000
BV69	Pandrol	1970-76	100000
BV75	Pandrol	1976-80	170000
BS75	Pandrol	1977-78	15000
BP89 & BP99	Pandrol & Skl 14	1990-	>5000000
B97	Skl 14	1997-	>3000000

Ainoaa Suomen rataverkolla enemmän käytettyä kaksiosaista VR 101 -betoniratapölkkyä valmistettiin vuosina 1964–65 yhteensä 32500 kappaletta Raj:n piirustuksen n:o 1151A mukaisena (Grundfelt 2010). VR 101 -betoniratapölkky on esitetty kuvassa 2.14.



Kuva 2.14 VR 101 -betoniratapölkky, Fist -kiskonkiinnitys (Grundfelt 2010).

2.7.2 Ruotsalaisen Abetong AB:n tuotanto

Ensimmäinen Abetong'in betoniratapölkky suunniteltiin 1950-luvun alussa. Rata-pölkky perustui SJ:n uuteen määritykseen ja tuotteeksi muodostui kuvan 2.15 mukainen ns. twin block -pölkky (tvåblockssliper). Kymmenen vuotta myöhemmin se korvattiin ensimmäisellä monoblock -pölkkyllä, joka tarjosi useita etuja sekä teknisestä että tuotannollisesta näkökulmasta. Vuosien aikana Abetong hankki vankan tietotaidon ratapölkkyjen suunnittelussa ja oli ensimmäinen yritys maailmassa, joka aloitti sarjatuotannon vaihteiden ratapölkkyille. Nämä vaihdepölkkyt on suunniteltu jokaiselle vaihteelle erikseen ja valmistetaan yhtiön patentoiman järjestelmän mukaisesti. (Abetong 2010a)



Kuva 2.15 Abetongin Vislandan (Växjön lähellä) tehtaan pihalla kuvattuja vanhoja ratapölkkyille (Abetong 2010b).

Vasemmalla on Abetongin tyyppi 101, jota valmistettiin vuosina 1955–1971 yhteensä 1350000 kappaletta. Keskellä tyyppi LSF, jota valmistettiin vuosina 1966–1976 yhteensä 900000 kappaletta. Oikealla betoniratapölkky, joka on valettu Ystadissa jo vuonna 1915, ja asennettu Malmö–Ystad-linjalle.

Kaikki Abetong'in ratapölkkyt valmistetaan nykyisin pitkien valupetien järjestelmällä. Maailmanlaajuisesti tällä menetelmällä on valmistettu yli 50 miljoonaa ratapölkkyä. Valumenetelmän etuja ovat (Abetong 2010a):

- pedit ovat vähintään 100 metriä pitkät, mikä takaa tasaisen jänneteräspunosten jännityksen
- nykyaikaiset laitteet automaattiseen betonin kuljettamiseen ja tiivistämiseen sauva- ja rullatäryttimillä sekä tärypalkilla
- kussakin valupetissä ratapölkkyt valetaan yhtenä pitkänä rivinä ja katkaistaan timanttilaikalla muotista irrottamisen ja punosjännityksen laukaisun jälkeen.

2.7.3 Betoniratapölkkyjen valmistus

Betoniratapölkkyjen valmistuksessa voidaan käyttää joko esi- tai jälkijännitystekniikkaa. Nykyään Suomessa valmistetaan ainoastaan esijännitettyjä betoniratapölkkyjä. Vielä 1980-luvulla Suomessa valmistettiin Dywidag-ankkurijännemenetelmällä jälkijännitettyjä betoniratapölkkyjä. Menetelmällä valmistettuja pölkkytyyppejä olivat B63, B75, B82, B86 ja B88. Kyseisellä tekniikalla jännittäminen tapahtuu vasta kun betoni on saavuttanut riittävän puristuslujuuden. Jänneterästangot asennetaan valun aikana pölkkyssä olleiden teräsmatriisien eli tankojen tekemiin kanaviin, minkä jälkeen jänneterästangot jännitetään tunkeilla tavoitejännitykseen. Kun tavoitejännitys on saavutettu, esiasennetut mutterit kierretään ankkurointikappaletta vasten. Tämän jäl-

keen jänneterästen ympärillä oleva tyhjätila injektoidaan injektointilaastilla umpeen. (Järveläinen 2010, K-Betonia 1986)

Pölkkyjä valmistettaessa jälkijännitystekniikalla on hyvinä puolina muun muassa pienet investointikustannukset, tuotannon pieni tilantarve ja pieni muottimäärä. Lisäksi jokainen pölkky jännitetään erikseen, jolloin ainakin teoriassa voidaan olla vakuuttuneita jokaisen pölkyn jännityksen suuruudesta. Menetelmän huonoina puolina on suuri työvoiman tarve, runsas valutapahtumien määrä ja siten alhainen tuotantonopeus. Lisäksi jännityksen jälkeinen terästen ympärillä olevan tyhjän tilan injektointi on lisätyö, mitä ei muissa menetelmissä ole. (K-Betonia 1987)

Nykyään esijännitystekniikalla valmistettavat ratapölkkyt valmistetaan usein pitkien valupetien järjestelmällä (pitkälinjamenetelmä). Suomessa sekä Luja että Parma käyttävät tätä järjestelmää. Myös Ruotsalainen Abetong AB käyttää pitkien valupetien järjestelmää.

Pitkälinjamenetelmässä ratapölkkyt valmistetaan pitkällä pedillä, jossa on useita muotteja vierekkäin. Petien pituus voi olla yli 100 m. Jännittäminen voi tapahtua joko yhden muottirivin tai koko valupedin jännittämisellä aktiivipäästä. Menetelmän etuja ovat. pieni työvoiman tarve ja suuri päivätuotanto. Vastaavasti haittoja ovat suuret alkuinvestoinnit ja suuri tilantarve. Lisäksi pölkkyihin mahdollisesti tulevat muutokset vaativat isomman työn muottien muuttamisessa verrattuna jälkijännitystekniikalla pölkkyjä valmistavaan tehtaaseen. Syynä tähän on pitkälinjamenetelmässä käytävä suurempi muottien määrä. (K-Betonia 1987)

Tällä hetkellä Suomessa betoniratapölkkyjä valmistavat Lujabetoni Oy Siilinjärvellä ja Parma Oy Forssassa. Nämä ovat ainoat ratapölkkyjen valmistajat, jotka toimittavat ratapölkkyjä Suomen valtion omistamille rataosuuksille. Betoniratapölkkyjen valmistusmäärät vaihtelevat vuosittain riippuen uudisrakentamis- ja kunnossapitokohteiden määrästä. Esimerkiksi vuonna 1997 betoniratapölkkyjen tarve oli noin 700000 kappaletta, kun taas vuonna 2009 betoniratapölkkyjä valmistettiin alle 300000 kappaletta. (Jaakkola 2010, Järveläinen 2010)

Ratkaisevaa ratapölkkyjen valmistuksessa on betonin jälkihoito. Pölkkyjen tulee pysyä kosteina riittävän pitkään, jotta betoniin ei synny kutistumishalkeamia. Pölkkyjä tulee sumuttaa vedellä käsittelyn eri vaiheissa ja ennen varastointia pölkkyt pitää käsitellä suoja-aineella. Liikenneviraston esijännitettyjen betoniratapölkkyjen toimitusehtojen määräämä suoja-aine on Curing 101. Mikäli suoja-ainetta ei käytetä, ratapölkkyt tulee pitää riittävän kosteina seitsemän vuorokauden ajan. (Jaakkola 2010, Ratahallintokeskus 2008.) Liikenneviraston asettamat laatuvaatimukset täyttyviä jälkihoitoaineita ovat Curing 101 SF ja Antisol E sekä varhaisvaiheen jälkihoitoaine Masterkure 111 CF (Liikennevirasto 2010c). Curing 101 jälkihoitoainetta lukuun ottamatta muita jälkihoitoaineita ei ole kuitenkaan hyväksytty tämänhetkissä betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa.



Kuva 2.16 Lujabetoni Oy:n käyttämä jälkikäsitteilytila, jossa ratapölkkyt pidetään riittävän kosteina seitsemän vuorokauden ajan ilman jälkihoitoainetta.

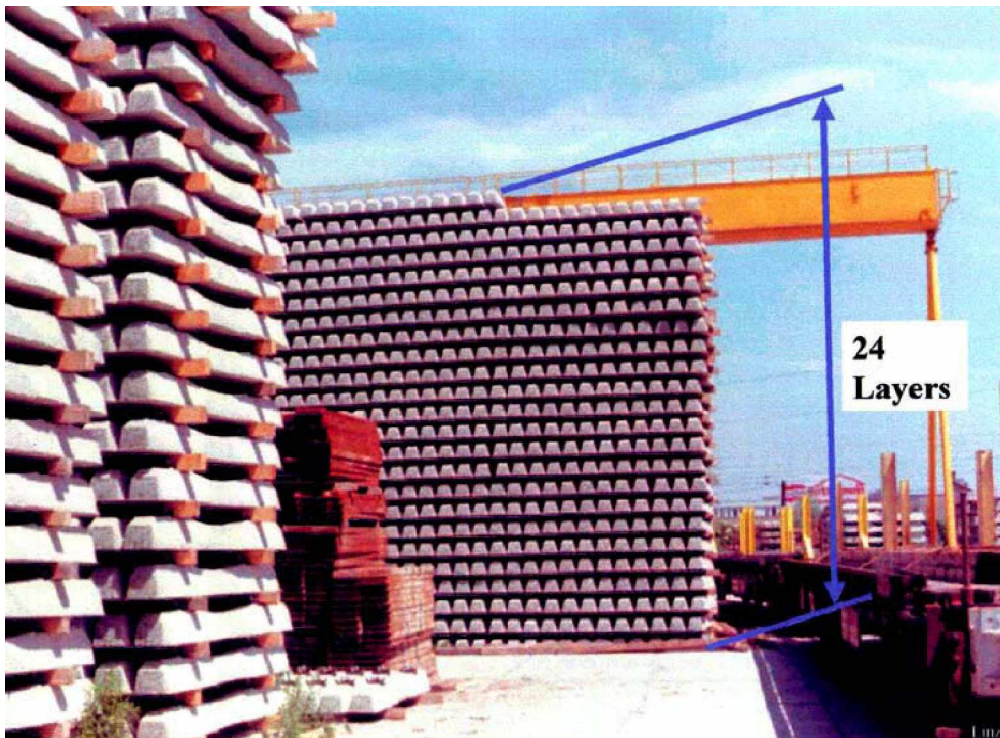
Useissa maissa betoniratapölkkyjä on lämpökäsitelty muottikierron nopeuttamiseksi. Suomessakin ratapölkkyjä on lämpökäsitelty. Lämpötilan aiheuttamien ongelmien johdosta varsinaisesta lämpökäsittelystä on kuitenkin luovuttu. Liikenneviraston teknisten toimitusehtojen mukaisesti ratapölkkyjen lämpötila kuivumisen aikana ei saa ylittää 55 astetta. Lämpötilan ylittyminen saattaa johtaa haitalliseen ettringiitin muodostumiseen (ks. kohta 5.3.2.1) ja tätä kautta betoniratapölkkyjen pitkäaikaiskestävyyden heikkenemiseen. (Levomäki & Valtonen 2001, Ratahallintokeskus 2008)

Mahdollisessa lämpökäsittelyssä betonin lämpötila sovitetaan betonin koostumuksen ja lämpökäsittelymenetelmän mukaan. Valettaessa betonin lämpötila saa olla korkeintaan 30 °C ja valun jälkeisen alkusäilytyksen on ennen mahdollista lisälämmitystä oltava kestoltaan vähintään 3 tuntia. Betonin suurin lämpötila on pyrittävä pitämään korkeintaan 50 asteessa. Lämpötilan nousu ja lasku saavat olla korkeintaan 15 °C tunnissa. Betoniratapölkky on suojattava kuivumiselta. (Ratahallintokeskus 2008)

Ruotsissa lämpökäsittely on kielletty. Lämmönkehitystä pitää seurata ja dokumentoida. Betonimassan maksimilämpötila valun alkamishetkellä on 30 °C. Ylin sallittu lämpötila valmistusprosessin aikana on 55 °C, joten Ruotsissa käytössä oleva ohjeistus on lämpötilojen osalta hyvin samankaltainen kuin Suomessa. (Banverket 2002)

2.7.4 Betoniratapölkkyjen varastointi

Betoniratapölkkyjä varastoidaan ratapölkkytehtailla, varastoalueilla sekä työmailla. Suomessa ratapölkkyt pinotaan enintään 20 päällekkäisen pölkyn pinoiksi (Levomäki & Valtonen 2001). Ulkomailla, kuten kuvassa 2.17, ratapölkkyjä varastoidaan edellä mainittua korkeampiinkin kasoihin. Varastoitaessa pölkkyt tuetaan kiskonkiinnitysalueelta ja eri ratapölkkykerrosten väliin on asetettava niin korkeat välipuut, että pölkkyt eivät kosketa toisiaan. Välipuuden on oltava myös riittävän pitkiä, etteivät pinot pääse kallistumaan. Ratapölkkypinojen perustukset on tehtävä siten, että haitallisia painumia ei pääse syntymään (Levomäki & Valtonen 2001).



Kuva 2.17 Betoniratapölkkyjen varastopino (Heinz 2000).

Suomessa ratapölkkyjen kuljetus pyritään järjestämään varastoalueilta työmaalle junakuljetuksena. Erityisesti jos ratatyömaalle kuljetettavien ratapölkkyjen määrä on suuri, kuljetetaan ne rautateitse. Jos määrä on pienempi, esimerkiksi alle 1000 kpl, tai jos kohde on lähellä pölkkyjen säilytyspaikkoja, järjestetään kuljetus rekkakuljetuksena. (Pelkonen 2010, Järveläinen 2010)

2.8 Vaihtoehtoiset materiaalit betoniratapölkylle

2.8.1 Puinen ratapölkky

Umpinainen puu on ollut paljon käytetty, perinteinen ratojen pölkky materiaali saatavuutensa, käytön helppoutensa ja joustavuusominaisuuksiensa vuoksi. Useita puulajeja on käytetty puuratapölkkyjen materiaalina viimeisten 150 vuoden aikana. Erityisesti tavaraliikenteessä puuratapölkkyistä on hyviä kokemuksia. (IHHA 2009.) Puuratapölkyn tukikerrokselle välittämät kuormat jakautuvat tukikerrokselle tasai-

semmin verrattuna esimerkiksi betoniratapölkkyyn. Tämä johtuu siitä, että puurata-pölkky mahdollistaa sepelirakeiden painautumisen pölkkyyn ja siten suuremman tukikerroksen rakeiden ja pölkyn välisen kontaktialan.

Suomessa betoni on korvannut laajalti puun pölkkyateriaalina, mutta edelleen noin 30 % raiteista on varustettu puisilla ratapölkkyillä. Uusia puurata-pölkkyjä valmistetaan Oy VR-rata Ab:n Haapamäen kyllästämöllä, missä pölkkyjä valmistettiin joitain vuosia sitten 130000-160000 kappaletta vuodessa. (LiVi 2010b, Tunninen 2007)

Puulajilta vaaditaan suurta tiheyttä, joka luo pohjan kiskonkiinnikkeiden paikallaan pysymiseen ja kiskojen kohdan kulutuskestävyyteen. Raskaammat ratapölkkyt myös tekevät raiteen stabiilimmaksi. IHHA:n (2009) mukaan tiheyden pitäisi olla yli 800 kg/m^3 . Suoja-aineet pienentävät sään vaikutuksia ja pidentävät täten puurata-pölkkyjen käyttöikä. Punatammaa käytetään yleisesti Yhdysvalloissa ja trooppisia kovapuulajeja, kuten Azobea, käytetään muualla. Jos tiheys on riittävä, IHHA (2009) toteaa vaahterasta, Douglas-kuusesta, hickoripuusta, eukalyptuksesta ja eteläisestä keltaisesta männystä valmistettavat puupölkkyt käyttökelpoisiksi. Puisia komposiittiratapölkkyjä käytetään rajoitetusti tavaraliikenteen radoissa. (IHHA 2009)

Kun kaarteen säde on vähemmän kuin 1000 m (2°), IHHA:n (2009) mukaan puurata-pölkkyissä tulee käyttää joustavia kiskonkiinnikkeitä. Isot poikittaiset voimat pidentävät naulareikiä ratapölkyn pituussuuntaan.

TTCI:n (Transportation Technology Center, Inc.) FAST (Facility for Accelerated Service Testing) -testiradalla tutkittiin puulajin kovuuden vaikutusta raidelevyyden kasvuun 61 m pitkällä kaarevalla rataosuudella. Pienemmän tiheyden pehmeäpuupölkkyistä tehdyllä osuudella tarvittiin raidelevyyden korjaus aina 200 MGT (US Tons) liikenteen jälkeen. Suuremman tiheyden kovapuulajeilla vastaava toimenpide vastaavissa olosuhteissa tarvittiin vasta 600 MGT jälkeen. (IHHA 2009)

Kosteassa ilmanalassa ja erityisesti, kun radalla on tiukkoja kaarteita, puisen ratapölkyn elinkaari raidelevyyden kasvun ja muiden syiden takia on melko lyhyt. Länsi-Kanadan vuoristoseudulla liikennemäärällä 30 Mbrt/vuosi kaarteissa keskimääräinen pehmeistä puulajeista tehtyjen ratapölkkyjen käyttöikä on kuusi vuotta, kun kovapuupölkkyjen käyttöikä on 12 vuotta (Raymond 1978).

Vuonna 1957 avattiin 640 km pitkä Quebec North Shore–Labrador -rataosuus Kanadassa. Radalla oli kovapuupölkkyt, joista noin 1 % uusittiin ensimmäisen vuoden aikana ja 6 % ennen viidennen vuoden loppua. Vertailuna Raymond (1978) esittää, että Canadian National Railway (CN Rail) vaihtaa 0,3 % betoniratapölkkyistä viiden vuoden aikana. Tämän lisäksi betoniratapölkyn puupölkkyä parempi kyky säilyttää raideleveys on tuplannut kiskojen iän koeradalla. British Rail on havainnut 4 % säästön polttoaineen kulutuksessa jäykässä betonipölkkyraiteessa verrattuna puupölkkyraiteeseen (Raymond 1978).

Puisia ratapölkkyjä käsitellään enemmän kohdassa 6.2 painottaen kreosootin käytön mahdollisen kieltämisen myötä kyseeseen tulevia vaihtoehtoisia ratkaisuja.

2.8.2 Teräksinen ratapölkky

Teräksisten ratapölkkyjen käyttö on ulkomaillakin suhteellisen vähäistä. Suurimmat teräspölkyn käyttöä rajoittavat tekijät ovat korkea hankintahinta, huono sähköinen eristävyys ja ongelmat kunnossapidossa. (Esveld 2001.) Erimuotoiset teräspölkkyt painavat noin 35-100 kg ja niiden korkeus sekä leveys ovat muita pölkkytyyppejä pienempiä. Esimerkiksi puuratapölkkyt painavat kosteudesta riippuen noin 70-100 kg ja betoniratapölkkyjen massa on mallista riippuen pääsääntöisesti 200-300 kg. Betonista valmistettujen ratapölkkyjen massa voi olla myös selvästi edellä mainittua suurempi, sillä esimerkiksi leveä ratapölkky painaa noin 560 kg. Teräspölkkyjen pienemmän korkeuden ansiosta tukikerroksen paksuutta voidaan kuitenkin hieman pienentää, jos tavoitteena on pölkyn alapuolisen raidesepelikerroksen määrittäminen yhtä suureksi kuin se on esim. betonipölkkyillä, mutta pölkyn kovuus taas kasvattaa tukikerrosateriaalin lujuusvaatimuksia. Teräspölkyn sivusuuntainen vastus on pieni, mutta sitä voidaan parantaa pölkyn muotoilulla. (Tunninen 2007.) Teräsratapölkkyt kehitettiin pitkäikäiseksi ratapölkkyksi, jolla voidaan korvata yksittäisiä puuratapölkkyjä (IHHA 2009).

TTCI:n testiradalla tehdyissä kokeissa (Jimenez et al. 2000) teräsratapölkkyt eivät toimineet hyvin. Teräsratapölkkyraide vaati jatkuvaa kunnossapitoa. Dynaamisten kuormien alaisena tukikerroksen raidesepeli hienoni nopeasti (kuva 2.18). Raidetta kuormitti 170 miljoonan tonnin liikennemäärä (MGT), akselikuorman ollessa 39 tonnia ja junan nopeuden 62 km/h. Testin tuloksena havaittiin sekä positiivisia että negatiivisia teräsratapölkkyjen ominaisuuksia.

Negatiivisina havaintoina teräsratapölkkyraiteesta todettiin, että (Jimenez et al. 2000):

- raiteen huoltotoimenpiteitä (esim. tukeminen) tarvittiin jokaisen 7 MGT jälkeen, kun puuratapölkkyradalla FAST:ssa huoltoa tarvittiin vasta 150 MGT jälkeen
- tukikerros jauhaantui teräsratapölkkyradalla nopeasti
- tavanomaisen raskaan tavaraliikenteen dynaamisen kuormituksen aiheuttama raiteen toistuva pystysiirtymä (pumppaava liike) sai vaunut keinumaan enemmän kuin puuratapölkkyradalla ollen todennäköinen syy myös edellä mainittuihin ilmiöihin.

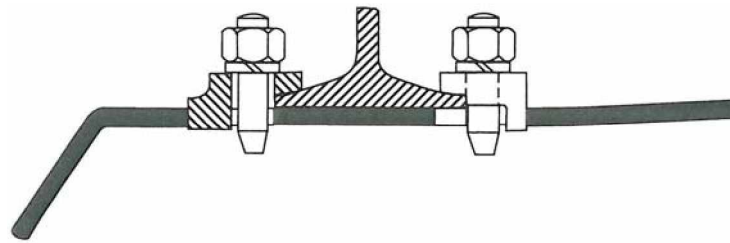


Kuva 2.18 Tukikerros jauhaantui teräsratapölkkyradalla nopeasti raiteen toistuvan pystysiirtymän seurauksena (Jimenez et al. 2000).

Vastaavasti positiivisina testituloksina Jimenez et al. (2000) totesivat, että:

- yksittäisen teräsratapölkyn sivuttainen vastus oli suurempi kuin puuratapölkyn sivuttainen vastus
- teräsratapölkkyraiteessa raideleveys säilyi paremmin kuin puuratapölkkyraiteessa sekä naulakiinnitystä että joustavaa kiinnitystä käytettäessä.
- 360 MGT jälkeen ei havaittu merkittävää kulumista kiskojen kiinnityskohdissa, välilevyissä tai eristimissä
- 20 puupölkyn pituinen raide joustavilla kiskonkiinnikkeillä toimi hyvin yhteen teräsratapölkkyraiteen kanssa.

Kuva 2.19 näyttää suoran kiskonkiinnityksen teräsratapölkkyyn. Yhtenä esitetyn kiinnityksen haittana on, että reiät ratapölkkyssä pyrkivät levenemään ja pölkyn halkeilu saattaa saada alkunsa näistä rei'istä. Näiden haittojen välttämiseksi ratapölkyn yläpintaan on hitsattu pohjalaattoja, joihin puolestaan voidaan kiinnittää esim. irralliset teräsosat kiskon kiinnittämiseksi. (Lichtberger 2005)

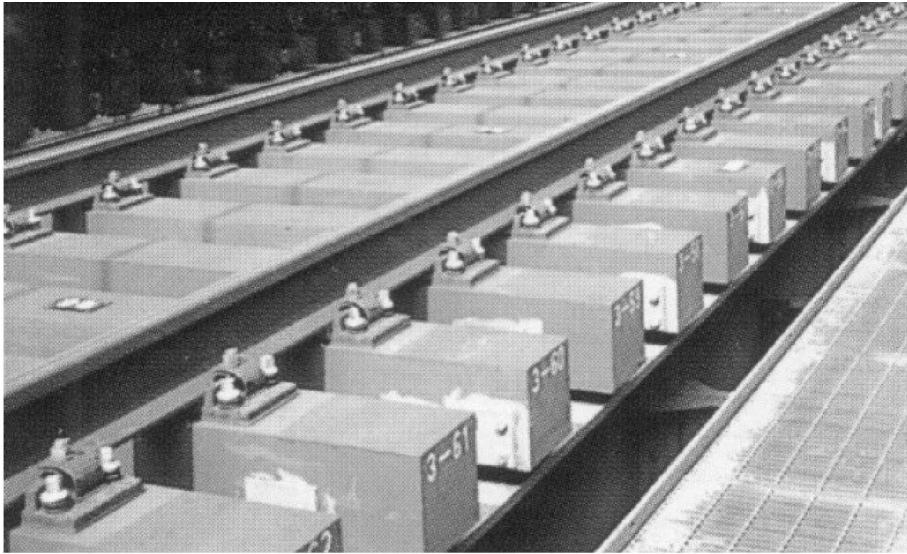


Kuva 2.19 Kiskon suora kiinnitys teräsratapölkkyyn (Lichtberger 2005).

Suomessa teräksiset ratapölkkyt ovat olleet vain koekäytössä ja ne eivät ole kokemusten myötä yleistyneet laajempaan käyttöön. (Viitala 2011)

2.8.3 Synteettinen ratapölkky

Puuratapölkyn huonojen ominaisuuksien, erityisesti pitkäaikaiskestävyyden, parantamiseksi ja ympäristön suojelemiseksi on pyritty kehittämään synteettisiä ratapölkkyjä. Todennäköisesti vanhin ja eniten käytetty synteettistä materiaaleista valmistettu ratapölkky on kehitetty Japanissa. Pölkyn valmistus on aloitettu vuonna 1980 ja 25 vuoden aikana valmistettiin 1,3 miljoonaa synteettistä ratapölkkyä. Niillä korvattiin puuratapölkkyjä vaihteissa ja terässilloilla (kuva 2.20). Takai et al. (2006) toteavat, että vuonna 2006 valmistettiin noin 100000 synteettistä ratapölkkyä vuosittain. Ne valmistetaan kovetetusta vaahdotetusta polyuretaanista ja lasikuidusta automatisoidusti tehdasolosuhteissa. Valmistusprosessia on kehitetty 20 vuoden ajan. Materiaalille käytetään lyhennettä FFU, mikä on lyhenne sanoista Fiber-reinforced Formed poly-Uretane. Se kestää hyvin muun muassa happoja, alkaliineja ja suolaista vettä. (Takai et al. 2006)



Kuva 2.20 Synteettisiä ratapölkkyjä terässillalla Japanissa (Takai et al. 2006).

Takai et al. (2006) arvioivat synteettisten ratapölkkyjen säilyttävän ominaisuutensa 50 vuotta ja käytännössä ne ovat palvelleet jo yli 25 vuotta. Japanissa synteettisille ratapölkkyille on valmisteltu JIS-standardia, joka on tarkoitettu sekä kotimaassa että vientikohteissa hyödynnettäväksi sisältäen muun muassa ratapölkkyjen testausmenetelmät. Takai et al. (2006) listaavat synteettisen FFU-ratapölkyn fysikaalisiksi ominaisuuksiksi:

- riittävä mekaaninen lujuus
- lahoamattomuus, pilaantumattomuus ja alhainen vedenläpäisevyys
- muoto- ja mittapysyvyys
- hyvä sähköneristyskyky
- naulojen ja raideruuvien riittävän hyvä kiinnipysyvyys
- riittävä säänkestävyys
- helppo asennettavuus
- pitkäikäisyys
- kimmomoduuli 8100 MPa
- puristuslujuus 58 MPa
- leikkauslujuus 10 MPa.

Synteettisen ratapölkky on kevyt, sen massa on noin 1/5 betoniratapölkyn massasta, minkä vuoksi sen asentaminen sillalle on helppoa jopa miesvoimin, ja raskaita asennuskoneita ei tarvita. Vaihteisiin voidaan helposti valmistaa erimittaisia pölkkyjä kuvassa 2.21 esitetyllä tavalla.



Kuva 2.21 Synteettisten vaihdepölkkyjen koeasennusta Taiwanissa (Takai et al. 2006).

3 Ratapölkyn rasitukset ja toiminnan perusteet

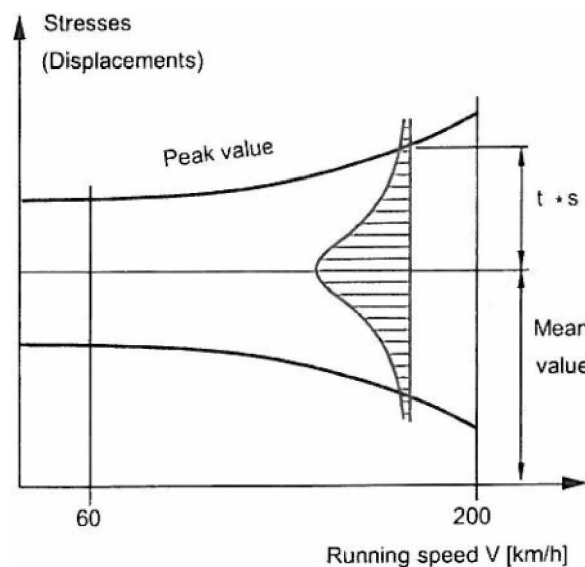
3.1 Ratapölkkyyn liikennekuormasta kohdistuvarasitus

3.1.1 Liikennekuormitus

Liikennekuormituksen raiteeseen kohdistamat voimat voidaan jakaa pysty- ja vaakasuuntaisiin voimiin. Kuormat voidaan jakaa niiden ominaisuuksien perusteella staattisiin, kvasistaattisiin ja dynaamisiin kuormiin. Staattiset voimat muodostuvat suoralla raiteella paikallaan olevasta kalustosta. Kvasistaattisia voimia syntyy liikkuvan kaluston painosta, keskipako- ja keskeisvoimista kaarteissa ja vaihteissa sekä kalustoon kohdistuvasta sivutuulesta. Dynaamisia voimia aiheutuu muun muassa radassa esiintyvien poikkeamien sekä kisko- ja pyörävikojen johdosta. (Esveld 2001)

Paikallaan oleva juna aiheuttaa raiteeseen lähinnä vain staattisen kuorman. Junan nopeuden ja painon kasvaessa raiteeseen kohdistuu merkittäviä dynaamisia kuormia. Merkittävien korkeataajuuksisen iskukuorman aiheuttaja on junan pyörien epätasaisuus eli ns. lovipöyrä.

Raiteeseen kohdistuvan kuorman suuruus voidaan ajatella riippuvaiseksi junan nopeudesta periaatekuvan 3.1 mukaisesti. Kuvasta nähdään, että nopeudella 200 km/h mitoittava arvo on paljon keskiarvoa suurempi. Mitoittavan arvon suuruus arvioidaan yleensä kertomalla staattinen kuorma dynaamisella kertoimella (DAF = Dynamic Amplification Factor). Dynaaminen kerroin arvioidaan junan nopeuden, radan geometrisen kunnan ja halutun varmuustason perusteella arvioidun todennäköisyystekijän mukaan.

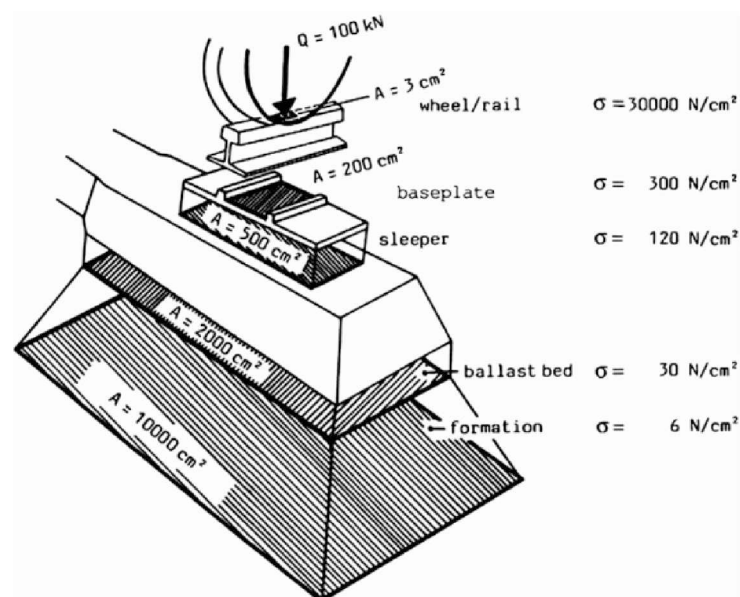


Kuva 3.1 Periaatekuva kiskoon kohdistuvan kuormituksen jakautumasta junan nopeuden funktiona, s = keskihajonta ja t = valittavan luotettavuustason mukainen kerroin (suositusarvo 3) (Esveld 2001).

Suurimmat yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvat voimat aiheutuvat iskukuormista. Iskukuormat ovat luonteeltaan erittäin lyhytkestoisia (1-10 ms), mutta samalla erittäin suuria. Iskukuormien suuruus voi olla pahimmillaan jopa kuusinkertainen staattiseen kuormaan verrattuna (Samppala 2011). Yleisimpiä iskukuormien aiheuttajia ovat erinäiset pyöräviat, kuten lovipyörä sekä kiskoviat. Useissa maissa iskukuormia pidetäänkin suurimpana yksittäisenä ratapölkkyjen vaurioiden aiheuttajana. (FIP 1987, Kaewunruen & Remennikov 2007)

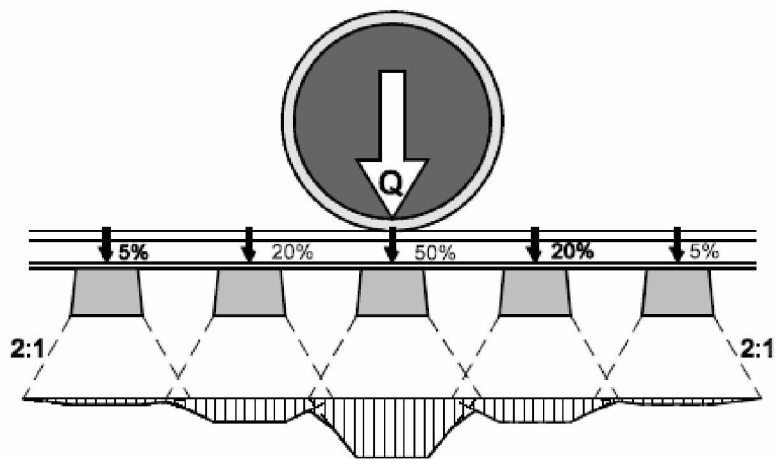
3.1.2 Pyöräkuorman jakautuminen ratapölkkyille raiteen pituussuunnassa

Junan paino siirtyy pyörien välityksellä kiskoon ja edelleen ratapölkkyille ja rata-penkereeseen. Pyörän kosketuspinnan erittäin pienelle pinta-alalle keskittynyt rasitus jakaantuu toisaalta pituussuunnassa kiskojen välityksellä usealle tuelle ja toisaalta jokaisella tuella kiskonjalan alapuoliselle tukipinnalle. Tukipinnalla jännitys siirtyy välilevyn kautta ratapölkkyille. Ratapölkkyt puolestaan siirtävät rasitukset tukikerrokseen jakaen niitä myös radan poikittaissuunnassa. Tukikerroksen alapuolisissa rakennekerroksissa jännitykset jakautuvat edelleen laajemmalle alalle kuvan 3.2 mukaisesti. (Kohler 2002)

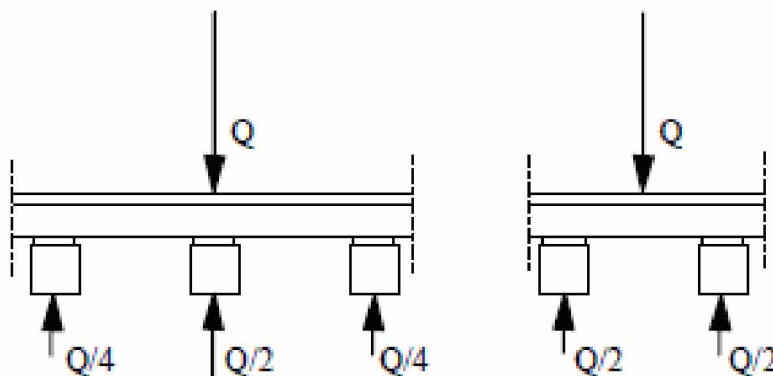


Kuva 3.2 Pyöräkuorman jakaantuminen jännitykseksi eri rakenneosissa (100 N/cm² = MN/m² = 1000 kN/m²) (Kohler 2002).

Kuvassa 3.3 on esitetty pystysuorien kuormien jakautuminen pölkkyistä tukikerrokseen RATO 11 mukaisesti ja kuvassa 3.4 Ruotsissa käytettävän Banverketin ohjeistuksen mukaisesti.

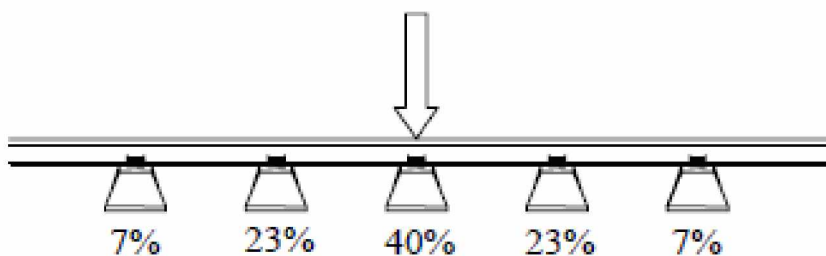


Kuva 3.3 RATO 11 (2002) mukainen pystysuorien kuormien jakautuminen pölkystä tukikerrokseen.



Kuva 3.4 Banverketin esittämä pyöräkuormien jakautuminen ratapölkkyille (Thun 2006).

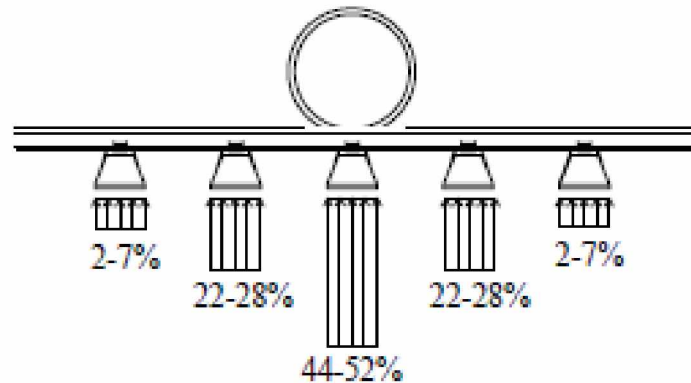
Kuvissa 3.5 ja 3.6 on esitetty edellisestä poikkeavia pystykuormien jakautumisia eri ratapölkkyjen kesken. Profillidis (2000) esitti mittausten ja mallintamalla saatujen tulosten perusteella yhdelle ratapölkkyille kohdistuvaksi maksimikuormaksi 40 % akselikuormasta.



Kuva 3.5 Pyöräkuormien jakautuminen ratapölkkyille (Profillidis 2000).

Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa (Holm et al. 2002) havaittiin pyöräkuormien suuruuden vaikuttavan kuormien jakautumiseen viereisten ratapölkkyjen kesken. Tutkimuksessa arvioitiin akselikuormien kasvun johtavan kuormien keskittymiseen juuri kuorman alapuolella olevaan ratapölkkyyn. Kuvassa 3.6 on esitetty pääsääntöisesti vallitseva tilanne kuormien jakautumisen osalta. Yksittäiselle pölkkyille kohdistuva

kuorma voi kuitenkin olla kuvan esittämiä prosenttiosuuksia suurempi. Esimerkiksi 30-tonnin akselikuorman alla jopa 60 % kuormituksesta kohdistuu yksittäiseen ratapölkkyyn.



Kuva 3.6 Holm et al. (2002) esittämä pyöräkuormien jakautuminen ratapölkkyille.

Ratapölkyn suunnittelun pitää perustua kiskon kohdan maksimikuormaan. Tämä kuorma kasvaa, kun raiteen alustaluku kasvaa siten, että ratapenkereen jäätyessä kuorma on suurimmillaan. Raymondin (1978) mukaan jäätyneen tukikerroksen tarjoama alustaluku on noin kaksinkertainen verrattuna hyvin tiivistettyyn sulaan soratukikerrokseen. Alustaluvun ollessa pieni jakaantuu pyöräkuorma useammalle ratapölkkyille. (Raymond 1978)

Jäykkä kisko luonnollisesti jakaa kuormaa laajemmin peräkkäisten pölkkyjen välillä. Sen lisäksi ratapenkereen jäykkyydellä on suuri merkitys kuormien jakautumiseen vierekkäisten ratapölkkyjen kesken. Jäykkä ratapenger joustaa ratapölkkyjen alla vain vähän, joten pölkky ei pääse liikkumaan pystysuunnassa. Tämä aiheuttaa kuormien suuremman keskittymisen yksittäiselle ratapölkkyille. Näin ollen ratapenger ei saa olla liian jäykkä, jotta kuormat jakautuisivat tasaisemmin vierekkäisille ratapölkkyille. Erityisesti dynaamisten kuormien aiheuttamat rasitukset kasvavat ratapenkereen liian suuren jäykkyyden myötä. (Kaewunruen & Remennikov 2008)

Dynaamisten kuormien kannalta erityisen kriittisiä osuuksia radassa ovat kohdat, joissa radan jäykkyys muuttuu nopeasti. Radan pituussuunnassa esiintyvät ratapenkereen jäykkyyksimuutokset luovat edellytykset dynaamisten kuormien synnylle (Lei & Mao 2004). Betoniratapölkky on erityisen herkkä taajuudeltaan 25-300 Hz värähtelylle (Esveld 2001). Radan pituussuuntaisia jäykkyyksimuutoksia esiintyy esimerkiksi vaihteissa, tunnelien ja kalliroleikkausten päädyissä, tasoristeyksissä, silloilla ja rum-pupaikoilla tai raiteen tuentatilan vaihtuessa. Jäykkyyksimuutos luo edellytykset dynaamisen kuormituslisän synnylle, kun pehmeämpi ratapenger joustaa junan painon alla jäykkää ratapengertä enemmän. Jäykkyyksimuutosalue antaa junalle dynaamisen kuormituksen synnyttävän herätteen. Ratapenkereen jäykkyyksimuutoksessa raiteeseen voi myös toistuvan kuormituksen myötä syntyä pysyvä epätasaisuuskohta (Lei & Mao 2004).

Kiskon taivutusjäykkyyden ohella ratapenkereen ja välilevyn jäykkyys sekä raiteen tuentatila vaikuttavat täten merkittävästi kuorman jakautumiseen ja yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvaan maksimikuormitustasoon.

3.1.3 Puutteellinen kontakti tukikerrokseen

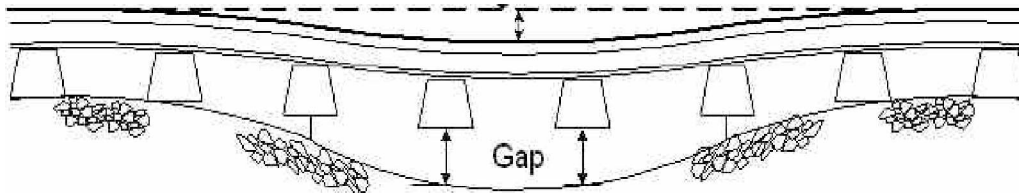
Ratapölkkyjä suunniteltaessa otaksutaan pääsääntöisesti ratapölkyn ja tukikerroksen olevan täydellisessä kontaktissa keskenään. Kuitenkin ratapölkyn alla on usein tyhjää tilaa, jolloin kontakti on puutteellinen. Syynä tähän on toistuvat dynaamiset kuormat, jotka johtavat tukikerroksen epätasaiseen tiivistymiseen, sepelin kulkeutumiseen pois ratapölkyn alta sekä sepelin hienontumiseen. Yksittäisen junan aiheuttamat muodonmuutokset ovat pieniä, mutta kumuloituvat tuhansien ylityskertojen myötä merkittäviksi. Tämä voi aiheuttaa tyhjän tilan muodostumisen ratapölkyn alle. (Kaewunruen & Remennikov 2007, Lundqvist & Dahlberg 2005.) Joissain tilanteissa tämä voi johtaa yksittäisten ratapölkkyjen ja tukikerroksen kontaktin häviämiseen kokonaan, jolloin ratapölkky jää tukemattomana kiskojaan varaan. Augustin et al. (2003) arvioivat, että radassa olevista pölkkyistä jopa yli 50 % on huonosti tuettuja tai ne eivät ole ollenkaan kontaktissa tukikerrokseen.

Mikäli yksittäinen ratapölkky ei ole tukeutunut sepeliin, aiheuttaa se kuormituslisän sekä edessä että myös jäljessä olevaan ratapölkkyyn. Junan kulkusuunnassa tukemattoman ratapölkyn jälkeinen ratapölkky kohtaa suurimman kuormituksen, koska tukemattoman ratapölkyn kohdalla oleva junan pyörä on kiihtyvässä liikkeessä alaspäin. Junan pyörän ollessa seuraavan ratapölkyn kohdalla kiihtyvyys muuttua nopeasti suuntaansa ja samalla aiheutuu kuormituslisäys ratapölkkyyn. Kyseisessä tilanteessa tukikerrokseen tukeutumattoman ratapölkyn jälkeiseen ratapölkkyyn kiskon lepopinnan kohdalle muodostuvat jännitykset kasvavat merkittävästi (Kaewunruen & Remennikov 2007, Lundqvist & Dahlberg 2005, Zhang et al. 2008). Betoniratapölkyn kannalta kriittisin tilanne on, kun yksittäistä tuettua ratapölkkyä ympäröi molemmin puolin tukikerrokseen tukeutumattomat ratapölkkyt (Lundqvist & Dahlberg 2005).

Lundqvistin & Dahlbergin (2005) tekemän mallinnuksen mukaan tukematon ratapölkky, joka on tukemattomana 1 mm etäisyydellä raideseppelin pinnasta, aiheuttaa raiteeseen jäykkyyksimuutoksen, jonka seurauksena tukemattoman ratapölkyn jälkeisen ratapölkyn ja raideseppelin välinen kontaktivoima kasvaa 50 kN:sta 84 kN:iin ja ratapölkyn siirtymä kasvaa noin 40 % junanopeuden ollessa 90 m/s. Lisäksi kyseiseen ratapölkkyyn kiskon alapuolelle muodostuva jännitys kaksinkertaistuu. Ratapölkyn ja raideseppelin kontaktivoimat ovat 60 m/s ja 30 m/s nopeuksilla vastaavasti 73 kN ja 67 kN. Näin ollen nopeuden kasvulla on suuri merkitys tukemattoman ratapölkyn jälkeisen ratapölkyn ja tukikerroksen väliseen kontaktivoimaan ja siten myös ratapölkyn rasitukseen. Ratapölkyn alla oleva 0,5 mm rako kuormituksen yhteydessä aikaansaa Lundqvistin & Dahlbergin mukaan kaikilla edellä mainituilla nopeuksilla lähes samansuuruisen eli noin 65 kN kuormituksen viereisen ratapölkyn ja raideseppelin välille.

Tukemattomassa ratapölkkyssä kuormituksen aikana esiintyvät jännitykset ovat melko vähäisiä. Tukematon ratapölkky alkaa kuitenkin värähdellä pyöräkerran ylitettyä sen. Lundqvistin & Dahlbergin tekemän mallinnuksen mukaan nopeuden ollessa 90 m/s värähtelyn aiheuttama jännitysamplitudi ylitettävään ratapölkkyyn on suurempi kuin viereisiin ratapölkkyihin muodostuva jännitysamplitudi. Pyöräkerran aiheuttama värähtely voikin väsyttää ratapölkkyä ja näin ollen betoniratapölkyn väsymisestä johtuvia halkeamia voi esiintyä. (Lundqvist & Dahlberg 2005, Nielsen & Igeland 1995)

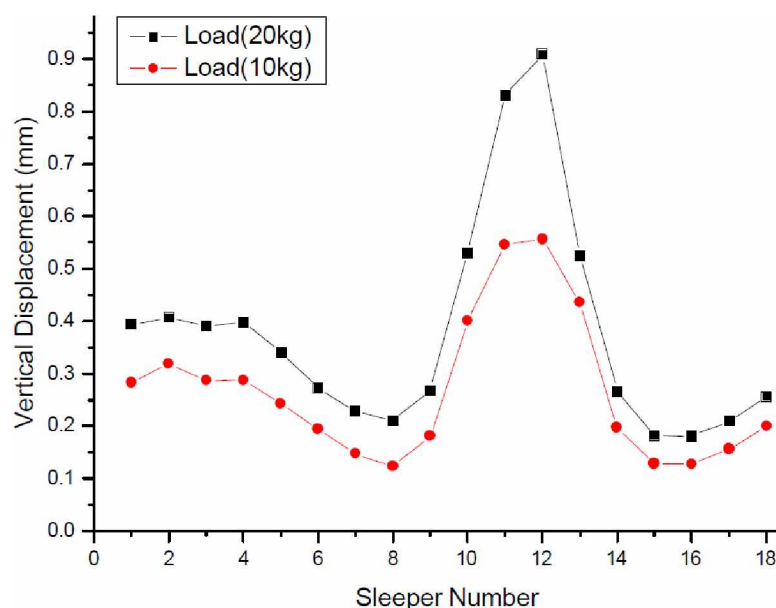
Kuvassa 3.7 esitettävää ratapölkkyjen tukeutumattomuutta on havaittu myös korealaisissa kenttäkokeissa. Tyhjätilat ratapölkyn alla ovat erityisen haitallisia suurnopeusjunien raiteissa, joihin kohdistuu suuria dynaamisia voimia (Kim et al. 2006).



Kuva 3.7 Tukemattomat ratapölkkyt (Kim et al. 2006).

Kevyt pudotuspainolaite (LFWD) on helposti liikuteltava laite, jota käytetään esim. tierakennekerrosten kantavuuden mittaamisessa. Kim et al. (2006) pudottelivat painoa ratapölkyn päälle ja aikaansäivät näin dynaamisen kuormituksen ratapölkylle. Samalla laitteella mitataan ko. kohdan painuma pudotuspainon alla. Laitteella voidaan mitata ratapölkkyjen pystysuuntainen vaste nopeasti eri kohdissa ja mittaustuloksista päätellä mahdollinen rakojen olemassaolo ratapölkkyjen alla. Suomessa kevyttä pudotuspainolaitetta on käytetty maarakenteiden tiiviyyden laadunvalvontaan (Kalliainen et al. 2011).

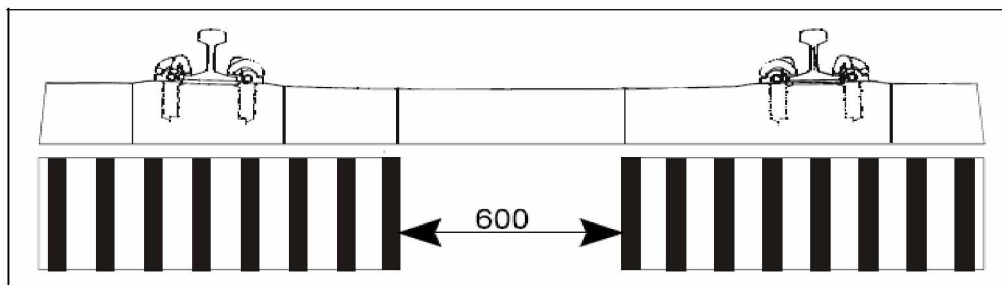
Kim et al. (2006) tekemissä LFWD-tutkimuksissa Sihung–Daegu-rataosuudella (Korea Express Railroad) ratapenkereellä noin 250 m ennen siltaa ei havaittu rakoja ratapölkkyjen alapuolella. Siirtymäalueella, eli noin 30 m ennen siltaa mitatut LFWD-testin tulokset on esitetty kuvassa 3.8. Sekä 10 kg että 20 kg pudotuspainotestauksen mukaan ratapölkkyt 10 - 13 ovat irti tukikerroksesta. Ratapölkyn 7 kohdalla mitattu pystysuuntainen jäykkyys oli noin 8-kertainen ratapölkyn 12 kohdalla mitattuun jäykkyyteen verrattuna. Siirtymämittarilla ratapölkkyjen 11 ja 12 alla havaittiin olevan noin 1 mm rako. Mittauksia samalla rataosuudella tehtiin myös viivakameralla. Peltokangas et al. (2013) ovat käsitelleet radan jäykkyyden mittaamista tarkemmin.



Kuva 3.8 LFWD pudotuspainolaitteen testitulokset sillan siirtymäalueella (Kim et al. 2006).

3.1.4 Pohjapaineen jakautuminen ratapölkyn pituussuunnassa

Tukikerroksen ominaisuuksilla on suuri merkitys ajateltaessa ratapölkkyyn kohdistuvia jännitystiljoja. Ideaalitapauksessa ratapölkkyihin kohdistuva, liikenteestä ja pölkyn tuennasta riippuva kuormitus jakautuu reilun kolmasosan pituudelle ratapölkyn päihin kuvan 3.9 mukaisesti (RATO 11 2002). Tukikerroksen ominaisuuksien, kuten ratapölkyn päiden alla tapahtuvan tiivistymisen ja sepelin hienontumisen seurauksena kuormituksen jakautuminen muuttuu huomattavasti ideaalitapauksesta. UIC 713:n ratapölkkymitoituksen perustana olevat pohjapainejakautumat on esitetty luvussa 4.7.3. Sadeghi & Babae (2006) ovat esittäneet erilaisille tukikerrosolosuhteille kuvan 3.10 mukaisia hypoteettisia pohjapaineen jakautumiskuvioita.



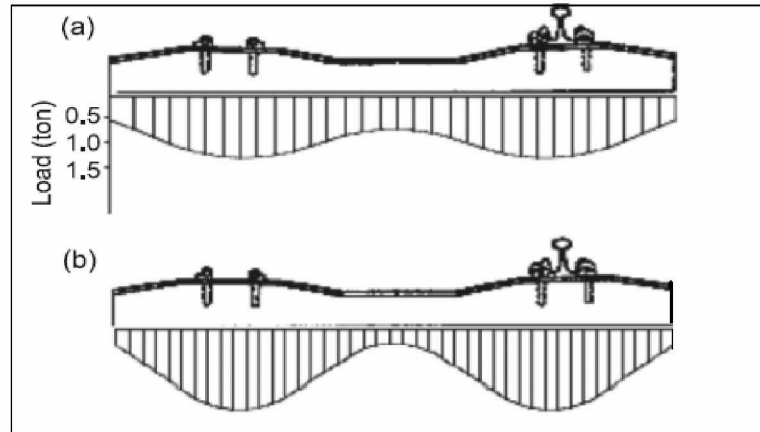
Kuva 3.9 Kuormituksen ideaalinen jakautuminen ratapölkyllä (RATO 11 2002).

Item No.	Distribution of bearing pressure	Developers	Remarks
1		ORE (1987), Talbot (1933)	Laboratory test
2		ORE (1987), Talbot (1933), Bartlett (1960), Clark (1957)	Tamped either side of rail
3		ORE (1987), Talbot (1933)	Principal bearing on rails
4		ORE (1987), Talbot (1933)	Maximum intensity at ends
5		Talbot (1933)	Maximum intensity at center
6		Talbot (1933)	Center bound
7		Talbot (1933)	Flexure of sleeper produces variations in form
8		ORE (1987), Talbot (1933), Kerr (2003), Schramm (1961)	Well-tamped sides
9		ORE (1987), Talbot (1933)	Stabilized rail seat and sides
10		AREMA (2006), Raymond (1977), Talbot (1933)	Uniform pressure

Kuva 3.10 Hypoteettisia pohjapaineen jakautumiskuvioita (Sadeghi & Babae 2006).

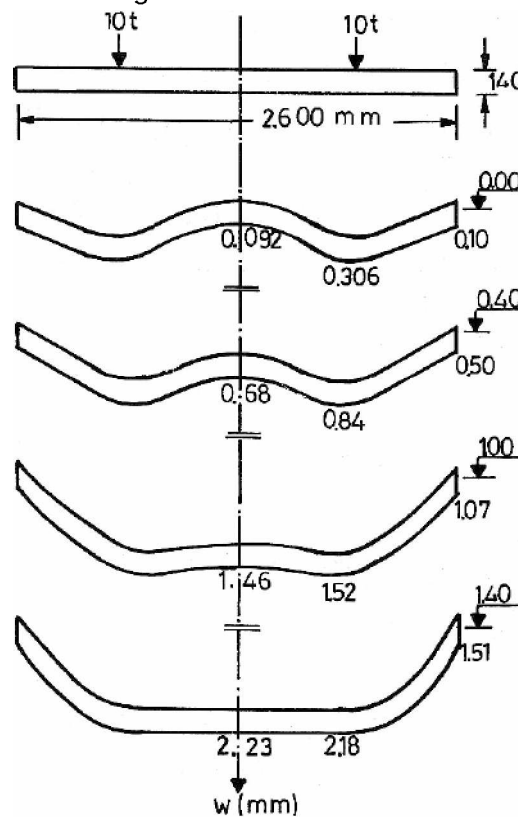
Sadeghi & Babae (2006) tekemien kenttätutkimusten perusteella betoniratapölkyn pohjapaineen jakautuminen on lähellä paraboloidista käyrää. Kuten kuvasta 3.11b voi huomata, juuri raiteen tukemisen jälkeen pohjapaine on keskittynyt kiskon lepopin-
nan alapuoliselle osuudelle. Kuormituksen aikaansaaman tiivistymisen seurauksena pohjapaine siirtyy enenevässä määrin pölkyn keskelle (kuva 3.11a), toisin sanoen ra-

tapölkky alkaa kantaa yhä enemmän keskeltä. Tämän seurauksena pölkyn keskiosan rasiukset kasvavat merkittävästi ja pidemmälle edenneessä tilanteessa seurauksena saattaa olla jopa halkeamien synty pölkyn yläpintaan raiteen keskelle.



Kuva 3.11 Kenttätutkimustulosten mukainen pohjapaineen jakautuminen ratapölkyn alla: (a) ennen tuentaa, (b) tukemisen jälkeen (Sadeghi & Babae 2006).

Ratapölkyn saamalla tuennalla on suuri merkitys kiskon kohdan painuman lisäksi pölkyn taipumamuotoon kuvan 3.12 mukaisesti.



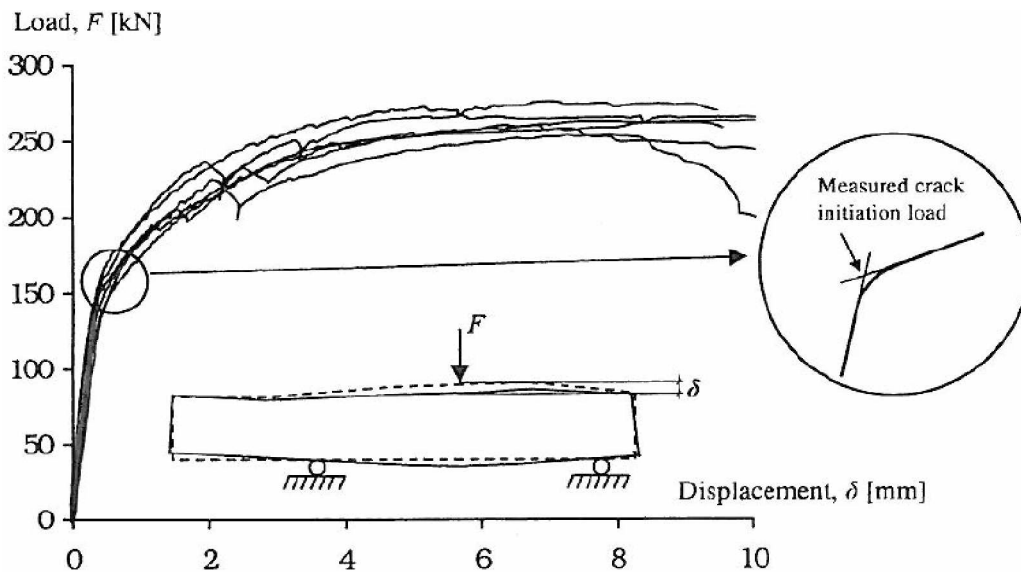
Kuva 3.12 Tuennan (heikkenee kuvan tapauksissa alaspäin) vaikutus ratapölkyn painumaan ja taipumamuotoon vakiokuormalla $2 \cdot 100 \text{ kN}$ (Kohler 2002).

3.1.5 Taivutusrasitus

Edellisessä luvussa käsitelty pohjapaineen jakautuminen vaikuttaa merkittävästi ratapölkkyyn kohdistuviin taivutusrasituksiin. Esimerkiksi pohjapaineen siirtyminen enenevässä määrin pölkyn keskelle aiheuttaa taivutusrasitusten kasvamisen pölkyn keskiosassa. Samanaikaisesti kiskon kohdan taivutusrasitus pienenee. Taivutusrasitus vaihtelee myös vuodenaikojen mukaan. Talvella, kun ratapenger on jäässä ja penkereen jäykkyys on suuri, pohjapaine pölkyn päissä on yleensä suurempi. Tällöin kiskon kohdalla on pääsääntöisesti suurempi ja pölkyn keskellä pienempi taivutusrasitus verrattuna esimerkiksi kesällä pölkkyissä esiintyviin rasituksiin.

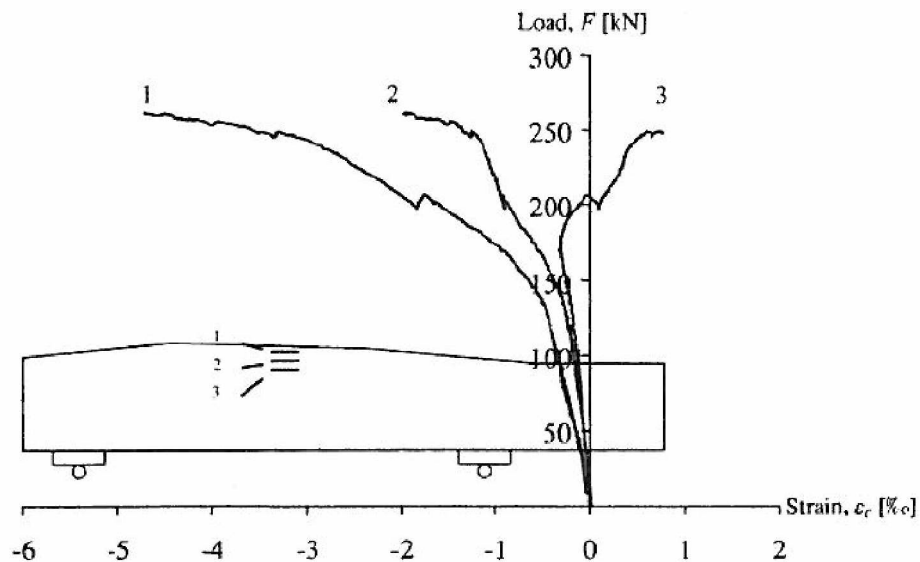
Chalmersin teknillisessä korkeakoulussa on tutkittu kuormituskokeiden avulla ratapölkkyjen käyttäytymistä taivutusrasituksen alaisuudessa. Kuormitettavina oli kuusi Abetong Teknik AB:n valmistamaa ratapölkkyä, tyyppi AgP. Ratapölkkyt oli katkaistu keskeltä kahtia. Kuormitusta ohjattiin siirtymäohjauksella maksimikuormaan asti, nopeus 0,05 mm/min. Pystysuuntaista siirtymää mitattiin sekä keskellä että tuilla. Tukien keskinäinen etäisyys oli 800 mm ja leveys 100 mm. Kuormituskohdalle eli jännevälän keskelle ratapölkyn molemmille sivuille oli sijoitettu kolme kuvan 3.14 mukaista vaakasuuntaista venymäliuskaa, sijainnit 10 mm, 30 mm ja 60 mm ratapölkyn yläpinnasta. Jännepunoksen myötölujuus oli $f_{sy} = 1703$ MPa ja betonin puristuslujuus $f_{c,cube} = 66$ MPa. (Gustavson 2002)

Ratapölkkyjen murtumisen syy oli betonin murskaantuminen punosten myötämisen seurauksena. Yhdessä ratapölkkyssä tapahtui ankkurointimurto. Kaikki testatut ratapölkynpuolikkaat käyttäytyivät samankaltaisesti eli niiden kuvassa 3.13 esitetty kuorma-taipuma-kuvaaja oli samantyyppinen. Ratapölkkyjen toiminta oli lineaarista noin kuormaan 135 kN asti, jolloin halkeilu alkoi. Keskimääräinen maksimikuorma oli 263 kN. Tämän jälkeen siirtymän kasvaessa voima säilyi samansuuruisena ja betoni jatkuvasti vaurioitui sekä punokset myötivät sekä hieman liukuivat betonissa. (Gustavson 2002)



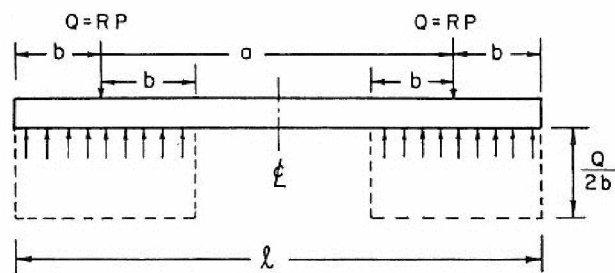
Kuva 3.13 Kuuden ratapölkynpuolikkaan kuorma-taipuma-kuvaajat sekä menetelmä halkeilukuorman määrittämiseksi (Gustavson 2002).

Kuormituskohdan yläreunan puristuspuunnan korkeutta seurattiin venymämittauksilla. Yhden kokeen tulokset on esitetty kuvan 3.14 kuvaajassa. Kaikissa kokeissa maksimikuormalla puristuspuunnan korkeus oli 30–60 mm eli puristusvyöhykkeen alapinta asettui venymäliuskojen 2 ja 3 väliin. (Gustavson 2002)



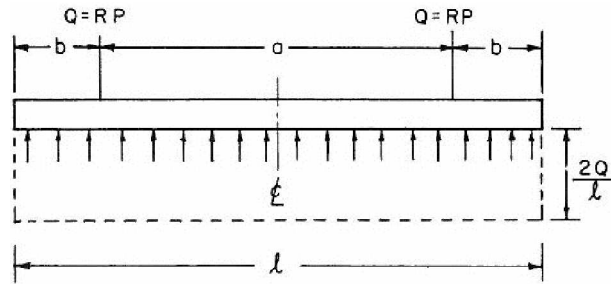
Kuva 3.14 Venymät liuskoissa 1, 2 ja 3 kuormituksen funktiona (Gustavson 2002).

Ratapölkkyyn kohdistuva kuorma ja pohjapainejakautuman muoto määräävät minkälainen taivutusrasitus mihinkin kohtaan pölkkyä kohdistuu. Ratapölkkyyn kohdistuva taivutusrasitus voidaan määrittää pölkyn oletettua pohjapainejakautumaa hyväksikäyttäen. Ideaalinen suoran raiteen ratapölkyn pohjapainejakautuma voidaan esittää kuvan 3.15 avulla:



Kuva 3.15 Alkutilan ideaalinen ratapölkyn pohjapainejakautuma (Raymond 1978).

Taivutusmomentti voidaan tällöin laskea lausekkeista $M_r = Q \cdot b/4$ ja $M_c = 0$, joissa M_r on positiivinen (kiskon kohta) ja M_c negatiivinen (keskikohta) momentti. Kuormitustoistojen jälkeen pohjapainejakautumaksi voidaan Raymondin (1978) mukaan karkeasti olettaa (kuva 3.16):



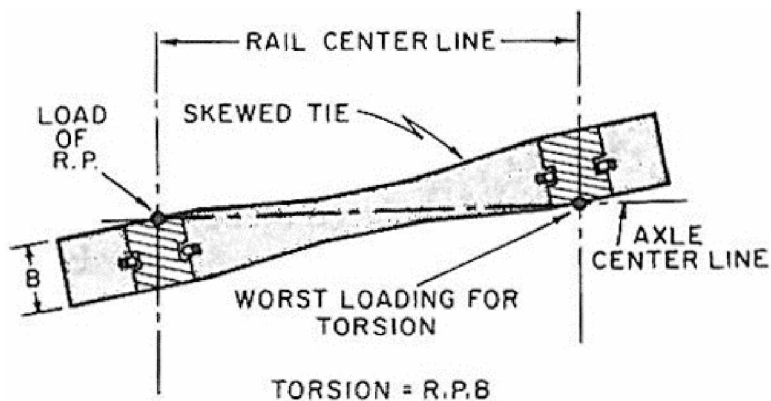
Kuva 3.16 Pitkän ajan ideaalinen ratapölkyn pohjapainejakautuma (Raymond 1978).

Taivutusmomentit ovat tasaisen jakautuman mukaisesti muuttuneet lausekkeiksi $M_r = Q \cdot b^2 / (a + 2b)$ ja $M_c = -Q \cdot (a - 2b) / 4$. Yksi tapa arvioida näiden lausekkeiden merkitystä, on määrittää momentit M_r ja M_c yhtä suuriksi ja kiskojen keskilinjojen etäisyydeksi $a = 1600 \text{ mm}$, joka on suomalaisen raidelevyden mukainen arvo. Tällöin saadaan ulokemitaksi $b = 0,354a = 566 \text{ mm}$ ja ratapölkyn pituudeksi 2732 mm eli enemmän kuin suomalainen 2600 mm . Suomalaisilla mitoilla keskikohdan taivutusmomentti M_c on siis kiskon kohdan momenttia M_r suurempi.

3.1.6 Leikkaus- ja vääntörasitus

Ratapölkyn leikkauskestävyyden määrittäminen voidaan tehdä otaksutun pohjapainejakautuman perusteella, vrt. kohta 3.1.5. Raymond (1978) ei tunne yhtään tapausta, jossa olisi tapahtunut leikkausmurto, eivätkä American Railway Engineering Association -yhdistyksen (AREA) suositukset tuolta ajalta tunne leikkausmitoitusta.

Vääntörasitus syntyy, kun kontaktipaineet ovat epätasaiset. Väännön aiheuttamia ratapölkyn murtumisia on havaittu Yhdysvalloissa, erityisesti kun poikkileikkaus ratapölkyn keskellä on ollut kavennettu (Raymond 1978). Toinen mahdollinen syy väännön aiheuttamiin halkeamiin on kuvassa 3.17 esitetty ratapölkyn vino asento raiteessa. AREAn ohjeet suosittelivat kiskon tukipinnan 150 mm minimipituutta ratapölkyn poikkisuunnassa, mutta ei määrittele maksimipituutta. Pitkällä välilevyllä kiskon taipuessa kuormituksen johdosta kuormituspisteet eli kiskon tuentapisteet saattavat sijaita kuvan osoittamissa paikoissa, jolloin ratapölkkyyn kohdistuu vääntörasitus.



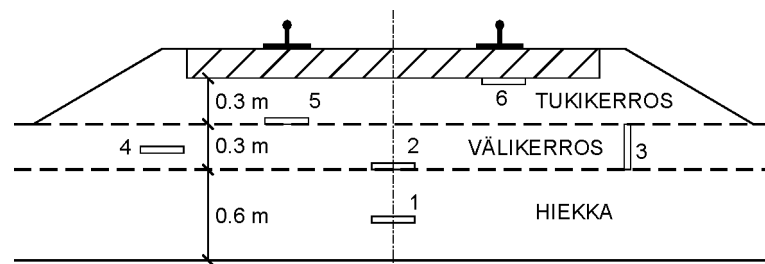
Kuva 3.17 Ratapölkyn vinosta asennosta johtuva pahin mahdollinen vääntörasitus (Raymond 1978).

Raymondin mukaan väännöllä on niin suuri ratapölkyn rasituksia lisäävä vaikutus, että ratapölkyn asennuksen suoruus kannattaa varmistaa. Pitkäaikaisessa tilanteessa asiaan vaikuttavat myös kiskonkiinnitysosien ja välilevyn luotettava toiminta.

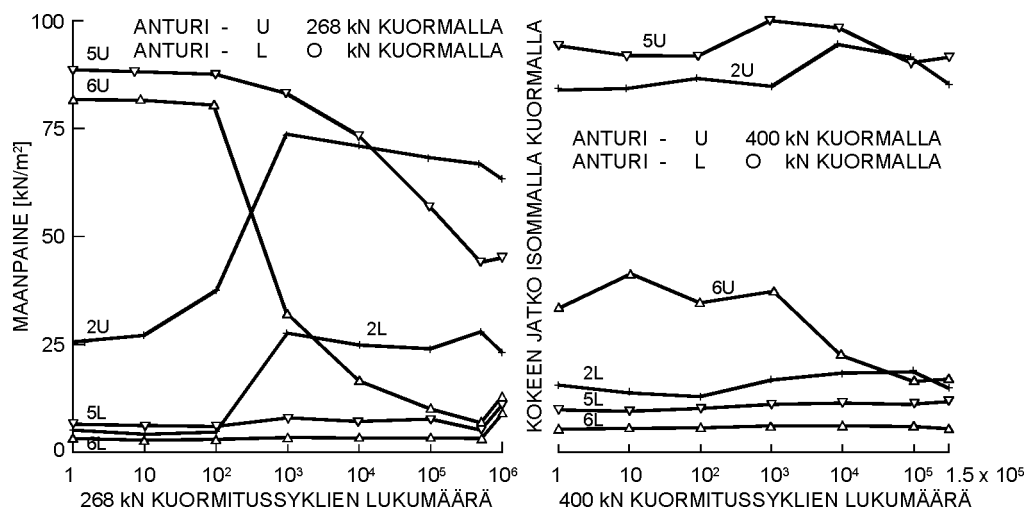
3.1.7 Toistokuormituksen vaikutus

Raymond on jo vuonna 1978 todennut, että ratapölkyn keskikohtaan syntyy pitkän ajan kuluessa pystysuuntainen tuentakohta, ja että ratapölkyn suunnittelu tarvitsee lähtötiedokseen tietoa maamateriaalin toiminnasta toistuvan kuormituksen aikana. Radan jousimalliin tai alustalukuun perustuvilla laskentalausekkeilla voidaan laskea kiskojen taivutusmomentit melko tarkkaan koetuloksia vastaavasti, kun kyseessä on hiljattain tuettu rata. Tukemista tarvitsevilla radalla mitatut kiskojännitykset sen sijaan olivat noin 40 MPa suuremmat kuin ko. laskentalausekkeilla lasketut arvot. (Raymond 1978)

Kanadan Ontariossa tutkijat rakensivat laboratorioon 11 kovapuuratapölkkyä sisältävän täysimittakaavaisen radan, jota he kuormittivat toistuvasti keskimmäisen ratapölkyn kohdalta. Ensimmäisten miljoonan syklin aikana rataa kohdistettiin 268 kN kuorma jakaantuneena kahdelle kiskolle. Tämän jälkeen kuormaa lisättiin ja rataa kohdistettiin 400 kN kuorma 150000 lisäsyklin aikana. Keskipölkyn alle sijoitettiin maanpaineantureita eri syvyyksille ja eri kohdille ratapölkkyä. Maanpaineantureiden sijainti esitetään kuvassa 3.18 ja tulokset kuvassa 3.19. (Raymond 1978)



Kuva 3.18 Maanpaineantureiden sijainti (Raymond 1978).



Kuva 3.19 Maanpaineet täysimittakaavakokeissa, tässä anturit 2, 5 ja 6 (Raymond 1978).

Tukikerros tuettiin kiskojen kohdilta molempiin suuntiin vain 300 mm matkalta senaikaisen käytännön mukaisesti. Kuitenkin jo 1000 syklin jälkeen syntyi pysyviä muodonmuutoksia kiskojen kohdilla ja ratapölkyn keskellä mitattiin yhtä suuria maanpaineita kuin kiskojen alapuolella. Tämä voitiin päätellä vertailemalla antureiden 2 ja 5 mittaustuloksia kuormituksen 268 kN alaisena. Jatkossa kuormituksella 400 kN tavoitettiin tasan jakaantunut pohjapaine ratapölkyn alla kaikilla syklimäärillä (Raymond 1978).

Edellisen kokeen havainnot haluttiin varmistaa yhden kuormitettavan kovapuupölkyn avulla kokonaiskuorman vaihdellessa välillä 0–178 kN. Paineanturit asennettiin nyt suoraan ratapölkyn alapintaan kiskon kohdalle ja keskelle. Noin 50000 syklin jälkeen pohjapaine tasoittui ja pysyi tasaisena miljoonaan sykliin asti, vaikka alussa 100 syklin kohdalla kiskonkohdan paine oli kaksinkertainen keskikohtaan verrattuna.

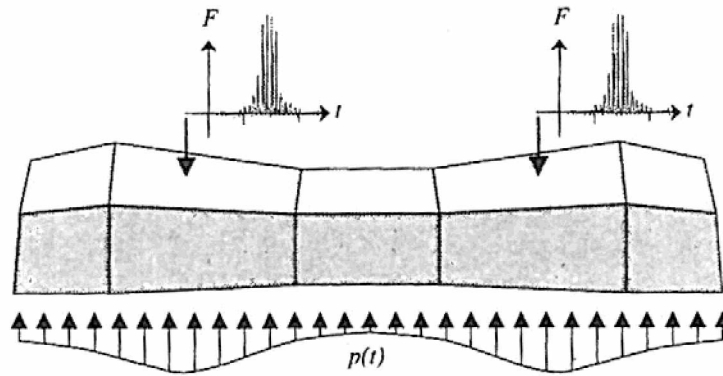
3.1.8 Dynaaminen käyttäytyminen

Ruotsalaisten kokeiden mukaan ratapölkkyt toimivat kimmoisesti junien normaali-kuormilla. Suurilla dynaamisilla kuormilla toiminta ei ole kimmoista, pääasiassa betonin halkeilemisen vuoksi. Kokeiden mukaan ratapölkyn vastukseen radassa vaikuttavat suuresti sekä kuorman vaikutusaika että pohjapaine ratapölkyn alapinnalla. Pitkäaikaisessa staattisessa kuormituksessa pohjapainejakautuma on tasaisempi kuin dynaamisessa kuormituksessa. (Gustavson 2002)

Epälineaarisen FEM-mallintamisen avulla on havaittu, että ratapölkky saattaa irrota raideseppelin pinnalta ylöspäin suuntautuvan liikkeen aikana. Tämän seurauksena ratapölkky ja raideseppeli saattavat värähdellä toisistaan riippumatta ja suuri pohjapaine syntyy aina ratapölkyn iskeytyessä raideseppelin pintaan. FEM-analyysien tulosten pohjalta on myös päätelty, että halkeilusta johtuvalla ratapölkyn piententyneellä jäykkyydellä on vain pienehkö merkitys koko raiteen pystysuuntaisen vastuksen suuruuteen. Täten raiteen kuormankantokyky säilyy, vaikka siinä on muutamia haljenneita ratapölkkyjä. (Gustavson 2002)

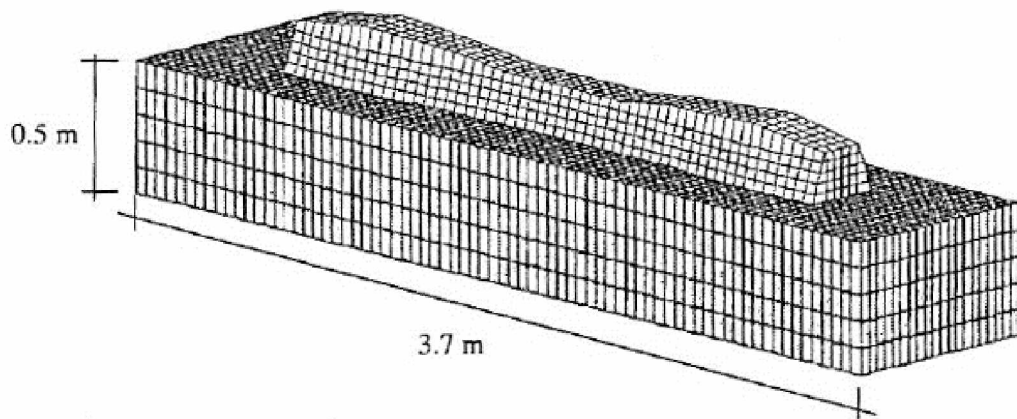
Perinteisesti raiteen toimintaa analysoidaan staattisesti kasvattamalla staattista akselikuormaa dynaamisen kertoimen avulla. Staattinen tarkastelu ei kuitenkaan huomioi dynaamisten kuormien vaikutuksesta syntyviä fysikaalisia ilmiöitä, esimerkiksi (Gustavson 2002/kuva 3.20):

- ratapölkkyyn syntyy jännitysaaltoja,
- ratapölkyn kiihtyvyys synnyttää hitausvoimia,
- suurella venymänopeudella betonin materiaaliominaisuudet poikkeavat staattisen kuorman aikaisista,
- pohjapaine muuttuu ajan funktiona dynaamisessa kuormitustilanteessa.



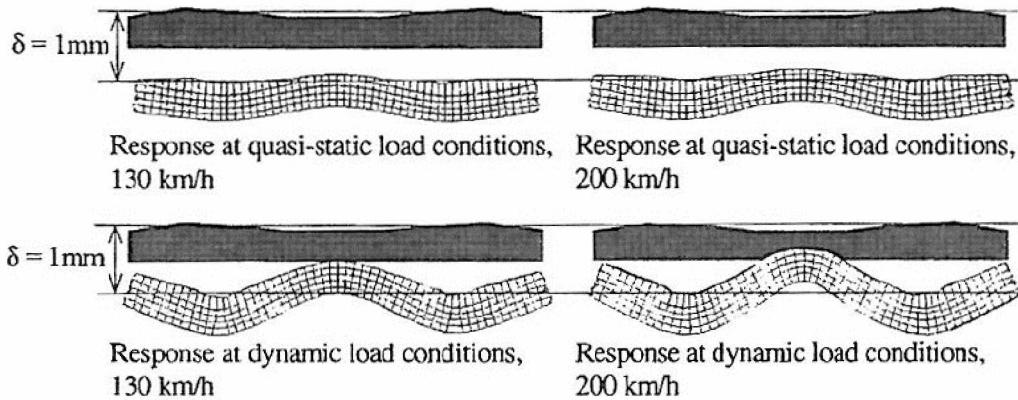
Kuva 3.20 Dynaamisten kuormien huomiointi ratapölkyn kuormitustapauksena (Gustavson 2002).

Gustavson (2002) on tarkastellut ratapölkyn dynaamista toimintaa FEM-3D-laskenta-mallissa, jossa ratapölkyn lisäksi mallinnettiin ratapölkyn alapinnan ja raidesepelin välinen rajapinta sekä osa pengertä kuvassa 3.21 esitetyllä mallilla. Ratapölkyn materiaalmalli salli betonin halkeilemisen. Ratapölkyn toimintaa tutkittiin sekä kvasistaattisessa (sileä kiskon yläpinta) että dynaamisessa (epätasainen kiskon pinta) pystysuuntaisessa kuormitustilanteessa. Kiskon epätasaisuuden syvyys oli 0,7 mm ja aallonpituus 0,25 m.



Kuva 3.21 Ratapölkyn ja alla olevan raidesepelin FEM-malli (Gustavson 2002).

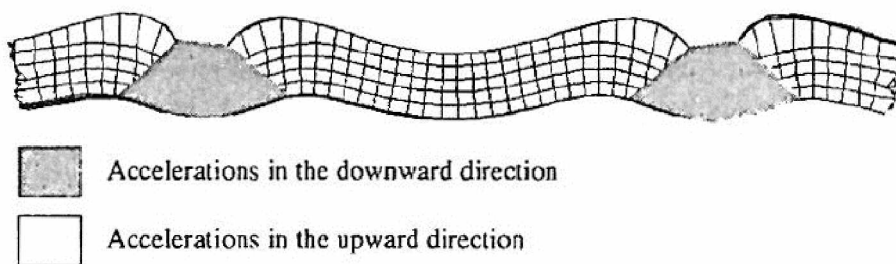
Ratapölkyn pystysuuntaista vastusta vertailtiin tutkimalla 1 mm painumaa vastaavia ratapölkyn rasituksia, muodonmuutoksia ja kuormittavan voiman suuruutta sekä kvasistaattisessa että dynaamisessa kuormitustilanteessa nopeuksilla 130 km/h ja 200 km/h (kuva 3.22). Kuormittavan voiman suuruus oli noin 200 kN molemmissa kvasistaattisissa tapauksissa ja dynaamisessa kuormituksessa nopeudella 130 km/h. Dynaamisessa kuormituksessa nopeudella 200 km/h voiman suuruus oli noin 230 kN. (Gustavson 2002)



Kuva 3.22 Ratapölkyn vastus vakiopainumalla kvasistaattisessa (yksi nopea kuormitus) ja dynaamisessa (yksi nopea kuormitus + värähtely) kuormituksessa nopeuksilla 130 km/h ja 200 km/h. Suurennuskerroin 300 (Gustavson 2002).

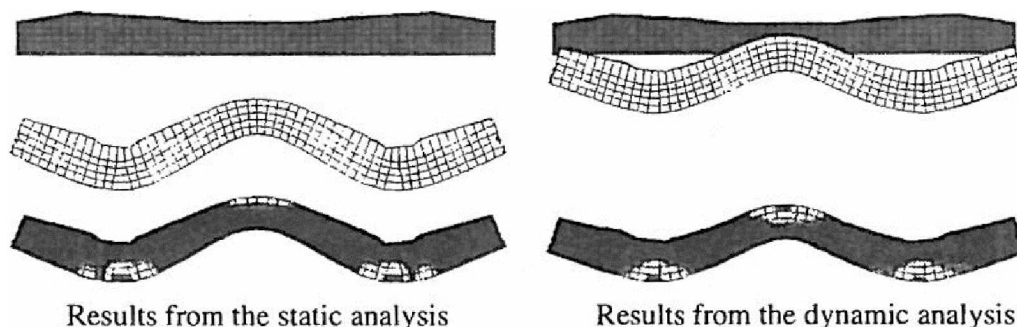
Ratapölkyn muodonmuutokset kiskonkohdan 1 mm painumalla olivat sitä suuremmat mitä pienemmän aikaa kuormitus kesti. Tällöin kiihtyvyys kuormituskohdissa oli suurimmillaan. Lisäksi kiihtyvyys vaihteli ratapölkyn eri kohdissa, minkä seurauksena ratapölkky taipui koko pituudellaan. Hitausvoimat vaikuttivat siten, että eri kohdissa oli erilainen painumanopeus, mikä edelleen johti halkeilun muodostumiseen. Yhden millimetrin painumalla ei kvasistaattisessa kuormituksessa syntynyt halkeilua, mutta dynaamisessa kuormituksessa syntyi. Lisäksi halkeilu lisääntyi junan nopeuden kasvaessa. (Gustavson 2002)

Nopeudella 200 km/h ratapölkyn pystysuuntainen liike saattoi vaihtaa suuntaa erittäin nopeasti ja kiihtyvyys oli erimerkkinen ratapölkyn eri kohdissa. Tämä johti kuvassa 3.23 esitettyyn ratapölkyn taipumamuotoon, josta voi päätellä, että ratapölkkyssä kiskojen kohdilla oli tietyllä ajanhetkellä lävistysmurron riski. (Gustavson 2002)



Kuva 3.23 Ratapölkyn kiihtyvyys kahteen vastakkaiseen suuntaan osoittaa lävistysmurron riskin. Pystysuuntaisen siirtymän suurennuskerroin on 300 (Gustavson 2002).

Dynaamisessa tarkastelussa nopeudella 200 km/h laskennallinen maksimikuorma käytetyillä oletuksilla oli 252 kN. Vertailutulosten saamiseksi samalla kuormalla kuormitettiin ratapölkkyä myös staattisessa FEM-mallinnuksessa. Erityisesti kuvassa 3.24 esitettyä kaarevuutta ja halkeilevan alueen suuruutta vertailtiin. (Gustavson 2002)



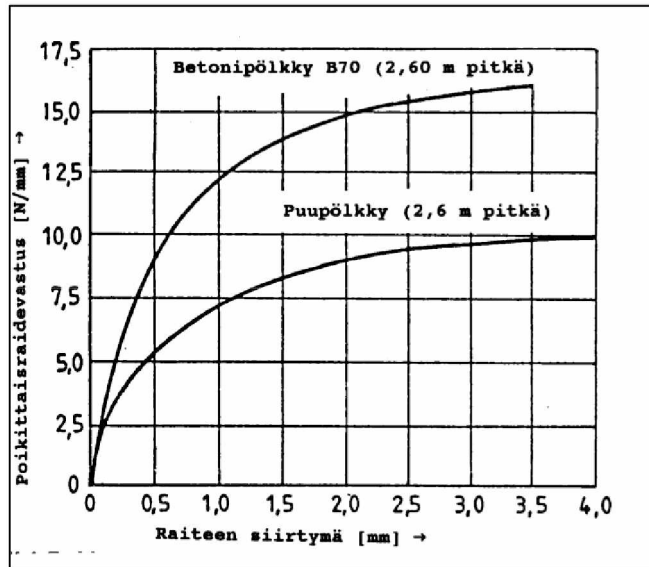
Kuva 3.24 Staattisen ja dynaamisen analyysin tulosten vertailu. Suurennuskerroin 200. Staattinen painuma noin 4 mm ja dynaaminen noin 1,7 mm (Gustavson 2002).

Staattisessa kuormituksessa ratapölkyn painuma kuormituskohdissa oli noin 2,5-kertainen dynaamisen kuormituksen painumaan verrattuna. Painumaero oli vielä suurempi ratapölkyn päissä kuin keskikohdassa. Staattisessa kuormituksessa hitausvoimat eivät vaikuttaneet ratapölkkyssä tai alapuolisessa tukikerroksessa. Molemmilla kuormitustavoilla saatiin kuitenkin samantyyppinen taipumamuoto ja halkeilutila. (Gustavson 2002)

3.1.9 Ratapölkky ja raiteen vaakasuuntainen toiminta

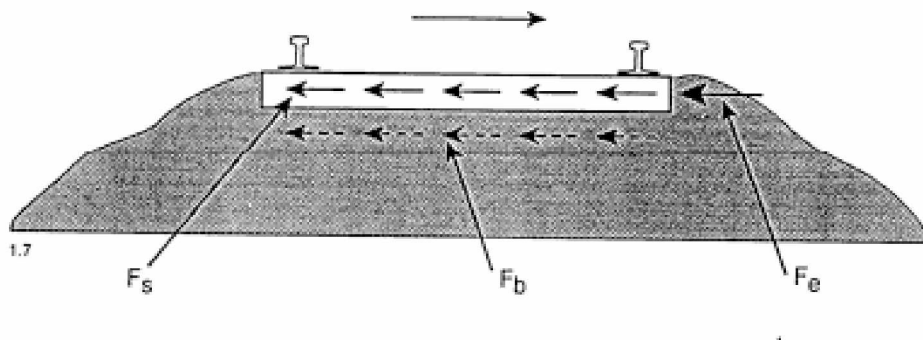
Pystysuuntaisten voimien lisäksi raiteeseen kohdistuu vaakasuuntaisia voimia. Vaakasuuntaiset voimat voidaan jakaa raiteeseen nähden pituus- ja poikkitaissauntaisiin voimiin. Ratapölkyn oleellinen tehtävä on tarjota radalle sivuttainen tuki, sekä kaarteissa että suoralla rataosuudella. Sivutuenta tarvitaan myös kaltevassa kaarteissa, missä kaltevuus normaalisti vastaanottaa noin puolet vaakavoimasta (Tunna 2010).

Ratapölkky välittää vaakasuuntaiset voimat tukikerrokselle. Pölkyn vaakasuuntaisten voimien välityskykyyn vaikuttaa kiskon ja pölkyn välinen kitka, pölkyn ja tukikerroksen välinen kitka, pölkkyä ympäröivän sepelin ominaisuudet sekä pölkyn muotoilu. Betoniratapölkkyt ovat yleensä keskiosastaan kapeampia kuin kiskon kohdalta. Lisäksi betoniratapölkkyt ovat usein poikkileikkaukseltaan pohjaa kohden leveneviä puolisuunnikkaita. Tämän muotoilun ansiosta betoniratapölkkyt lukkiutuvat sepeliin antaen näin suuremman sivuttaisvastuksen verrattuna esimerkiksi puisiin ratapölkkyihin (kuva 3.25). Lisäksi betoniratapölkkyjen suuri massa edesauttaa raiteeseen kohdistuvien vaakavoimien vastustamista. (Esveld 2001)



Kuva 3.25 Puu- ja betonipölkkyraiteen sivuttaiset staattiset raidevastukset (VR Track 2011).

Raide-elementin sivuttainen raidevastus koostuu oheisen kuvan mukaisesti kolmen eri vastuksen summasta:



Kuva 3.26 Raide-elementin sivuttaisen raidevastuksen aikaansaamat voimat (VR Track 2011).

Yllä olevassa kuvassa 3.26 F_b on pölkyn alapinnan ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa. Sen suuruus on 30 - 50% kokonaisvastuksesta riippuen raideelementin painosta ja pölkyn alapinnan karheudesta. F_s on pölkyn sivupintojen ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa ja se on noin 30 - 50% kokonaisvastuksesta riippuen sepelimäärästä sekä sen tiiveydestä. F_e on pölkyn päätympinnan ja tukikerroksen välinen raidevastuksen osa ja se on noin 30 - 40% kokonaisvastuksesta riippuen pölkyn pään ulkopuolella olevan sepelipatjan leveydestä, tiiveydestä sekä palteesta. (VR Track 2011.) Kaksiosainen ratapölkky (twin-block) on F_e :n suhteen parempi, koska siinä on kaksi päätä molempiin suuntiin.

Sivuttaisen raidevastuksen suuruuteen vaikuttavat myös tukikerroksen tiiveys ja vajaus. Raidevastus saavuttaa maksimiarvonsa täydellä sepelimäärällä noin 4 Mbrt kuormituksen jälkeen. Tällöin tukikerroksen oletetaan saavuttaneen 100 % tiiveysasteen. Raidevastuksen oletetaan kuitenkin olevan riittävän suuri alle 37 °C lämpötilassa, kun raidetta on liikennöity tuennan jälkeen noin 200000 brt tai stabiloitu. (VR Track 2011)

Ratapölkkyjen tuenta vähentää raidevastuksen noin puoleen maksimistaan ja tukikerroksen vajuus voi vähentää edellä mainittuja arvoja jopa puoleen tukikerroksen vajuuden määrästä riippuen. (VR Track 2011)

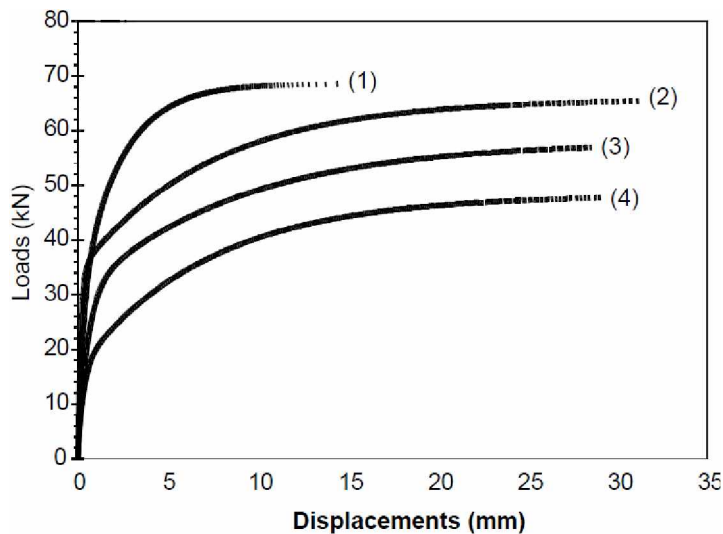
Poikkisuuntaisten voimien lisäksi raiteeseen kohdistuu pituussuuntaisia voimia. Pituussuuntaisia voimia aiheuttavat muun muassa junien kiihdytykset ja jarrutukset sekä kiskojen lämpölaajeneminen. Lämpölaajeneminen on merkittävä tekijä erityisesti jatkuvakiskoraiteilla. (Esveld 2001.) Suomessa kiskojen jatkuvaksi hitsaaminen alkoi pääradoilla 1960-luvulla (Grundfelt 2010).

Kiskojen lämpölaajenemisen estäminen aikaansaa kiskoon jännityksiä, jotka pyrkivät liikuttamaan kiskoja pölkkyyn nähden ja pölkkyä tukikerrokseen nähden. Jatkuvakiskoraiteen päissä olevia osuuksia, joissa kiskot liikkuvat pitkittäissuunnassa lämpötilan ja lämpövoimien muuttuessa, sanotaan jatkuvakiskoraiteen hengitysosuuksiksi. Hengitysosuudet sijaitsevat pääasiassa ratapihoilla ja pitkien siltojen liikuntasaumalaitteissa. Lämpötila-alueita, jossa kiskossa ei esiinny lämpövoimia, kutsutaan neutraalilämpötilaksi. Mikäli lämpötila alkaa poiketa neutraalilämpötilasta johtaen lämpövoimien kasvuun, kisko alkaa liikkua kiinnitys kiinnitykseltä ja metri metriltä yhä pidemmältä matkalta. Lopullisena rajana liikkeelle on joko jatkosraon liikevaran loppuminen tai esimerkiksi kiskonmurtumatapauksessa kiinnitysten läpivetovastuksen ja pitkittäisen raidevastuksen vaikutus. (VR Track 2011)

Jatkuvakiskoraiteen vakavuuteen vaikuttavat raide-elementin kehäjäykkyys, tukikerroksen sivuttainen ja pitkittäinen raidevastus sekä kiskon kiinnitysten läpiveto- ja vääntövastus. Kiskon kiinnityksen läpivetovastuksen suuruuteen vaikuttaa sekä kiinnityksen puristusvoima että myös välilevyn materiaali ja kunto kuitenkin niin, että pelkän puristusvoiman mittauksella ei voida määrittellä läpivetovastuksen hyvyyttä. Raide-elementillä tulee olla tukikerroksen kanssa riittävän suuri vastus estämään koko raide-elementin liikkumista pituussuunnassa jatkuvakiskoraiteen päissä ja osittain myös kiskonmurtumatapauksissa. Tämä tukikerroksen pitkittäinen raidevastus- ja kiskonkiinnitysten läpivetovastusarvot heikkenevät aikaa myöten liikenteen kuormituksen ja tukemis- sekä nostokertojen vaikutuksesta, joten ne tulee aika ajoin tarkistaa määrättyinä otantoina. (VR Track 2011)

Brasiliassa on testattu raiteen pituussuuntaista vastusta neljällä eri ratapölkkytyypillä: esijännitetty betoniratapölkky, teräsbetoninen kaksiosainen ratapölkky (twin block), puuratapölkky ja teräsratapölkky (Queiroz 2006). Testissä pölkkyväli oli 600 mm, kiskona TR-68 (paino 67,41 kg/m) ja kiskonkiinnityksinä Pandrol. Raidelevytenä oli 1600 mm ja ratapölkkyjen tasolla oli 350 mm standardi raidesepelikerros, jonka alla 300 mm paksu tiivistetty maakerros.

Raiteessa oli seitsemän ratapölkkyä peräkkäin. Kuvassa 3.27 on esitetty kuormituskokeen tulokset kuvaajina koko raiteelle.



Kuva 3.27 Raiteen (7 ratapölkkyä) siirtymä-voima –kuvaajat. 1) betoniratapölkky, 2) kaksiosainen ratapölkky, 3) puuratapölkky ja 4) teräsratapölkky (Queiroz 2006).

Kuvan mukaan raide, jossa kisko kiinnitetään yksiosaisiin betoniratapölkkyihin, on selvästi jäykkin. Tämä korostuu pienillä raiteen pituussuuntaisilla siirtymillä. Kiskojen ja ratapölkkyjen väliset siirtymät olivat merkityksettömät. Queiroz'n testissä saatiin betoniratapölkkyä kohden vastukseksi $69\text{ kN}/7\text{ kpl} = 9,86\text{ kN}/\text{betoniratapölkky}$.

3.2 Esijännityspunosten toiminta

Esijännityspunoksia käytetään ratapölkkyissä pienentämään halkeiluriskiä. Ratapölkyn alapinnalla kiskon kohdalla on suuri kuormituksen aiheuttama vetojännitys, minkä vuoksi tällä kohdalla tarvitaan suuri jännitysvoiman aikaansaama betonin puristusjännitys. Koska kiskon kiinnityskohdasta on ratapölkyn päähän lyhyt etäisyys, tyypillisesti noin 0,5 m, pitää punosten tarttua betoniin hyvin ja voiman siirtyä punoksesta betoniin lyhyellä matkalla. (Gustavson 2002)

Ennen vuotta 2002 kolmelankaisen punoksen tartuntaominaisuuksia ei oltu tarkasti selvitetty. Esiin nousseita epävarmuustekijöitä olivat (Gustavson 2002):

- Pyörähtääkö punos akselinsa ympäri, kun punoksen ja ympäröivän betonin välille syntyy liukumaa?
- Vaikuttaako liikkeen suunta, veto tai työntö, punoksen pyörähtämiseen?
- Onko 3- ja 7-lankaisella punoksella erilainen Poissonin vakio?
- Kolmen eri tekijän (adheesio, kitka ja muu mekaaninen toiminta) merkitys punoksen tartuntaan eri liukumatasoilla ja niihin vaikuttavat parametrit.

Eri tekijät ovat aktiivisia punosliukuman suurentuessa. Alkutartunta syntyy punoksen ja ympäröivän betonin välisen adheesiovaikutuksesta. Kun adheesiokestävyys ylittyy, teräs irtoaa betonista niiden välisellä rajapinnalla tai tartunta peittää betonissa lähellä rajapintaa. Täten adheesiokestävyyttä rajoittaa betonimateriaalin vetolujuus punoksen lähellä. (Gustavson 2002)

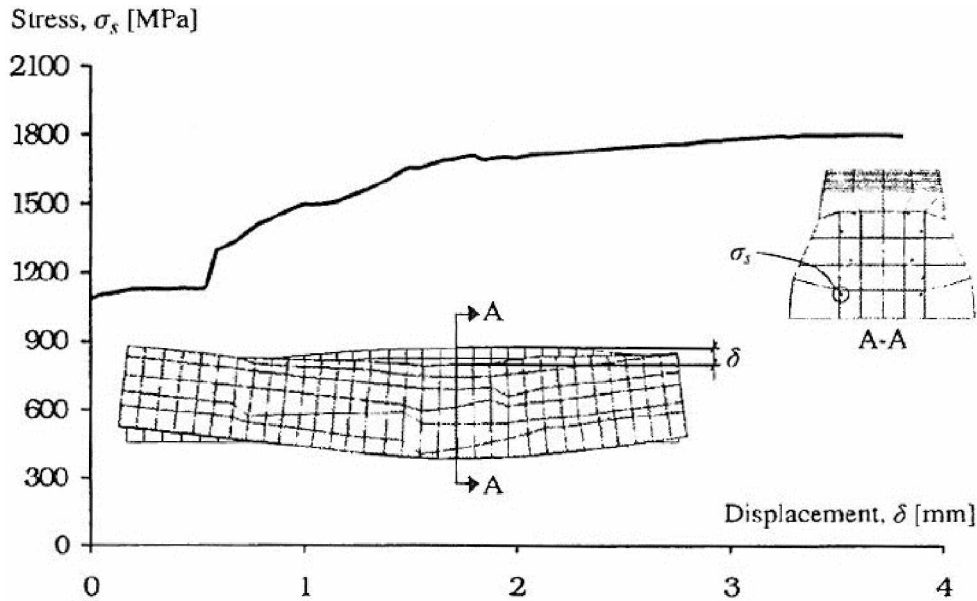
Alkuvaiheen jälkeen tartuntaan vaikuttavat kitka muodostuneessa irtoamisvyöhykkeessä sekä muu mekaaninen toiminta. Muita mekaanisia toimintoja ovat lack-of-fit -vaikutus, kiilautuminen, Poisson-ilmiö ja punoksen kierteen tiheyden vaikutus

(pitch effect). Kaikki nämä ilmiöt aiheuttavat poikittaisia jännityksiä tartunta-rajapinnalla. Poikittaisen jännityksen lisääntyessä punoksen tartuntakestävyys kasvaa, koska kitkan välittämä voima lisääntyy (Gustavson 2002).

- Lack-of-fit -vaikutus on raportoitu vain 7-lankaisille punoksille, ja sen syyksi on ilmoitettu epäjatkuvuudet punoksen muodossa ja sen halkaisijan vaihtelu punoksen pituuden suhteen johtuen epätasaisesta ulommaisten lankojen kiertämisestä keskilangan ympärille. Tämä, yhdessä liukumisrajapinnan partikkeleiden kiilautumisen kanssa, aiheuttaa normaalijännityksen lisääntymisen ja täten parantaa punoksen tartuntakykyä.
- Poisson-ilmiö liittyy punoksen vetojännityksen paikalliseen muuttumiseen, joka puolestaan johtaa punoksen halkaisijan muuttumiseen. Vetojännityksen pienentyessä punoshalkaisija ja poikittainen jännitys kasvavat, mikä parantaa tartuntaa. Näin tapahtuu tyypillisesti rakenteen päässä, jossa punos on katkaistu ja punoksen päässä on nollajännitys. (Punoksen myötäessä tartunta heikkenee, koska punoshalkaisija ja poikittainen jännitys pienentyvät.)
- Punoksen kierteen tiheyden vaikutus (pitch effect) kuvaa sitä, miten punoksen kierrejako muuttuu kun pituussuuntainen jännitys kasvaa tai pienenee. Kierrejaon muuttuminen ei ole mahdollista ympäröivän betonin vuoksi ja siksi tartunta paranee. Pienen vääntökestävyyden vuoksi tämän ilmiön merkitystä punoksella pidetään kuitenkin pienenä.

Alkuvaiheen tartuntakyvyllä on suuri merkitys punoksen tartuntakestävyyteen. Täten ankkurointia voidaan parantaa lisäämällä punoksen pinnan mikrokarheutta tai käyttämällä lisäaineita, esimerkiksi silikaa, betonin lujuuden kasvattamiseksi punoksen ja betonin rajapinnalla ja sen läheisyydessä. (Gustavson 2002)

Gustavson (2002) on mallintanut laboratoriossa kuormitettuja ratapölkyn puolikkaita 3D-FEM-mallilla, jossa 3D-betonielementtityyppien materiaalmallina käytettiin pääasiassa halkeilun mallintamiseen tarkoitettua mallia (brittle cracking). Ratapölkyn yläreunassa käytettiin elastoplastista materiaalmallia. Esijännityspunokset sisältyivät rakennemalliin, ainoastaan niiden liukumista betonin sisällä ei voitu mallintaa todellista vastaavasti. Laskennan tulosten mukaan punosvenymät (kuva 3.28) lisääntyivät selvästi ensimmäisen halkeaman muodostumisen jälkeen noin 0,5 mm painuman kohdalla. Alapunos myöti maksimikuormalla.



Kuva 3.28 Yhden alapunoksen jännitys suhteessa ratapölkyn kuormituskohdan pystysiirtymään (Gustavson 2002).

3.3 Ilmaston vaikutus

Puuratapölkkyihin verrattuna betoniratapölkyn pitkäaikaiskestävyys on tietyn edellytyksin erinomainen ja on oletettavaa, että ilmastollisilla tekijöillä on vain vähän vaikutusta betoniratapölkyn toimintaan. (Esveld 2001)

3.3.1 Terästen korrosio

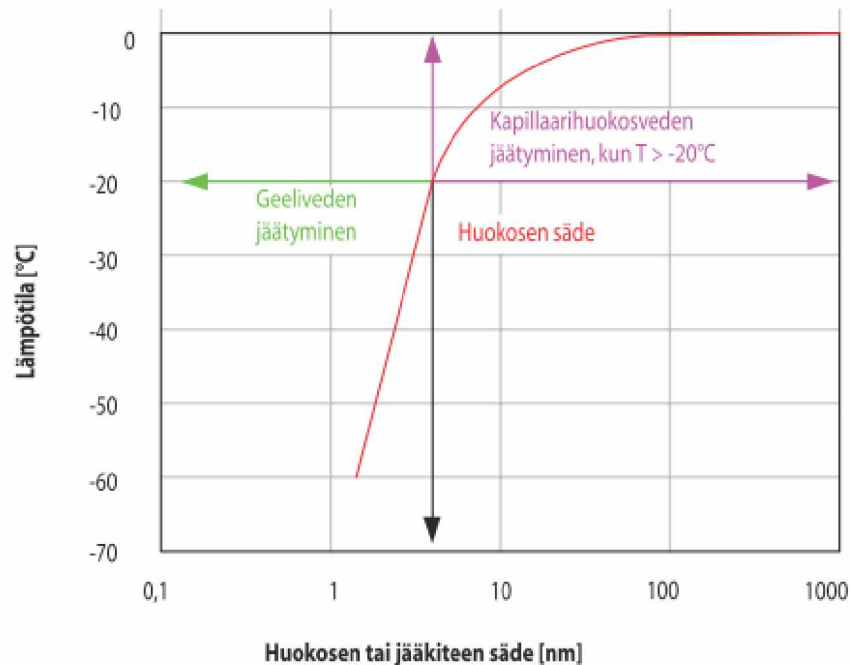
Betoniratapölkyn kuten kaikkien teräsbetonirakenteiden toiminnan kannalta on tärkeää raudituksen säilyminen ehjänä koko rakenteen elinkaaren ajan. Yksi merkittävä rauditusta vaurioittava tekijä on terästen korrosio. Korrosio syövyttää terästä ja pienentää raudituksen poikkipinta-alaa.

Useimpia terästen korrosioon vaikuttavia tekijöitä voidaan poistaa rakenteen elinkaareen nähden riittävällä suojabetonipaksuudella. Rakenteiden suojabetonipaksuuteen vaikuttavat rasitusolosuhteet eli rakenteen sijainti. Suomessa betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa pienimmäksi suojabetonipaksuudeksi sallitaan 30 mm. Suojabetonivaatimuksen piiriin ei lasketa pölkyn päitä, sillä pölkyn päissä teräkset saavat ulottua pölkyn pintaan saakka (Ratahallintokeskus 2008.) Terästen korrosiota on käsitelty tarkemmin luvussa 5.1.3

3.3.2 Betonin huokosrakenne ja veden liikkuminen betonissa

Betonin pakkasenkestävyydelle on oleellista betonin huokosrakenne. Huokosrakenteessa oleva vesi ei käyttäydy vapaan veden kaltaisesti, sillä sementtikiven sisältämät erikokoiset huokokset vaikuttavat oleellisesti veden käyttäytymiseen toistuvien jäätymis-sulamissykliä aikana. Betonin pakkasvaurioitumista selittävässä teoriassa pyritäänkin ottamaan huomioon huokosrakenne ja sen vaikutus ilmiöihin, joita tapahtuu betonin kastuessa ja jäätyessä. Sementtikiven sisältämän veden olomuotojen muutokset ja jäätympiste ovat riippuvaisia huokossysteemin rakenteesta ja huokoskoos-

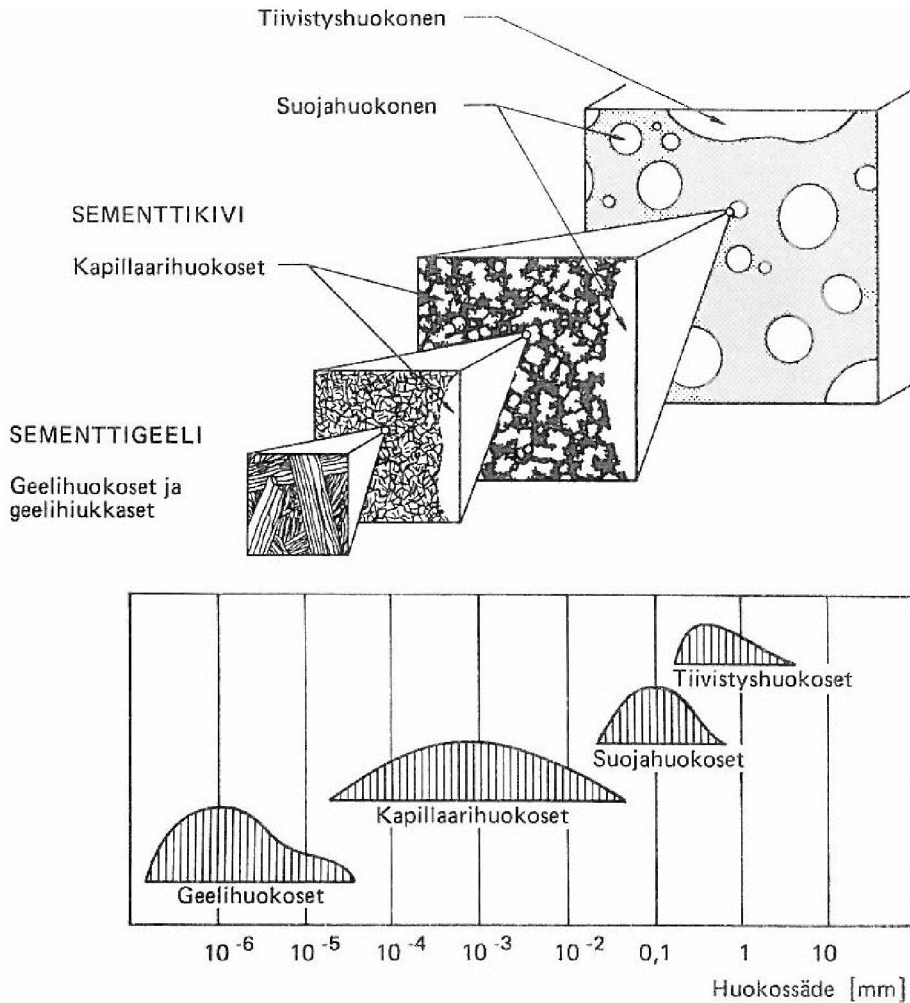
ta. Mitä pienempi huokonen on, sitä alhaisempi lämpötila vaaditaan huokosen sisältämän veden jäätymiseen (Kuosa & Vesikari 2000.). Kuva 3.29 esittää huokosen koon ja veden jäätyislämpötilan yhteyden.



Kuva 3.29 Veden jäätymiseen vaadittavan lämpötilan ja betonissa olevan huokosen koon yhteys. (Tiehallinto 2007)

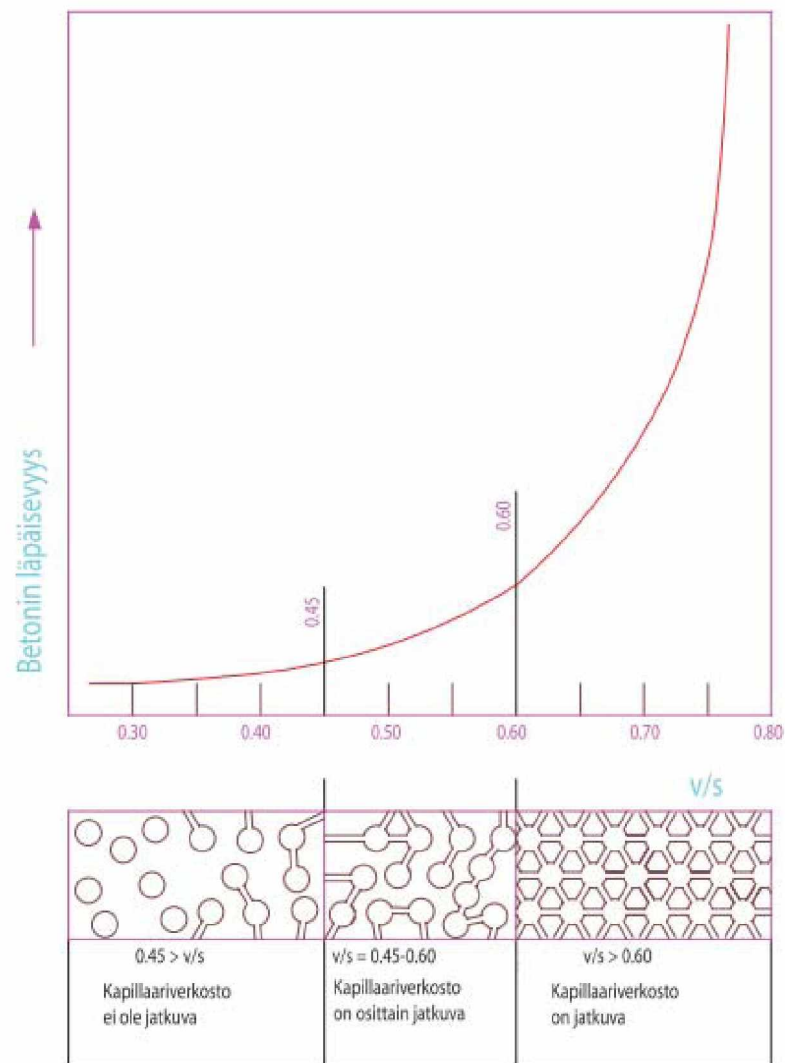
Erityisesti sementtikiven vesi-sementtisuhte ja hydrataatioaste vaikuttavat sementtikivessä olevien huokosten kokoon, minkä johdosta ne vaikuttavat tietyssä lämpötilassa jäätyvän veden määrään. Esimerkiksi jos betoni kuivatetaan lähelle 60 % suhteellista kosteutta, poistuu siitä kaikki vesi, joka voi jäätymään ennen -20 °C. (Kuosa & Vesikari 2000)

Betonissa esiintyvistä huokosista pienimmät ovat geelihuokosia, kuten kuvasta 3.30 voidaan havaita. Geelihuokokset ovat sementin klinkkerimateriaalien hydrataatiotuotteiden väleihin jääviä huokosia, jotka ovat kooltaan alle 0,03 µm. Geelihuokosissa olevan veden jäätympiste on pintavaikutusten johdosta -40 °C – -78 °C. Alhaisesta jäätympisteestä johtuen vesi ei jäädy käytännön olosuhteissa. (Kuosa & Vesikari 2000)



Kuva 3.30 Betonin sisältämien huokosten koko (by 32 1989).

Kapillaarihuokokset muodostuvat sementin hydrataation aikana yli jäävän veden johdosta. Kapillaarihuokokset aikaansaavat sementtikiveen verkoston, jossa ympäristöstä betoniin tuleva vesi voi edetä kapillaarivoimien vaikutuksesta. Betonin tiiveys vaikuttaa kapillaarihuokosten aikaansaaman verkoston yhtenäisyyteen ja betonin tiiveyttä voidaan kuvata kokeellisesti määritettävällä kapillaarisuusluvulla. Tärkein betonin tiiveyteen vaikuttava tekijä on betonin valmistamisessa käytetty vesi-sementtisuhte. Kuva 3.31 esittää vesi-sementtisuhteen yhteyden betonin huokosrakenteeseen ja läpäisevyyteen. Myös betonin valmistuksessa käytetyillä seosaineilla on vaikutusta tiiveyteen. Hydrataation edetessä betonin kokonaishuokoisuus pienenee kapillaarihuokosten määrän vähentyessä. Kapillaarihuokosten vähenemisen myötä geelihuokosten tilavuusosuus kasvaa (Kuosa & Vesikari 2000.). Betonin ikääntyessä kapillaarihuokoisuus kuitenkin lisääntyy, vaikka betonin kokonaishuokoisuus pysyisikin vakiona. Tämä johtaa siihen, että betonin keskimääräinen jäätyislämpötila nousee ja sen seurauksena pakkasrasitus lisääntyy. (Tiehallinto 2007)



Kuva 3.31 Vesi-sementtisuhteet yhteys betonin huokosrakenteeseen ja läpäisevyyteen. (Tiehallinto 2007)

Kapillaarihuokosissa vesi käyttäytyy pääasiassa makroskooppisen veden kaltaisesti. Huokosiin alkaa kondensoitua vettä suhteellisen kosteuden ollessa 90–95 %. Pinta-voimat alentavat veden kemiallista potentiaalia ja tästä johtuen jäätyminen alkaa lämpötilavälillä -5 °C – -12 °C , joskin suurimmissa kapillaarihuokosissa vesi alkaa jäätyä jo heti 0 °C alapuolella. (Kuosa & Vesikari 2000, Tiehallinto 2007)

Ilmahuokosiksi kutsutaan huokosia, jotka ovat betonia sekoitettaessa tai betonin lisähuokostamisella aikaansaatuja pallomaisia huokosia. Mikäli ilmahuokosia aikaansaadaan lisähuokostamisella, kutsutaan huokosia suojahuokosiksi. Suojahuokokset ovat merkittävässä roolissa silloin, kun betonia pyritään suojaamaan jäädytys-sulatussykleistä johtuvilta vaurioilta. (Kuosa & Vesikari 2000)

Suurimmat betonissa esiintyvät huokokset ovat tiivistyshuokosia. Tiivistyshuokokset ovat huonosta betoni tiivistyksestä jääneitä huokosia. Huokokset ovat usein epämääräisen muotoisia ja muihin huokosiin verrattuna kooltaan erityisen suuria. Tiivistyshuokokset saattavat olla jopa betonissa olevia onkaloita, jolloin niitä kutsutaan harvalukuksi. Suurten ilmahuokosten ja tiivistyshuokosten välinen raja on osin määrittelykysymys. (Kuosa & Vesikari 2000)

Pakkasrapautumisen kannalta on olennaista ymmärtää veden siirtyminen betoniin ja betonissa. Veden siirtymiseen vaikuttavat pääasiassa fysikaaliset ilmiöt ja tekijät. Ympäristöstä johtuvia tekijöitä ovat suhteellinen kosteus, suora kosketus veteen, ulkoinen paine ja lämpötila sekä lämpötilan vaihtelu. Betonin sisällä veden liikkeisiin vaikuttavat kapillaarivoimat ja kosteuden johtuminen. Myös veden jäätyminen ja tätä kautta veden tilavuuden kasvun aikaansaama hydraulinen paine on merkittävässä roolissa ajatellen veden liikkumista. Veden jäätyminen aikaansaa myös konsentraatioeroja jäätyneen ja sulan veden välille. Konsentraatioerot pyrkivät tasoittumaan, sillä veteen liuenneet aineet kertyvät vielä jäätyttömään veteen.

Lämpötilan muutokset aikaansaavat veden siirtymistä, sillä vedellä on taipumus liikkua lämpimästä kylmempään. Toisin sanoen ilman lämmitessä vesi siirtyy ympäristöstä betoniin. Vähäistä veden siirtymistä aiheuttaa myös veden ja betonin kiinteän aineen erilaisesta lämpölaajenemisesta johtuvat tekijät.

Veden liikkuminen betonissa aikaansaa sen, että jäätä voi muodostua lämpötilan pysyessä vakiona. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi geelihuokosten jäätyvän vesi pystyy kulkeutumaan kapillaarihuokosiin ja ilmahuokosiin, joissa se jäätyy. Edellä mainitun liikkumisen aikaansaa sulan ja jäätyneen veden kemiallinen potentiaaliero, sillä jäätyneen veden potentiaali on alhaisempi verrattuna jäätyttömään veteen.

3.3.3 Betonin pakkasenkestävyys

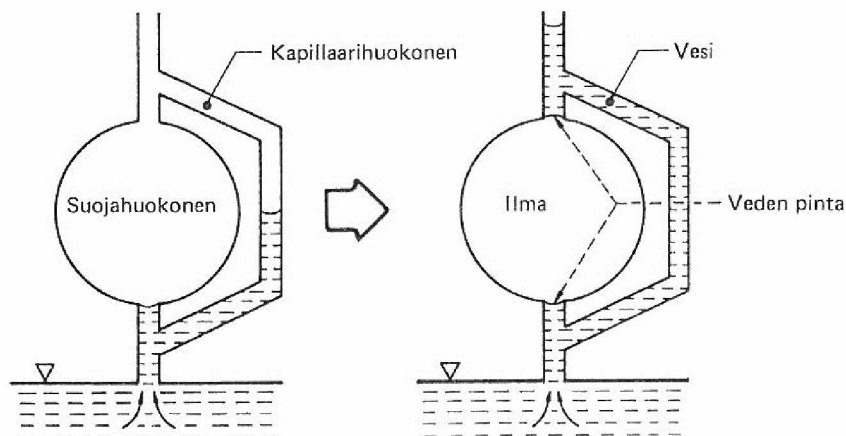
Ulkorakenteiden betonilta vaaditaan pakkasenkestävyyttä. Betonin sisältämän veden jäätyminen aiheuttaa pakkasrasituksen. Olennaiset tekijät pakkasrasituksen voimakkuudessa ovat betonin kosteuspitoisuus jäätyneen tapahtuessa sekä jäätymissyörien lukumäärä. Lisäksi lämpötilan laskun nopeus vaikuttaa pakkasrasituksen voimakkuuteen. Mitä nopeammin lämpötila laskee, sitä suuremmat ovat muodostuvat jännitykset ja sitä voimakkaampi on pakkasrasitus. Rakenteen sijainnin, tyypin ja suojausten mukaan pakkasrasitus voidaan jakaa kohtuulliseen ja ankaraan pakkasrasitukseen. Lisäksi suolarasituksen alaiset ulkorakenteet altistuvat suola-pakkasrasitukselle. (Leivo 2000, RTT 2010)

Pyrittäessä betonin hyvään pakkasenkestävyyteen, tulee betonia tehtäessä pyrkiä mahdollisimman alhaiseen vesisementtisuhteeseen, jolloin kapillaarihuokoisuus jäisi mahdollisimman pieneksi. Alhaisen vesi-sementtisuhteen lisäksi betonin jälkihoito parantaa pakkasenkestävyyttä. Hyvällä jälkihoidolla hydrataatioaste saadaan korkeaksi, mikä johtaa betonin pakkasenkestävyyden paranemiseen. Esimerkiksi jälkihoitoajan pidentäminen 7:stä vuorokaudesta 28 vuorokauteen vähentää kokeiden perusteella pakkassuolarapautumista noin 10 %. (Tiehallinto 2007) Betonirata-pölkkytuotannossa jälkihoitoajan kasvattaminen 28 vuorokauden mittaiseksi ei ole kuitenkaan saavutettava etu ja tuotannon vaikeutuminen huomioiden järkevää.

Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa betonimassaan lisättävillä lisähuokostimilla, joilla muodostetaan kovettuneeseen betoniin läpimitaltaan noin 0,025–0,05 mm suojahuokosia. Kun suojahuokosten läpimitta on sopiva, huokokset eivät täyty kokonaan vedellä, vaan pysyvät osittain ilmatäytteisinä betonin kastuessa. Suojahuokokset toimivat betonissa tyhjätilana, johon huokosveden paine voi purkautua (RTT 2010). Suojahuokosten koon vaihteluväli on esitetty myös julkaisussa by 32 (1989), joka esittää suojahuokosten kooksi hieman edellä esitettyä enemmän (kuva 3.30). Jotta lisähuokostus olisi tehokas, tulee betonissa olla tietty minimimäärä suojahuokosia, joiden tulee olla mahdollisimman tasaisesti jakautuneena betonissa.

Pakkasrasitukselle on olennaista se, että se vaurioittaa betonia sieltä, missä se on heikoimmillaan. Huokostuksen epätasainen jakautuminen aiheuttaa sen, että rakenne vaurioituu sen kohdan mukaisesti, jossa on huonoin suojahuokostus. (Leivo 2000)

Veden imeytyessä betoniin kapillaarisesti jäävät suojahuokokset suuren kokonsa vuoksi ilmatäytteisiksi kuvan 3.32 mukaisesti. Veden pintajännitys estää sen tunkeutumisen suojahuokosiin.



Kuva 3.32 Malli, joka esittää, miten suojahuokokset pysyvät ilmatäytteisinä veden imeytyessä betonin kapillaarihuokosiin (by 32 1989).

Suomessa kokemukset betonin huokostamisesta ovat pääasiassa hyviä. Huokostaminen lisää kuitenkin sementin kulutusta ja vaikeuttaa betonin valmistusta ja laadun hallintaa. Näin ollen tarpeeton huokostus vaikeuttaa lujien betonien valmistusta ja nostaa materiaali- sekä laadunvalvontakustannuksia (Kuosa & Vesikari 2000.). Huomionarvoista on myös se, että betonin lujuus laskee noin 5 % ilmamäärän kasvaessa 1 %-yksiköllä (Kuosa 2013).

Riittävän ilmapitoisuuden ja suojahuokosmäärän lisäksi pakkasenkestävällä betonilla on oltava riittävästi lujuutta, jotta se kestää jäätymislaajentuman aiheuttaman sisäisen vetorasituksen. Betonin on myös oltava vesitiivistä. Riittävä vesitiiveys vähentää veden imeytymistä betoniin ja pienentää siten pakkasrasitusta. (RTT 2010, Kuosa 2002)

3.3.4 Betonin suola-pakkaskestävyys

Betonirakenteen kanssa kosketuksiin joutuvat suolat lisäävät voimakkaasti jäätymisen aiheuttamaa pakkasrasitusta. Suolan sisältämät kloridit nostavat betonin vedelläkyllystymisastetta ja laskevat kriittistä kyllystymisastetta. Vedelläkyllystymisasteen kasvu perustuu siihen, että kloridisuolojen läsnä ollessa kosteus lähes jatkuvasti voi imeytyä betoniin alhaisissa lämpötiloissa rakenteen pinnalta ja ilmasta. Tiesuolaa kulkeutuu autonrenkaiden mukana myös niihin betonirakenteisiin, joista ei poisteta lunta ja jäätä suolaamalla. Junaradalla tällaisia rakenteita ovat tasoristeykset. Suola siirtyy myös lumen sulamisvesien mukana. Suolan lisäksi betonirakenteen pakkasenkestävyyttä heikentää rakenteen korkea kosteuspitoisuus. (RTT 2010, Tiehallinto 2007)

Betonin suola-pakkasrasituskestävyyttä parannetaan lisäämällä betonin ilmamäärää ja suojahuokossuhdetta. Voimakkaan suola-pakkasrasituksen alaisen betonirakenteen valmistuksessa voidaan käyttää P-lukubetonia, jonka ilmamäärä,

suojahuokossuhde, sementtilaatu ja hyvä jälkihoito parantavat rakenteen säänkestävyyttä. (RTT 2010)

Suolarasitukselle alttiiksi joutuvat ratapölkkyt voidaan suojata vettähyllivällä impregnoinnilla tai muulla suojauksella. Suoja-aineella käsitellyt pölkkyt erottuvat myös ulkonäöllisesti muista pölkkyistä. Erillisiä suojakäsiteltyjä pölkkyjä ei kuitenkaan tällä hetkellä vaadita suolarasitetuissa kohteissa.

3.3.5 Betonin pakkasenkestävyyden testaus

Luotettavalla pakkasenkestävyyden testausmenetelmällä tai pakkasenkestävyyden simulointimallilla on yhteys pakkasvaurioitumisen taustalla oleviin mekanismeihin. Vaurioitumisteorioiden tunteminen auttaa valittaessa kokeellisia menetelmiä ja muita tapoja betonin pakkasenkestävyyden arvioimiseen. Betonin pakkasvaurioitumisen mekanismeihin vaikuttaa oleellisesti olosuhteet, joissa betonirakenne on (Kuosa & Vesikari 2000.). Betonin pakkasenkestävyyttä arvioitaessa tulee muistaa, että betonin kaikki ominaisuudet sisältävät aina hajontaa. Tästä johtuen pakkasenkestävyys ja koetulokset vaihtelevat aina hieman. Vaihtelu on sitä suurempaa mitä enemmän koekappale poikkeaa lopullisesta rakenteesta. Tästä johtuen erikseen valmistettujen koekappaleiden mitatut pakkasenkestävyydet eroavat todellisen rakenteen pakkasenkestävyydestä enemmän kuin poraamalla irrotettujen koekappaleiden. (Leivo 2000)

Pakkasenkestävyyden arvioimiseen ja varmistamiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, joista vain osa on esitelty lyhyesti tässä luvussa.

Erinäiset jäädytys-sulatuskokeet ovat yksi vaihtoehto betonin pakkasenkestävyyden arvioimiseen. Esimerkkinä jäädytys-sulatuskokeista on standardin SFS 5447 mukainen koe. Vaikka tätä koetta on käytetään runsaasti on sitä myös kritisoitu siitä, että useilta osin se ei simuloi hyvin luonnonolosuhteissa tapahtuvaa pakkasvaurioitumista. (Kuosa & Vesikari 2000)

Jäädytys-sulatuskestävyyden mittausmenetelmiä on joitain. Rapautumisen etenemistä kokeissa voidaan arvioida muun muassa näytteen massan muutoksella, lujuuden muutoksella, halkeilun määrällä ja ultraäänellä. Betonin lujuuden kasvaessa massan muutos arviointikriteerinä on joiltain osin ongelmallista. Tämä johtuu siitä, että erityisesti korkealujuusbetoni ei yleensä murene vaikka halkeilu olisikin runsasta. Ultraäänien etenemisnopeus on myös varteenotettava arviointi peruste. Menetelmä perustuu siihen, että äänen etenemisnopeus betonissa hidastuu vaurioiden kasvaessa. Menetelmän ongelma on kuitenkin se, että vaikka halkeaman syntyessä äänen nopeus laskee, niin halkeamat alkavat vähitellen täyttyä jolloin ultraäänien nopeus kasvaa. Saadut tulokset ovat osin riippuvaisia mittausajankohdasta, mikä hankaloittaa tulosten tulkintaa. (Kuosa & Vesikari 2000)

Pakkasenkestävyyden arvioimiseen voidaan käyttää myös suojahuokossuhteen määrittämistä. Menetelmä kertoo kuinka suuri osa betonissa olevasta kokonaishuokostilavuudesta pysyy ilmatäytteisenä vesisäilytyksessä ja normaalipaineessa. Tämän tilavuuden katsotaan vastaavan betonissa olevaa ilmahuokosten tilavuutta. Menetelmän eduista huolimatta virhearviot ovat mahdollisia. Tämä johtuu siitä, että kokeessa ei pystytä erottelemaan suojahuokosia ja näitä isompia tiivistyshuokosia. Koe ei myöskään kerro suojahuokosten keskimääräisestä koosta, kokojakaumasta ja siitä miten suojahuokokset ovat jakautuneet betoniin. Tästä johtuen on arvioitu, että

huokostusta kuvaavista suureista huokosjako soveltuu parhaiten pakkasenkestävyyden arvioimiseen. Huokosjako ilmaisee laskennallisen maksimietäisyyden sementtipastan mistä tahansa pisteestä lähimmän suojahuokosen pinnalle. Betonin ilmapitoisuus ja suojahuokossuhde eivät sinänsä kuvaa suoraan huokostuksen tehokkuutta. Ne toki korreloivat huokosjaon ja tätä kautta pakkasenkestävyyden kanssa, mutta ne ovat tarkkuudeltaan heikompia. (Kuosa & Vesikari 2000)

Betoninormien mukaan pääsääntöisesti pakkasenkestävyyden saavuttamiseksi riittää suojahuokossuhteelle asetettu vaatimus 0,20. Suojahuokoskokeen suurin ongelma on kuitenkin se, että se ei sovellu korkeiden lujuusluokkien betonille joiden vesisementtisuhte on alhainen. Koeteknisesti kokeen soveltamisala loppuu yli K50:n betoneilla. Tästä johtuen korkeammilla lujuusluokilla kuin K50 tulisi pakkasenkestävyys arvioida joko huokosjakona tai suorana pakkasenkestävyyssuhteena. Myös kapillaarinen vedelläimeytyskoe on vartenotettava menetelmä arvioitaessa korkean lujuusluokan betoneita. On arvioitu, että menetelmällä saatava kapillaarisuusluku yksi parhaista korkealujuusbetonin säilyvyyttä kuvaavista suureista. (Kuosa & Vesikari 2000)

Siltarakenteiden osalta Liikennevirasto arvio P-lukumenettelyn avulla muun muassa pakkasenkestävyyttä. P-lukulaskennassa pakkasenkestävyyteen vaikuttavat sideaineen laatu ja määrä, tehollinen vesimäärä, ilmamäärä ja jälkihoitoaika. (Tiehallinto 2007) P-lukumenettelyä ei ole sovellettu betoniratapölkyille.

P-luku voidaan määrittää standardin SS 137224 mukaisen 56 kierroksen pakkassuolakokeen ja suhteitustietojen perusteella kaavan 3-1 mukaisesti.

$$P = k_{sid} \cdot \frac{2000}{(m_{56})^{0,75}} \quad (3-1)$$

Kaavassa:

k_{sid} on sideainekerroin.

m_{56} on standardin SS 137224 mukaisen 56 kierroksen pakkassuolakokeen rapautuma [g/m²]

4 Betoniratapölkkyjen suunnittelu ja mitoitus

4.1 Suunnittelun lähtökohdat

Ratapölkkyjen suunnittelun tavoitteena pitää olla halkeilematon ratapölkky, koska taivutusmomentista johtuvat halkeamat betonissa johtavat esijännityspunosten jännitystason suureen nousuun halkeamakohdassa taivutusrasituksen aikana. Tämä saattaa johtaa punosten väsymismurtoon. Esijännityksen suunnittelu ja jännityksen suuruuden määrittäminen sekä kiskon kohdalla että ratapölkyn keskellä ovat oleellisia tekijöitä ratapölkyn toiminnan kannalta. Kiskon kiinnityskohdassa pitää olla täysi esijännitys käyttörajatilan halkeiluriskin pienentämiseksi. Tämän vuoksi punosten ankkurointikestävyystarve ratapölkyn päässä on suuri. Koska ratapölkyn pään pituus on tyypillisesti vain noin 500 mm, pitää tartunnan toimia lyhyellä matkalla. (Gustavson 2002)

Ratapölkkyjen hyväksynnän pitää perustua staattisiin rakenteellisiin testeihin. Taivutuskokeessa varmistetaan, että kiskonkiinnytyksen kohtaan ei synny halkeilua ennalta määrättyllä kuormalla tai selvitetään ensimmäistä näkyvää halkeamaa vastaava kuorma. Murtorajatilassa murto ei saa olla hauras. Siksi betonin puristuslujuuden ja esijännityspunosten vetolujuuden pitää olla tasapainossa siten, että punos venyy selvästi teräsmateriaalin plastisella alueella ennen ratapölkyn murtumista. Sykliset dynaamiset kokeet voivat myös olla osa normaaleja hyväksyttämiskokeita. Näiden tavoitteena on varmistaa ratapölkyn väsytykestävyys. (Gustavson 2002)

Useimmat kansalliset standardit ohjeistavat suunnittelukuorman määrittämisen siten, että staattinen kuorma kerrotaan dynaamisella kertoimella. Tämän jälkeen rakenne mitoitetaan suunnittelukuormalle staattisen rakennemallin mukaan. Tämä periaate ei täysin oikein huomioi kaikkia dynaamisia vaikutuksia, kuten ratapölkyn värähtelyä ja takaisinponnahtamista, joiden aiheuttamat rasitukset saattavat olla päinvastaiset edellä esitettyyn nähden. Suunnittelukuormat määritetään tyypillisesti kokemuksen, ei teorian, pohjalta. (Gustavson 2002)

Betoni- ja teräsmateriaaleja koskevat yksityiskohdat ja vaatimukset on esitetty kohdassa 2.3

4.2 Ohjeistus Suomessa

4.2.1 Liikenneviraston ohjeet RATO 1 ja RATO 11

Radassa saa käyttää vain RATO:n mukaisia Liikenneviraston erikseen hyväksymiä rakenteita ja laitteita. RATO 3 antaa määräysten ja ohjeiden pätemisjärjestyksen, jossa Suomen rakentamismääräyskokoelma RakMK on vasta sijalla 7 ja eurooppalaisia EN-standardeja ei mainita lainkaan.

Määritelmiä (RATO 1):

- Liikkuvan kaluston akselipainolla tarkoitetaan veturin tai vaunun yhden akselin molempien pyörien eli pyöräkerran raiteeseen kohdistamaa staattista painoa.
- Metripainolla tarkoitetaan veturin tai vaunun staattista painoa jaettuna sen metreissä ilmaistulla pituudella.

RATO 11:ssä esitetään taulukkoon 4.1 kootut eri betonipölkkytyypeille sallitut akselipainot eri nopeuksilla ja kiskoprofiileilla.

Taulukko 4.1 Betoniratapölkkyille sallitut suurimmat nopeudet ja akselipainot (RATO 11).

Suurin nopeus [km/h]	Suurin akselipaino [kN]				
	B75 ja vanhemmat	B86	B88, BP89 B97, BP99		
			54 E1	54 E1	K43
250	-	-	-	-	200
240	-	-	-	-	205
230	-	-	-	-	205
220	-	-	-	-	210
210	-	-	-	-	210
200	190	200	-	200	215
190	195	205	-	205	220
180	195	205	-	205	220
170	200	210	-	210	225
160	205	215	-	215	230
150	205	215	-	215	230
140	210	220	-	220	235
130	215	225	-	225	240
120	215	225	215	225	240
110	220	230	215	230	245
100	225	235	220	235	250
90	225	240	225	240	255
80	230	250	230	250	260
70	235	250	230	250	265
60	250	255	235	255	265

Laskelmia mitoituskaavioille LM71-35 (RATO 3 / Taulukko 3.8:1)

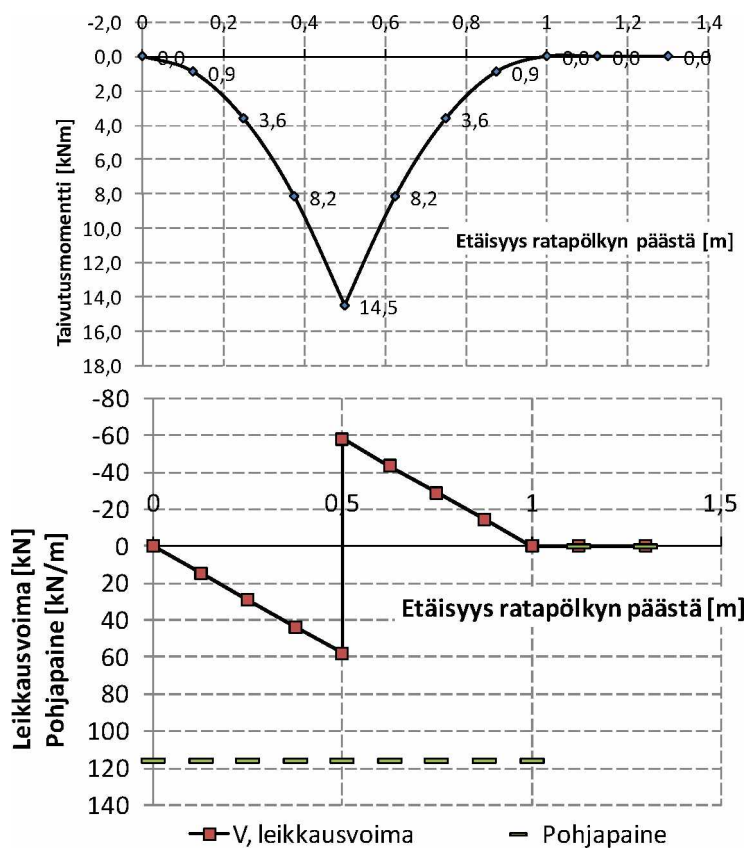
Mitoituskaavion LM71-35 pistekuormasta Q_{vk} tulee metrikuormaksi $Q_{vk}/\text{pistekuormaväli} = 370\text{kN}/1,6\text{m} = 231,25 \text{ kN/m} \approx 231 \text{ kN/m} = q_{vk} + \Delta q_{vk}$. Kun ratapölkkyjako on 610 mm (RATO 11), saadaan mitoituskaavion tasaisesta kuormasta yhden ratapölkyn kuormaksi $(q_{vk} + \Delta q_{vk}) \cdot 0,610\text{m} = 141 \text{ kN}$.

Uusien ratojen suunnittelussa sysäskertoimelle käytetään arvoa $\phi_v = 1,25$.

Suoraan pyörän kohdalla olevaan ratapölkkyyn kohdistuu puolet pystykuormasta (RATO 3). Näillä tiedoilla voidaan kuorma laskea yhdelle ratapölkkyille: $Q_{vk,pölkky} = Q_{vk} \cdot \varphi_v \cdot 50\% = 370 \text{ kN} \cdot 1,25 \cdot 50\% = 231 \text{ kN}$ (ominaisarvo). $Q_{vd,pölkky} = Q_{vk,pölkky} \cdot \gamma_q = 231 \text{ kN} \cdot 1,3 = 301 \text{ kN}$ (laskenta-arvo).

Suomalaisten betoniratapölkkyjen pituus on 2,6 m ja keskimääräinen leveys pohjassa päiden alla on 277 mm (ratapölkky BP89). Kun kuorman tulkitaan välittyvän tukikerrokselle metrin pituisten päätyjen kautta (RATO 3), saadaan pohjapaineen ominaisarvoksi: $p_{vk,pölkky} = Q_{vk,pölkky} / ((2,6-0,6)\text{m} \cdot 0,277\text{m}) = 231 \text{ kN} / 0,554 \text{ m}^2 = 417 \text{ kN/m}^2$. Ratapölkky B97 on hieman kapeampi, jolloin sen alapinnalla pohjapaineeksi saadaan 422 kN/m^2 .

Kun pohjapaine päissä on $231 \text{ kN} / 2 \text{ m} = 116 \text{ kN/m}$ ja ulokemitta 0,5 m, saadaan taivutusmomentiksi kiskon kohdalla (kuva 4.1): $M_{Ek} = 0,5 \cdot (0,5\text{m})^2 \cdot 116 \text{ kN/m} = 14,5 \text{ kNm}$.



Kuva 4.1 Ratapölkyn puolikkaan taivutusmomentti ja leikkausvoima ominaispystykuormasta $Q_{vk,pölkky}$, kun keskellä 0,6 m matkalla ei ole pohjapainetta.

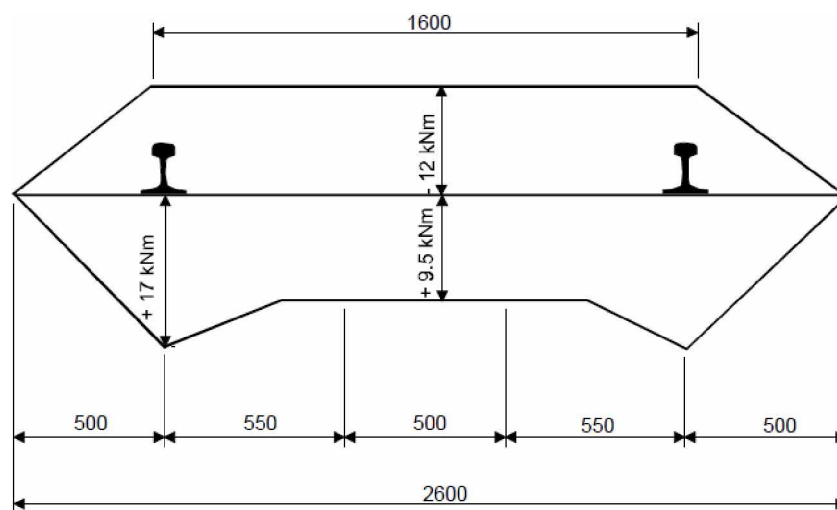
Tätä taivutusmomenttia voidaan verrata kuvassa 4.2 esitettyyn Betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen (Ratahallintokeskus 2008) ratapölkyn momenttikaavioon, jossa on annettu kiskon kohdalle taivutusmomenttivaatimukseksi $M_{k,vaad} = 17 \text{ kNm}$.

4.2.2 Esijännitetyt betoniratapölkkyt. Tekniset toimitusehdot.

Suomessa betoniratapölkkyjen valmistamiseen ja laadunvalvontaan on laadittu betoniratapölkkyjen tekniset toimitusehdot (Esijännitetyt betoniratapölkkyt). Tekniset toimitusohjeet ovat perusrakenteeltaan olleet hyvin samanlaiset jo pitkän aikaa, pakkasuola-kokeiden avulla tehdystä betonikehitystyöstä lähtien (Grundfelt 2010).

4.2.2.1 Momenttikuormat

Betoniratapölkky on mitoitettava siten, että kuvassa 4.2 esitetyt ulkoisten voimien momenttipinnan mukaiset momentit eivät aiheuta betonin vetojännityksiä, jotka ylittävät 3 MN/m^2 , eivätkä betonin puristusjännityksiä, jotka ylittävät 20 MN/m^2 . Varmuuden murtumista vastaan on mitoitussuunnitelmissa osoitettava olevan vähintään kaksinkertainen. (Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 4.2 Betoniratapölkky momenttikuvio (Ratahallintokeskus 2008).

Vertailu betoninormiin RakMK B4

Betoniratapölkky suunnitellaan rakentamismääräyskokoelman RakMK mukaisen rakenneluokan K60-1 mukaan. Betonin puristuslujuuden ominaisarvo on $f_{ck} = 0,7K = 0,7 \cdot 60 \text{ MPa} = 42 \text{ MPa}$ (RakMK B4). Betoninormin betonin jännitys-muodonmuutoskuvaajan mukaan K60-betonin käyttäytyminen on lineaarista noin Ratahallintokeskuksen (2008) mainitsemaan puristusjännitykseen $\sigma_{c,pur} = 20 \text{ MPa}$ asti.

Betonin vetolujuuden ominaisarvo lasketaan kaavasta $f_{ctk} = 0,2 \cdot K^{2/3} \text{ MPa} = 0,2 \cdot 60^{2/3} \text{ MPa} \approx 3,1 \text{ MPa}$. Ratahallintokeskuksen (2008) teknisten toimitusehtojen mukainen momenttikuvion (kuva 4.2) mukainen maksimi vetojännitys 3 MPa on vain hieman pienempi kuin betonin K60 vetolujuus f_{ctk} . RakMK:n taivutusvetolujuus betonille K60 on $f_{ctk,taiv} = 1,7 \cdot f_{ctk} = 5,2 \text{ MPa}$ eli selvästi suurempi kuin teknisten toimitusehtojen mukainen maksimi vetojännitys. Jos ratapölkky taivutusrasitukset jäävät teknisten toimitusehtojen mukaisia momenttikuvion taivutusmomentteja pienemmiksi ja ratapölkky on oikein mitoitettu, halkeamia ei synny.

4.2.2.2 Tyypikokeet

Ennen uuden betoniratapölkkytyypin valmistuksen aloittamista valmistajan on teetettävä 4×3 koepölkylle dynaamiset ja staattiset päiden ja keskiosan taivutuskokeet. Dynaamisessa kokeessa ei sallita pysyvien halkeamien (leveys 0,05 mm) muodostumista (Ratahallintokeskus 2008). Dynaamisen kokeen suorittamisen pelkkä väsytysoisuus kestää noin $2000000/(5/s) = 400000$ sekuntia ≈ 5 vuorokautta. Päiden kokeessa kuormituksen ylärajan $P_{\max} = 185$ kN aikaansaama taivutusmomentti, kun jännevälit ovat 0,6 m, on: $M_{\max, \text{dyn}, \text{pää}} = P_{\max} \cdot 0,5 \cdot 0,3 \text{ m} = 27,75 \text{ kNm} \approx 28 \text{ kNm}$. Tässä yksinkertaisessa taivutusmomenttilaskelmassa ei ole huomioitu pistekuormaa pölkyn yläpinnalla pölkyn suuntaisesti jakavan teräslevyn vaikutusta. Jos mitoitus tehdään teknisten toimitusehtojen mukaisella 17 kNm taivutusmomentilla sallien 3 MPa vetojännityksen muodostuminen (kuva 4.2) on todennäköistä, että dynaamisen kokeen taivutusmomentilla syntyy taivutushalkeilua.

Vastaavasti saadaan keskiosalle karkea taivutusmomenttiarvio, kun kokonaiskuorma on $P_{\max} = 110$ kN: $M_{\max, \text{dyn}, \text{keski}} = P_{\max} \cdot 0,5 \cdot 0,3 \text{ m} = 16,5 \text{ kNm}$ (kuva 4.2: käyttötilassa 12 kNm)

Staattisessa kokeessa betoniratapölkky kuormitetaan kiskon kiinnityskohdasta ja tuetaan alapinnastaan symmetrisesti kuormituspisteen suhteen jännevälin ollessa 600 mm. Pölkkytyypeille B97 ja BP99 staattisen kokeen mukainen punosten vetomurtolujuutta vastaava laskennallinen maksimi pystyvoima ratapölkyn päissä on 315 kN, ks. Betoniratapölkyn toiminta ja vaurioitumismekanismit, osa 2/2, liite. Tämä on riittävä pystyvoiman arvo, koska viranomaisvaatimukset ovat (Ratahallintokeskus 2008):

- ensimmäinen halkeama $P \geq 150$ kN
- pysyvä halkeama $P \geq 240$ kN
- murto $P \geq 300$ kN

Keskiosan staattisen kokeen vaatimus $P_{\text{murto}} \geq 300$ kN merkitsee käytännössä, että ratapölkyn pään eli kiskon kohdan pitää kestää momentti $M_{\text{murto}} = P_{\text{murto}} \cdot 0,5 \cdot 0,3 \text{ m} = 45 \text{ kNm}$. Tämä vaatimus on suurempi kuin momenttikuviossa (kuva 4.2) ja vastaavassa tekstiosuudessa esitetty $2 \cdot 17 \text{ kNm} = 34 \text{ kNm}$, vaikka kuormaa jakavan teräslevyn pituuskin huomioidaan.

Betoniratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa ratapölkky tuetaan kiskon kiinnityskohdista ja kuormitetaan alapinnaltaan kahdesta tukien suhteen symmetrisestä pisteestä, jotka sijaitsevat etäisyydellä 300 mm tuentakohdista. Kokeen mukaisen järjestelyn viranomaisvaatimukset ovat (taivutusmomentit on tässä laskettu ilman kuormaa jakavan teräslevyn vaikutusta) (Ratahallintokeskus 2008):

- ensimmäinen halkeama $P \geq 80$ kN (vastaava taivutusmomentti $M_{\text{ens.halk}} \geq 12$ kNm)
- pysyvä halkeama $P \geq 128$ kN (vastaava taivutusmomentti $M_{\text{pys.halk}} \geq 19,2$ kNm)
- murto $P \geq 160$ kN (vastaava taivutusmomentti $M_{\text{murto}} \geq 24$ kNm)

Staattisen kokeen vaatimus $P_{\text{murto}} \geq 160$ kN merkitsee käytännössä, että ratapölkyn keskiosan pitää kestää momentti $M_{\text{murto}} = P_{\text{murto}} \cdot 0,5 \cdot 0,3 \text{ m} = 24 \text{ kNm}$, mikä on tällä likimääräiskaavalla laskettuna sama kuin momenttikuviossa (kuva 4.2) ja vastaavassa tekstiosuudessa esitetty $2 \cdot 12 \text{ kNm} = 24 \text{ kNm}$.

4.2.2.3 Valmiiden betoniratapölkkyjen kokeet

Valmistajan on tehtävä ratapölkylle kerran vuorokaudessa ratapölkyn pään ja keskiosan taivutuskokeet. Näiden kokeiden kuormitusjärjestelyt poikkeavat tyyppikokeiden kuormitusjärjestelyistä, varsinkin keskikohdan koe.

Ratapölkyn pään taivutuskoe tehdään erikseen betoniratapölkyn kummallekin päälle. Betoniratapölkky kuormitetaan kiskon kiinnityskohdasta ja tuetaan alapinnastaan symmetrisesti kuormituspisteen suhteen jännevälin ollessa 600 mm. Kokeessa kuormitusta lisätään asteittain 160 kN saakka, eikä tällöin saa muodostua vetopuolen alimpaan jänneteräsriiviin ulottuvia halkeamia. Kokeen vaatimus $P_{\max} = 160$ kN merkitsee käytännössä, että kiskon kohdalle syntyy momentti $M_{\max} = P_{\max} \cdot 0,5 \cdot 0,3\text{m} = 24$ kNm, mikä on 41 % suurempi kuin momenttikuviossa esitetty käyttötilan momentti 17 kNm, vrt. kuva 4.2. Tällöin näissä kokeissa ylitetään 41 prosentilla vaatimukset $\sigma_{\text{veto}} \leq 3$ MPa ja $\sigma_{\text{puristus}} \leq 20$ MPa eli laskennallisesti saadaan vertailuarvo $\sigma_{\text{veto,max}} \leq (24 \text{ kNm} / 17 \text{ kNm}) \cdot 3 \text{ MPa} = 4,2$ MPa. Betonin K60 vetolujuus on $f_{\text{ctk}} = 3,1$ MPa ja taivutusvetolujuus on $f_{\text{ctk,taiv}} = 5,2$ MPa, joten taivutustestauksessa vetojännitys jää kuitenkin pienemmäksi kuin laskennallinen taivutusvetolujuus.

Betoniratapölkyn keskiosan taivutuskokeessa ylösalaisin oleva ratapölkky tuetaan kiskonjalan lepopintojen kohdilta rullalaakereilla, joiden välinen etäisyys on keskeltä keskelle 1600 mm ja kuormitetaan keskeisesti pistekuormalla. Kuormitusta lisätään asteittain 33 kN saakka, eikä tällöin saa muodostua halkeamia vetopuolelle. Kokeen vaatimus $P_{\max} = 33$ kN merkitsee käytännössä, että keskiosalle syntyy momentti $M_{\max} = P_{\max} \cdot 0,5 \cdot 0,8\text{m} = 13,2$ kNm, mikä on 10 % suurempi kuin momenttikuviossa esitetty käyttötilan momentti 12 kNm, vrt. kuva 4.2. Tällöin näissä kokeissa ylitetään 10 prosentilla vaatimukset $\sigma_{\text{veto}} \leq 3$ MPa ja $\sigma_{\text{puristus}} \leq 20$ MPa eli laskennallisesti saadaan vertailuarvo $\sigma_{\text{veto,max}} \leq (13,2 \text{ kNm} / 12 \text{ kNm}) \cdot 3 \text{ MPa} = 3,3$ MPa. Tämä on vähän suurempi kuin betonin K60 vetolujuus f_{ctk} ja selvästi pienempi kuin taivutusvetolujuus $f_{\text{ctk,taiv}}$.

Näissä yksinkertaisissa taivutusmomenttilaskelmissa ei ole huomioitu pistekuormaa pölkyn yläpinnalla pölkyn suuntaisesti jakavan teräslevyn vaikutuksia. Teräslevyjen vuoksi yllä esitetyt laskelmat esittävät taivutusmomentit todellista suurempina, erityisesti kiskon kohdalla.

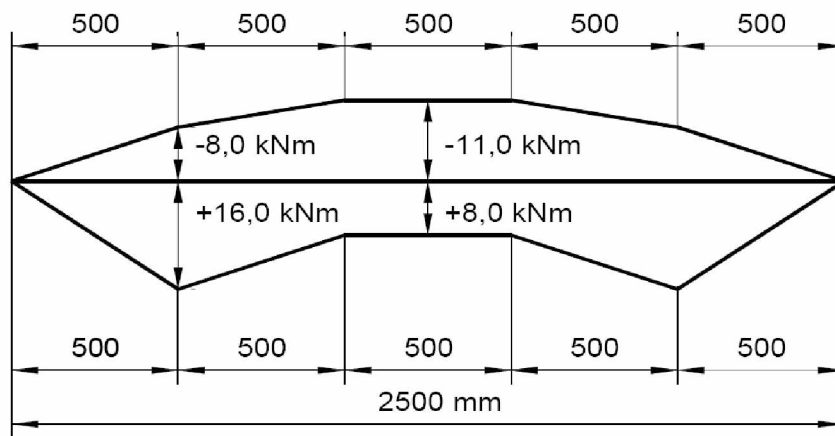
4.3 Ohjeistus Ruotsissa

Ruotsin ratahallinto Banverket on 07.01.2002 julkaissut standardin BVS 522.30 ”Tekniska bestämmelser för sliprar av betong”. Siinä esitetyt vaatimukset pohjautuvat eurooppalaiseen rata-alan esistandardiin prEN 13230 sekä betonistandardiin EN 206-1.

Ratapölkkyt suunnitellaan odotettavissa olevan 50 vuoden teknisen eliniän mukaan. Betonin pitää täyttää lujuusluokan C50/60 sekä ruotsalaisen BBK 94:n 1-luokan vaatimukset. Ympäristön rasitusluokka on XD1/XF3. Sementin pitää olla luokkaa CEM 1 ja betonipeitekerroksen paksuuden 30 mm pohjassa ja 20 mm muissa pinnoissa. Tieympäristöön asennettaessa ratapölkkyt pitää pintakäsitellä BRO 94:n mukaan. Betonin taivutusvetolujuuden 28 vrk iässä pitää olla 6 MPa.

Ratapölkkyt suunnitellaan siten, että vetojännitys ovat korkeintaan 3 MPa ja puristusjännitys 20 MPa standardin liitteen 1 mukaisille taivutusmomenttikuvaajille.

Kuvan 4.3 mukaiset kuvaajat on annettu erikseen 25 t ja 30 t akselipainon ominais-arvoille sekä pehmeälle ja kovalle välilevyille.



Kuva 4.3 Taivutusmomenttikuvaaja 25 t akselikuormalle ja kovalle välilevyille (Banverket 2002).

Lämpökäsittely on kielletty. Lämmönkehitystä pitää seurata ja dokumentoida. Betonimassan maksimilämpötila valun alkamishetkellä on 30 °C. Ylin sallittu lämpötila valmistusprosessin aikana on 55 °C.

Valmiiden ratapölkkyjen testaus tehdään esistandardin prEN 13230-1 luvun 7 ja prEN 13230-2 luvun 4 mukaan.

Mitoituslaskennan perusteita (Banverket 2002):

- Raideleveys 1435 mm
- Kiskomalli BV 50 / UIC 60
- Kiskon kallistus 1:30
- Pölkkyväli 650 mm
- Suurin sallittu akselipaino 25 tonnia, kun nopeus > 200 km/h.
- Suurin sallittu akselipaino 30 tonnia, kun nopeus ≤ 200 km/h.

Ohjeen (Banverket 2002) liitteessä 1 on annettu prEN 13230-1 mukaiset staattiset ja dynaamiset kuormakertoimet K1s, K2s, K1d ja K2d, jotka ovat samat kuin standardissa EN 13230-1:2002. Kertoimilla kerrotaan momenttikuvaajien taivutusmomentit, kun määritetään testeissä vaadittavat kuormitustunkkien voimat.

4.4 Ohjeistus Norjassa

4.4.1 Päällysrakenneluokka

Päällysrakenneluokat on määritelty määräyksissä Generelle tekniske krav (Yleiset tekniset vaatimukset). Pari poimintaa määräysten taulukosta (Jernbaneverket 2010c):

- Luokassa c on henkilöliikenteen vaunuille nimellinen akselikuorma 18 tonnia ja maksiminopeus 160 km/h. Tavaraliikenteelle on maksimi akselikuorma 22,5 tonnia nopeudella 80 km/h.
- Luokassa d on henkilöliikenteen vaunuille nimellinen akselikuorma 18 tonnia ja maksiminopeus 230 km/h. Tavaraliikenteelle on maksimi akselikuorma 25 tonnia nopeudella 70 km/h.

4.4.2 Raiteet

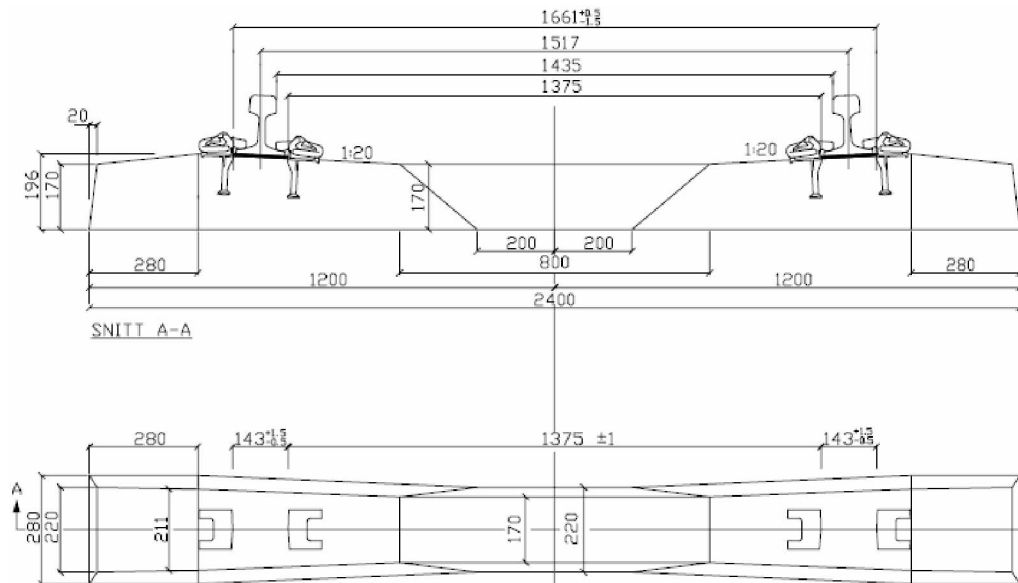
Pölkkyväli on 600 mm. Vaatimukset päällysrakenteelle on esitetty taulukossa 4.2 (Jernbanelverket 2010a).

Taulukko 4.2 Uuden raiteen rakentamisessa ja raiteen uusimisessa käytettävä päällysrakenne.

Kiskot	Kiskonkiinnike	Ratapölkkyt	Päällysrakenne-luokka
60E1	Pandrol Fastclip	Betoni NSB 95	d
49E1/54E3	Pandrol Fastclip	Betoni JBV 97	c
49E1/54E3 (käytetty tai uusi)	Pandrol Fastclip	Puu	c
49E1/54E3 (käytetty)	Hey-Back	Puu	c

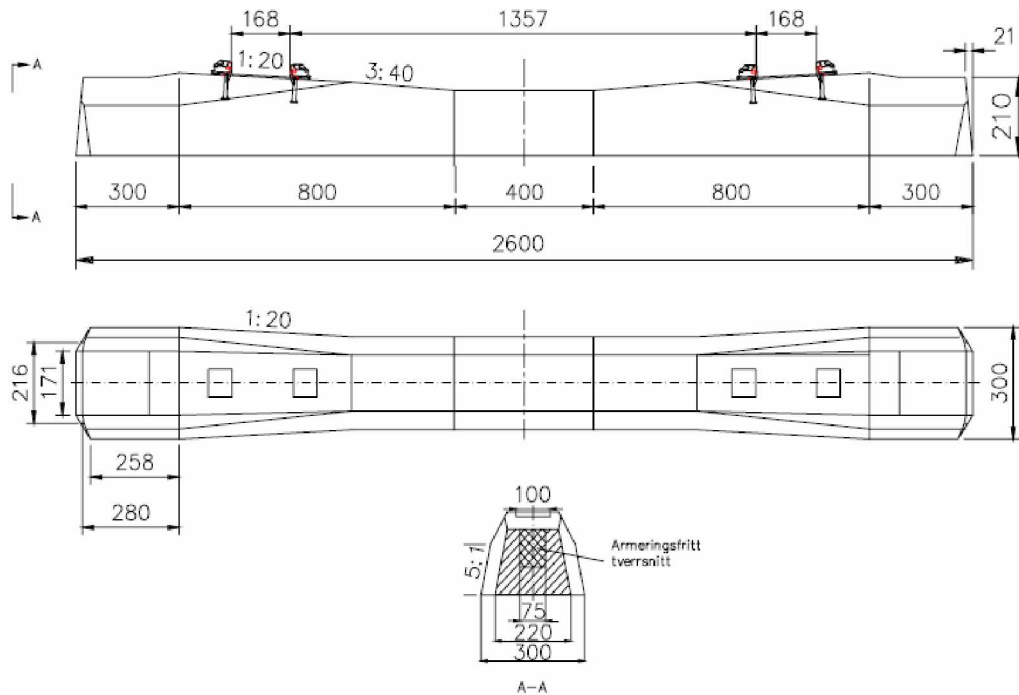
Uusille raiteille ja melko vaativiin kuormituksiin saadaan siis edelleen asentaa puisia ratapölkkyjä.

Kuvassa 4.4 esitettävän esijännitetyn ratapölkyn JBV 97 paino on 230 kg.



Kuva 4.4 Norjalainen betoniratapölkky JBV 97 (Jernbanelverket 2010a).

Esijännitetyn ratapölkyn NSB 95 paino on 270 kg. Kuvan 4.5 päätykuvassa, leikkaus A, on verkkorasterilla esitetty raudoittamattoman poikkileikkauksen alue.



Kuva 4.5 Norjalainen betoniratapölkky NSB 95 (Jernbaneverket 2010a).

Ratapölkkyä NSB 95 käytetään uusilla suurten nopeuksien rataosilla. Oslosta Gardermoenin lentoaseman kautta Eidsvolliin kulkeva suurnopeusrata, Gardemobanen, oli ensimmäinen NSB 95 -rataosuus. Sinne toimitettiin noin 210000 ratapölkkyä (Spenncon AS 2010).

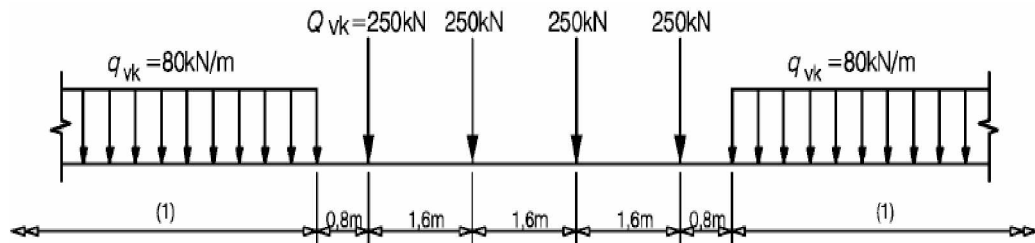
4.5 Ratapölkkyjen kuormitukseen liittyvä eurokoodiohjeistus

4.5.1 SFS-EN 1991-2 Siltojen liikennekuormat

Raideliikennekuormat ja muut erityisesti rautatiesiltoja koskevat kuormat on esitetty standardin SFS-EN 1991-2 luvussa 6. Esitetyt kuormakaaviot eivät kuvaa todellisia kuormia. Ne on valittu siten, että niiden vaikutukset, dynaamiset lisävaikutukset erikseen huomioon otettuina, edustavat säännöllisen liikenteen vaikutuksia. Kansallisessa liitteessä määritetään lisäksi, että asianomainen suomalainen viranomais voi määrittellä hankekohtaisesti vaihtoehtoiset kuormakaaviot yhdistelysääntöineen ja että tilapäiset sillat mitoitetaan kuten pysyvät sillat.

4.5.1.1 Kuormakaavio 71

Kuvan 4.6 kuormakaavio 71 edustaa pää ratojen normaalin raideliikenteen aiheuttaman pystykuormituksen staattista vaikutusta.



Kuva 4.6 Pystykuormien kuormakaavio 71 ominaisarvoineen (SFS-EN 1991-2).

Kuvassa esitetyt ominaisarvot tulee kertoa kertoimella α ratalinjoilla, joilla kulkeva raideliikenne on raskaampaa tai kevyempää kuin tavanomainen raideliikenne. Kertoimella α kerrottuja kuormia kutsutaan "luokitetuiksi pystykuormiksi". Kertoimen α tulee olla jokin taulukon 4.3 arvoista. Taulukkoon on laskettu myös muutettujen kuormien arvot.

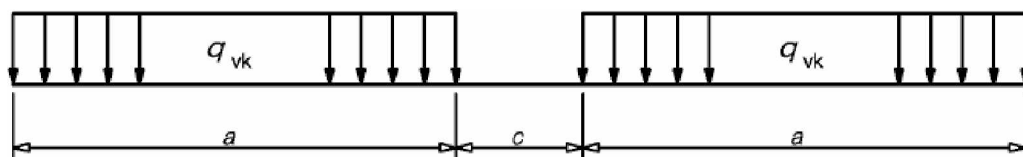
Taulukko 4.3 Kuormakaavio 71 α -kertoimella kerrotut viiva- ja akselikuormat (SFS-EN 1991-2).

Kerroin α	0,75	0,83	0,91	1	1,1	1,21	1,33	1,46
q_{vk}	60	66	73	80	88	97	106	117
Q_{vk}	188	208	228	250	275	303	333	365

Suurimmalla α -kertoimella saadaan akselikuormien kohdalla 6,4 m matkalle jatkuvaksi kuormaksi $4 \cdot 365 \text{ kN} / (4 \cdot 1,6 \text{ m}) = 228 \text{ kN/m}$. Liikenne- ja viestintäministeriön kansallisessa liitteessä on määritetty yksiselitteisesti kertoimelle arvo $\alpha = 1,46$. Lisäksi on mainittu, että asianomainen viranomainen voi kuitenkin määrätä α -kertoimen arvon hankekohtaisesti.

4.5.1.2 Kuormakaavio SW/2

Kuvassa 4.7 esitetty kuormakaavio SW/2 edustaa raskaita kuormia:

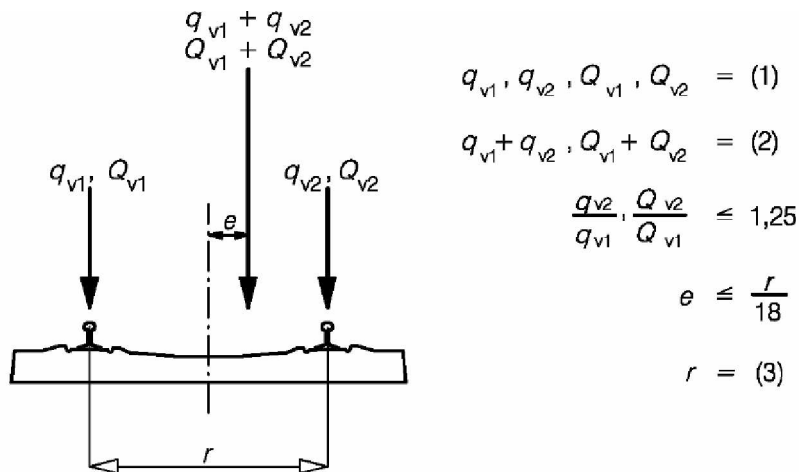


Kuva 4.7 Kuormakaavio SW/2 (SFS-EN 1991-2).

Pystykuorman ominaisarvo on $q_{vk} = 150 \text{ kN/m}$. Mitat ovat: $a = 25 \text{ m}$ ja $c = 7 \text{ m}$. Tätä kuormaa ei kerrota α -kertoimella. Asianomainen suomalainen viranomainen määrittelee hankekohtaisesti ne rataosat, joissa kuormakaaviota SW/2 sovelletaan.

4.5.1.3 Pystykuormien epäkeskisyys (kuormakaavio 71)

Pystykuormien poikittaisen epäkeskisyyden vaikutus tulee ottaa huomioon antamalla kaikkien akselien pyöräkuormien suhteelle arvo, joka on enintään 1,25:1,00 millä tahansa raiteella.



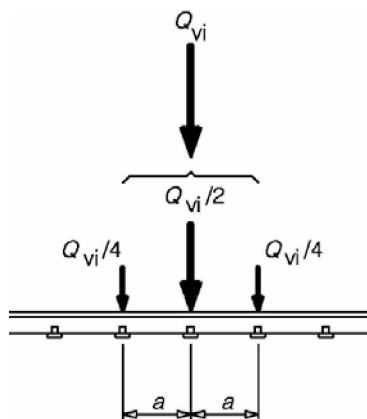
Kuva 4.8 Pystykuormien epäkeskisyyss (SFS-EN 1991-2).

- (1) Tasaisesti jakautunut kuorma ja pistekuormat kullakin kiskolla
- (2) Kuormakaavio 71
- (3) Pyöräkuormien välinen poikittainen etäisyys

Kuvan 4.8 suhdeluvusta 1,25 voidaan laskea, että Q_{v1} (tai q_{v1}) on suurimmillaan 55,6 % kokonaiskuormasta ($55,6\% / 44,4\% = 1,25$).

4.5.1.4 Akselikuormien pituussuuntainen jakautuminen kiskojen välityksellä

Pistekuorma voidaan jakaa kolmelle raiteen tukipisteelle kuvan 4.9 mukaisesti (vrt. kuva 3.4).

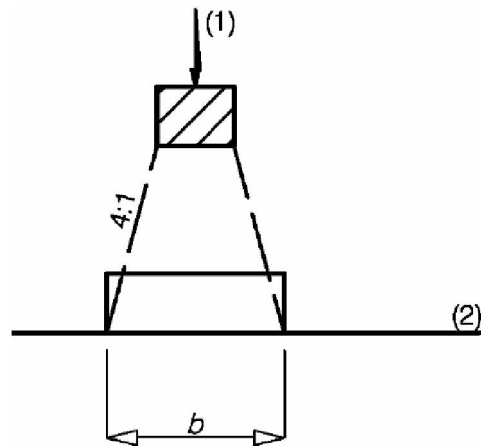


Kuva 4.9 Pistekuorman tai pyöräkuorman pituussuuntainen jakautuminen kiskon välityksellä (SFS-EN 1991-2).

- Q_{vi} kummankin kiskon pistekuorma
- a on kiskon tukipisteiden välinen etäisyys

4.5.1.5 Kuorman pituussuuntainen jakautuminen tukikerroksen välityksellä

Yleensä pistekuormat tai akselikuorma voidaan jakaa tasaisesti pituussuunnassa. Laattojen paikallisten osien mitoittamista varten otetaan kuvassa 4.10 osoitettu pituussuuntainen jakautuminen ratapölkkyjen alla huomioon (kuvassa tarkastelutasona on käytetty sillan kannen yläpintaa):

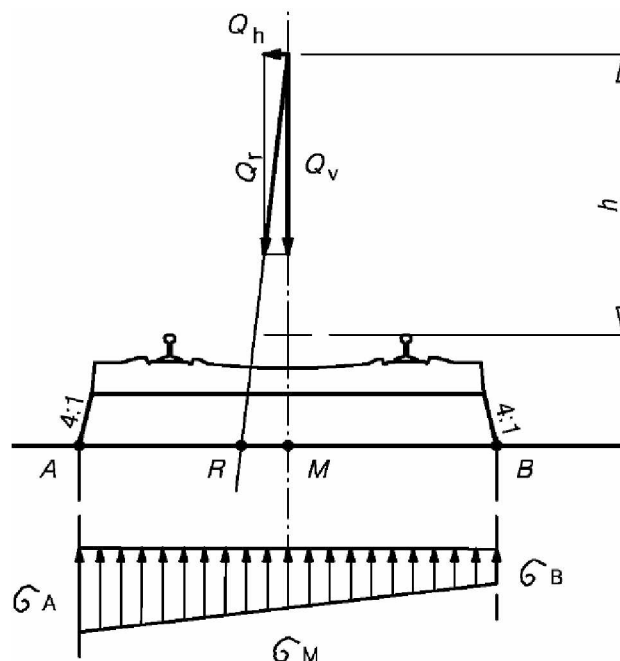


Kuva 4.10 Kuorman pituussuuntainen jakautuminen tukikerroksen välityksellä (SFS-EN 1991-2).

(1) Ratapölkyn kuorma (2) Tarkastelutaso

4.5.1.6 Kuormien poikittainen jakautuminen ratapölkkyjen ja tukikerroksen välityksellä

Silloilla, joilla on tukikerroksellinen kallistamaton raide, kuormat jaetaan poikittais-suunnassa kuvassa 4.11 esitetyllä tavalla.



Kuva 4.11 Kallistamattoman raiteen kuormien poikittainen jakautuminen ratapölkkyjen ja tukikerroksen välityksellä (pystykuormien epäkeskisyyden vaikutusta ei ole esitetty) (SFS-EN 1991-2).

Kuvasta havaitaan, että pisteen R epäkeskisyyden ja pohjapaineen jakautuman (σ_A ja σ_B) laskemiseksi pitää pystykuorman Q_v lisäksi tuntea vaakakuorma Q_h ja sen sijainti korkeussuunnassa.

4.5.1.7 Sivusysäyskuorma

Sivusysäyskuorma tulee käsitellä pistekuormana, joka vaikuttaa vaakasuuntaan raiteen yläpinnassa kohtisuoraan raiteen keskiviivaa vastaan. Sivusysäyskuorman ominaisarvona käytetään arvoa $Q_{sk} = 100$ kN, joka kerrotaan α -kertoimella, kun $\alpha \geq 1$. Sivusysäyskuorma tulee aina yhdistää pystysuuntaisen liikennekuorman kanssa.

4.5.1.8 Vedosta ja jarrutuksesta aiheutuvat kuormat

Veto- ja jarrukuormat vaikuttavat kiskojen yläpinnassa raiteen pituussuuntaan. Ne tulee olettaa tasaisesti jakautuneiksi tarkasteltavan rakenneosan veto- ja jarrukuormien vaikutuspituudelle $L_{a,b}$ [m].

Vetokuorman suuruudeksi on määritetty vaikutuspituuden mukaan voima $Q_{lak} = 33 \cdot L_{a,b}$ [kN] ja maksimikuormaksi 1 000 kN. Tämän mukaan voidaan laskea vaikutuspituudelle $L_{a,b}$ maksimiarvo $L_{a,b} \leq 30,3$ m.

Samoin jarrukuorman suuruudeksi on määritetty vaikutuspituuden mukainen voima $Q_{lbk} = 20 \cdot L_{a,b}$ [kN] ja maksimikuormaksi 6 000 kN (kuormakaavio 71). Tämän mukaan voidaan laskea vaikutuspituudelle $L_{a,b}$ tämän tapauksen maksimipituus $L_{a,b} \leq 300$ m. Kuormakaavio 71 sovellettaessa yllämainitut kuormat kerrotaan α -kertoimella.

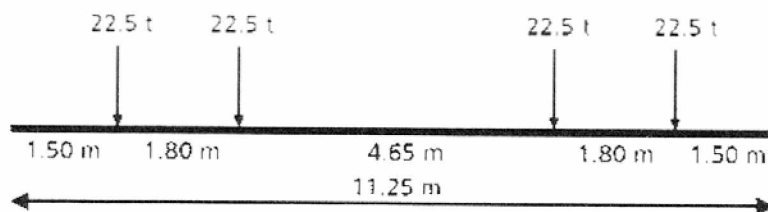
Kansallinen liite toteaa lisäksi, että jarrukuorman suurimman arvon oletetaan olevan 6000 kN, ja että erikoistapauksissa asianomainen viranomainen voi määrittellä hankekohtaisesti lisävaatimukset yli 300 m pitkille jarrutuskuormituksille. Kuormakaaviota 71 sovellettaessa yllämainitut kuormat kerrotaan α -kertoimella.

4.5.2 EN 15528

Eurooppalaisessa standardissa EN 15528:2008 esitetyt kuormakaaviot on tarkoitettu olemassa olevan rataverkon luokitteluun. Radan luokitus huomioi seuraavat tekijät:

- akselikuorma P ,
- massa pituusyksikköä kohden p ,
- geometria koskien akselien sijoitusta,
- nopeus.

Jos radalle, jonka akselikuormaksi on määritetty 22,5 t, ehdotetaan yli 100 km/h nopeutta, pitää erityistarkastelu arvioida radan dynaamiset vaikutukset. Paikallisesti arvioidaan kansallisen luokituksen soveltuvuus EN 15528:ssä (esim. liite L) esitettyihin luokkiin. Standardin liitteen A taulukossa on esitetty luokitukset, jossa esimerkiksi vertailuvaunulle D4 (kuva 4.12) on akselikuorma $P = 22,5$ t ja massa pituusyksikköä kohden $p = 8$ t/m.



Kuva 4.12 Geometriset ominaisuudet vertailuvaunulle D4 (EN 15528 2008).

Kuvasta suoraviivaisesti laskien saadaan metripainoksi yllä annettu: $p = 4 \cdot 22,5 \text{ t} / 11,25 \text{ m} = 8 \text{ t/m}$. Vertailuvaunulle E5 on määritetty EN 15528:n taulukossa A.1 suurin akselikuorma $P = 25 \text{ t}$ ja massa pituusyksikköä kohden $p = 8,8 \text{ t/m}$. Taulukon huomautuksena mainitaan, että erityisradoilla vertailuvaunulle G akselikuorma $P = 30 \text{ t}$. Standardin liitteessä F on esitetty esimerkkejä standardin käytöstä. Esimerkiksi radalle, jossa paikallinen nopeus on 160 km/h , määritetään, että D4 -vertailuvaunu voi liikennöidä maksiminopeudella 140 km/h ja C2 -vertailuvaunu (akselikuorma 20 t) maksiminopeudella 160 km/h .

4.6 Eurooppalainen YTE

Eurooppalaisilla yhteentoimivuuden teknisillä eritelmillä pyritään saamaan valtioiden rajojen yli tapahtuva liikennöinti mahdollisimman sujuvaksi. Tavanomaisten ratojen infrastruktuuriosajärjestelmää koskevan osan englanninkielisessä versiossa (TSI = "Technical specifications for interoperability" 3.11.2009) ja suomennoksessa (YTE 26.4.2011) on esitetty vain vähän ratapölkkyihin liittyvää asiaa (TSI 2009 & Abetong 2010b).

YTE:n mukaan ratapölkkyt pitää suunnitella siten, että kun niitä käytetään määrättyllä kiskolla ja kiskonkiinnikkeellä, niissä on huomioitu seuraavien YTE:n määräysten sisältö: nimellinen raideleveys, kartiokkuus, kiskon kaltevuus ja raiteen kuormitettavuus. Eurooppalainen raideleveys on 1435 mm , mikä siis poikkeaa suomalaisesta raideleveydestä.

4.7 UIC Code 713

UIC ohjeistaa betonisen ratapölkyn kuormituksen ja taivutusmomentin laskemisen. Ratapölkkyyn kohdistuva kuormitus määritetään muutamien oletusarvojen mukaan ja taivutusmomentit lasketaan näiden kuormien ja annettujen pohjapainejakautumien mukaan.

4.7.1 Lähtöarvoja

Seuraavassa on esitetty lähtöarvoja, joita tarvitaan julkaisun UIC Code 713 "Desing of monoblock concrete sleepers" mukaan tehtävässä ratapölkyn rasiusten laskennassa:

γ_p	Kerroin kiskonkiinnitysten iskukuormien vaimennuskyvyille. Välilevyllä suuri vaimennuskyky $\Rightarrow 0,78$. Välilevyllä pieni vaimennuskyky $\Rightarrow 1,0$
γ_v	Dynaaminen junan nopeuden mukaan määräytyvä kerroin, jolla huomioidaan radan ja kaluston poikkeavuuksia. Suositellut arvot ovat $0,5$ kun junan nopeus on alle 200 km/h ja $0,75$ junan nopeuden ollessa yli 200 km/h .
γ_d	Kerroin kuormien jakautumiselle ratapölkkyjen kesken. Suositeltava arvo on $0,5$.
γ_r	Kerroin ratapölkyn tukireaktiolle. Kertoimella huomioidaan tuennan vaihteluita. Tyypillinen arvo on $1,35$.

Koska taivutusmomentti lasketaan suoraan UIC:n pohjapainejakautumista, esimerkkilaskelmassa ei huomioida kerrointa γ_i dynaamiselle lisälle taivutusmomenttiin. Dynaaminen lisä johtuu epäsäännöllisyyksistä ratapölkyn pituussuuntaisessa

tuennassa. Tyypillinen arvo olisi 1,6, jos taivutusmomentti laskettaisiin UIC:n antamilla monimutkaisilla erityislausekkeilla.

4.7.2 Kuormitus

Ratapölkkyyn kohdistuva kuorma lasketaan lausekkeesta:

$$P_k = \frac{Q_0}{2} (1 + \gamma_p * \gamma_v) * \gamma_d * \gamma_r$$

UIC 713 määrittää pölkyn osalta huomioitavan sysäyskertoimen edellä mainittujen oletusarvojen ja esitetyn laskentalausekkeen avulla. Iskusta johtuva kuorman lisäys kiskon tasolla on junan nopeudesta riippuen joko 0,75 tai 0,5. Välilevy vaimentaa sitä jäykkyydestään riippuen 0,78–1,00-kertaiseksi pölkyn tasolla.

Pienimmillään dynaaminen kuormakerroin $(1 + \gamma_p \cdot \gamma_v)$ on täten $(1 + 0,78 \cdot 0,5) = 1,39$ ja suurimmillaan $(1 + 1,00 \cdot 0,75) = 1,75$. Näitä voi verrata esimerkiksi UIC 713:ssa määritettyihin poikkeus- ja onnettomuustilanteiden dynaamisiin kuormakertoimiin k_1 ja k_2 . Kerrointa k_1 käytetään poikkeustilanteessa ja kerrointa k_2 onnettomuustilanteessa. Kertoimien arvot ovat staattiselle kuormalle $k_{1s} = 1,8$ ja $k_{2s} = 2,5$ ja dynaamiselle kuormalle $k_{1d} = 1,5$ ja $k_{2d} = 2,2$.

a) Ratapölkkyyn kohdistuva kuormitus, kun $\gamma_p = 0,78$:

Ilman tuennan vaihtelun huomioimista ($\gamma_r = 1,0$):

$$P_k = \frac{Q_0}{2} (1 + \gamma_p * \gamma_v) * \gamma_d * \gamma_r = \frac{250 \text{ kN}}{2} (1 + 0,78 * 0,75) * 0,5 * 1,0 = 99,1 \text{ kN}$$

Tuennan vaihtelu huomioiden ($\gamma_r = 1,35$): $P_k \cdot 1,35 = 133,7 \text{ kN}$

b) Ratapölkkyyn kohdistuva kuormitus, kun $\gamma_p = 1,0$:

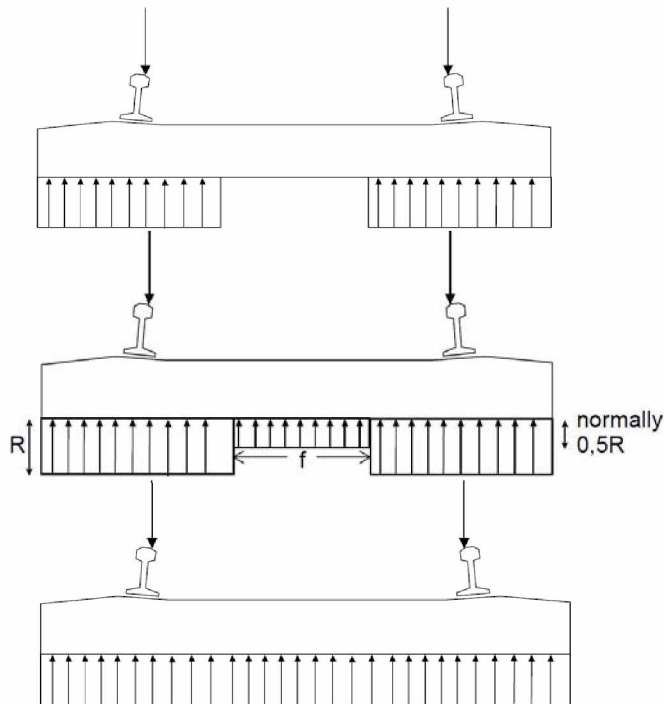
Ilman tuennan vaihtelun huomioimista ($\gamma_r = 1,0$):

$$P_k = \frac{Q_0}{2} (1 + \gamma_p * \gamma_v) * \gamma_d * \gamma_r = \frac{250 \text{ kN}}{2} (1 + 1,0 * 0,75) * 0,5 * 1,0 = 109,4 \text{ kN}$$

Tuennan vaihtelu huomioiden ($\gamma_r = 1,35$): $P_k \cdot 1,35 = 147,7 \text{ kN}$

4.7.3 Taivutusmomentin laskeminen

UIC 713:ssa on annettu kolme vaihtoehtoista tuentatapaa eli pohjapainejakautumaa kuvan 4.13 mukaisesti.



Kuva 4.13 Pohjapainejakautumien tapaukset a (ylin, hiljattain tuettu), b (keskellä, osittain konsolidoitunut) ja c (alhaalla, konsolidoitunut) (UIC 713 2004)

Tapauksen a pohjapainejakautumalla saadaan kiskon kohdan taivutusmomentiksi $M_{\text{kisko}} = P \cdot b/4$, jossa b on ulokepituus:

a) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 0,78$:

$$M_k = P_k \cdot 0,5\text{m}/4 = 12,4 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = 16,7 \text{ kNm}$$

b) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 1,0$:

$$M_k = P_k \cdot 0,5\text{m}/4 = 13,7 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = 18,5 \text{ kNm}$$

Ratapölkyn keskikohdalla on nolletaivutusmomentti.

Tapauksen b pohjapainejakautumalla saadaan ratapölkyn taivutusmomenteiksi:

c) Keskikohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 0,78$:

$$M_k = -8,4 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = -11,3 \text{ kNm}$$

d) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 0,78$:

$$M_k = 10,8 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = 14,5 \text{ kNm}$$

e) Keskikohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 1,0$:

$$M_k = -9,3 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = -12,5 \text{ kNm}$$

f) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 1,0$:

$$M_k = 11,9 \text{ kNm} \qquad M_{k-1,35} = 16,1 \text{ kNm}$$

Tapauksen c pohjapainejakautumalla saadaan ratapölkyn keskikohdan taivutusmomentiksi $M_{\text{keski}} = -P \cdot (a-2b)/4$, jossa a on kiskojen keskilinjojen etäisyys (1,6 m) ja b on ulokepituus (0,5 m):

g) Keskikohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 0,78$:

$$M_k = -P_k \cdot (a-2b)/4 = -14,9 \text{ kNm}$$

$$M_{k \cdot 1,35} = -20,1 \text{ kNm}$$

h) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 0,78$:

$$M_k = 9,5 \text{ kNm}$$

$$M_{k \cdot 1,35} = 12,9 \text{ kNm}$$

i) Keskikohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 1,0$:

$$M_k = -P_k \cdot (a-2b)/4 = -16,4 \text{ kNm}$$

$$M_{k \cdot 1,35} = -22,2 \text{ kNm}$$

j) Kiskon kohdan taivutusmomentti, kun $\gamma_p = 1,0$:

$$M_k = 10,5 \text{ kNm}$$

$$M_{k \cdot 1,35} = 14,2 \text{ kNm}$$

4.8 Yhteenveto suunnitteluperusteista ja eri maiden käytäntöjen väliset vertailut

Suomalaiset valmiiden ratapölkkyjen staattisen testauksen taivutusmomentti-vaatimukset poikkeavat suunnitteluvaiheen momenttikuvioon merkityistä vaatimuksista (Ratahallintokeskus 2008). Taulukon 4.4 mukaisesti momenttikuviossa vaaditaan ratapölkyn keskikohdalla taivutusmomentilla $M = -12 \text{ kNm}$ vetojännityksen maksimiksi 3 MPa ja testauksessa sama taivutusmomentti vastaa ensimmäisen halkeaman muodostumista. Tässä tapauksessa momenttikuviossa on tiukempi vaatimus. Momenttikuviossa esitetään kiskon kohdan taivutuskestävyydeksi $M = 34 \text{ kNm}$ ja staattisessa kuormituskokeessa $M = 45 \text{ kNm}$. Tässä tapauksessa testauksessa on tiukempi vaatimus.

Ruotsalaiset taivutusmomenttivaatimukset 25 t akselipainolle ovat suomalaiseen momenttikuvioon merkittyjä pienemmät ja 30 t akselipainolle suomalaiseen momenttikuvioon merkittyjä suuremmat. Ruotsalaiset kriteerit ovat käyttörajatilassa samat kuin suomalaiset. Murtorajatilassa taivutuskestävyysvaatimukset poikkeavat suomalaisista käyttörajatilaa enemmän.

Taulukkoon kirjatut UIC:n vaatimukset ovat samaa suuruusluokkaa suomalaisten vaatimusten kanssa, paitsi tasaisen pohjapaineen tapauksessa. Tasaisen pohjapaineen tapauksessa ratapölkyn keskellä käyttörajatilassa UIC:n vaatimus on erittäin tiukka pohjoismaisiin vaatimuksiin verrattuna.

Taulukko 4.4 Ohjeellinen taivutusmomentin arvo, kNm. UIC-ohjearvoissa ei ole huomioitu kuorman dynaamista lisää.

Ohje (julkaisun osa 1) / mittaustulos (julkaisun osa 2)	kiskon kohta	keskikohta
Suomi, RHK 2008, momenttikuvio, vetojännitysmax = 3 MPa ja puristusjännitysmax = 20 MPa	17	-12
Suomi, RHK 2008, momenttikuvio, murto	34	-24
Suomi, RHK 2008, staattinen kuormituskoe, ensimmäinen halkeama	23	-12
Suomi, RHK 2008, staattinen kuormituskoe, pysyvä halkeama	36	-19
Suomi, RHK 2008, staattinen kuormituskoe, murto	45	-24
Ruotsi, Banverket 2002, momenttikuvio, 25t, pehmeä välilevy	15	-11
Ruotsi, Banverket 2002, momenttikuvio, 25t, kova välilevy	16	-11
Ruotsi, Banverket 2002, momenttikuvio, 30t, pehmeä välilevy	18	-11
Ruotsi, Banverket 2002, momenttikuvio, 30t, kova välilevy	19	-13
UIC Code 713, 25t, välilevyllä suuri vaimennuskyky, tasainen pohjapaine kiskon kohdalla 1 m matkalla	17	0
UIC Code 713, 25t, välilevyllä pieni vaimennuskyky, tasainen pohjapaine kiskon kohdalla 1 m matkalla	18	0
UIC Code 713, 25t, välilevyllä suuri vaimennuskyky, pohjapaine kiskon kohdalla 1 m matkalla kaksinkertainen keskiosaan verrattuna	15	-11
UIC Code 713, 25t, välilevyllä pieni vaimennuskyky, pohjapaine kiskon kohdalla 1 m matkalla kaksinkertainen keskiosaan verrattuna	16	-13
UIC Code 713, 25t, välilevyllä suuri vaimennuskyky, tasainen pohjapaine koko ratapölkyn matkalla	13	-20
UIC Code 713, 25t, välilevyllä pieni vaimennuskyky, tasainen pohjapaine koko ratapölkyn matkalla	14	-22

5 Kirjallisuushavainnot ja vaurioitumismekanismeista

5.1 Halkeamien synty ja merkitys

Betoniratapölkyn suunnittelun tavoitteena tulee olla halkeilematon ratapölkky. Käytännössä ratapölkkyissä kuitenkin esiintyy halkeamia eri syistä johtuen. Halkeamat syntyvät, kun betonin vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden (FIP 1987). Ääritilanteissa rasitukset voivat kasvaa niin suuriksi, että ratapölkky murtuu.

Ruotsissa Luulajan teknillisessä yliopistossa on laajassa tutkimushankkeessa muun muassa testattu halkeilleiden betoniratapölkkyjen kestävyyttä. Ratapölkkyt katkaistiin keskeltä kahteen osaan. Vaikka molemmat kuormitettavan ratapölkyn päät näyttivät ulkoisesti yhtäläisesti halkeilleilta, saattoi kuormituskestävyydessä olla selvä ero. Toinen pää saattoi kestää staattisessa kokeessa 74 kN kuorman. Toinen pää saattoi 2 miljoonan syklin väsytkuormituksen jälkeen kestää 153 kN, eli kaksinkertaisen staattisen kuormituksen. Kuormitustulokset osoittavat, että betonin sisäisellä halkeilulla on ratkaiseva merkitys punostartuntaan ja murtokestävyyyteen (Thun et al. 2003).

5.1.1 Heikentyneessä tuentatilassa liikennekuormituksesta aiheutuva halkeilu

Betoniratapölkkyissä esiintyvät liikennekuormituksen aiheuttamat halkeamat ovat todennäköisimmin joko kiskon lepopinnan kohdalla ratapölkyn alapinnassa tai yläpinnassa ratapölkyn keskellä. Kiskon lepopinnan kohdalla alapinnassa olevat halkeamat johtuvat pääsääntöisesti suurista iskukuormista, jotka useimmiten aiheutuvat kiskoja kalustovioista. (FIP 1987, Kaewunruen & Remennikov 2008.) Kyseiset halkeamat ovat yleisiä. Vaikka edellä mainitut halkeamat saattavat lyhentää ratapölkyn käyttöikää, eivät ne yleensä estä ratapölkkyä täyttämästä niiden ensisijaisia tehtäviä. Kiskon lepopinnan kohdalla pölkyn yläpinnassa olevat halkeamat ovat sitä vastoin vakavampia ja syntymekanismiltaan myös vähemmän ymmärrettyjä. Junan ja ratapölkyn dynaaminen vuorovaikutus saattaa aiheuttaa kyseisen vaurion ja johtaa ratapölkyn ennenaikaiseen hajoamiseen. Tämänkaltaiset vauriot ovat kuitenkin erittäin harvinaisia. (FIP 1987)

Ratapölkyn keskiosan yläpinnassa esiintyvät halkeamat aiheutuvat useimmiten ratapölkkyjen kantamisesta niiden keskiosalta ja ne syntyvät usein jo pölkkyjen asennusvaiheessa. Näiden halkeamien estämiseksi on tärkeää varmistua riittävästä tuennasta ennen kuin junat päästetään kulkemaan radalle. Riittävällä tuennalla varmistetaan pohjapaineen keskittyminen pölkyn päihin, jolloin halkeiluriski pienenee. Kuva 5.1 ja kuva 5.2 esittävät Suomen rataverkolla radassa haljenneita ratapölkkyjä. Halkeamat on havaittu pian pölkyn asentamisen jälkeen.



Kuva 5.1 Raiteessa halkeillut ratapölkky.



Kuva 5.2 Raiteessa oleva haljennut ratapölkky.

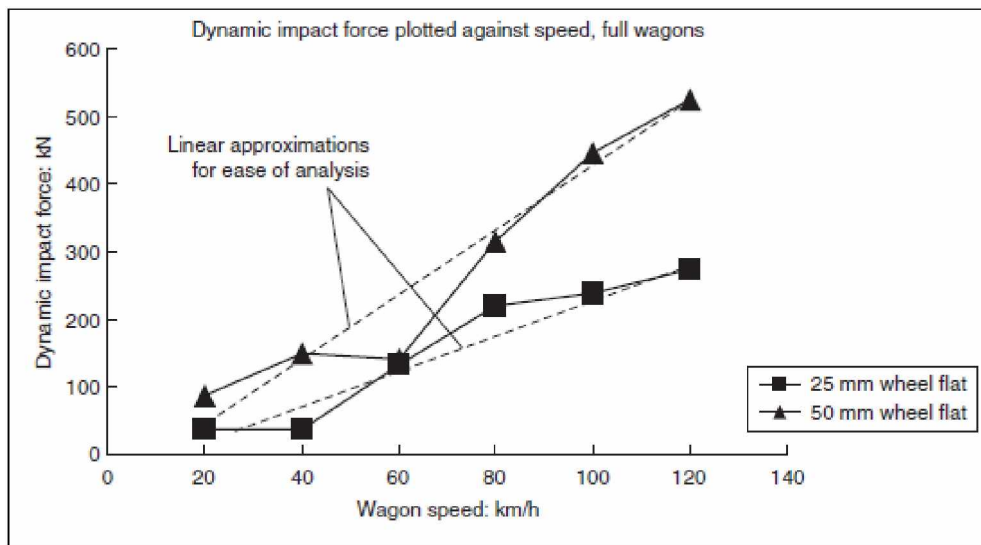
Jo vuonna 1978 on kanadalainen professori todennut, että vaikka betonisia ratapölkkyjä on Euroopassa käytetty laajasti toisesta maailmansodasta lähtien, on Pohjois-Amerikassa vastustus niiden käytölle raskaasti liikennöidyillä radoilla ollut vahvaa. Suurimmat syyt vastustukseen olivat tuolloin betonisten ratapölkkyjen suurempi hankintakustannus ja ratapölkyn keskikohtaan pitkän ajan kuluessa syntyvä tuenta. Tämän tuennan arveltiin ajoittain johtavan halkeaman muodostumiseen ratapölkyn keskikohtaan ja kyseenalaistavan ilmoitetun 50 vuoden käyttöiän. (Raymond 1978)

Ratapölkyn pituussuuntainen halkeaminen saattaa aiheutua kiskonkiinnityksen sopimattomuuden tai jänneterästen vääränlaisen sijainnin seurauksena. Kyseisessä punosten vääränlaisessa sijoittelussa punoksia on sijoitettu liikaa yhteen kerrokseen. (FIP 1987)

5.1.2 Iskukuormien aiheuttama halkeilu

Suurimmat dynaamiset iskukuormat johtuvat kalustossa ja kiskoissa olevista vioista. Vioista johtuvat dynaamiset kuormat ovat luonteeltaan lyhytkestoisia, mutta pahimmillaan erittäin suuria. Esimerkiksi tyypillinen lovipyörän aiheuttama kuorma on kestoltaan 1-10 ms, mutta suuruudeltaan jopa kuusinkertainen suhteessa staattiseen kuormaan. (Esveld 2001, Remennikov & Kaewunruen 2007, Remennikov et al. 2008.) Lovipyörän betoniratapölkkyyn kohdistama rasitus kasvaa merkittävästi vain silloin, kun lovi osuu ratapölkyn kohdalle. Toisin sanoen lovipyörän on osuttava ratapölkyn päälle, jotta ratapölkkyyn kohdistuvat kuormat voisivat aiheuttaa halkeamia. Talvella pölkyn rasitukset ovat noin puolitoistakertaiset kesään verrattuna johtuen radan suuremmasta jäykkyydestä. (Lahti 2008, Lehtomäki 1999)

Yleisesti ottaen iskukuormissa noin 70 % pyörä-kisko kontaktista syntyvistä voimista kohdistuu kiskon lepopinnalle (Leong & Murray 2008, Remennikov et al. 2008). Iskukuormia vaimentavana tekijänä toimii kiskon ja pölkyn välissä sijaitseva välilevy. Välilevyn kovuus vaikuttaa vaimennuskykyyn. On arvioitu että esimerkiksi jäykkä välilevy pienentää pölkkyyn muodostuvia jännityksiä alle 15 % kun pehmeä välilevy pienentää jännityksiä jopa yli 30 % (UIC 713 2004) Junan nopeus vaikuttaa erittäin merkittävästi dynaamisten iskukuormien suuruuteen. Kuvasta 5.3 voidaan havaita, että nopeuden kasvaessa esimerkiksi lovipyörän aiheuttama kuormitus kasvaa merkittävästi (Leong & Murray 2008).



Kuva 5.3 Nopeuden vaikutus lovipyörän aiheuttamaan iskukuormaan (Leong & Murray 2008).

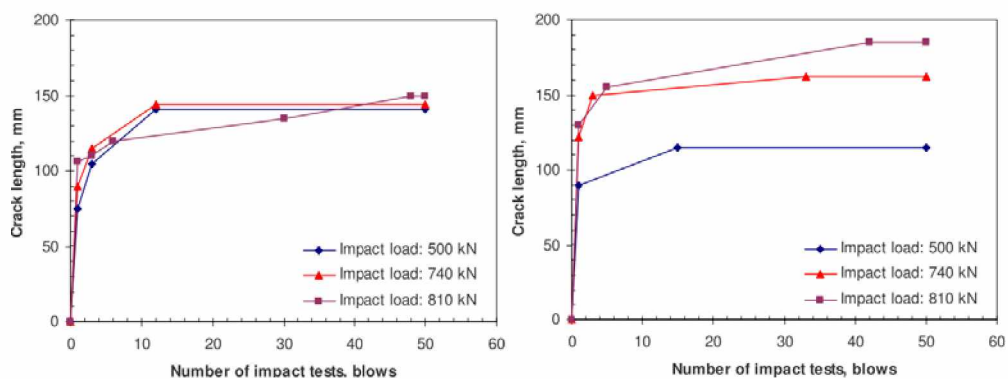
Australialaiset tutkijat Kaewunruen & Remennikov ovat todenneet, että betoninen ratapölkky vaurioituu todennäköisemmin voimakkaiden ja harvojen iskujen kuin kevyiden usein toistuvien iskujen väsyttämänä. Tämän periaatteen varmistamiseksi on australialainen tutkimusryhmä tehnyt iskukokeita betonisille ratapölkkyille kuvassa 5.4 esitetyllä laitteistolla. Pudotuspainoa 5,81 kN pudotettiin ohjainta myöten eri korkeuksista ratapölkkyyn normaalikiinnikkeillä kiinnitetyn 60 kg/m painavan standardikiskon päälle. Kiskon ja pölkyn välissä ei ollut välilevyä, koska tavoiteltiin iskujen maksimivaikutusta. (Kaewunruen & Remennikov 2010)



Kuva 5.4 Iskustestauslaitteisto (Kaewunruen & Remennikov 2010).

Pudotuspainokokeilla pyrittiin kehittämään ratapölkkyjen suunnittelukäytäntöä ja jäljittelemään lovipyörän iskujen vaikutusta esijännitettyjen ratapölkkyjen kestävyys. Tukikerros korvattiin pölkkyjen alle asennettujen kumilevyjen avulla. Kumien ominaisuuksia muunneltiin siten, että kyettiin jäljittelemään sekä ns. pehmeää rataa (tukikerros pölkyn alla 100–150 mm) että kovaa rataa (tukikerros pölkyn alla yli 250 mm). Ratapölkkyjen betonin lujuus oli 55 MPa.

Kovaan rataan kohdistetun 500 kN vastaavan ensimmäisen iskun aiheuttama etu- ja taustapuolen keskimääräinen halkeamapituus oli 113 mm ja palautumattoman halkeaman leveys 0,01–0,02 mm. Samalla pudotuskorkeudella 50 iskun jälkeenkin pysyvä halkeama ei ollut niin leveä, että se olisi pienentänyt pölkyn käyttömahdollisuutta radassa. Seuraavalla pudotuskorkeudella eli 740 kN iskulla etu- ja taustapuolen keskimääräinen halkeamapituus oli 142 mm ja halkeaman leveys 0,01–0,03 mm. Suurimmalla pudotuskorkeudella ensimmäisellä pudotuksella irtosi pölkyn yläreunasta iskukohdasta hieman betonia, ja halkeamaleveys oli 0,03–0,04 mm. Kaikkien 50 pudotuksen jälkeen havaittiin halkeilua myös ratapölkyn keskellä.



Kuva 5.5 Halkeamapituus - pudotusten lukumäärä -kuvaajat. Vasen kuva: pehmeä alusta. Oikea kuva: kova alusta (Kaewunruen & Remennikov 2010).

Raideleveys säilyi testien aikana toleranssien rajoissa. Koska vauriot kiskojen ja pölkkyjen välisellä kontaktipinnalla jäivät pieniksi, kokeet voitiin tehdä ilman välilevyjä. Pienestä betonin lohkeilusta huolimatta olivat kiskonkiinnikkeet edelleen tiukasti ratapölkkyissä kiinni.

Tämän kokeellisen tutkimuksen mukaan ensimmäiset halkeamat syntyvät ns. kovalla radalla nopeammin kuin pehmeällä radalla, kuten kuvasta 5.5. voidaan havaita. Lisäksi syntyneet halkeamat olivat pitempiä. Toistuvien iskujen jälkeenkin halkeamaleveydet jäivät pieniksi, mutta kuvassa 5.6 esitetty lohkeilu lisääntyi. Iskujen vaikutukset jäivät kuitenkin paikallisiksi ja testattujen ratapölkkyjen käytettävyys säilyi.



Kuva 5.6 Ratapölkkyjen kunto pudotusten jälkeen. Vasen kuva: iskuvaikutus 500 kN. Oikea kuva: iskuvaikutus 810 kN (Kaewunruen & Remennikov 2010).

Kaewunruen & Remennikov ovat havainneet tutkimuksissaan, että betoni käyttäytyy eri tavalla iskukuormien ja staattisten kuormien alaisuudessa. Yleisesti ottaen betonin lujuus ja jäykkyys ovat suurempia, kun iskukuormien suuruus kasvaa. Lujuuden ja jäykkyyden kasvu johtuu iskukuormien aiheuttamien halkeamien taipumuksesta edetä suoraan kiviainesrakeiden läpi, kun taas staattisen kuormituksen alaisena halkeamat pyrkivät kiertämään kiviainesrakeita. (Remennikov & Kaewunruen 2007)

Kuormituskokeissa saatujen tulosten perusteella ensimmäiseen halkeamaan vaadittu taivutusmomentti on iskukuormilla noin 23 % suurempi verrattuna staattisiin kuormiin (taulukko 5.1). Vastaavasti murtoon vaadittava taivutusmomentti on iskukuormilla noin 12 % suurempi staattisiin kuormiin nähden.

Taulukko 5.1 Australiassa Wollongongin yliopistossa tehtyjen staattisten ja dynaamisten kuormituskokeiden tuloksia (Remennikov & Kaewunruen 2007).

Loading	Target Conditions	Tested moment capacity (kNm)	Type of damage
Static	crack	34	First crack is due to bending
	fail	84	Shear failure
Impact	crack	44	First crack is the bending crack
	fail	95	Bending-shear failure

Kaluston aiheuttamaa dynaamista kuormitusta voidaan seurata erilaisilla mittalaitteilla. Esimerkiksi Britanniassa on radoille asennettu 4 mittaustaitetta todellisten dynaamisten kuormien mittaamiseksi (tilanne vuonna 1993). Ensimmäisessä mittauskohdassa vuonna 1986 hälytysrajana oli 30 t pyöräkuorma. Tätä suurempia kuormia radalle välittävät junat havaittiin ja korjattiin. Vuonna 1993 hälytysraja

ylitettiin selvästi harvemmin kuin ennen laitteen asennusta. (Taylor 1993). Samppala (2011) on diplomityössään tarkastellut pyörävoiman valvontaa lähemmin.

5.1.3 Jänneteräspunosten korroosio

Teräksen korroosion aiheuttavat ympäristön kemialliset reaktiot. Korroosiossa rauta pyrkii palautumaan stabiiliin luonnontilaansa luovuttaen samalla hapettuessaan sitä energiaa, mikä on sitoutunut teräksen tuotantoprosessissa. Teräksen ruostuessa se menettää myös lujuuttaan. Korroosiotuotteet ovat pitkälti samoja yhdisteitä, joista teräs on valmistettu. Edellytyksenä korroosion alkamiselle on ennen kaikkea kosteuden sekä hapen riittävä saanti. Korroosio kiihtyy, kun epäpuhtauksia kuten suoloja, happoja ja mikrobeja kerääntyy teräksen pinnalle. Kyseiset aineet rikkovat jatkuvasti terästä suojaavan oksidikalvon. Riskiympäristöjä ovat muun muassa eloperäisten aineiden, maantiesuolan ja teollisuuden kemikaalien vaikutusalueet. (Hakulinen 2003)

Betonin raudoitus on uutena hyvin suojattu ruostumiselta, koska alkalinen huokosvesi passivoi teräspinnan muodostaen siihen suojaavan kalvon. Korroosiosuojaus on virheettömässä rakenteessa hyvin pysyvä, koska passiivikalvo on itseään jatkuvasti korjaava ja terästä suojaava betonikerros hidastaa tiivydellään ja yhtenäisyydellään erilaisten korroosioita aiheuttavien aineiden (hapot, kloridit, sulfaatit) pääsyä raudoitteiden pinnalle. (Bakker 1988)

Teräksen passiivisuuteen perustuva korroosiosuoja voidaan menettää ja korroosio voi käynnistyä joko raudoitteita suojaavan betonin karbonatisoitumisen tai kloridien vaikutuksesta. Betonin halkeilu voi lisätä em. tekijöiden haittavaikutusta. (Parrott 1987)

Ilman hiilidioksidin reaktiota betonin alkalisten yhdisteiden kanssa kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Karbonatisoitumisen seurauksena betonin huokosveden pH alenee tasolta 13-14 noin tasolle 8 eli betonin huokosvesi neutraloituu (Neville 1995.). Karbonatisoituminen alkaa betonin pinnasta ja etenee rintamana hitaasti syvemmälle betoniin. Karbonatisoituminen on suhteellisen hidasta, koska hiilidioksidin tunkeutuminen betonin huokosverkostoon on hidasta, karbonatisoituvaa ainesta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) on betonissa runsaasti ja koska ilman CO_2 -pitoisuus on alhainen, noin 400 ppm eli 0,04 tilavuus-%. Karbonatisoitumisen etenemisnopeus riippuu pääasiassa seuraavista tekijöistä (Tuutti 1982, Bakker 1988):

- betonin ja mahdollisen pinnoitteen tiiviys, joka hidastaa hiilidioksidin tunkeutumista betoniin, (tämä riippuu myös betonin kosteuspitoisuudesta). Pinnan tiiveyttä voidaan parantaa erinäisillä suoja-aineilla.
- ympäröivän ilman hiilidioksidipitoisuus
- karbonatisoituvan aineen määrä (lähinnä betonin sementtimäärä).

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi betonin kosteustila vaikuttaa merkittävästi karbonatisoitumisnopeuteen. Karbonatisoituminen on nopeimmillaan 50–60 % suhteellisessa kosteudessa. Sateelle alttiina oleva betoni karbonatisoituu noin neljä kertaa hitaammin verrattuna sateelta suojassa olevaan betoniin. (Tiehallinto 2007)

Karbonatisoitumisen eteneminen hidastuu ajan myötä, koska ilman hiilidioksidin täytyy kulkea pitempi matka reaktiovyöhykkeelle. Betoniratapölkkyissä suojabetonin paksuus sekä oletettu käyttöikä huomioiden betonin karbonatisoituminen ei yleensä aiheuta jänneterästen korroosioita. (Pihlajavaara 1970)

Betonin karbonatisoitumista pystytään tarkastamaan poraamalla näyte betonista. Sivelemällä näytteen betonipintaan fenoliftaleiinin ja alkoholin seosta värjäytyy karbonatisoitumaton kerros punaiseksi, joten värjäntymättömän kerroksen paksuus antaa arvion karbonatisoituneen kerroksen paksuudesta. (Pihlajavaara 1970)

Raudoitteiden passiivisuuteen perustuva korroosiosuojaus voidaan menettää myös, jos teräksen pinnalle pääsee haitallisessa määrin klorideja (Neville 1995). Kloridit voivat jo hyvin pieninä pitoisuuksina aiheuttaa suojaavan passiivikalvon tuhoutumisen, jolloin raudoitteiden korroosio voi käynnistyä alkalisessakin (karbonatisoitumattomassa) betonissa. Raudoitteiden korroosion kannalta haitallisena kloridipitoisuutena pidetään noin 0,03 – 0,07 p-% betonin painosta happoliuoksena betonin painosta määritettynä (BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus, 2002). Vastaavasti siltarakenteiden yhteydessä rajana on pidetty 0,07 p-% betonin painosta (Äijälä 2012) ja jännitetyissä rakenteissa arvo on puolet edellä mainitusta. Klorideja voi tunkeutua kovettuneeseen betoniin, mikäli betonipinta altistuu ulkoiselle kloridirasitukselle esim. liukkaudentorjunta- tai pölynsidontasuolojen tai merivesiroiskeiden vaikutuksesta. On myös mahdollista, että betonimassaan on valmistuksen yhteydessä sekoitettu klorideja nopeuttamaan betonin kovettumista.

Korroosion käynnistyttyä teräksen pinnasta alkaa liueta metallia, joka muuttuu ruosteeksi. Tämän seurauksena raudoitteiden poikkipinta-ala pienenee, mikä saattaa heikentää rakenteiden lujuutta ja kantavuutta. Poikkipinta-alan pientyminen voi olla erityisesti haitallista jännitetyissä betonirakenteissa. Käytännössä heikkeneminen tapahtuu kuitenkin hyvin hitaasti. Teräksen korroosion nopeuteen karbonatisoituneessa ja/tai kloridipitoisessa betonissa vaikuttavat pääasiassa seuraavat tekijät:

- betonin kosteuspitoisuus, joka vaikuttaa elektrolyytin määrään ja hapensaantiin
- lämpötila
- betonin kloridipitoisuus.

Huokosverkoston suhteellisen kosteuden lisääntyessä betonin sähkönjohtavuus kasvaa huomattavasti. Huokosverkoston täyttyminen vedellä toisaalta myös vähentää hapen diffuusiota rakenteeseen. Karbonatisoitumisen käynnistämä teräksen korroosion katsotaan yleisesti alkavan, kun suhteellinen kosteus betonissa ylittää 65–70 %. Korroosionopeus kasvaa merkittävästi suhteellisen kosteuden noustessa yli 80–85 % tason (Tuutti 1982). Kloridien aiheuttama korroosio alkaa jo alemmilla kosteuspitoisuuksilla ja on usein selkeästi nopeampaa kuin karbonatisoitumisen käynnistämä korroosio. Käytännössä ulko-olosuhteille alttiissa betonirakenteissa kosteuspitoisuuden on havaittu olevan lähes jatkuvasti korroosiolle riittävän korkea.

Teräksen korroosiotuotteen eli ruosteen tilavuus on huomattavasti terästä suurempi. Tämä aikaansaa betoniin jännityksiä, jotka voivat aiheuttaa säröilyä. Säröt heikentävät betonin lujuutta ja jänneterästen tartuntaa. Lisäksi säröt ja halkeamat saattavat kiihdyttää korroosiota entisestään, koska halkeamat lisäävät betonin läpäisevyyttä. Korroosion kannalta haitalliset aineet (hiilidioksidi, kloridit, sulfaatit, vesi) voivat tunkeutua halkeamien kautta helposti syvälle betoniin, mahdollisesti suoraan raudoitteen pinnalle. Halkeamien haitallisuus korroosion kannalta riippuu halkeamien leveydestä ja niiden ulottumasta rakenteeseen sekä rakenteen rasisuoloista (kosteus, kloridit). Karbonatisoitumisesta johtuvan korroosion tapauksessa haitattomana pysyvän halkeaman enimmäisleveytenä pidetään 0,30 mm ja kloridikorroosion tapauksessa 0,10 mm (Tuutti 1982, Bakker 1988).

Halkeilemattomissa ratapölkkyissä betoni suojaa teräksiä lukuun ottamatta pölkyn päitä, joissa esijännityspunokset tulevat pintaan asti. Näin ollen teräksissä ei tapahdu korroosiota. Kuitenkin rapautumisesta ja muista syistä johtuvat halkeamat, joita käsitellään tarkemmin luvuissa 5.1.1, 5.1.2 ja 5.3 voivat mahdollistaa kosteuden sekä epäpuhtauksien ja ilman pääsyn teräksiin tarjoten edellytykset korroosion alkamiselle. Betoniratapölkkyjen kohdalla halkeamien korjaukseen käytetään usein epoksihartsia, joka täyttää halkeaman ja tätä kautta estää kosteuden, haitallisten aineiden ja ilman pääsyn jänneterästen pinnalle. (Grundfelt 1980, Hakulinen 2003, Pihlajavaara 1970)

5.2 Väsyminen

Betonisten ratapölkkyjen väsymisestä on kirjoitettu hyvin vähän tieteellisiä tutkimusraportteja. Ruotsalainen Thun on tutkinut ettringiitin kehittymisen seurauksena rapautuneiden ratapölkkyjen väsymistä kuormituskokein. Thun on tutkinut myös vetorasitettujen betonikoekappaleiden väsymistä laajan koeohjelman avulla (Thun 2001). Näistä kokeista on esitetty tiivistelmät TERA -tutkimusohjelman rautatiesiltoja esittelevässä julkaisussa (Tulonen et al. 2013). Samassa julkaisussa on laajasti käsitelty betonin ja betonirakenteiden väsymistä. Tässä esitetään muutamia poimintoja kirjallisuustutkimuksen havainnoista.

Betonin väsyminen on hyvin monimutkainen ilmiö. Väsymisilmiöön vaikuttavat jännityksen vaihteluväli, jännitysjaksojen lukumäärä, rakenneosan väsymislujuus, kuormitusnopeus ja kuormitushistoria. Väsymismitoitus perustuu jännitysvaihteluväleihin ja jännitysjaksojen lukumääriin. Tavallisesti rakenteisiin kohdistuu tyypillisistä laboratoriokuormituskokeiden vakiojännitysvaihteluolosuhteista oleellisesti poikkeava kuormitusten kirjo.

Väsytyskuormitetun teräsbetonirakenteen murtuminen yleensä tapahtuu terästangon väsymismurtona. Toinen murtotapa on betonin lohkeilu puristusvyöhykkeessä. Puristuspuolella tapahtuu jännitysten uudelleenjakautumista, jonka vuoksi murto tapahtuu harvoin betonissa. Betonin väsymismurto onkin hyvin harvinainen, jos betoni on hyvässä kunnossa. Esimerkiksi britit toteavat, 50 vuoden betoniratapölkkyjen käyttökokemuksen jälkeen, että betonin puristuspuolen väsytyskuormitus ei ole ongelma eikä sellaiseksi todennäköisesti tulevaisuudessakaan muodostu. (Taylor 1993)

Betoni käyttäytyy vedettynä hyvin erilaisella tavalla verrattuna materiaalin käyttäytymiseen puristettuna. Betoni on epäjatkovaa ja siihen syntyy vetojännityksen kasvaessa suuria paikallisia venymäkeskittymiä. Näiden keskittymien väleissä venymä ei kasva vaan jopa pienenee. Kuormituksen loppuvaiheessa vetojännitys vedetyssä rakenteessa pienenee, koska venymäkeskittymäkohdissa venymän kasvaessa jännitys pienenee selvästi. Venymäkeskittymäkäyttäytymisen seurauksena syntyy syklisessä kuormituksessa vetohalkeaman kärkeen yhden kuormitusyöskin jälkeen pieni puristusjännitys. Seuraavalla kuormituskerralla vetojännityksen huippuarvo on siirtynyt hieman kauemmaksi halkeaman kärjestä edelliseen kuormituskertaan verrattuna.

Tartuntajänteellisten jännitettyjen betonipalkkien väsymislujuus on melko korkea, koska kuormitustoistojen aiheuttama liike jännepunosten ja betonin välillä on pieni. Tästä johtuen punosten hankautuminen ja kuluminen betonissa on pientä. Jos betoni

säilyy halkeilemattomana, ei betonissa myöskään synny merkittäviä jännityskeskittymiä.

5.3 Betonin rapautuminen

Betonin rapautumiseksi kutsutaan vaurioitumismekanismeja, joissa betonin sisään muodostuva ylipaine saa aikaan sisäisiä säröjä ja halkeamia. Vaurioitumisen ilmenemismuodot voidaan jakaa kahteen erilaiseen tyyppiin. Ilmenemismuodot ovat betonin rapautuminen pinnalta käsin ja betonin sisäinen vaurioituminen. Varmuudella ei voida sanoa, ovatko vaurioitumistapojen perusmekanismit erilaisia. Todennäköistä kuitenkin on, että betonia sisäisesti vaurioittavat mekanismit vaikuttavat jossain määrin myös pinnan rapautumiseen. Rapautuminen johtaa edetessään lopulta siihen, että betoni menettää lujuutensa ja koossapysyvyytensä. Suomen olosuhteissa pakkasrapautuminen on selvästi merkittävin rapautumisilmiö. Muita rapautumisilmiöitä on havaittu huomattavasti vähemmän. Eri rapautumisilmiöiden aiheuttamat näkyvät vauriot ovat samankaltaisia, joten rapautumisen syyn selvittäminen edellyttää laboratoriotutkimuksia. (Haukijärvi 2002, Kuosa & Vesikari 2000)

Silmämääräisesti betonin rapautumisen huomaa ensimmäisenä ratapölkkyjen päistä, joihin muodostuu verkkohalkeamia. Tämän jälkeen pinnasta alkaa irtautua betonia ja ratapölkkyyn syntyy pituussuuntaisia halkeamia. (Grundfelt 1980)

Betonin rapautuminen saattaa nopeuttaa jänneterästen korroosiota ohentuneen suojaetonipeitteen sekä halkeamien kautta kulkeutuvan kosteuden ja kemiallisten yhdisteiden johdosta. Jänneterästen kannalta pahimpia halkeamia ovat ratapölkyn pituussuuntaiset halkeamat. Ratapölkkyssä oleva jännitys ei vaikuta kyseisessä suunnassa, joten halkeamat eivät sulkeudu. Suuret rapautumisvauriot saattavat aiheuttaa ratapölkkyssä jännityksen laukeamisen, kiskonkiinnityksen irtoamisen, raidelevyden muutoksen tai muun vastaavan betoniratapölkyn vaihtoon johtavan vaurion. (Grundfelt 1980)

5.3.1 Pakkasrapautuminen

Pakkasrasitus aiheutuu betonin huokosverkostossa olevan veden jäätymislaajeneman synnyttämästä paineesta, jota kasvattaa edelleen jääkiteen tilavuuden vähäinen kasvu lämpötilan jälleen noustessa. Betonin kapillaarihuokosten vesi on pakkasrapautumisen pääasiallinen aiheuttaja, joskin pakkasvaurion voi aiheuttaa myös sementtikivimatriisin ja kiviaineksen erisuuruinen lämpölaajeneminen. Betonin kapillaarihuokosissa oleva vapaa vesi laajenee jäätyessään noin 9 tilavuusprosenttia ja aiheuttaa huokosverkostoon ylipainetta. Kaikki huokosverkostossa oleva vesi ei kuitenkaan jäädy samalla hetkellä lämpötilan laskiessa veden jäätymispisteen alapuolelle, vaan pienemmissä huokosissa oleva vesi jäätyy vasta huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa. Jotta huokosveden jäätymislaajentumisen aiheuttama hydraulinen paine ei voisi synnyttää betoniin murtumia, on betonissa oltava ilmatiloja, jotka eivät täyty vedellä kapillaarivoimien vaikutuksesta, ja joihin laajeneva vesi voi tunkeutua. Näitä erillisiä pallomaisia ilmahuokosia, eli suojuhuokosia on oltava riittävän tiheässä ja tasaisesti jakautuneena sementtikiveen. (Haukijärvi 2002, Iso-Mustajärvi 2004, Tiehallinto 2007)

Pakkasvaurioiden syntyyn ei riitä pelkästään se, että betoni on normien mukaan pakasta kestävä. Tämän lisäksi pakkasrasitustason on oltava riittävän korkea sekä

rakennetyypin sellainen, että kosteusrasitus johtaa betonin korkeaan vedellä täyttymisasteeseen jäätymistilanteessa. (Haukijärvi 2002)

Alhainen vesisementtisuhde johtaa korkeampaan lujuuteen ja tiiveyteen, joka pienentää vedenimunoitusta sekä jäätyvän veden kokonaisuutta. Vaurioiden syntyminen vaikuttavat yleisesti myös rasitusolosuhteet ja rasitus syklien lukumäärä. Rannikko-seudun ja Etelä-Suomen pakkasrasitusolosuhteet ovat ankarammat kuin sisämaassa ja Pohjois-Suomessa. (Haukijärvi 2002, Iso-Mustajärvi 2004)

Pakkasvaurioituminen ilmenee betonin säröilynä. Säröt vaikuttavat betonin lujuuteen ja läpäisevyyteen. Rapautuvan betonin vedenimunoitus kasvaa voimakkaasti säröilyn ja halkeamien lisääntyessä, joten rapautuminen on kiihtyvää. Pitkälle edennyt pakkasrapautuminen ilmenee muun muassa betonipinnan halkeiluna ja betonin murenemisena. Rapautuminen heikentää betonin vetolujuutta ja samalla myös puristuslujuutta. Lisäksi rapautuminen voi heikentää jänneterästen tartuntaa betoniin. Alkuvaiheessa tapahtuvaa pakkasrapautumista ei voi havaita silmämääräisesti tai rakennetta vasaroimalla, vaan se edellyttää tarkempia tutkimuksia. (Haukijärvi 2002, Tiehallinto 2007)

Vaurioitumismallit

Betonin pakkasvaurioitumiselle on esitetty yli 15 erilaista teoreettista mallia tai selitystä. Rungas vaurioitumismallien määrä osoittaa, että pakkasvaurioituminen on monimutkainen prosessi. Vaurioita voi tapahtua useilla toisistaan osin poikkeavilla tavoilla ja niiden kaikkia yksityiskohtia ei tunneta vielä tarkasti. Vaurioitumismalleja tutkitaan edelleen aktiivisesti pyrkimyksenä kehittää malleja, jotka ottavat huomioon vaurioitumismekanismien lisäksi erilaiset ulkoiset olosuhteet, kuten kosteusolosuhteet, sementtikiven rakenteen ja tiiveyden. Eri teorioiden avulla pyritään selittämään, mitä betonissa tapahtuu sen jäätyessä ja minkälaisia vaikutuksia tällä on betonin sisäiseen rakenteeseen. Yleisimmät vaurioitumismallien teoriat ovat hydraulisen paineen teoria, mikroskooppisten jäälinssien kasvun teoria, osmoottisen paineen teoria ja kriittisen kyllästymisasteen teoria. Näistä kaksi ensimmäistä teoriaa soveltuvat useimmille tavanomaisille betoneille. (Kuosa & Vesikari 2000)

Yksinkertaisimman mallin mukaan vesi jäätyy suljetussa tilassa eikä näin ollen pysty siirtymään sementtikiven huokosrakenteeseen. Veden laajentuminen jäätyessä aiheuttaa huokoiseen materiaaliin vaurioita. Mallin mukaan betonin vedellä kyllästymisasteen ollessa enintään 0,917 ei materiaaliin synny painetta veden jäätyessä. Malli ei kuitenkaan kuvaa kaikkia betonin jäätyessä tapahtuvia ilmiöitä, kuten jäätyminen aiheuttamaa veden liikkumista betonin huokosrakenteeseen. Tästä johtuen malli soveltuu lähinnä tilanteisiin, joissa erittäin tiiviissä betonissa on paikallisia kohtia, joissa on riittävä määrä jäätyvää vettä. Tiiviissä betonissa vettä voi kerääntyä esimerkiksi huokosiin kiviainespartikkeleihin, vesitaskuihin, halkeamiin jne. Huomionarvoista on, että edellä mainitun tyyppiset viat voivat olla tiiviissä betonissa vaarallisempia verrattuna tavanomaiseen betoniin. (Kuosa & Vesikari 2000)

Tunnetuin pakkasvaurioitumisen teoria on hydraulisen paineen teoria. Teoria soveltuu parhaiten betoneille, joiden vesi-sementtisuhde on suuri ja ei-jäätyvän veden määrä tätä kautta pieni. Vaurioiden katsotaan aiheutuvan veden jäätyminen aikaansaamasta hydraulisesta paineesta betonin huokosjärjestelmässä. Paine syntyy, kun kapillaarihuokosen täyttävä vesi jäätyy ja aikaansaa jäätyttömän veden puristumisen pois huokosesta aiheuttaen näin hydraulisen paineen huokossysteemissä. Mallis-

sa jäätyvät vesi voi liikkua jäätyiskohdasta aiheuttaen jännityksiä sementtikivessä. Jännitykset voivat ylittää betonin lujuuden aiheuttaen säröilyä. Muodostuvan paineen suuruuteen vaikuttaa sementtikiven vedelläkyllästymisaste, läpäisevyys, etäisyys jäätyiskohdasta lähimpään ilmatäytteiseen huokoseen, jäätyminenopeus ja jäätyvän veden määrä tiettyä lämpötilan laskua kohden. Teoriaan perustuen sementtikivessä on olemassa lähimpään tyhjiin tilaan tietty matka, minkä ylittyessä hydraulinen paine aikaansaa säröilyä. Teorian avulla on pystytty selittämään ilmahuokosten merkitys betonin jäätyessä. Veden kulkiessa kohti ilmahuokosta kasvaa veden aiheuttama paine jyrkästi etäisyyden kasvaessa ilmahuokoseen. Näin ollen hydraulisen paineen teoria kiinnitti huomion ilmahuokosten ja eritoten niiden keskinäisen välimatkan merkitykseen ajatellen betonin pakkasenkestävyyttä. Teorian hyvistä puolista huolimatta se ei yksin selitä betonin pakkasvaurioitumista. (Kuosa & Vesikari 2000)

Mikroskooppisten jäälinssien kasvun teoria kehitettiin täydentämään hydraulisen paineen teoriaa. Mikroskooppisten jäälinssien teoria soveltuu parhaiten betoneille, joiden vesi-sementtisuhte on pieni ja jäätyvän veden määrä suuri. Teorian mukaan betonin jäätyessä ilmenevä vaurioituminen selittyy osin sillä, että kapillaarihuokosiin kehittyy mikroskooppisia jäälinssiejä, jotka pyrkivät kasvamaan. Jäälinssien kasvu aiheutuu siitä, että betonissa olevan alijäähtyneen veden kemiallinen potentiaali geelihuokosissa on suurempi kuin kooltaan suuremmissa kapillaarihuokosissa olevien jäälinssien. Mikäli jäälinssien kasvulle ei ole riittävästi tilaa, kasvaa paine huokosten seinämiin aiheuttaen huokosrakenteen mekaanisen rikkoutumisen. Ilmahuokosiin voi kertyä vapaasti jäätä huokosten seinämien rajoittamatta kasvua. Huokostetussa betonissa veden kulkeutuminen ilmahuokosten jäälinssieihin pienentää veden kulkeutumismahdollisuuksia kapillaarihuokosten jäälinssieihin. Teorian avulla pystytään perustelemaan, että betonissa on olemassa tietty jäätymisvaurioille kriittinen huokosjako. Mikroskooppisten jäälinssien teorialle on tyypillistä, että jäälinssit jatkavat kasvamistaan vaikka lämpötilan lasku jäätymisvaiheessa pysähtyisikin. (Kuosa & Vesikari 2000)

Osmoottisen paineen teoria on kehitetty täydentämään hydraulisen paineen teoriaa ja mikroskooppisten jäälinssien teoriaa. Osmoottisen paineen teoria huomioi, että betonin huokosissa olevassa vedessä on veteen liuenneita kemikaaleja. Teoria pystyy selittämään kloridi-ionien pakkasrapautumista kiihdyttävän vaikutuksen. Teorian mukaan jään muodostuminen kapillaarihuokosiin kasvattaa jäätyttömän veden sisältämien kemikaalien, kuten kloridien, konsentraatiota. Kapillaari- ja geelihuokosten välille syntyy konsentraatioero, joka pyrkiessään tasoittumaan aikaansaa huokosten seinämiin kohdistuvan kokonaispainetta kasvattavan osmoottisen paineen. (Kuosa & Vesikari 2000)

Kriittisen kyllästymisasteen teoria on perusmekanismeja yhdistävä teoria. Kriittisen kyllästymisasteen teorialla on monia yhtymäkohtia perusteorioihin, mutta se ei ole riippuvainen perusteorioista. Keskeisenä ajatuksena teoriassa on, että betonilla on tietty kriittinen kyllästymisaste, minkä ylityttyä betoni vaurioituu jäätyessään. Teoriaa sovellettaessa on oleellista tietää kuinka usein kriittinen kosteuspitoisuus ylittyy betonin jäätyessä. (Kuosa & Vesikari 2000)

Edellä kuvattujen teorioiden lisäksi on olemassa useita pakkasvaurioitumisesta esitettyjä vähemmän täydellisiä malleja.

5.3.2 Kemiallinen rapautuminen

5.3.2.1 Ettringiitti

Ettringiittireaktioksi kutsutaan kovettuneessa sementtikivessä tapahtuvia sulfaattimineraalien kemiallisia reaktioita, joihin liittyy reaktiotuotteiden voimakas tilavuudenkasvu. Reaktiossa muodostuva ettringiittimineraali kiteytyy ilmatäytteisten huokosten eli suojahuokosten (kuva 5.7) seinämille, jolloin suojahuokosten tilavuus pienenee ja betonin pakkaskestävyys heikkenee. Reaktion jatkuessa varsinainen vaurioituminen voi tapahtua joko pakkasrapautumisena heikentyneen pakkasenkestävyyden johdosta tai siten, että ettringiitin kiteytymisen aiheuttama paine aiheuttaa halkeamia betoniin. Ettringiitin aiheuttamat vauriot muistuttavat pakkasrapautumisen aiheuttamia vaurioita, joten näiden kahden erottaminen vaatii laboratoriotutkimuksia. (Haukijärvi 2002)



Kuva 5.7 Ettringiittiä betonin ilmahuokosissa. Ilmahuokokset ovat tyypillisesti halkaisijaltaan noin 0,025–0,05 mm (Stark J. & Bollmann 2010).

Ettringiittireaktioon eli ettringiitin uudelleen kiteytymiseen on yleensä syynä betonin liian voimakas lämpökäsittely kovettumisen aikana, mikä aiheuttaa häiriöitä sementin kovettumisreaktioihin. Yleisesti ettringiitin muodostumisen kannalta kriittisenä lämpötilana pidetään 60 astetta, jonka yli betonin lämpötila ei saa kovettumisen aikana nousta. Lisäksi ettringiittireaktion kannalta kriittisenä pidetään mikrohalkeamia, joihin ettringiitti voi kiteytyä. Mikrohalkeamat voivat aiheutua liian nopeista lämpötilan vaihteluista, kuivumiskutistumasta tai ulkopuolisista kuormitustekijöistä. Ettringiittireaktioon vaaditaan myös sisäinen tai ulkoinen sulfaatin lähde sekä pitkäaikainen ja korkea kosteusrasitus betoniin. (Collepari 1999, Haukijärvi 2002)

Alkuvaiheessa syntynyt ettringiitti on harmiton niin kauan kun se syntyy betonin ollessa plastisessa tilassa. Jos sitä vastoin sen syntyminen viivästyy hydrataatioprosessin häiriöiden, korkean lämpötilan tai lämpökäsittelyn vuoksi, aiheutuu vaurioita, jotka alentavat lujuutta ja heikentävät säilyvyyttä. Tätä reaktiota kutsutaan ettringiittireaktioksi eli ettringiitin uudelleen kiteytymiseksi. Sulfaatin kestävä betonin käyttö on varmin tapa estää vauriota. Haitallinen ettringiittireaktio voi aiheutua joko ulkoisesta sulfaattilähteestä tai sisäisesti esimerkiksi korkean hydrataatiolämpötilan vuoksi. (Collepari 1999, Sahu & Thaulow 2004, SILKO)

Suomessa 1960–1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkkyissä on havaittu ettringiitistä johtuvia vaurioita. Syynä tähän oli tuolloin käytetty lämpökäsittely (höyrykarkaisu), jonka avulla nopeutettiin betonin hydrataatiota. Lämpötila nostettiin 75°C–80°C:een, mikä mahdollisti ettringiitin uudelleen kiteytymisen. 1980-luvulla tehtyjen tutkimusten perusteella lämpökäsittelystä luovuttiin, jonka jälkeen Suomessa valmistetuissa

ratapölkyissä ei ole havaittu ettringiitistä johtuvia vaurioita. (Tepponen & Eriksson 1987)

Ruotsissa on havaittu 1992-1996 välisenä aikana valmistetuissa betoniratapölkyissä runsaasti kuvan 5.8 mukaisia rapautumisen aiheuttamia vaurioita. Silmämääräisesti suoritetuissa kenttätutkimuksissa noin kolmesta miljoonasta ratapölkystä 500000 oli rapautumisen vaurioittamaa. Tarkemmissa tutkimuksissa vaurioiden aiheuttajaksi on todettu viivästynyt ettringiitin muodostuminen, mikä on pakkasrapautumisen kanssa aiheuttanut kyseiset vauriot. Tutkimuksissa viivästyneen ettringiitin muodostumisen syyksi on arvioitu liian korkeita lämpökäsittelyn aikaisia lämpötiloja. (Sahu & Thaulow 2004, Thun 2006)



Kuva 5.8 *Ettringiitin aiheuttamaa halkeilua betoniratapölkyissä Ruotsissa (Sahu & Thaulow 2004).*

Ruotsissa vääristä valmistusmenetelmistä johtuvia ongelmia on havaittu tietyissä yhden toimittajan, Strängbetong AB, toimittamissa ratapölkyissä. Tämän vuoksi kaikille tämän toimittajan 1992–1996 valmistamille ratapölkyille pitää suorittaa täydentävä tarkistus. Ettringiitin vaurioittama ratapölkky saattaa viidessä vuodessa menettää toimintakykynsä jopa kokonaan. Tarkastuksessa ratapölkkyt jaotellaan neljään luokkaan, ja joka luokalle annetaan oma värikoodi. Punainen koodi annetaan välitöntä vaihtoa edellyttävälle ratapölkyille. Kuvassa 5.9 on punaisen koodin saanut ratapölkky.



Kuva 5.9 Tyypillisiä halkeamia ratapölkyn päässä. Luokka 1 ”punainen” (Banverket 2010).

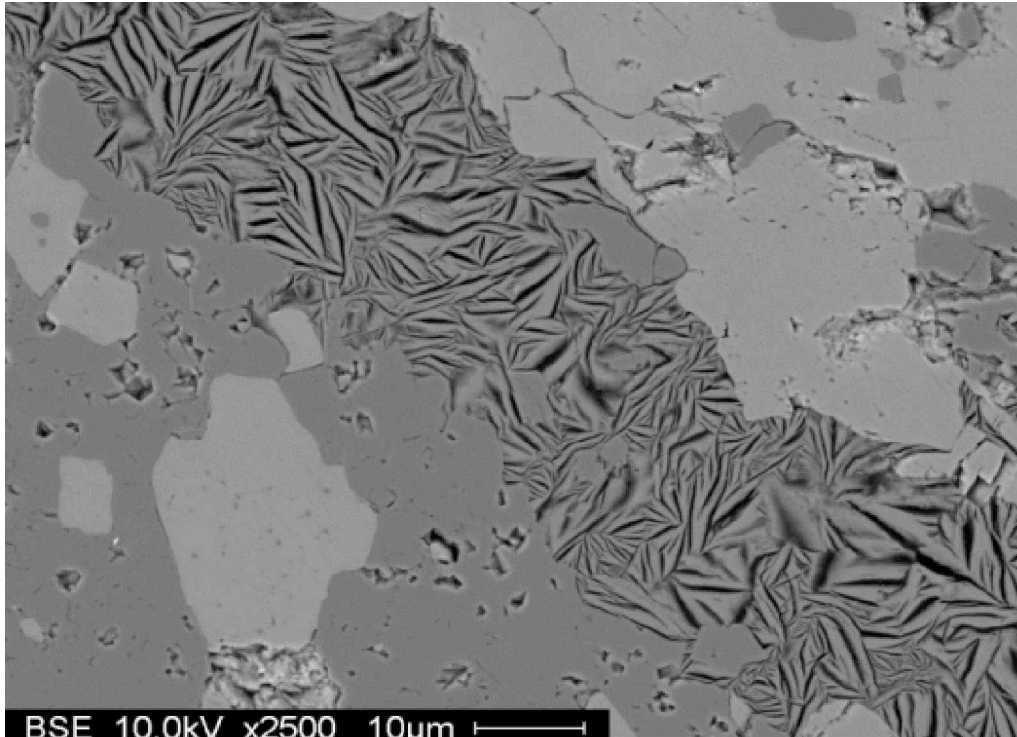
Laajamittaisista ongelmista johtuen Banverket on antanut ehjien ja vaurioituneiden (DEF-sliprar) betoniratapölkkyjen vaihtotyön suorittamiselle yksityiskohtaiset ohjeet julkaisussa Banverket 2007.

5.3.2.2 Alkalikiviainesreaktio

Alkalikiviainesreaktio on betonin kiviaineksessa tapahtuva sementtikiven alkalisuudesta aiheutuva paisumisreaktio, joka voi rapauttaa betonia. Alkalikiviainesreaktio on mahdollinen, jos kaikki seuraavista kolmesta edellytyksestä täyttyvät: sementin tulee sisältää runsaasti alkaleja (Na ja K), kiviaineksessa on heikosti alkalisuutta kestäviä mineraaleja sekä betonin kosteuspitoisuus on riittävän korkea. Vallitseva lämpötila vaikuttaa reaktionopeuteen niin, että matalassa lämpötilassa alkalikiviainesreaktio etenee hitaasti, ja korkea lämpötila vastaavasti kiihdyttää reaktiota. (Haukijärvi 2002, Punkki ja Suominen 1994).

Alkalikiviainesreaktio jaetaan yleensä alkalipii-, alkalikarbonaatti- ja alkalisilikaatti-reaktioihin reagoivan kiviaineksen mukaan. Tyypillisesti alkalikiviainesreaktio esiintyy massiivisissa betonirakenteissa, kuten silloissa ja patorakenteissa (Punkki ja Suominen 1994.). Suomessa olevat tiiviit syväkivilajit ovat pääsääntöisesti kemiallisesti hyvin kestäviä. Tästä johtuen alkalikiviainesreaktio on Suomessa harvinainen ilmiö. Murskatun kiviaineksen käyttö saattaa kasvattaa alkalikiviainesreaktion riskiä, koska kallioperän mahdolliset vaihtelut ovat homogenisoituneet irtomaalajeissa. Esimerkiksi Englannissa alkalikiviainesreaktiota esiintyy runsaasti (Grantham 2012, Haukijärvi 2002)

Alkalikiviainesreaktiosta kärsiville betonirakenteille on tyypillistä pinnan laikkaisuus ja epäsäännöllinen sekä tiheä verkkohalkeilu ja paisuminen. Halkeamissa voidaan havaita myös geelimäistä reaktiotuotetta (kuva 5.10). Alkalikiviainesreaktion vauriot muistuttavat pakkasrasituksen ja ettringiitin aiheuttamia vaurioita, joten silmämääräisten havaintojen perusteella ei pääsääntöisesti pystytä sanomaan, mikä kyseisistä vaurioiden aiheuttajista on syyppä vaurioihin. (Haukijärvi 2002, Quinhua et al. 1997)



Kuva 5.10 Alkalikiviainesreaktiossa muodostuneen geelin täyttämä halkeama. (Leemann 2012)

Alkali-silikareaktio on aiheuttanut Kiinassa ongelmia kostean ilmaston alueilla. Esimerkiksi Quinhua Jin et al. tekemässä tutkimuksessa (Quinhua et al. 1997) tarkasteltiin Shanghaiin ja Zhengjiangin rautatieasemilla olleita betoniratapölkkyjä. Tutkimuksessa havaittiin runsaasti alkali-silikareaktion aiheuttamia vaurioita. Esimerkiksi vuonna 1995 tehdyssä kartoituksessa vuosina 1985–1987 ratapihoille asennetuista ratapölkkyistä 61–85 % kärsi alkali-silikareaktion aiheuttamista halkeamista. Myös Norjassa on havaittu merkittävässä määrin alkali-kiviainesreaktion vaurioittamia ratapölkkyjä. Norjassa on aloitettu kiviaineksena käytettävän materiaalin testaus, jotta alkalikiviainesreaktion aiheuttamilta vaurioilta välttyttäisiin (Skoglund 2010).

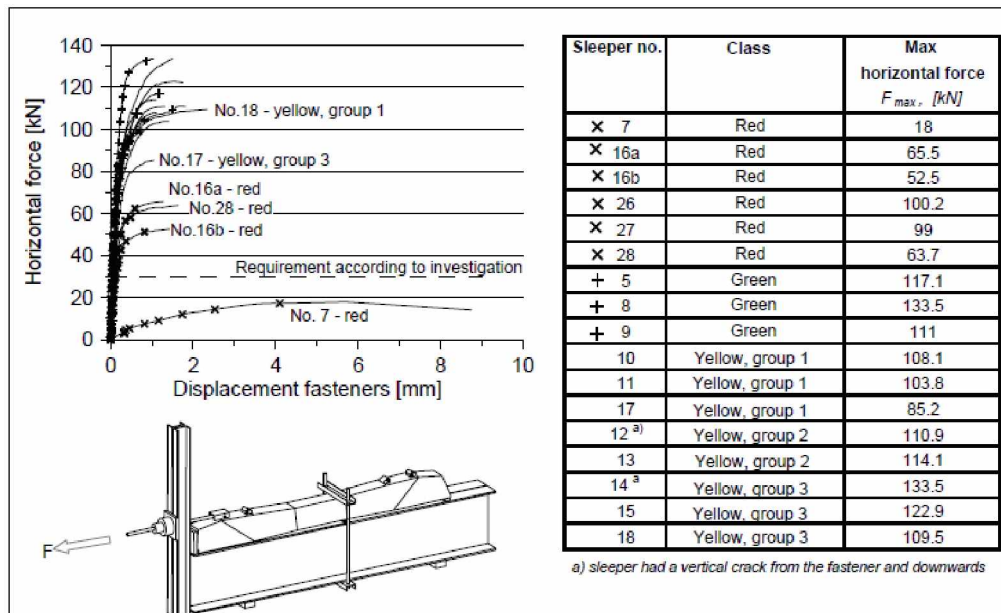
5.4 Kiskon kiinnityksen irtoaminen

Dynaamiset kuormat aiheuttavat ratapölkkyssä oleviin kiskonkiinnityksiin suuria rasituksia. Dynaamisten kuormien alaisuudessa kiskon kiinnikkeet saattavat löystyä ja muoviset raideruuviholkit saattavat vaurioitua (Marx et al. 2003). Vossloh Skl 14-kiinnityksessä vioittunut raideruuviholkki voidaan kuitenkin poistaa ja tilalle voidaan asentaa uusi raideruuviholkki. Mikäli normaalia holkkia ei voida enää asentaa, voidaan käyttää ulkohalkaisijaltaan pienempää raideruuviholkkia (Ratahallintokeskus 1999).

Kiskonkiinnityksen kunnon heikentyminen lisää kiskon siirtymiä kiskoa kuormitettaessa. Kiinnityksen jäykkyyden pienentymisen seurauksena, kiskon pystysuuntaiset siirtymät kasvavat jopa 60–70 %. Tämän lisäksi kiskon kiihtyvyydet lisääntyvät huomattavasti. (Zhai & Cai 1997.) Kiskon pystysuuntainen liike saattaa aiheuttaa kiinnikkeisiin rasitustiloja, jotka voivat johtaa kiinnikkeiden täydelliseen irtoamiseen. Varsinkin Pandrol e-clip-kiinnitys saattaa irrota tärinän vaikutuksesta (Nummelin & Ojanperä 1996).

Ruotsissa tehdyissä kiskonkiinnitysten valuankkureiden radan suhteen sivusuuntaisissa vetokokeissa (Thun et al. 2001) havaittiin, että vähäinen tai kohtalainen määrä halkeamia ei vaikuta merkittävästi kiskonkiinnitysten kapasiteettiin ottaen sivusuuntaisia voimia vastaan. Mikäli ratapölkkyssä on runsaasti halkeamia, kiskonkiinnitysten sivusuuntainen kuorman vastaanotto kyky pienenee merkittävästi. Mikäli huonokuntoisen ratapölkyn ympärillä on hyväkuntoiset ratapölkkyt, pystyy huonokuntoinen ratapölkky kuitenkin täyttämään tehtävänsä (Thun 2006, Thun et al. 2001). Kuva 5.11 esittää kiskonkiinnitysten sivusuuntaisissa vetokokeissa saatuja tuloksia. Ratapölkkyjen luokittelussa käytetyt värit ovat:

- Green = Halkeilematon
- Yellow, group 1 = Joitain halkeamia, ei halkeamia yläpinnassa
- Yellow, group 2 = Joitain halkeamia, joitain halkeamia yläpinnassa
- Yellow, group 3 = Joitain halkeamia, useita halkeamia yläpinnassa
- Red = Runsaasti halkeamia



Kuva 5.11 Ruotsissa suoritettujen kiskonkiinnityksen vetokokeiden tuloksia (Thun 2006).

Vossloh Skl 14 kiskonkiinnityksen yleistyessä betoniratapölkkyissä on joissain yksittäistapauksissa ilmennyt halkeilua raideruuviholkkien ympärillä. Tämä johtuu siitä, että Skl-kiinnitys asennetaan ratapölkkyyn raideruuvilla, toisin kuin Pandrol e-clip, jonka jousikiinnitin asennetaan valamalla (Levomäki 2001). Äärimmäisessä tilanteessa ratapölkky voi haljeta raideruuvien linjalta kuvan 5.12 mukaisesti. Raideruuvien reiät ovat selkeä epäjatkuvuuskohta. Lisäksi betoniratapölkkyt eivät sisällä raudoitusta pölkyn poikittaissuunnassa, joten alkaneet pituussuuntaiset halkeamat pystyvät kasvamaan erittäin suuriksi. Poikkisuuntainen raudoittaminen ei varsinaisesti estäisi halkeamien syntyä, mutta se pysäyttäisi halkeaman kasvamisen.



Kuva 5.12 Pituussuuntaan haljenneita ratapölkkyjä.

Mahdollinen syy kuvan mukaisen halkeaman synnylle on raideruuviholkin pohjalla olevan vesireiän tukkeutuminen, jonka johdosta vesi ei pääse poistumaan raideruuviholkeista. Jäätyessään vesi laajenee, joka sinällään ei välttämättä riitä ratapölkyn halkeamiseen, mutta jos tällöin raideruuvia kiristetään, saattaa pölkyn halkeamiseen riittävät sivusuuntainen voima syntyä. Ongelmallista on myös raideruuviholkin pidikkeen pään katkeaminen ratapölkyn sisään valmistuksen aikana. Itse raideruuviholkin pidike ei aiheuta halkeamia, mutta kuten holkin reikään muodostuneen jään kanssa, raideruuvia kiristettäessä syntyy sivusuuntainen voima, joka aikaansaa ratapölkyn halkeamisen. Lisäksi raideruuviholkkiin kuulumaton kiinteä aines voi aikaansaada raideruuvia kiristettäessä kiilavaikutuksen, mikä voi aiheuttaa pölkyn halkeamisen. (Järveläinen 2010.) Edellä mainitut tekijät eivät kuitenkaan selitä kaikkia ratapölkyn pituussuuntaisia halkeamisia, sillä ratapölkkyjä on haljennut kyseisellä tavalla jopa niiden kuljetuksen aikana (Blomberg 2001).

Radassa on havaittu myös pölkkyjä, joissa pölkyn yläpinnassa keskellä kulkee pituussuuntainen halkeama koko pölkyn pituudelta. Kuvassa 5.13 näkyvän pölkyn halkeama ulottuu muutaman sentin syvyydelle pölkkyssä ja sen leveys vaihtelee noin 0,03-0,08 mm välillä. Kuvan pölkkyssä kiskonkiinnityksenä oli Pandroll E-clip, joten halkeaman synty ei ole todennäköisesti samanlainen kuin aikaisemmin käsiteltyjen Vosslohin kiinnitysten kanssa esiintyvien halkeamien. Mahdollinen halkeaman aiheuttaja saattaa olla voimakas lämpötilojen vaihtelu. Lämpötilan nopea lasku saa aikaan pintabetonin nopeamman kutistumisen verrattuna pölkyn sisäosiin. Tällöin pölkyn pintaan muodostuu vetojännityksiä ja halkeama saattaa syntyä. Varmuudella ei voida kuitenkaan sanoa, onko lämpötilan laskun aikaansaama betonin kutistuminen syy kuvassa näkyvään halkeamaan.



Kuva 5.13 Oikealla pituussuunnassa haljennut pölkky ja vasemmalla pölkystä halkeaman kohdalta porattu näyte.

Ainoastaan pölkyn pinnassa kulkeva halkeama ei todennäköisesti aiheuta ongelmia, mikäli halkeama ei jatka kasvuaan. Mikäli halkeama on riittävän leveä, pääsee vesi kulkeutumaan halkeamaan. Vesi voi jäätymään halkeamassa, jolloin halkeama saattaa jatkaa kasvuaan tai jäänyt vesi saattaa kiihdyttää halkeaman ympärillä olevan betonin rapautumista.

5.5 Muut

5.5.1 Valmistuksen aikaiset vauriot

Oikealla ja huolellisella valmistustekniikalla on merkitystä ratapölkyn pitkäaikaiskestävyyteen ja vaurioihin. Huolellinen ja riittävän pitkäaikainen jälkihoito on erittäin tärkeää, sillä puutteellinen jälkihoito johtaa betonin kuivumiskutistuman johdosta betonin säröilyyn. Säröily saattaa heikentää betonin pitkäaikaiskestävyyttä merkittävästi. Lisäksi ratapölkkyjä tulee käsitellä varoen hydrataatioprosessin alkuvaiheessa, koska huolimaton käsittely voi johtaa vaurioiden syntymiseen, kun betonin lujuus ei ole kehittynyt riittävästi. (Iso-Mustajärvi 2004, Jaakkola 2010, Järveläinen 2010)

Valmistuksen aikana yleisin valmistusvirhe on harvavalu. Kyseinen virhe voidaan kuitenkin havaita usein silmämääräisesti, joten yksittäisiä tapauksia lukuun ottamatta vialliset ratapölkkyt pystytään poimimaan pois jo valmistusprosessin aikana. (Järveläinen 2010, Ratahallintokeskus 1999–2002)

Suomessa käytettävissä Skl 14 kiskonkiinnityksessä betoniratapölkkyyn asennetaan valun yhteydessä muovinen raideruuviholkki. Raideruuviholkin pidikkeen pää, mikä tekee vesireiät betoniratapölkkyyn raideruuviholkkien alle, saattaa katketa ja jäädä ratapölkkyyn ratapölkyn muotista irrottamisen yhteydessä. Raideruuvia kiristettäessä ratapölkky saattaa haljeta luvussa 5.4 esitetyllä tavalla. Raideruuviholkin pidikkeen

katkeaminen on kuitenkin harvinaista. (Järveläinen 2010, Ratahallintokeskus 1999–2002)

Betoniratapölkkyjä valmistettaessa käytettävään betonimassaan saattaa päästä sinne kuulumattomia ainesosia. Vääränlainen betonin koostumus voi pienentää betonin lujuutta ja vähentää pitkäaikaiskestävyyttä. Nykyään tarkkaan valvotut tuotantoprosessit estävät kuitenkin erittäin tehokkaasti betoniin kuulumattomien aineiden pääsyn betoniin. (Järveläinen 2010)

5.5.2 Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset vauriot

Betoniratapölkkyjen varomaton käsittely rakentamisen ja kunnossapidon yhteydessä saattaa aiheuttaa ratapölkkyihin eriasteisia vaurioita. Tyypillisimmät vauriot ovat betonikappaleiden lohkeamat sekä hiushalkeamat ratapölkystä. Betonikappaleiden lohkeamiset eivät välttämättä juurikaan pienennä ratapölkyn lujuutta, mutta jänneterästen ympärillä olevan suojabetonipeitteen paksuus pienenee. Tämä saattaa johtaa ratapölkyn pitkäaikaiskestävyyden heikkenemiseen. Todennäköisin betonikappaleiden lohkeamien aiheuttaja on tuentahakut (Ratahallintokeskus 1999–2002). Myös kaivinkoneella ratapölkkyjä vaihdettaessa käytettävä kahmarikauha saattaa aiheuttaa betonikappaleiden lohkeamisia. Kuvassa 5.14 on esitetty tuentahakkujen vaurioittamia ratapölkkyjä.



Kuva 5.14 Tuentahakun vaurioittamia ratapölkkyjä.

Rakentamisen ja kunnossapidon yhteydessä tulisi varmistua oikeaoppisesta ja riittävästä tuennasta ennen kuin junat päästetään kulkemaan asennettujen ratapölkkyjen yli. Mikäli tuenta on puutteellista voi ratapölkky alkaa kantaa keskiosaltaan ja näin aiheuttaa halkeamia pölkyn yläpintaan keskelle. Kuvassa 5.15 on esitetty sepelin seulonnan jälkeinen tilanne, jossa yksittäisten ratapölkkyjen päiden alta puuttuu tuenta lähes täysin.



Kuva 5.15 Sepelin seulonnan jälkeinen tilanne, jossa yksittäisten ratapölkkyjen päiden alta puuttuu tuenta lähes täysin.

Tukikerroksen paksuuden tulisi olla vaadittu 550 mm. Suomessa on ilmennyt yksittäistapauksia, joissa ratapölkkyissä esiintyvien halkeamien aiheuttajaksi on arveltu vajaata tukikerroksen paksuutta. Vaadittua ohuempi tukikerros ei pysty vastaanottamaan toistuvia dynaamisia kuormia ja ratapölkkyjen päiden alla oleva sepeli alkaa jauhaantua. Sepelin jauhaantuminen aiheuttaa tuennan keskittymisen pölkyn keskele ja halkeamilla on edellytykset syntyä. (Ratahallintokeskus 1999b)

5.5.3 Kiskon lepopinnan kulumisvauriot

Suurten akselipainojen rautateillä Pohjois-Amerikassa on havaittu vaurioita betoniratapölkkyissä kiskon alapuolella. Vaurioita on esitetty kuvassa 5.16. Eri toimijoille suunnatussa kyselytutkimuksessa kyseinen kiskon kiinnityskohtan kulumisen/vaurioituminen (rail seat deterioration = RSD) on arvioitu kriittisimmäksi vauriotyypiksi. (Zeman et al. 2009a.) Yhdysvaltojen pohjoisosissa ja Kanadassa on havaittu kiskon lepopinnalla 10 mm tai jopa suurempia kulumia. Tämä on suuri ongelma kunnossapidon näkökulmasta, sillä jo pienikin kuluma kiskon lepopinnalla voi aiheuttaa merkittäviä ongelmia raidelevyyden oikeana säilymiseen. Lisäksi ongelman huomaaminen sen alkuvaiheessa on erittäin hankalaa ja korjaaminen kallista. Äärimmäisissä olosuhteissa betoniratapölkky voi vaurioitua kiskon alapuolelta jo 1-2 vuodessa (Zeman et al. 2009b).



Kuva 5.16 Ratapölkyn kuluminen. Kiskon kiinnityskohta on kulunut enemmän toiselta laidalta, koska ratapölkky on sijainnut kaarteessa (Zeman et al. 2009b).

Kiskon lepopinnan vaurioituminen on monimutkainen prosessi, johon on osallisena useita tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat suuret liikennöintimäärät ja nopeudet, kaarresäteet sekä radan kaltevuus. Tärkeimpinä tekijöinä ovat kuitenkin hiovan hienoaineksen läsnäolo, viileä ja kostea ilmasto sekä suuret akselikuormat. Yhdysvalloissa saatujen kokemuseräisten tietojen ja TTCI:n tekemien kokeiden perusteella hiovan hienoaineksen, viileän ja kostean ilmaston sekä suurten akselikuormien pitää kaikkien olla vaikuttavina tekijöinä, jotta kulumista tapahtuisi. Liikennöintimäärät ja nopeudet, kaarresäteet sekä radan kaltevuus vaikuttavat lähinnä kulumisen ja vaurioiden suuruuteen. (Zeman et al. 2009a, Zeman et al. 2009b)

Kiskon kiinnikkeet ja ratapölkky toimivat yhdessä pitäen kiskon paikoillaan ja tätä kautta säilyttäen kiskon oikean kallistuksen sekä raidelevyden. Kyseisen systeemin heikentyessä kiskon kiinnitys löystyy ja kisko pääsee liikkumaan toistuvien kuormitus syklien alaisena. Tämä kiihdyttää entisestään betoniratapölkyn kulumista ja sitä kautta vaurioitumista kiskon alapuolelta. (Zeman et al. 2009a, Zeman et al. 2009b)

Yhtenä tärkeimmistä betoniratapölkyn kiskon alapuolisen vaurioitumisen syistä on mekaaninen hioutuminen (abrasion). Kyseisessä tilanteessa radalla olevaa hienoainesta pääsee kulkeutumaan ratapölkyn ja välilevyn väliin. Syklisen kuormituksen alaisena hienoaines alkaa hioa betonia, jolloin sementtipasta ja betonin kiviaines alkavat kulua kuvan 5.17 mukaisesti. Kosteudella on suuri merkitys tähän, sillä kovettu-
nut betoni kestää kosteana heikommin mekaanista kulutusta (Zeman et al. 2009b).



Kuva 5.17 Sementtipasta on kulunut pois jättäen jäljelle kovemman kiviaineksen (Zeman et al. 2009b).

Yksinomaan hioutuminen ei aina pysty selittämään kaikkia vaurioita. Tästä johtuen Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa on nostettu esiin hydraulisen paineen ja pakkasra-pautumisen merkitys. Hydraulisesta paineesta johtuvia halkeamia voi esiintyä, kun välilevyjen alla oleva vesi täyttää betonin pintaosissa olevat huokokset. Kuormituksen alaisena paine aiheuttaa sisäisiä jännityksiä betoniin ja jos vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden, betoniin syntyy mikrohalkeamia. Hydraulisen paineen ja pak-

kasrapautumisen aiheuttama halkeilu saattaa kiihdyttää kulumista. (Bakharev & Struble 1997, Zeman et al. 2009a, Zeman et al. 2009b)

5.6 Konenäkö ratapölkyn kunnan arvioinnissa

5.6.1 Johdanto

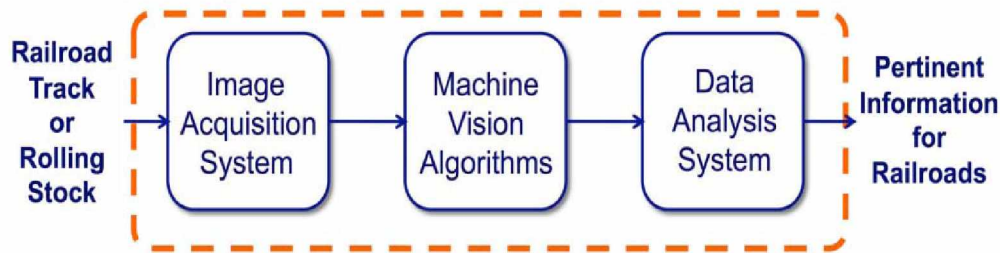
Rautatieliikenne on tärkeä kuljetusmuoto Suomessa sekä tavara- että henkilöliikenteessä. Tästä johtuen turvallisuus ja luotettavuus ovat keskeisessä roolissa ajateltaessa liikennöintiä radalla. Rautateillä tarvitaan säännöllisiä tarkastuksia turvallisen ja tehokkaan toiminnan ylläpitämiseksi. Useat tarkastustehtävät tehdään manuaalisesti ihmisvoimin. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että rautatietyöntekijä kävelee rataa pitkin ja tarkastaa visuaalisesti radan komponentteja, kuten esimerkiksi ratapölkkyjä. Tarvittaessa suoritetaan myös tarkempia tutkimuksia. Tarkastukset vaativat aikaa, jota on yhä vähemmän käytössä liikennöintimäärien kasvaessa. Liikennöintimäärien kasvaessa myös tarkastuksia joudutaan tekemään yhä useammin. Tällöin ihmistyön aikaansaama kustannuserä kasvaa entisestään. Tarkastukset vaativat myös ammattitaitoista henkilöstöä, jotka pystyvät luokittelemaan vaurioita. Silmillä tehty tarkistus on kuitenkin hyvin subjektiivinen ja riippuu hyvin pitkälti henkilön ominaisuuksista kuten vireystilasta, kokemuksesta ja koulutuksesta annettuun tarkastustehtävään.

Konenäkö (machine vision) on ihmisen näköaistia matkiva koneellinen aisti, jonka juuret ovat tutkimusmaailmassa. Tutkimusmaailmassa konenäköä kutsuttiin tietokonenäköksi (computer vision) (Soini 2011). Konenäön laitteistoja alettiin käyttää teollisuuden tarpeisiin 1980-luvulla ja konenäön sovellukset ovat jo varsin vakiintuneita menetelmiä useilla teollisuuden aloilla. Vaikka konenäköjärjestelmillä ei ole älyä tai ihmisen oppimiskykyä, pidetään niitä kuitenkin käyttökelpoisina moniin tehtäviin. Järjestelmiä käytetään tehtäviin, joissa optisen tarkastuksen pitää olla nopeaa, tarkkaa, ympärivuorokautista ja toistettavaa. Konenäöllä voidaan korvata ihmiselle raskaita rutiinitehtäviä tai tehdä ihmisen näkökyvylle mahdottomia tehtäviä käyttämällä avuksi esimerkiksi aallonpituuksia, joita ihmisen silmä ei pysty havaitsemaan. Konenäön keskeisiä käyttökohteita ovat muun muassa erilaiset laaduntarkastus, mittaus, tunnistus ja luokittelutehtävät, joten konenäköjärjestelmät ovat pääsääntöisesti kehitetty toistamaan yhtä yksittäistä tehtävää. Konenäön päätehtävä onkin pintojen tutkiminen kohdistetulta ja rajatulta alueelta. Yleistä joka tilanteeseen sopivaa konenäkötekniikkaa ei toistaiseksi ole pystytty kehittämään, mutta tietyissä tilanteissa konenäkö on saatu toimimaan hyvin. (Aguilar et al. 2005, Podder 2008.) Laitteistojen kehityksen johdosta konenäöstä on tullut potentiaalinen vaihtoehto myös rataympäristössä tehtäville tarkastuksille.

5.6.2 Konenäköjärjestelmä

Konenäköjärjestelmä voidaan karkeasti jakaa kolmeen pääelementtiin kuvan 5.18 mukaisesti. Ensimmäisenä elementtinä on kuvienhankintajärjestelmä, missä useimmiten digitaalikameralla lisävalaistusta hyödyntäen otetaan näkyvää aallonpituutta olevia valokuvia tai videokuvaa. Konenäön kannalta on ensiarvoisen tärkeää luoda kuvaamiselle suotuisat olosuhteet. Käytännössä tämä tarkoittaa oikeita valintoja kameroiden, valaistuksen, taustan ja käytettävien suurennuksien suhteen. Toisena elementtinä on kuvien analysointiin tarkoitettu järjestelmä, missä valokuvia tai videokuvaa käsitellään konenäköalgoritmia hyödyntäen. Tämän avulla erotellaan tutkittavat ja mielenkiintoiset kohteet ja arvioidaan niiden kunto. Viimeisenä elementtinä on

saadun datan analysointijärjestelmä, mikä vertaa ja vahvistaa täyttääkö tutkittava kohde sille ennalta asetetut vaatimukset. (Agullar et al. 2005, Honkala 2010, Resendiz et al. 2010)



Kuva 5.18 Konenäköjärjestelmä karkeasti jaoteltuna (Resendiz et al. 2010).

5.6.2.1 Kamera ja kuvankäsittely

Kamera kuvaa tutkittavaa kohdetta. Kamerassa on optiikka, jonka avulla kohteesta heijastuva valo siirretään valoherkälle kennolle. Kenno varautuu sähköisesti siihen tulevan kirkkauden perusteella. Kenno muodostuu suuresta määrästä varausyksiköitä, joita kutsutaan pikseleiksi. Kameran tarkkuus määräytyy pikselien määrän perusteella. Kamerat voidaan jakaa eri ryhmiin niiden toimintaperiaatteen ja niissä käytettävän tekniikan perusteella. Kennossa olevat pikselit voivat olla yhdessä rivissä eli viivana. Tällöin kamerasta käytetään nimitystä rivikamera. Pikselit voivat olla myös useassa rivissä eli matriisina, jolloin nimityksenä on matriisikamera. Kamerat voivat olla mustavalko- tai värikameroita käyttötarkoituksesta riippuen. (Honkala 2010, Konenäkö 2011.) Nykyisin konenäköjärjestelmissä käytetään kuitenkin usein mustavalkokameraa. Mustavalkokameralla kuvattavasta kohteesta saatu informaatio on usein tarkempaa verrattuna värikameralla saatuun informaatioon. Tämä johtuu siitä että värikameralla yhden pisteen tieto on hajautettu kolmelle eri kennolle, kun taas mustavalkokameratekniikassa tieto on yhdellä kennolla. Tästä johtuen myös kuvatiedon käsittely on mustavalkotekniikalla nopeampaa. (Honkala 2010)

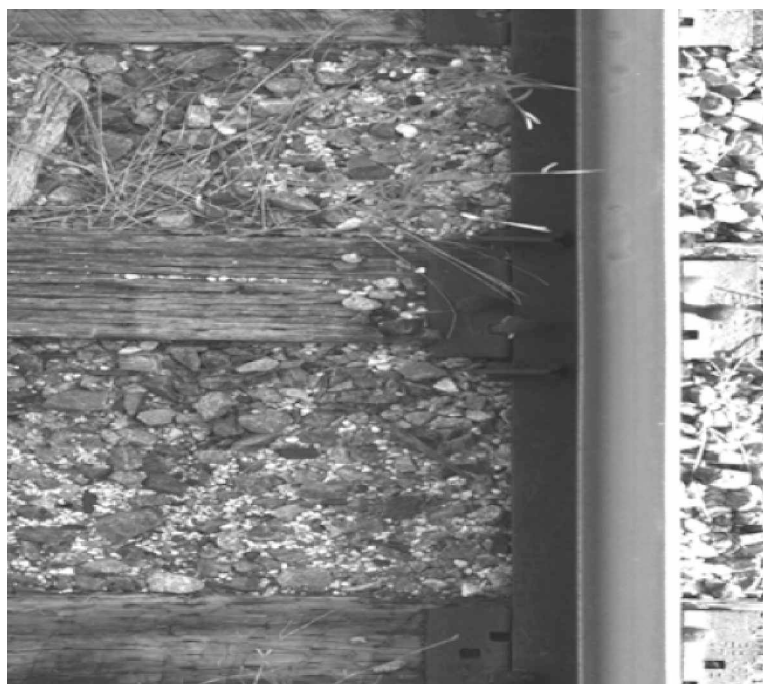
Kameroiden kuvanottotaajuus on ohjauselektronikan kehittymisen myötä kasvanut standardin videosignaalin taajuudesta, 25 kuvaa sekunnissa, moninkertaiseksi. Taajuus voi olla jopa tuhansia kuvia sekunnissa. Suurilla kuvataajuuksilla ja hyvällä erotelukyvyllä varustetuilla kameroilla voidaan kuvata tarkasti nopeasti liikkuvia kappaleita ja analysoida niiden ominaisuuksia. (Soini 2011)

Perinteisten kameroiden rinnalle markkinoille on tullut niin sanotut älykamerat. Älykamerat sisältävät koko konenäköjärjestelmän. Älykamerat koostuvat kamerasta, keskusyksiköstä kuvankäsittelyineen sekä näytöstä. Näiden kameroiden käyttäminen eri konenäkösovelluksissa on yleistynyt ja älykameroiden hankintahinnat ovat laskeneet. Ehdoton etu älykameraa käytettäessä on tietokoneen puuttuminen laitteistokokonaisuudesta. Tietokonetta tarvitaan kuitenkin älykameran ohjelmointiin, mutta pääsääntöisesti se voidaan tehdä kätevästi kannettavan tietokoneen avulla. Varjopuolena älykameroissa voidaan pitää rajallista laajennettavuutta ja muistia. (Aimonen 2010, Honkala 2010)

Kuvankäsittelyohjelmistolla kuvasta erotetaan tarvittava ja tarpeeton data. Kuva myös usein segmentoidaan, eli erotetaan tarkasteltavat kohteet ja niiden osat taustasta. Tämä nopeuttaa mittausohjelmiston ja tiedonsiirron nopeutta. (Konenäkö 2011)

5.6.2.2 Valaistus

Valaistus tuottaa olosuhteet, joissa kameran tekemä kuvaaminen voi tapahtua. Kohteen tarkan kuvaamisen ja virheettömien mittaustulosten aikaansaamisen edellytyksenä on oikea valaistus. Käytettävä valaistus on valittava huomioiden mittaamisen vaatimukset ja olosuhteet. Valaistuksen tulee olla riittävä sekä mahdollisimman tasainen ja sen on katettava koko kuva. Muutokset valaistuksessa aiheuttavat virheitä mittaustuloksiin. Ulkoisten muuttuvien varjojen ja päivänvalon vaikutus järjestelmään olisikin poistettava mahdollisuuksien mukaan. Konenäköjärjestelmässä pyritään käyttämään mahdollisimman paljon valoa, jolloin ulkoapäin tulevan valon vaikutus saadaan minimoitua. Valaistusta voidaan pitää käytön osalta haasteellisimpänä osana konenäöllä tehtävää mittausta. (Honkala 2010, Konenäkö 2011.) Nyrkkisääntönä voidaankin pitää sitä, että valaistuksen merkitys lopputulokseen konenäköjärjestelmässä on 50%, eli parhaimmillakaan laitteistoilla ei saada luotettavaa lopputulosta ilman oikeanlaista valaistusta (Honkala 2010). Kuva 5.19 esittää ympäristöstä tulevan valon aiheuttamat muutokset kuvassa olevien ratapölkkyjen pinnalla. Kuva ottamiseen on käytetty rivikameraa ja kuvaus on tapahtunut kohtisuoraan kiskoon nähden. Kuvasta voidaan havaita, että aurinko paistaa kuvasta katsoen oikealta, jolloin kiskon oikeapuoli on selkeästi kirkkaampi kuin varjossa oleva kiskon vasen puoli.



Kuva 5.19 Rivikameralla kohtisuoraan kiskoon nähden otettu valokuva (Shan 2010).

Valaistukseen vaikuttavia tekijöitä ovat kohteen materiaali, heijastuskyky ja alueen koko. Valonlähteen taajuuden eli valaistustaajuuden tulee olla vähintään viisinkertainen kuvaustaajuuteen nähden. Tällä pyritään estämään kuvan välkkyminen. Lisäksi suljinaika pyritään valitsemaan mahdollisimman lyhyeksi, jolloin mahdolliset kuvan tärinät saadaan minimoitua. (Honkala 2010)

Valitun valaistuksen on korostettava kohteen tutkittavia piirteitä. Jos kameralla tuotetussa kuvassa ei ole näkyvissä tarvittavia piirteitä, on niitä turha yrittää laskea tai estimoida esiin konenäkötyökaluilla (Aguilar 2005). Konenäköjärjestelmissä on käytössä useita valaisintyyppisiä. Yleisimmin käytetyt valaisimet ovat niin sanottuja fluo-

risoivia valaisimia, kuten loisteputket. Ne ovat halpoja ja pitkäikäisiä. Usein kuitenkin led-valonlähteet ovat paras vaihtoehto konenäköjärjestelmiin. Ledien hankintakustannus on korkea, mutta sitä kompensoi ledien pitkä käyttöikä, joka voi olla jopa yli 50000 tuntia. Lisäksi konenäkösovelluksissa on käytetty halogeenivalaisimia. Halogeenivalaisimet ovat erittäin kestäviä ja tehokkaita, joten ne sopivat hyvin erilaisten pintojen valaisemiseen. Haittapuolena halogeeneissa on niiden hankintahinta, joskin eri valaisintyyppien hankintahinnat ovat valaisintyyppistä riippumatta vain pieni osa konenäköjärjestelmän kokonaishinnasta. Nopeissa sovelluksissa, joissa kuvattava kohde halutaan pysäyttää kuvauksen ajaksi, voidaan käyttää strobo-valaistusta. Strobovalon haittapuolena on sen tahdistaminen kameran kanssa ja valaisimen varsin lyhyt käyttöikä. Lisäksi on olemassa joukko erilaisia röntgen-, ultraviolett-, infrapuna- ja laservalaisimia eri sovellusten ja kameroiden tarpeen mukaan. (Honkala 2010)

5.6.2.3 Konenäköjärjestelmän kalibrointi ja ylläpito

Kun konenäköjärjestelmällä halutaan tehdä luotettavia mittauksia, on järjestelmä kalibroitava huolellisesti käyttöä varten. Kalibroinnista ja laitteiston toiminnasta on huolehdittava säännöllisesti myös käytön aikana. Tällä varmistetaan mittauksista saatavan tiedon oikeellisuus myös pitemmällä aikavälillä. Kalibrointi voidaan tehdä käyttämällä tarkkoja testikappaleita tai esimerkiksi kalibrointia varten tehtyjä pistematriiseja eli niin sanottuja tähyksiä. Pistematriisien avulla voidaan algoritmeja hyödyntäen laskea millimetri-pikselisuhde ja kamerassa käytettävän objektiivin ja kuvakulman aiheuttama epälineaarinen- sekä perspektiivivirhe. Korjaustieto on tärkeää kun halutaan tehdä tarkkoja mittauksia koko kuva-alalle. (Aimonen 2010.) Varsinkin laajakulmaisilla kameroilla otetuissa kuvissa kuvan reuna-alueille saattaa syntyä vääristymiä.

5.6.2.4 Konenäön hyödyt ja haitat

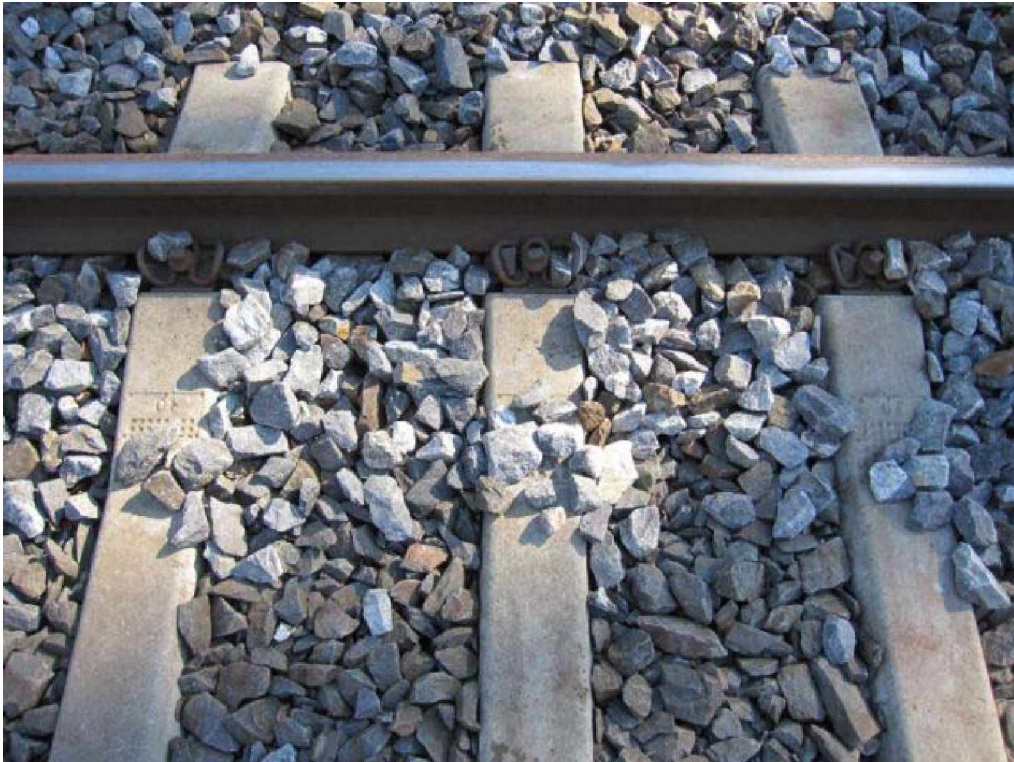
Teollisuudessa konenäköä on perinteisesti käytetty erityisesti laaduntarkastuksessa. Ihmisen tekemänä tämä työ on usein kallista, hidasta, ylimalkaista ja epätarkkaa. Ihmisen tekemä työ ei useinkaan yllä kontrolloiduissa olosuhteissa konenäöllä saavutettavaan tarkkuuteen ja ihmisen työn tulos vaihtelee muun muassa kokemuksen, vireyden ja motivaation mukaan. Työn tulos perustuu usein yleisilmeeseen ja ihmisen kykyyn yhdistellä tietämiään asioita ympäröivästä maailmasta. Koneilta puuttuu tämä näkemys, mutta toisaalta ne pystyvät suorittamaan samaa tehtävää väsymättä täysin objektiivisesti ja mukautuvat viiveettömästi esimerkiksi vaihtuviin standardeihin. (Aguilar et al. 2005, Edwards et al. 2009, Mohammad 2008, Podder 2010, Sawadisavi et al. 2008.) Konenäköjärjestelmän avulla saatu data voidaan myös taltioida helposti, jotta aikaisemmin saatuja tutkimustuloksia voidaan hyödyntää helposti myöhemmissä analyyseissä. Datan helppo taltiointi onkin selkeä etu verrattuna ihmisvoimin tehtyihin tarkastuksiin. Esimerkiksi rataympäristössä taltioitu data helpottaa pitkällä aikavälillä radan ja komponenttien kunnan kehittymisen seuranta ja johtaa näin parempien kunnossapitostrategioiden laatimiseen ja parempaan ymmärrykseen radan rakenteiden heikkenemisestä ja vaurioitumisesta. Taltioitujen datan perusteella voidaan muun muassa arvioida vähemmän kriittisten vaurioiden vaikutus kriittisten vaurioiden esiintymiseen. Esimerkiksi jos rataosalla on ratapölkkyjä, joista puuttuu kiskonkiinnityksiä, voidaan tarkastuksessa myös tutkia onko tällä rataosalla murtuneita ratapölkkyjä. Tämä on erittäin hankalaa perinteisillä tarkastusmetodeilla varsinkin laajempaa aluetta tutkittaessa. (Edwards et al. 2009, Resendiz et al. 2010, Sawadisavi et al. 2009)

Konenäköjärjestelmän heikkoutena voidaan pitää epätavallisten ja ennenäkemättömien olosuhteiden, vaurioiden ja komponenttien tutkimista. Edellä mainittujen asioiden johdosta konenäköjärjestelmä ei välttämättä reagoi selkeään vaurioon, mikäli vaurio poikkeaa järjestelmään ohjelmoiduista vaurioista. Lisäksi ulkoilmassa tapahtuvassa kuvauksessa kohteeseen kohdistuvan valon kontrollointi on erityisen tärkeässä roolissa ja se saattaa aiheuttaa merkittävän epävarmuustekijän saataviin tuloksiin. (Resendiz et al. 2010)

5.6.3 Konenäkö rautatieympäristössä

Rautatieympäristö sisältää runsaasti dynaamista liikettä ja paljon muita potentiaalisia häiriötekijöitä konenäkölle. Tällaisissa olosuhteissa kuvatedon kerääminen on melko monimutkainen ja haastava tehtävä. Esimerkiksi pelkästään radalla kulkevan laitteiston varustaminen tarvittavien kuvien ottamiseen kalibroidulla kameralla on erittäin monimutkainen ja haastava tehtävä. Radalla tapahtuvaa testausta hankaloittaa muuttuvat ympäristöolosuhteet, kuten luonnonvalon intensiteetin vaihtelut ja erilaiset sääolosuhteet. Esimerkiksi vesi tai lumi muuttaa kuiviin olosuhteisiin verrattuna merkittävästi kuvattavan pinnan heijastusominaisuuksia. (Edwards et al. 2009, Yella et al. 2006)

Konenäköteknologian kehittymisen myötä nykyään käytettävissä olevat kamerat ovat kompaktimpia, kyvykkäämpiä ja erittäin tehokkaita verrattuna esimerkiksi 2000-luvun alun kameroihin. Rautatieympäristössä tämä mahdollistaa tarvittavan informaation keräämisen useiden komponenttien osalta. Osaltaan kameroiden kehittyminen onkin edesauttanut erinäisten konenäkösovellusten tuloa rautatieympäristöön. Erityisesti konenäköjärjestelmiä on kehitetty, tai parhaillaan kehitetään, muun muassa kaluston, kiskojen, kiskonkiinnitysten kuin myös ratapölkkyjen tutkimiseen. Huomionarvoista on kuitenkin se, että konenäköjärjestelmän kehittämisen hankaluus riippuu pitkälti siitä, mihin kohteisiin tutkimus keskitetään, sillä kehittämisen haastavuus vaihtelee tutkimuskohteittain. Esimerkiksi kiskon pinnan tai ratapölkkyjen kuvaaminen tarvitsevat erilaisen kameroiden sijoittelun. Tämä tarkoittaa sitä, että yleistä koko radan kattavaa kuvauslaitteistoa on lähes mahdotonta kehittää. Esimerkiksi kiskon pinnan tutkiminen muun muassa säröjen osalta onnistuu nykykalustolla jo melko hyvin, kun taas ratapölkkyissä esiintyvien vaurioiden havaitseminen on huomattavasti hankalampaa. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi kiskon pinta on huomattavasti tasaisempi, yksinkertaisempi, melko hyvin valoa heijastava ja vaadittavan kuvan laajuus on pienempi verrattuna ratapölkkyyn. Näin ollen poikkeavuudet ovat helposti havaittavissa. Ratapölkkyistä otetut kuvat sisältävät runsaasti erilaisia yksityiskohtia. Ratapölkkyjä on valmistettu eri profiileilla ja kiskonkiinnitysjärjestelmillä. Myös ratapölkyn pintaväri saattaa vaihdella pölkyn iän ja sijainnin mukaan. Lisäksi ratapölkkyjen päällä saattaa olla esimerkiksi kuvan 5.20 mukaisesti raidesepeä, lehtiä jne., jotka saattavat hankaloittaa kuvien tulkintaa. Pölkyn päällä olevat näkemäesteet estävät betonipinnan havaitsemisen ja pölkyn pintaan muodostuvat varjot saattavat vaihdella. Tästä johtuen konenäkösovellusten kehittäminen juuri ratapölkkyjen tutkimiseen on erittäin hankalaa sisältäen useita ratkaisua vaativia ongelmia. Tämä on osasy siihen, että erityisesti betoniratapölkkyjen tutkimiseen kehitettyjä sovelluksia on hyvin vähän käytössä. (Podder 2010, Resendiz 2010, Yella et al. 2006)



Kuva 5.20 Ratapölkyn päälle kulkeutunutta raidesepeliä.

5.6.3.1 Kiskon kiinnityksen tutkiminen

Junien raiteilta suistumiset ovat aiheuttaneet vakavia onnettomuuksia eripuolilla maailmaa. Junien turvallisuuden kannalta erittäin tärkeä komponentti on kiskonkiinnitys, joka kiinnittää kiskon ratapölkkyyn. Liikennöinnin aikaansaamat toistuvat iskut ja värähtelyt voivat kuitenkin kuluttaa tai jopa rikkoa kiskonkiinnitysosia. Tämän johdosta myös ehjiin kiskonkiinnityksiin kohdistuu suurempia rasituksia ja kiskonkiinnitysten vauriot saattavat johtaa pahimmillaan vakaviinkin onnettomuuksiin. Tästä johdetaan kiinnitysten säännöllinen kunnan seuranta on keskeisessä roolissa niin turvallisuuden, kuin taloudellisuuden kannalta. (Hsiang-Yu et al. 2007)

Kuten muissakin konenäkösovelluksissa eri rataosuuksilla muuttuvat ympäristötekijät hankaloittavat konenäön hyödyntämistä kiskon kiinnitysjärjestelmien tutkimisessa. Esimerkiksi kiskon ja kiskonkiinnitysosien ruostuminen aiheuttaa molempiin samanlaisen värin. Tämä hankaloittaa eri osien tunnistamista konenäkösovelluksissa. Lisäksi tunnistusta ulkoilmassa hankaloittaa erityisesti auringonvalon aikaansaamat varjot, mitkä vaihtelevat merkittävästi säätilan, vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. (Hsiang-Yu et al. 2007)

Hsiang-Yu et al. (2007) tekemässä tutkimuksessa pyrittiin kehittämään konenäkösovellusta kiskonkiinnitysten kunnan tutkimiseen. Tutkittavana oli Vosslohin kiskonkiinnitysjärjestelmä. Konenäköjärjestelmää testattiin kolmella eri rataosuudella sijainneilla koealueella ja kuvien ottamiseen käytettiin värikameraa. Kuvainformaation hankkimisen jälkeen järjestelmän toiminta voitiin jakaa viiteen eri vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa värikameralla otetut kuvat esikäsiteltiin muuttamalla ne harmaasävykuviksi. Tämän jälkeen kuvankäsittelyä hyödyntäen kuvista poistettiin mahdollisen kohinan aiheuttamia virheitä ja kuvien kontrastia kasvatettiin. Kuvan käsitteilyllä pyrittiin vähentämään kohinasta tai puutteellisesta valaistuksesta johtuvia tunnistusvirheitä. Toisessa vaiheessa kuvista tutkittiin harmaasävyjen vaihteluita.

Harmaasävyjen muutosten perusteella pyrittiin tunnistamaan kiskon reunat. Kolmannessa vaiheessa tunnistettiin kiskonkiinnityksen reunat. Neljännessä vaiheessa kuvista tarkennettiin kiskonkiinnitysten reunojen sijaintia, minkä jälkeen objektin etsimiseen tehty algoritmi valitsi kiskon kiinnityksen. Viidennessä vaiheessa kiskonkiinnityksestä etsittiin seitsemän pistettä. Näiden seitsemän pisteen perusteella ja tunnusalgoritmin avulla pystyttiin selvittämään onko kiskonkiinnitys kiinni, irti vai rikkoutunut. Jokaisen vaiheen onnistumisprosentti vaikutti lopullisen tunnistuksen luotettavuuteen. Toisin sanoen, mikäli jokaisen edellä mainitun vaiheen onnistumisprosentti oli 100, oli lopullinen tunnistusprosentti tasan 100. Jos jokaisen vaiheen tunnistusprosentti oli kuitenkin esimerkiksi noin 90, saattoi lopullinen tunnistusprosentti olla vain noin 70. (Hsiang-Yu et al. 2007)

Kaikkien kolmen koeosuuden tunnistuksen keskiarvo oli 77 % koekuvien määrän ollessa yhteensä 75. Tutkimuksessa esitettiin useita syitä, mitkä saattoivat aiheuttaa tunnistuksen epäonnistumisen. Esimerkiksi lika kiskon ja kiskonkiinnitysten ympärillä saattoi vaikeuttaa reunojen tunnistamista. Lisäksi puutteellinen valaistus ja kameran sijoittelu saattoivat heikentää tunnistamisen onnistumista. Tällöin kuvassa kiskonkiinnityksen ja taustan pikselit olivat sävyiltään hyvin samankaltaisia. Myös kiinnitysten ruostuminen ja ruostepigmentin leviäminen saattoivat hankaloittaa oikean lopputuloksen saamista. Esimerkiksi osuudella, jossa kiinnitykset olivat hyväkuntoisia ja väriltään punaisia onnistuttiin kokeessa tunnistamaan 90 % kiinnityksistä. (Hsiang-Yu et al. 2007)

Myös Singh et al. (2006) ovat pyrkineet kehittämään kiskonkiinnityksen tunnistamisjärjestelmää, missä videokuvasta pyritään löytämään kiskonkiinnitykset ja tämän jälkeen arvioimaan onko kiskonkiinnitys ehjä. Lisäksi kiskonkiinnityksen värin perusteella pyritään arvioimaan onko kiskonkiinnitys vanha vai uusi. Tarkoituksena vanhan ja uuden kiinnityksen tunnistamisella oli helpottaa kiinnitysten vaihdosta vastuussa olevien henkilöiden päätöksentekoa vaihdettavista kiinnitysosista. Tutkittavana kiinnitysjärjestelmänä oli Pandrol e-clip. Kuva 5.21 esittää videokuvasta otettuja yksittäisiä kuvia.



Kuva 5.21 Videokuvasta otettuja yksittäisiä kuvia. Vasemmalla vanha kiinnitysjousi ja oikealla lähes uusi kiinnitysjousi (Singh et al. 2006).

Tässä kehitystyössä kuvien esikäsittely kiskonkiinnityksen tunnistamiseksi sisälsi kolme vaihetta. Esikäsittely sisälsi kuvan pehmentämisen/tasoittamisen (smoothing). Kuvan pehmentämisellä pyrittiin vähentämään kuvan pikseleissä esiintyvää kohinaa kuitenkin niin, että kuvassa oleva oleellinen tieto ei häviäisi. Toisena vaiheena oli reunantunnistus (edge detection). Reunantunnistuksessa kuvasta pyrittiin havaitsemaan kaikkien oleellisten osien reunat/rajat. Kolmannessa vaiheessa jokaisen toisistaan eroavan alueen rajalle piirrettiin yhden pikselin levyinen viiva. Koska tutkittavana oli vain kiskonkiinnitys, voitiin osa havaituista rajoista jättää analyysin ulkopuolel-

le. Tällöin kaikki rajapinnoilla olevat tiettyä raja-arvoa lyhyemmät viivat poistettiin. Esikäsittelyn jälkeen voitiin soveltaa muita algoritmeja kiinnitysrousien havaitsemiseen ja niiden kunnan määrittämiseen. (Singh et al. 2006)

Kokeessa käytettiin videokameraa ja valonlähdettä, jotka olivat kiinnitetty junan pyörän viereen. Koe tehtiin Lontoon ja Heathrown lentokentän välisellä rataosuudella. Kokeessa ympäristöstä tuleva valo aiheutti merkittäviä ongelmia valaistukseen ja sitä kautta videokuvan luotettavuuteen. Valaistus oli ongelmallista erityisesti ulkoilmassa, joten lopulliseen analyysiin otettiin vain osuudet, joissa juna kulki tunnelissa. Analysoitujen videonpätkien pituus vaihteli minuutista puoleentoista minuuttiin. (Singh et al. 2006)

Taulukko 5.2 esittää kokeessa saadun tarkkuuden kiskonkiinnityksen havaitsemiseen. Kaikkien videoiden perusteella 95 % paikallaan olleista kiskonkiinnityksistä havaittiin.

Taulukko 5.2 *Kiskonkiinnitysrousien havainnointitarkkuus eri osuuksilla. (Singh et al. 2006)*

Video	Kuvat	Jousia videolla	Havaitsematta jääneet jouset	Tarkkuus
Vo1	2000	2303	36	96,9 %
Vo2	1500	2106	62	94,1 %
Vo3	2000	2750	48	96,5 %
Vo4	1375	1802	97	89,2 %
Vo5	2000	2533	28	97,8 %
Vo6	2000	2675	64	95,2 %
Vo7	2000	3070	42	97,3 %

Taulukko 5.3 esittää eri osuuksilla saavutetun tarkkuuden uusien väriltään sinisten kiinnitysrousien havaitsemiseen. Kaikkien videoiden perusteella sinisten jousien havainnointitarkkuus oli 86,5 %. Taulukko 5.4 esittää vanhempien väriltään harmaiden kiinnitysrousien havainnointitarkkuuden. Harmaat jouset havainnoitiin keskimäärin 95,3 % tarkkuudella. Tutkimuksessa arvioitiin, että siniset jouset havaittiin huonommin niiden sinisen värisävyn vaihteluiden johdosta. (Singh et al. 2006)

Taulukko 5.3 *Uusien, väriltään sinisten kiskonkiinnitysrousien havainnointitarkkuus eri osuuksilla (Singh et al. 2006).*

Video	Kuvat	Havaitut siniset jouset	Tarkkuus
Vo1	2000	21/28	75,0 %
Vo2	1500	245/273	89,7 %
Vo3	2000	1827/1940	94,2 %
Vo4	1375	498/570	87,4 %
Vo5	2000	181/186	97,3 %
Vo6	2000	73/97	75,3 %
Vo7	2000	336/387	86,8 %

Taulukko 5.4 Vanhojen, väriltään harmaiden kiskonkiinnitysrousien havainnointitarkkuus eri osuuksilla (Singh et al. 2006).

Video	Kuvat	Havaitut harmaat jouset	Tarkkuus
V01	2000	2264/2275	99,5 %
V02	1500	1810/1833	98,7 %
V03	2000	662/810	81,7 %
V04	1375	1176/1232	95,5 %
V05	2000	2280/2347	97,1 %
V06	2000	2556/2578	99,1 %
V07	2000	2561/2683	95,5 %

Tutkittavilla rataosuuksilla ei puuttunut yhtään kiinnitysrousta. Tästä johtuen videokuvissa osa ratapölkyistä korvattiin kuvaeditoinnin avulla pölkyillä, joista puuttui kiinnitysrousset. Keskimäärin noin 10 % kiinnitysrousista poistettiin. Taulukko 5.5 esittää tarkkuuden, jolla puuttuvat jousset havaittiin eri osuuksilla. Taulukosta voidaan havaita, että puuttuvat jousset havaittiin keskimäärin 84,7 % tarkkuudella. (Singh et al. 2006)

Taulukko 5.5 Puuttuvien kiinnitysrousien havaitseminen (Singh et al. 2006).

Video	Kuvat	Havaitut puuttuvat jouset	Tarkkuus
V01	2000	179/200	89,5 %
V02	1500	131/150	87,3 %
V03	2000	182/200	91,0 %
V04	1375	119/138	86,2 %
V05	2000	174/200	87,0 %
V06	2000	157/200	78,5 %
V07	2000	148/200	74,0 %

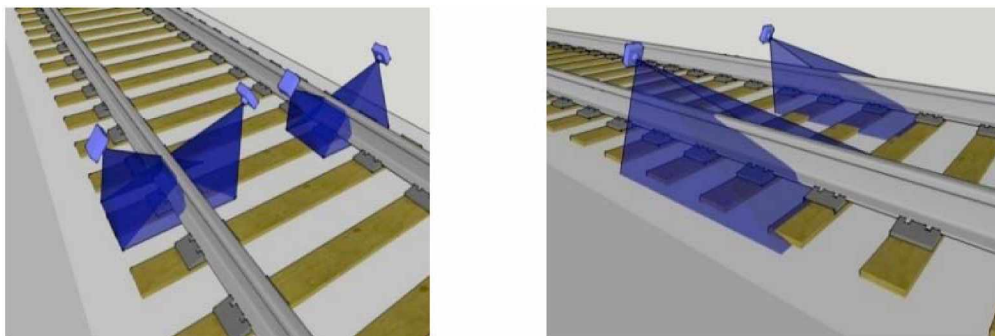
Tutkimuksen perusteella konenäkö on kokonaisuudessaan potentiaalinen vaihtoehto kiskonkiinnitysten kunnon seuraamiseen. Varsinkin kun konenäkötekniikka kehittyy jatkuvasti, kasvaa samalla myös analyysin luotettavuus. Tällä hetkellä luotettavuudessa on vielä puutteita. Hankalissa tilanteissa, joissa konenäkö ja analysointiohjelmit eivät pysty tulkitsemaan automaattisesti kuvaa, voidaan tulkinnassa käyttää apuna perinteistä ihmisenäköä. (Singh et al. 2006)

The University of Central Florida on kehittänyt Florida Department of Transportationin kanssa konenäköjärjestelmää, millä pystytään tutkimaan kiskojen pinnan säröilyä, puuttuvia tai väärässä kulmassa olevia aluslevyjä, kiskonkiinnitysten paikallaan oloa ja poikkeavaa raidelevyyttä. Tällä hetkellä kamerat ja mittauslaitteisto on kiinnitetty kuvassa 5.22 esitettävään pieneen kiskoilla liikuteltavaan vaunuun, mutta tarkoituksena tulevaisuudessa on kehittää järjestelmää siten, että se pystyttäisiin asentamaan kiskoilla kulkevaan ajoneuvoon. (Edwards et al. 2009, Sawadisavi et al. 2009)



Kuva 5.22 Kiskoilla liikuttettava vaunu, johon kamerat ja mittalaitteet ovat asennettu (Edwards et al. 2009).

Kerättävä data on videokuvaa, ja järjestelmässä käytetään strobovaloja, lasereita ja aurinkosuojia optimaalisten valaistusolojen saavuttamiseksi. Järjestelmässä on myös GPS-paikannus, minkä avulla pystytään paikantamaan mitattavan kohteen sijainti riittävällä tarkkuudella. (Sawadisavi et al. 2008.) Käytettävänä kameroina ovat videokuvaa ottavat area-scan-kamerat. Area-scan-kameroilla kuvataan pääsääntöisesti laajaa aluetta, jolla valaistuksen pitäisi olla tasainen ja valon intensiteetin riittävä. Kehitetyssä järjestelmässä kamerat ovat kuitenkin suhteellisen lähellä kohdetta. Suurimpana syynä tähän on se, että kauempana sijaitsevan kameran kanssa riittävän aurinkosuojan rakentaminen olisi selkeästi haastavampaa. Kuva 5.23 esittää tutkimuksissa käytetyt kameroiden sijoittelut.



Kuva 5.23 Vasemmalla kamerat ovat suunnattu kuvaamaan kiskoon nähden poikittaisessa suunnassa ja oikealla kamerat kuvaavat kiskon suunnassa (Resendiz et al. 2010).

Kiskon molemmin puolin sijaitsevilla kameroilla saatiin hyvää kuvaa aluslevystä, ratanauloista ja kiskoankkureista. Kiskon suuntaisesti kuvattavalla kameralla saatiin hyvää kuvaa kiskosta ja kiskon suuntainen kuvaaminen myös paransi naulojen ja kiskoankkureiden mittauksen tarkkuutta. (Edwards et al. 2009, Resendiz et al. 2010, Sawadisavi et al. 2008)

Tutkimuksissa todettiin, että kameran sijoittelu ja tätä kautta kuvakulma olivat tärkeässä roolissa, jotta haluttu tieto saatiin kuvista helposti. Valaistusolosuhteet aiheuttivat kuitenkin ongelmia. Eri kulmista tullut valo aiheutti poikkeavia varjoja tutkittavalle alueelle johtaen virheellisiin tuloksiin reunan tunnistuksen ja näin ollen kokonaistunnistuksen osalta. Myös kuvien kylläisyys aiheutti ongelmia. Liian kylläisissä kuvissa sepelin ja pölkyn tekstuurit eivät erottuneet kunnolla. Ongelmista johtuen laitteistoa pyritään parantamaan valaistuksen osalta. Lisäksi tunnistustehtäviin käytettyjä algoritmeja tulee parantaa. (Edwards et al. 2009, Resendiz et al. 2010)

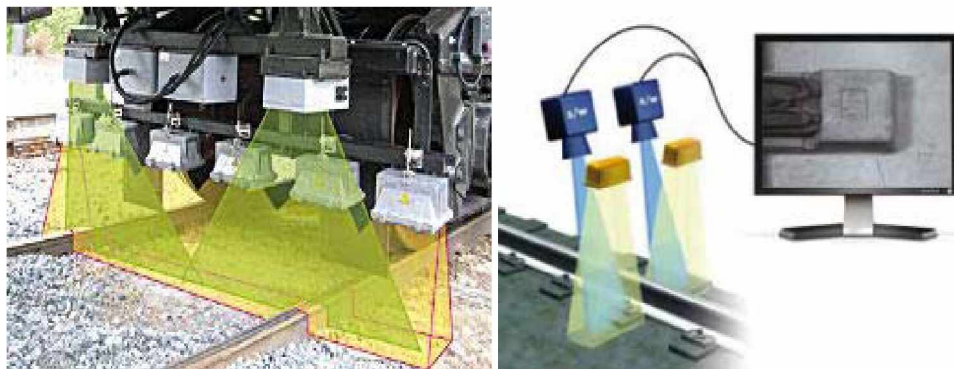
Aguilar et al. (2005) ovat kehittäneet ratapölkkyjen dimensioiden mittaamiseen stereonäköjärjestelmän (stereo vision system). Kehitetyn stereometrisen järjestelmän on tarkoitus mitata betoniratapölkkyjen vapaamuotoista pintaa sekä kiskonkiinnitysten mittatoleransseja. Järjestelmä mahdollistaa kosketuksettoman mittauksen ja on tarkoitettu käytettäväksi lähinnä betoniratapölkkyjen tuotannossa tapahtuvaan laadunvalvontaan. Järjestelmä hyödyntää 3D kuvia, joiden avulla voidaan mitata muun muassa kiskonsijan ja kiskonkiinnitysten sijaintia valmistusvaiheessa. Digitointi sisältää kahden kuvan ottamisen molemmilta puolilta ratapölkkyä sekä informaation prosessoinnin. Järjestelmän kuvan otto perustuu kahteen kameraan ja valoprojektoriin. Mittausten tarkkuus on todettu kontrolloiduissa olosuhteissa useilla eri kohteilla tehdyissä testeissä erittäin hyväksi.

5.6.3.2 Kaupallisten yritysten tarjoamat konenäköjärjestelmät

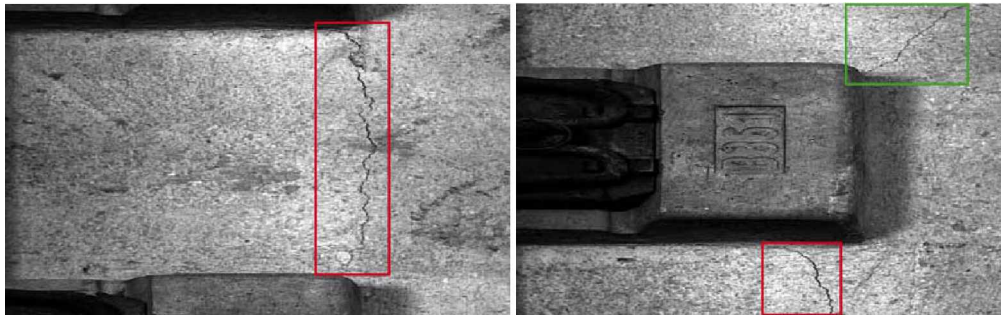
Rautateillä esiintyvien ongelmien myötä markkinoille on tullut yrityksiä, jotka tarjoavat konenäköjärjestelmiä erityyppisten vaurioiden ja puutteiden havaitsemiseksi. Järjestelmiä tarjoavia yrityksiä ovat muun muassa BvSys, Beena Vision, Ensco, Mermec, P-tech ja STI-Global. Nämä yritykset tarjoavat tuotteita ja palveluita, joiden avulla pystytään tarkastamaan esimerkiksi radan komponentteja ja geometriaa. Erityisesti BvSys, Mermec ja STI-Global tarjoavat järjestelmiä, joilla voidaan tutkia ratapölkkyjen kuntoa.

BvSys

Saksalaisen yrityksen nimeltä BvSys tarjoama Railway Inspection System tarjoaa joi-tain varteenotettavia sovelluksia raiteen tutkimiseen. Järjestelmä pystyy havaitsemaan muun muassa puuttuvat kiskonkiinnitykset ja vauriot ratapölkkyissä ja mittaamaan raidelevyyden. Automaattinen tarkastusjärjestelmä pystyy havaitsemaan halkeaman ratapölkkyissä nopeuden ollessa jopa 200 km/h. Järjestelmä koostuu neljästä korkearesoluutioisesta rivikamerasta (kuva 5.24), jotka on sijoiteltu siten, että ne pystyvät ottamaan valokuvat kiskojen oikealta ja vasemmalta puolelta. Kuvien ottoa kontrolloidaan vaunun pyörään kiinnitetyn laskurin avulla, joka reagoi vaunun nopeuteen ja säättää kuvanottotaajuutta sen mukaan. Laitteisto voidaan kiinnittää liikkuvan kaluston teliin tai muuhun kuljetusvälineeseen. Järjestelmän pitäisi pystyä havaitsemaan jopa erittäin pienet halkeamat pölkkyissä (kuva 5.25). Saadut kuvat arvioidaan modernin kuvankäsittelyalgoritmin avulla. Vian tyyppi luokitellaan automaattisesti ja tulos toimitetaan heti tutkimuksen jälkeen esimerkiksi kunnossapidon hyödyntämään tietokantaan. (BvSys 2011, Podder 2010)



Kuva 5.24 Vasemmalla laitteisto kiinnitettynä kalustoon ja oikealla periaatekuva kameroiden ja valaisimien sijoittelusta (BvSys 2011).



Kuva 5.25 Vasemmalla järjestelmän havaitsema halkeama ratapölkkyssä ja oikealla havaittuja halkeamia kiintoraiteessa (BvSys 2011).

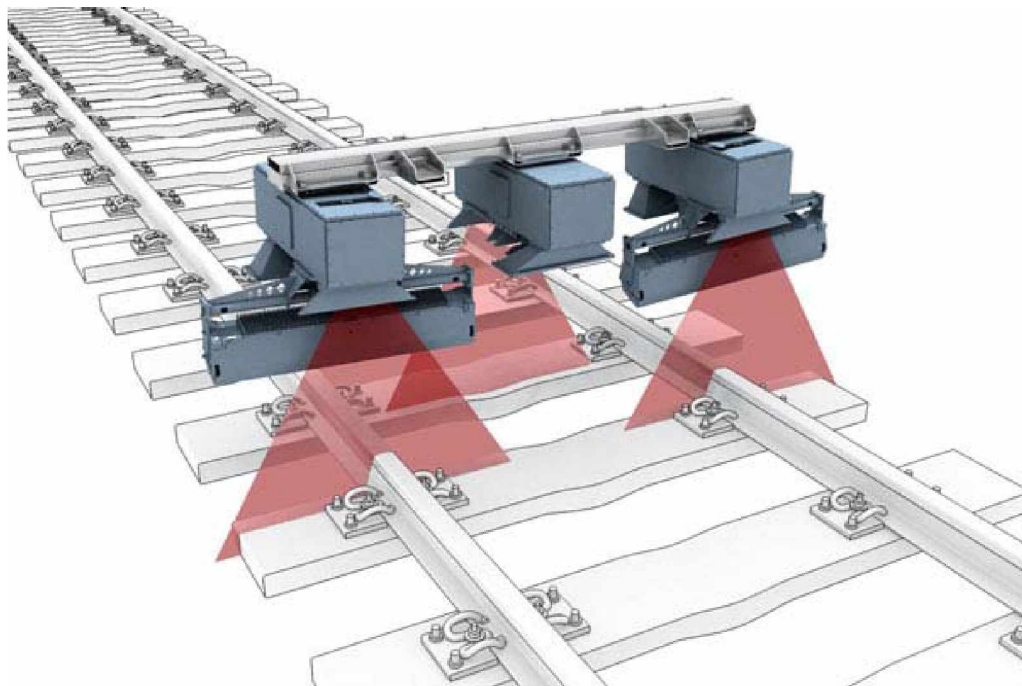
Järjestelmän etuja ovat:

- korkeanresoluution omaavat kamerat (0.4 x 0.5 mm)
- korkea tunnistusaste
- alhainen virheellisten tunnistusten aste
- helppokäyttöisyys
- alhaiset ylläpitokulut
- todistettu sopivuus radalla liikkuvaan kalustoon

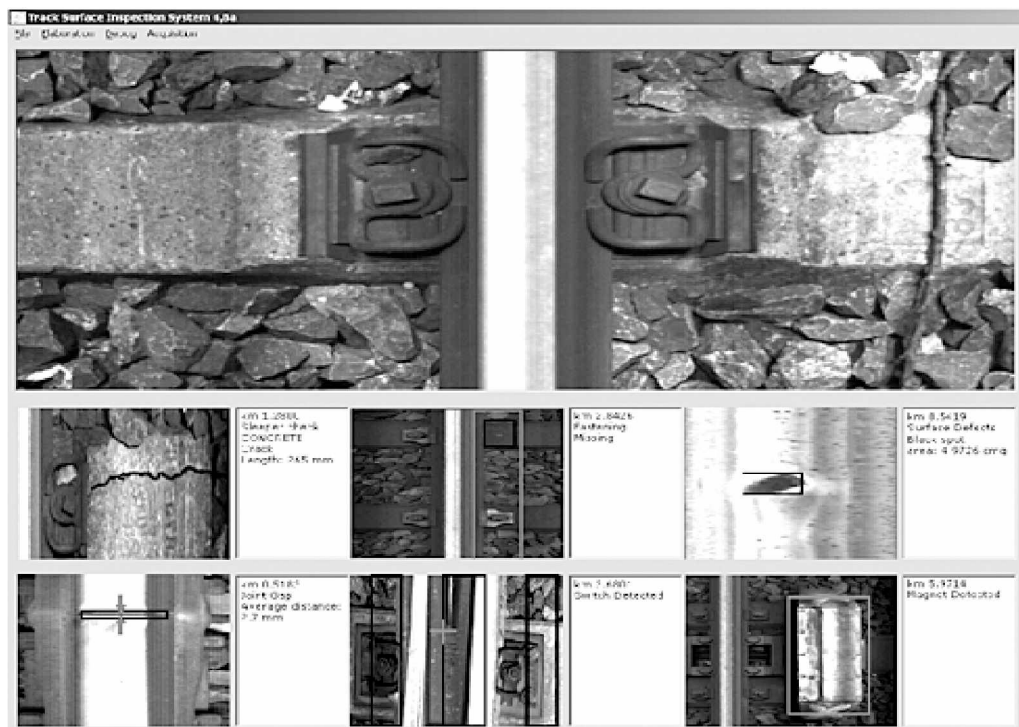
MerMec Group

Italialainen MerMec Group, joka on erikoistunut toimittamaan integroituja ratkaisuja rautateiden diagnostiikan eri osa-alueille, on kehittänyt radan tutkimiseen käytettävän järjestelmän, nimeltään V•CUBE. V•CUBE sisältää kolme alajärjestelmää: Track Surface Inspection System, Track Surface Measuring System ja Track Head Inspection Systems. Laitteisto voidaan asentaa mihin tahansa radalla liikkuvaan kulkuneuvoon ja se pystyy toimimaan aina 200 km/h nopeuteen asti. Järjestelmällä pystytään havaitsemaan muun muassa pölkkytyyppi ja mahdollinen pölkyn liikkuminen ajan saatossa, tutkimaan ja luokittelemaan kiinnitys- ja pintavaurioita, tarkistamaan poikkeavuudet sepelissä ja kasvillisuudessa sekä määrittämään aluslevyn kunto. (Merme Group 2010, MerMec 2011, Sawadisavi et al. 2009)

MerMec Gropin tarjoama Track Surface Inspection System hyödyntää suurnopeusrikkameroita. Järjestelmä sisältää kuvien oton, varastoinnin ja kuvien reaaliaikaisen analysoinnin. Parannetut algoritmit tekevät mittauksia ja luokittelevat vaurioita vaurioiden ominaisuuksien ja/tai niiden sijainnin mukaan. TSIS pystyy havaitsemaan useita ongelmia radalla, kiskon vaurioista aina poikkeamiin tukikerroksessa, kiskonkiinnityksissä ja ratapölkkyissä. Järjestelmä pystyy esimerkiksi havaitsemaan kiskoista säröt, jotka ovat leveydeltään suurempia kuin 0,5-1 mm ja pituudeltaan yli 20 mm. Betoniratapölkkyissä pienin havaittava halkeamaleveys on noin 1 mm halkeaman pituuden ollessa vähintään 50 mm. (Merme Group 2010, MerMec 2011, Podder 2010) Kuvassa 5.26 on esitetty periaatekuva käytettävän laitteiston sijoittelusta ja kuvassa 5.27 on järjestelmän hyödyntämä ohjelmisto.

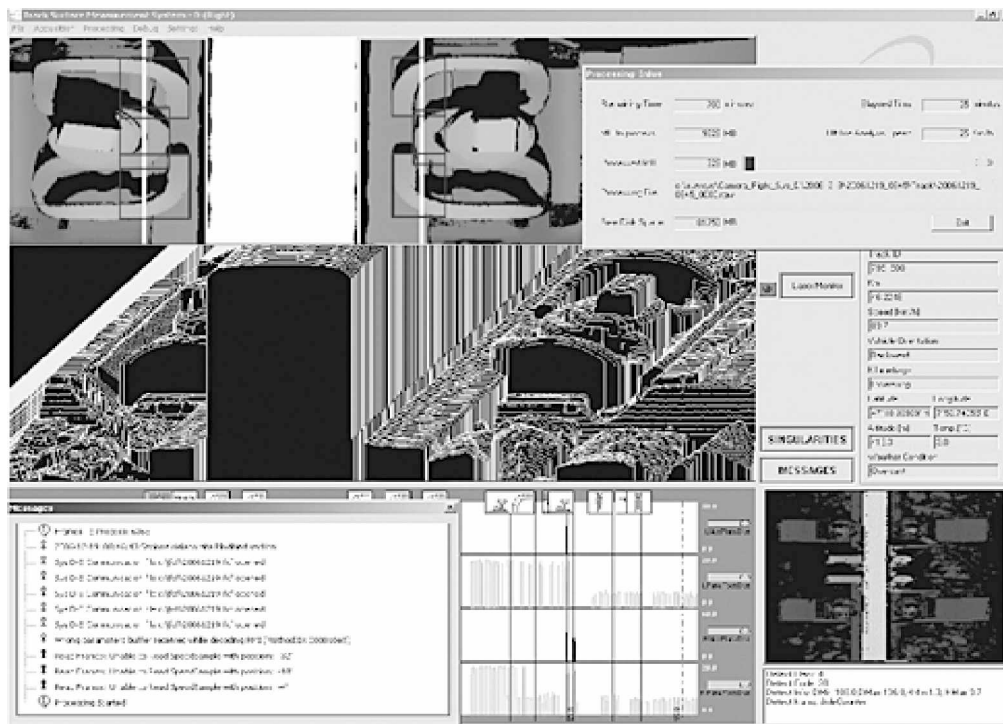


Kuva 5.26 Periaatekuva laitteiston sijoittelusta (MerMec 2011).



Kuva 5.27 Track Surface Inspection Systemsin hyödyntämä ohjelmisto (MerMec 2011-2).

MerMec Groupin Track Surface Measuring Systems on suunniteltu mittaamaan radan lähellä olevien kohteiden korkeutta, määrää ja keskinäistä asemaa. Järjestelmän hyödyntämällä 2D- ja 3D-tekniikan (kuva 5.28) avulla voidaan havainnoida muun muassa irronneita tai löystyneitä kiskonkiinnityksiä, sepelöinnin vajausta sekä ratapölkkyjen asentoa ja sijaintia. Saadun informaation avulla pystytään tehostamaan kunnossapidon kohdentamista ongelmallisille alueille. (MerMec 2011)



Kuva 5.28 Track surface measuring systemsissä käytettävä ohjelmisto (MerMec 2011-2).

Georgetown Rail

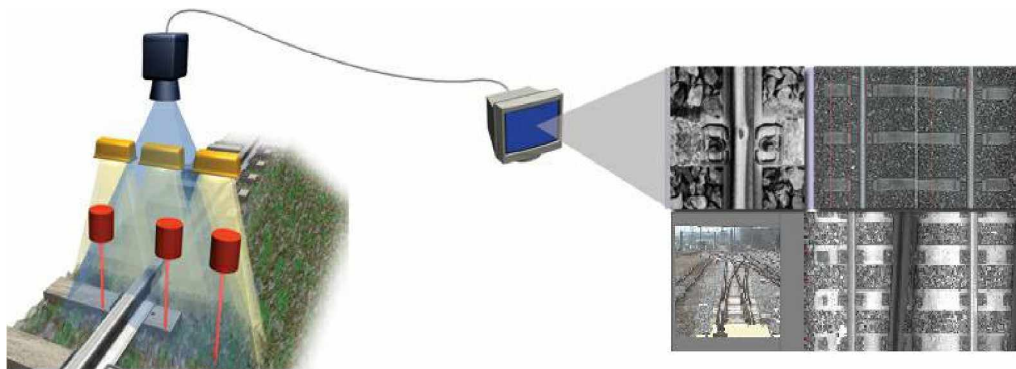
Yhdysvaltalainen rautateiden kunnossapitoon välineitä tuottava Georgetown Rail on kehittänyt AURORA-järjestelmän muun muassa puisten ja betonisten ratapölkkyjen, kiskonkiinnitysten paikallaan olon ja raidelevyden tutkimiseen. Järjestelmä on asennettu kuvassa 5.29 esitettävään kiskoilla liikkuvaan ajoneuvoon, ja tutkimus voidaan suorittaa nopeudella 48 km/h. Puupölkkyistä voidaan tutkia muun muassa halkeamien kokoa, pituutta ja sijaintia. Lisäksi järjestelmällä voidaan tunnistaa ratanaulojen, E-clip- ja Fastclip- ja Safelok-kiinnityksien paikallaanolo 85–90 % tarkkuudella. Maksiminopeudella konenäköjärjestelmä pystyy tutkimaan noin 70 000 ratapölkkyä tunnissa. (Georgetown Rail 2011, Sawadisavi et al. 2009)



Kuva 5.29 AURORA-järjestelmä kytkettynä raiteilla kulkevaan ajoneuvoon (Georgetown Rail 2011).

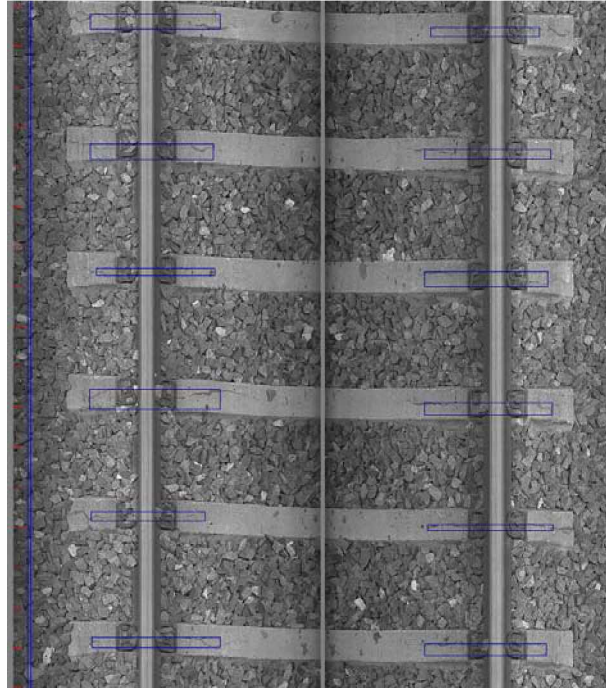
STI-Global

STI-Global tarjoaa konenäköön perustuvaa järjestelmää, Optical Track Inspection Systems (OTIS), jolla pystytään havainnoimaan puutteita niin kiskoissa, ratapölkkyissä kuin tukikerroksen sepelöinnissä. Järjestelmä hyödyntää tutkimuksissa 3000 riviä sekunnissa kuvaavia digitaalisia rivikameroita. Valaistuksena käytetään kuutta kohdistettua 1000 W halogeenilamppua, joiden aikaansaama valon intensiteetti pitäisi olla suurempi kuin kuvattavaan kohteeseen osuva auringon valon intensiteetti. Tämä parantaa merkittävästi saatavien kuvien tulkittavuutta, koska auringon valon aiheuttamat varjot häviävät. Kuva 5.30 esittää periaatekuvaa raiteen tarkastukseen tarkoitetusta laitteistosta. (STI-Global 2011)



Kuva 5.30 Raiteen tutkimiseen tarkoitettu laitteisto (STI-Global 2011).

Ratapölkkyistä halkeamia etsittäessä tutkittava alue keskittyy kiskon kiinnitysten ympärille ja ratapölkyn keskelle. Halkeamat luokitellaan kolmeen kategoriaan halkeaman pituuden mukaan. Vauriokategoriat ovat: yli 80 mm, 40–80 mm ja alle 40 mm. Halkeamia ei kuitenkaan etsitä ratapölkyn kohdista, joissa on erilaisia merkintöjä tai syvennyksiä. Järjestelmä ei myöskään etsi pölkyn poikkisuuntaisia eli ajosuunnan kanssa samansuuntaisia halkeamia. (STI-Global 2011.) Kuva 5.31 esittää järjestelmän tallioimaa kuvaa, mistä voidaan havaita tunnistettavia halkeamia.



Kuva 5.31 Halkeaman etsimisessä hyödynnettävä rivikameralla otettu kuva (STI-Global 2011).

Järjestelmällä pystytään tutkimaan myös kiskonkiinnitysten olemassaoloa ja kiinnitysten asentoa. Vaurioituneet kiinnitykset luokitellaan joko puuttuviksi tai väärässä asennossa oleviksi. Väärässä asennossa olevia kiinnityksiä tutkitaan vertaamalla niiden asentoa kiskon vastakkaisella puolella oleviin kiinnityksiin. Mikäli kiinnitykset eivät ole symmetrisesti toisiinsa nähden, on toinen kiinnitys todennäköisesti osittain irronnut. Lisäksi kiskon kiinnityksen on oltava vähintään 5 mm kiskon jalan päällä. Mikäli kiskon kiinnityksen päälle on kulkeutunut raidesepeliä, niin järjestelmä tulkitsee kiinnityksen olevan väärässä asennossa. (STI-Global 2011)

Cybernétix

Ranskalainen robotiikkaan ja automatiikkaan erikoistunut Cybernétix on kehittänyt yhdessä Ranskan valtiollisen rautatieyhtiön (French National Railways, SNCF) kanssa IVOIRE järjestelmän. Järjestelmällä pystytään tutkimaan ja luokittelemaan vaurioita muun muassa kiskoissa, kiskonkiinnityksissä ja ratapölkyissä. Käytettävän laitteiston ansiosta tutkiminen ja datan keruu onnistuu jopa nopeuden ollessa 320 km/h, mikä mahdollistaa erittäin nopeat tarkastukset. Kuvassa 5.32 on IVOIRE laitteisto kiinnitettyä tavaravaunuun. (Cybernétix 2011)



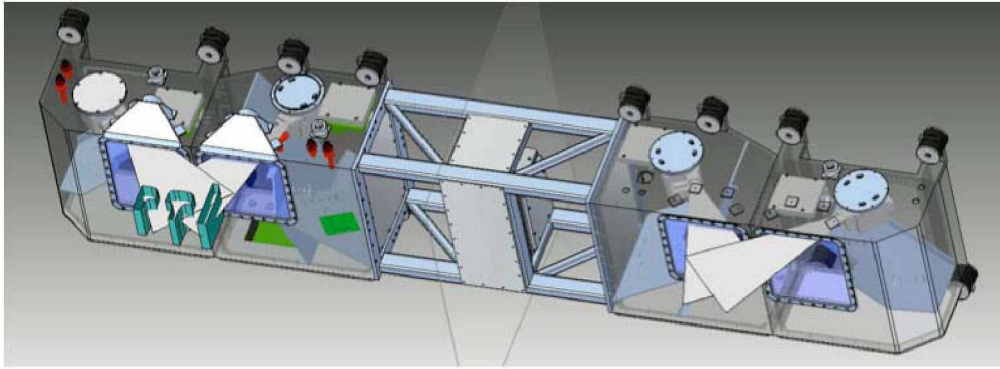
Kuva 5.32 IVOIRE järjestelmä kiinnitettynä tavaravaunuun (Cybernétix 2011).

IVOIRE järjestelmällä pystytään tunnistamaan kiskonkiinnitykset ja tarkastamaan kiinnitysten asento. Mikäli kiinnitykset sisältävät pultteja, onnistuu järjestelmällä myös pulttien paikallaan olon tarkistaminen. Kiskon kiinnitysten tarkastamisen lisäksi järjestelmä soveltuu myös kiskoissa esiintyvien pintavikojen ja betoniratapölkkyissä esiintyvien halkeamien etsimiseen. Myös puutteellinen sepelöinti pölkkyjen välissä on havaittavissa. (Cybernétix 2011)

IVOIRE järjestelmää käyttävät SNCF Ranskassa, MOR Kiinassa, UK Network Rail Iso-Britanniassa, UPR/Plasser Yhdysvalloissa ja Korail Etelä-Koreassa. (Cybernétix 2011)

EURAILSCOUT

Hollantilainen EURAILSCOUT on kehittänyt konenäköjärjestelmän erityisesti vaihteiden tarkastamiseen. Järjestelmä myös kykenee automaattisesti havainnoimaan ja analysoimaan puutteita ja vaurioita betoniratapölkkyissä, kiskonkiinnityksissä ja tukikerroksessa. Kuvissa 5.33 ja 5.34 esitettävä kuvaukseen käytettävä laitteisto koostuu kahdesta panoraama kamerasta, neljästä värikuvaa ottavasta rivikamerasta ja kahdesta mustavalkokuvaa ottavasta rivikamerasta. Valaistuksena värikameroille käytetään neljää kohdevalaisinta ja mustavalkokameroille kuutta kohdevalaisinta.



Kuva 5.33 Kalustoon kiinnitettävä kameralaitteisto (EURAILSCOUT 2011).



Kuva 5.34 Kameralaitteisto kiinnitettynä mittausvaunuun (EURAILSCOUT 2011).

Konenäköjärjestelmä kykenee havaitsemaan automaattisesti puuttuvat kiskonkiinnitykset. Tunnistettavien kiskonkiinnitysmallien joukossa ei kuitenkaan ole kaikkia olemassa olevia kiskonkiinnityksiä, mutta järjestelmä tunnistaa yleisimmin käytössä olevat kiskonkiinnitykset. Betoniratapölkkyissä esiintyvien vaurioiden osalta järjestelmän avulla pystytään havaitsemaan parhaimmillaan jopa 0,5 mm levyiset halkeamat ja mahdollinen betonin mureneminen sekä lohkeilu. Lisäksi järjestelmä havaitsee, mikäli pölkkyjen välissä olevassa sepelissä on vajausta tai ylimäärää. Käyttökokeuksien perusteella järjestelmän antamien tulosten luotettavuuden on todettu olevan yli 98 %. (EURAILSCOUT 2011)

5.6.4 Yhteenveto

Konenäköjärjestelmät ovat lähtöisin tutkimusmaailmasta. Konenäköä alettiin käyttää enenevässä määrin teollisuuden tarpeisiin 1980-luvulla ja nykypäivänä konenäköjärjestelmät ovatkin varsin yleisiä useilla teollisuuden aloilla. Konenäön keskeisiä käyttökohteita ovat muun muassa erilaiset laaduntarkastus-, mittaus-, tunnistus- ja luokittelutehtävät. Viime vuosina erilaiset konenäkösovellukset ovat yleistyneet merkittävästi myös radalla suoritettavissa tarkastuksissa. Konenäköä käytetään apuna muun muassa kiskojen, kaluston ja monien muiden radan komponenttien tarkastuksessa.

Konenäkösovelluksen haastavin osa-alue on kuvan otto ja erityisesti tarvittavan ja kuvaustilanteeseen sopivan valaistuksen aikaansaaminen. Kontrolloiduissa tehdasolosuhteissa tämä onnistuu suhteellisen helposti, mutta esimerkiksi rautatieympäristössä on runsaasti kuvausta hankaloittavia tekijöitä. Esimerkiksi auringon valo saat-

taa aiheuttaa kuvattavaan kohteeseen varjoja, mitkä hankaloittavat huomattavasti kuvien tulkintaa. Varjoja voidaan vähentää merkittävästi suojaamalla kuvattava kohde auringonvalolta ja riittävällä keinotekoisella valaistuksella. Konenäköjärjestelmän valotehoa voidaan kasvattaa jopa niin suureksi, että ulkopuolisilla valonlähteillä, kuten auringolla, ei ole vaikutusta kuvienottoon, vaikka ulkopuolinen valo pääsisikin kuvattavaan kohteeseen.

Konenäön avulla tehdyn tarkastuksen etuina verrattuna manuaalisesti ihmisvoimin tehtävään tarkastukseen on muun muassa tarkastuksen nopeus. Lisäksi konenäkö voi toistaa väsymättä samaa tarkastusta, kun taas ihmisen tekemän tarkastuksen lopputulokseen vaikuttaa muun muassa tarkastajan kokemus, vireystila jne. Radassa tarkastettavien komponenttien värisävyt vaihtelevat kuitenkin iän ja olosuhteiden perusteella. Värimuutokset saattavat heikentää konenäöllä tehtävien tarkastusten luotettavuutta. Lisäksi esimerkiksi ratapölkkyjen tarkastukseen perustuvat konenäkösovellukset havaitsevat vain pölkyn yläpinnassa olevat vauriot, joskin ihmisvoimin tehtävissä kävelytarkastuksissa on sama ongelma.

Vaikka konenäköjärjestelmä on usein tarkempi ja havaittavat virheet ovat pienempiä verrattuna ihmissilmällä tehtävään tarkastukseen, on kuitenkin tilanteita joissa ihmissilmä pärjää konenäköä paremmin. Esimerkiksi betoniratapölkkyistä konenäön avulla havaitsematta jäävät pienet halkeamat saattaa havaita ihmissilmällä. Lisäksi ihmissilmä havainnoi paremmin muuttuvia olosuhteita ja erityisesti uusia tai poikkeavia komponentteja, joita ei ole ohjelmoitu konenäköjärjestelmään. Konenäköjärjestelmien kehittymisen myötä markkinoille on tullut useita yrityksiä, mitkä tarjoavat konenäköjärjestelmiä ja palveluita radan eri komponenttien tarkastamiseen.

Nykypäivänä konenäköjärjestelmät ovat osoittaneet potentiaalinsa radan tarkastuksessa. Konenäkölaitteistoiden jatkuva kehittyminen parantaa järjestelmien tarkkuutta ja luotettavuutta. Hyväkään konenäköjärjestelmä ei kuitenkaan poista radalla tehtävien kävelytarkastusten tarvetta, sillä radalla on kohteita, joita voidaan tarkastaa vain kävelytarkastuksilla.

6 Kreosoottikyllästetyn puuratapölkyn korvaavat vaihtoehdot

6.1 Johdanto

Puu on vielä nykyäänkin laajalti käytetty materiaali ratapölkkyjen valmistuksessa. Arviolta maailmassa on käytössä yli 2,5 miljardia puusta valmistettua ratapölkkyä. Vaikka betoni on kasvattanut suosiotaan pölkky materiaalina, on puu silti suurin pölkkyjen valmistusmateriaali. Esimerkiksi vielä 1990-luvun alkupuolella arvioitiin ratapölkkyistä 75 % olevan puisia. Ratapölkkyjen valmistamiseen käytetään kovapuuta (jalopuuta) kuten pyökkiä ja tammea. Valmistukseen voidaan käyttää myös pehmeää puuta (havupuuta) erityisesti alueilla, missä kovapuuta on vaikeasti saatavilla. Yleisin ratapölkkyjen valmistukseen käytetty havupuu on mänty. Kovapuuta voidaan käyttää jopa suojaamattomana kun taas pehmeistä puulajeista valmistetut pölkkyt vaativat aina kyllästämisen suoja-aineella. (Rothlisberger 2008, Manalo 2011)

Pääasiallinen puuratapölkkyjen kyllästysaine on kreosoottiöljy. Viime vuosina on eripuolilla maailmaa alettu pohtimaan tarkemmin kreosootin haittavaikutuksia ja mahdollisia seurauksia kreosootin kieltämisestä puun kyllästyksessä. Mahdollinen ratkaisu ongelmaan voidaan löytää kahdesta eri suunnasta. Yhtenä vaihtoehtona on korvata puu jollain toisella materiaalilla, kuten betonilla, teräksellä tai erinäisillä muovi- ja komposiittimateriaaleilla. Toisena vaihtoehtona on löytää kreosootin korvaava kyllästysaine, joka ei ole yhtä haitallista kuin kreosootti. Puisia ratapölkkyjä on korvattu merkittävässä määrin betoniratapölkkyillä, mutta merkittävien betonin ja puun ominaisuuksien johdosta betoniratapölkky ei sovellu kaikkiin puuratapölkkykohteisiin. Alla olevassa taulukossa 6.1 on esitetty perinteisten pölkky materiaalien ominaisuuksia.

Taulukko 6.1 Perinteisistä pölkky materiaaleista valmistettujen pölkkyjen ominaisuuksia (Manalo 2011).

Properties	Hardwood	Softwood	Concrete	Steel
Adaptability	Easy	Difficult	Difficult	Difficult
Workability	Easy	Easy	Difficult	Difficult
Handling and installation	Easy	Easy	Difficult	Difficult
Durability	Low	Low	High	Low
Maintenance	High	High	Low	High
Replacement	Easy	Easy	Difficult	Difficult
Availability	Low	High	High	High
Cost	High	Low	Very high	Very high
Fasteners	Good	Poor	Very good	Poor
Sleeper ballast interaction	Very good	Good	Very good	Poor
Electric conductivity	Low	Low	High	Very high
Impact	High	High	Low	Medium
Weight ^a , kg	60-70	60-70	285	70-80
Service life, years	20-30	20	50	50

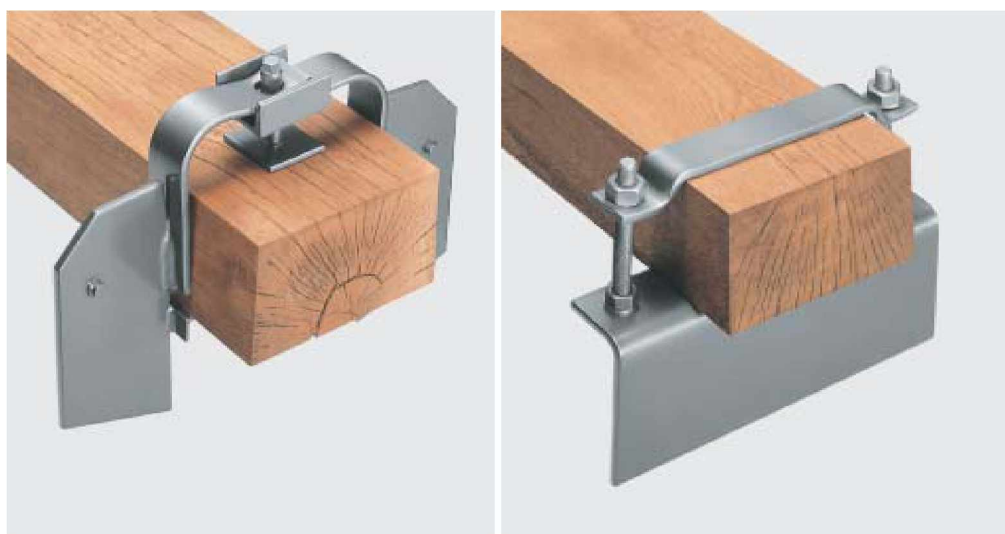
Suomessa on vielä vähäliikenteisiä soratukikerroksellisia ratoja, joissa käytetään puisia ratapölkkyjä. Mahdollinen kreosootin kieltäminen voi aiheuttaa merkittäviä ongelmia, sillä yleisen käsityksen mukaan betoniratapölkky ei sovellu käytettäväksi soratukikerroksilla.

6.2 Puu

6.2.1 Puisen ratapölkyn ominaisuudet ja toiminta radassa

Puu on ollut erittäin merkittävä ratapölkkyjen valmistusmateriaali rautateiden alkua ajoilta aina nykypäivään asti. Puuratapölkkyinä voidaan käyttää useita eri puulajeja. Puuratapölkkyjä voidaan käyttää kaikentyyppisillä radoilla, ja on ollut yleensä ainoa kyseeseen tuleva vaihtoehto puuratapölkkyraiteissa, joissa yksittäisiä vaurioituneita puuratapölkkyjä joudutaan korvaamaan. (Zarembski 1993.) Puuratapölkky on käyttökelpoinen, helppo käsitellä, helppo uusida ja puuratapölkkyt eivät tarvitse monimutkaisia asennusvälineitä. Yksittäiset ratapölkkyt voidaan korjata tai korvata ilman raskasta kalustoa. Edellä mainitut asiat ovat etuna varsinkin suurnopeuksisilla tai vilkkaasti liikennöidyillä radoilla, missä kunnossapitoon käytettävissä oleva aika on hyvin rajallinen. (Rothlisberger 2008.) Puuratapölkkyt voivat taipua toistuvasti ilman suurempaa väsymistä (Smith 2007). Puu pystyy myös vaimentamaan voimakkaita iskuja vähäisillä vaurioilla. Iskut syntyvät muun muassa kalusto- ja kiskovioista ja äärimmäisenä esimerkkinä on junan raiteelta suistuminen. Esimerkiksi betoniratapölkkyt voivat vaurioitua merkittävästi tällaisista kovista iskuista. Puuratapölkyn etuna on lisäksi erittäin hyvä sähköneristävyys ja puu vaimentaa liikennöinnin synnyttämää melua (Zarembski 1993, Zarembski).

Muotoilunsa ansiosta puupölkkyt eivät tunkeudu rakenteeseen ja soveltuvat täten betoniratapölkkyjä paremmin soratukikerroksellisille radoille. Pölkky ei lukkiudu sepelitukikerrokseen betoniratapölkyn tavoin, minkä johdosta puupölkyn sivuttaissuuntaisen vastus on selkeästi pienempi. Sivuttaissuuntaisen vastuksen lisäämiseksi onkin kehitelty erinäisiä pölkkyyn kiinnitettäviä ankkureita. Kuvassa 6.1 on esitetty kaksi erilaista Vosslohin valmistamaa ankkuria. (Vossloh 2012, Tunninen 2007)



Kuva 6.1 Vosslohin valmistamia ratapölkkyyn kiinnitettäviä pölkyn sivusuuntaista vastusta lisääviä ankkureita (Vossloh 2012).

Puuratapölkkyjen käytön haittana on puupölkkyjen alttius heikkenemiseen mekaanisten ja biologisten tekijöiden johdosta. Lopulta pölkyn heikkeneminen johtaa vakaviin vaurioihin ja pölkyn vaihtamiseen. (Qiao 2008.) Kuva 6.2 esittää kahta puupölkyn yleistä vaurioitumistapaa. Vasemmalla on puun lahoamisesta johtuva vaurio ja oikealla pölkyn pään halkeilusta johtuva vaurio. Puun heikkoutena on myös materiaaliominaisuuksien vaihtelu.



Kuva 6.2 Vasemmalla puun lahoamisesta kärsivä ratapölkky ja oikealla pölkyn pään halkeilusta kärsivä ratapölkky (Manalo 2011).

Pehmeistä puumateriaaleista valmistetuissa ratapölkkyissä pitää käyttää teräksisiä aluslevyjä. Aluslevyt jakavat kiskosta välittyvän voiman laajemmalle alueelle pölkyn yläpinnassa. Aluslevy voi kuitenkin painua pölkkyyn ja aikaansaa näin kiskonkiinnitysten löystymisen ja pölkyn ennen aikaisen vaurioitumisen. Suomessa puupölkkyjen yleisimmäksi viaksi onkin arvioitu aluslevyn tunkeutuminen pölkyn sisään kuormituksen ja pölkyn vanhenemisen takia. Tunkeutumista tapahtuu eniten kaarteissa, joissa kiskoon ja pölkkyyn kohdistuvat sivuttaiset voimat ovat suuremmat. Aluslevyn siirtyminen vaikuttaa raidegeometriaan sekä pysty- että vaakasuunnassa. Tämä lisää raiteeseen kohdistuvia rasituksia. Kuvassa 6.3 on esitetty ratapölkkyyn tunkeutunut aluslevy. Aluslevyn painumista voidaan kuitenkin hidastaa käsittelemällä pölkky aluslevyn kohdalta synteettisellä materiaalilla. Kovapuupölkkyt ovat nimensä mukaisesti kovempia ja kiskot voidaan kiinnittää niihin jopa ilman aluslevyä. Esveld on todennut, että hyvällä suoja-aineella kyllästetyn ratapölkyn käyttöikä ei päätä lahoaminen, vaan mekaanisen rasituksen aiheuttamat vauriot. (Esveld 2001, Tunninen 2007)

Pehmeistä puulajeista valmistetut ratapölkkyt eivät ominaisuuksiensa osalta ole yhtä hyviä kuin kovapuupölkkyt. Esimerkiksi pehmeästä puusta valmistetuissa ratapölkkyissä raidelevyiden kasvaminen on suurempaa ja raideruuvien sekä ratanulojen pysyminen heikompaa kovapuupölkkyihin verrattuna. Lisäksi pehmeistä puulajeista valmistetuissa pölkkyissä aluslevyn painuminen pölkkyyn on suurempaa. Kovapuusta valmistetut ratapölkkyt välittävät myös kuormitukset paremmin tukikerrokseen. Tästä syystä kovapuisia ja pehmeästä puulajista valmistettuja ratapölkkyjä ei suositella asennettavaksi samaan raiteeseen. (AREMA 2003, Manalo 2011)



Kuva 6.3 Ratapölkkyyn tunkeutunut aluslevy, jonka seurauksena kiskon kiinnitys on löystynyt (Tunninen 2007).

Viime vuosikymmenien aikana pölkkyjen valmistamiseen käytettävän laadukkaan kovapuun määrän väheneminen on aiheuttanut ongelmia ympäri maailmaa. On arvioitu, että ongelma pahenee tulevaisuudessa. Ongelma on korostunut erityisesti kovapuisten vaihdepölkkyjen kohdalla. Tämä johtuu siitä, että vaihdepölkkyissä käytettävän puutavaran on oltava kooltaan isompaa ja erityisesti pidempää verrattuna tavallisiin ratapölkkyihin. Osittain tästä johtuen onkin arvioitu vaihdepölkkyjen osuuden kasvavan kunnossapitokustannuksissa. Vaihdepölkkyjen kunnossapitokustannusten vähentämiseksi onkin kokeiltu muita kestävämpiä tai kustannustehokkaampia pölkky materiaaleja, kuten terästä, betonia tai kasvatettua puuta. Vaihtoehtoiset materiaalit eivät ole pystyneet täyttämään kaikkia niille asetettuja vaatimuksia. Syynä tähän on pölkkyjen mekaanisten ominaisuuksien poikkeavuus verrattuna olemassa oleviin puisiin vaihdepölkkyihin. (Manalo 2011)

Puisten ratapölkkyjen käyttö on suurta useissa maissa ja maanosissa. Esimerkiksi Australiassa vaihdetaan noin 1,5 miljoona puuratapölkkyä vuosittain. Intia tuo arviolta noin 7 miljoona puista ratapölkkyä vuosittain ratojen kunnossapitoa varten. Yhtenä suurimpana puuratapölkkyjen käyttömaana on Yhdysvallat. Yhdysvalloissa radan kunnossapito vaatii vuosittain noin 14 miljoonaa puista ratapölkkyä. (Manalo 2011.) Näin ollen vaurioituneiden puuratapölkkyjen korvaaminen uusilla ratapölkkyillä muodostaa merkittävän kuluerän radan kunnossapidolle. Lisäksi viime vuosina ympäristötietoisuuden kasvaminen on kasvattanut paineita kovapuisten ratapölkkyjen käytön vähentämiseen. Myös mahdollinen kreosootin käytön rajoittaminen puun kyllästämisessä kasvattaa paineita entisestään, sillä mahdollinen kreosootin kieltäminen saattaa rajoittaa kovapuun korvaavien puumateriaalien käyttöä pölkkyjen valmistamisessa. Ongelma on tiedostettu rautatiealalla ympäri maailmaa ja puun korvaavien materiaalien tutkiminen onkin ollut kasvussa. (Manalo 2011, UIC 2008)

Suomessa männyn käyttämisen syynä on sen helppo saatavuus ja yksinkertainen valmistusmenetelmä. Puupölkkyt valmistetaan Oy VR-Rata Ab:n Haapamäen kyllästämöllä. Kyllästysprosessissa puutavara painekyllästetään kreosoottiöljyllä ns. Rüping-säästömenetelmällä. Mäntypuisten ratapölkkyjen lisäksi Suomessa voidaan käyttää azobésta valmistettuja kovapuisia rata- ja vaihdepölkkyjä. Männyn ja azopén lisäksi Suomessa on kokeiltu koivu-, lehtikuusi-, tammi- ja pyökkipuista ratapölkkyjä. Suomessa puisten ratapölkkyjen tavoiteikä on 35 vuotta, mutta todellinen käyttöikä vaihtelee kohteesta riippuen 20-40 vuoden välillä. Käyttöikä laskevat pienet alle

500 m kaarresäteet, raskas liikenne ja ratapölkyn yksilölliset ominaisuudet. (Tunni-
nen 2007, Viitala 2011)

Suomessa käytettävien mäntypuisten ratapölkkyjen paino on kosteudesta riippuen
70-100 kg, josta kreosoottiöljyn osuus on noin 7 kg. Puupölkyn vanhetessa kyllästys-
aineen määrä vähenee, minkä seurauksena puun tekniset ominaisuudet heikkenevät
puun päästessä lahoamaan. Mitoitusikänsä aikana kreosoottiöljyn määrä vähenee
arviolta 1-2 kiloon. (Tunni-
nen 2007)

6.2.2 Puun kyllästäminen.

Puun lahoaminen on olennaisessa osassa ajateltaessa puuratapölkyn käyttöikä. La-
hottajasienien vaikutuksesta puun muoto, väri ja koostumus muuttuvat merkittävästi.
Lahoamisen johdosta puun lujuusominaisuudet voivat heiketä oleellisesti. Puun la-
hoamistavan perusteella lahot voidaan jakaa kolmeen lahotyyppiin: ruskolaho, valko-
laho ja katkolaho. Puun lahoaminen vaatii yli viiden asteen lämpötilan, yli 30 % puun
pitkäaikaisen kosteuden, hapetta, ja puussa olevien ravinteiden tulee olla sienille otol-
lisessa muodossa. Kuva 6.4 esittää tervettä puun solukkoa ja lahon vaurioittamaa
puun solukkoa. (Boren 2010, Metsäteho Oy 2004, UIC 2008)



Kuva 6.4 Vasemmalla terveen puun solukkoa, keskellä ruskolahon vaurioittamaa
solukkoa ja oikealla katkolahon vaurioittamaa solukkoa (Boren 2010).

Katkolahoa esiintyy usein kyllästäättömässä havu ja lehtipuutavarassa ja se pystyy
toimimaan erittäin vähähappisissa olosuhteissa. Tämän vuoksi maan kanssa koske-
tuksissa olevien puurakenteiden laho on usein katkolahon aikaansaamaa. Katkolahoa
pyritäänkin torjumaan eri kyllästysaineilla, joskin kyllästysaineetkaan eivät välttä-
mättä estä katkolahon vaikutusta. Katkolaho ei muodosta puun pinnalle näkyvää rih-
mastoa, mutta se heikentää puun taivutuslujuutta merkittävästi. Katkolahon johdosta
puun lujuus heikkenee jo varsin varhaisessa vaiheessa, vaikka puun kovuus heikkenee
vasta erittäin voimakkaan lahoamisen jälkeen. (Boren 2010, Metsäteho Oy 2004)

Ruskolahossa puuainees muuttuu hauraaksi ja rikkoutuu kuutioiksi. Puuainees myös
kutistuu jonkin verran. Ruskolahossa sienirihmat kasvavat puun pinnalla ja puusolu-
jen onteloissa. Sienet erittävät entsyymejä, jotka hajottavat selluloosamolekyylit pie-
niksi yksiköiksi, mitkä voivat huuhtoutua pois. Lahoamisen johdosta puun väri muut-
tuu ruskeammaksi ja puu kutistuu sekä haurastuu. (Boren 2010, Metsäteho Oy 2004)

Valkolahoa esiintyy pääasiassa pyöreässä puutavarassa, erityisesti lehtipuissa, joka
makaa maahan kaadettuna pitkiä aikoja. (Boren 2010, Metsäteho Oy 2004)

Yleisin ratapölkkyjen kyllästäämiseen käytetty kyllästysaine on kreosoottiöljy ja se on
yksi vanhimmista puun kyllästäämiseen tarkoitettusta aineesta. Kreosootti on yleisni-
mitys monille korkean lämpötilan avulla puusta tai kivihiilestä valmistetuille kemialli-
sille aineille. Kivihiilestä valmistettua kreosoottiöljyä on käytetty pitkään puun kyl-

lästämiseen. Kivihiilestä valmistettu kreosootti on väriltään tummaa, öljyistä ja pak-sua nestettä. Kreosootissa on jopa satoja erilaisia yhdisteitä, joista osa on ihmiselle haitallisia. Erityisesti terveydelle haitallisia ovat kreosootin sisältämät PAH-yhdisteet. Haitalliset yhdisteet aiheuttavat ihokosketuksessa kirvelyä ja punoitusta, ja kreosootin öljyt voivat ärsyttää myös hengitystä. Kreosootilla kyllästetystä puusta haihtuu ja liukenee myrkyllisiä yhdisteitä. Liuenneista yhdisteistä osa on vettä raskaampia ja ne voivatkin vajota pohjavedenpinnan alapuolelle muodostaen kerrostumia läpäisemättömän maakerroksen yläpuolelle. (Boren 2010, UIC 2008)

Puutavaraa on suojattu kuparipohjaisilla kyllästysaineilla, mitkä toimivat hyvin katkolahottajia vastaan. Ruskolahottajat kuitenkin sisältävät kuparitolerantteja kantoja, mitkä pystyvät lahottamaan pelkästään kuparilla kyllästettyä puuta. Tämän vuoksi kuparipohjaisiin kyllästeisiin pitäisi lisätä ruskolahottajia vastaan toimivia aineita, joita ovat muun muassa triasolit, boori, fenolit ja mäntyöljy. Edellä mainituista aineista muut paitsi mäntyöljy ovat vesiliukoisia, joten niiden antamasta pitkäaikais-suojasta ei ole vielä täysin pitäviä todisteita. Lisäksi myös kuparin kiinnittymistä puuhun pitää edistää esimerkiksi kromin avulla. Ilman kromia kuparin huuhtoutuminen puusta voi olla erittäin voimakasta. Tästä syystä CC-kyllästeet (kupari-kromi) toimivatkin selkeästi paremmin lahoa vastaan verrattuna pelkkiin C-kyllästeisiin (kupari). (Boren 2010)

Puun mäntyöljykyllästystä on tutkittu aktiivisesti 1990-luvun alkupuolelta lähtien. Tuolloin aloitettiin VTT:n toimesta kenttäkokeet raakamäntyöljyn lahonsuojauskyvyn selvittämiseksi. Laajamittaista teollisuustuotantoa mäntyöljypohjaista kyllästysaineista ei ole kuitenkaan syntynyt. VTT:n kenttäkokeissa kuitenkin huomattiin raakamäntyöljykyllästettyjen koekappaleiden kunnon olevan vain hieman huonompi kuin kreosoottikyllästettyjen koekappaleiden kunto. Ruotsissa tehtiin 1980-luvulla laho-tuskokeita eri mäntyöljyillä, CCA:lla (kupari-kromi-arseeni) ja kreosootilla. Kokeiden perusteella mäntyöljy antoi paremman suojan verrattuna CCA-kyllästeeseen. Lisäksi kokeessa käytetty mäntyöljytyyppi oli suuren neutraalipitoisuuden vuoksi yksi kyllästyksen huonoimmin soveltuvista. (Boren 2010)

Mäntyöljyjen kyllästystehoa pystytään parantamaan yhdistämällä sitä kupariin tai booriin. Puun lujuusominaisuudet eivät juuri muutu, koska lämpötilojen puolesta prosessi ei olennaisesti poikkea kreosoottikyllästysprosessista. Ongelmana on kuitenkin raakamäntyöljyn haju ja tahraavuus, jotka aiheutuvat öljyn tihkumisesta puun pinnalle. Hajua ja tahraavuutta suurempi ongelma on mäntyöljykyllästykseen hinta, mikä on arviolta noin kaksinkertainen kreosoottikyllästykseen verrattuna. (Boren 2010)

Perinteisissä C-kyllästeissä käytetään vesiliukoista kuparia. Uutena kuparipohjaisena kyllästysaineena on niin sanottu mikronisoitu kupari. Kyllästysaineessa veteen sekoitetaan lähes nanokokoisia kuparihiukkasia. Tuotteen etuna on se, että kupari ei ole vesiliukoista ja näin ollen kuparin korrosoiva vaikutus on vähäinen. Pelkkää kuparia sisältävänä kyllästysaineen teho vaihtelee riippuen muun muassa puulajista, pitoisuudesta ja partikkelikoosta. Mikronisoidun kuparin yhdistäminen toiseen kyllästysaineeseen, kuten esimerkiksi mäntyöljyyn, saattaa tulevaisuudessa olla varteenotettava vaihtoehto puun suojauksessa. (Boren 2010)

Puun kyllästämiseen on käytetty myös vesilasia eli natriumsilikaattia. Natriumsilikaatti koostuu piidioksidista ja natriumoksidista, jotka ovat palamattomia, hajuttomia ja ympäristölle vaarattomia, ja joilla ei ole korkeaa pH-lukua lukuun ottamatta terveydelle haitallisia vaikutuksia. Puun kyllästämisen jälkeen vesilasi kovettuu puun huo-

kosissa veden haihtumisen seurauksena ja polymerisoituu reagoidessaan puusolu-kossa olevien happamien karboksyyliyhdyntöjen kanssa. Vesilasi on tunnettu jo pitkään puun kyllästysaineena. Vesilasin käyttöön puun kyllästämisessä on kuitenkin liittynyt iso ongelma, sillä täyttä tai riittävää tunkeumaa puuhun on ollut hankala saavuttaa suojaustehon kannalta riittävän väkeillä, yli 3,3 moolisuhteilla, vesilasiliuoksilla. Ongelmaa esiintyy erityisesti happamilla puulajeilla, kuten havupuilla. Näin ollen riittävää pitkäaikaiskestävyyttä ei välttämättä ole saavutettu. Vesilasi, jossa on pieni moolisuhte, tunkeutuu helpommin puuhun. Pienimoolisuhteinen vesilasi kuitenkin liukenee helpommin pois puusta ja se heikentää myös puun ominaisuuksia korkeamman pH:n johdosta. (Boren 2010)

Pohjois-Amerikassa vesilasia käytetään sähköpölyväiden kyllästämiseen. Pylväinä käytettiin Montereynmäntyä, ja vesilasikyllästyksen jälkeen pylväille annettiin jopa 40 vuoden takuu. Vesilasin suojaavalla vaikutuksella pohjoismaiseen mäntyyn ei kuitenkaan ole riittävästi tutkimustietoa, ja vesilasin soveltuvuutta tulisi testata kenttäolosuhteissa. (Boren 2010)

Tutkimuksissa vesilasin ei ole havaittu heikentävän puun lujuusominaisuuksia vaan lujuusominaisuudet ovat voineet jopa parantua. Vesilasikäsittely saattaa kuitenkin lisätä puun halkeilua kuivatuksen ja käytön aikana. Hinnaltaan vesilasikyllästys on kilpailukykyinen moniin muihin kyllästysmenetelmiin verrattuna. (Boren 2010)

Tervansukuiset puutisleet ovat perinteisiä puunsuojauskeinoja. Lehtipuutervat toimivat paremmin kuin havupuutervat. Tehdyissä tutkimuksissa on todettu, että käsitellyt lehtipuutervat toimivat jopa paremmin kuin kreosootti. Kokeissa havaittiin korkeassa lämpötilassa kiehuneen lehtipuutervan antavan parhaan suojan lahoa vastaan. Ongelmana on kuitenkin tervansukuisten puutisleiden vähäinen tuotanto ja niiden saanti laajamittaiseen puun kyllästykseseen. Yhtenä vaihtoehtona on puutisleiden käyttö lisäaineena muihin kyllästyksessä käytettäviin öljyihin. (Boren 2010)

Haastavana tehtävänä on löytää kyllästysaine, jolla saavutetaan kreosoottikyllästeisen puun käyttöikä ja kilpailukykyinen hinta. Mikäli vaihtoehtoisen kyllästysaineen suojaustaso on lähellä kreosoottia, on kyllästysaineen ja kyllästysmenetelmän hinta korkeampi ja jos hinta on kilpailukykyinen, on suojaustaso selkeästi heikompi.

Mahdollisesti potentiaalisimmat vaihtoehtoiset kyllästysaineet ovat erilaiset CC-kyllästeet ja mäntyöljy. Kyllästysaineita yhdistelemällä voidaan parantaa suojauksen tehoa. Yksi vaihtoehto voisi olla kuparin tai vesilasin yhdistäminen mäntyöljyyn. Kupari toimisi hyvin katkolahoa vastaan ja mäntyöljy ruskolahoa vastaan. Lisäksi mäntyöljy sitoo kuparin puuhun. Toinen vaihtoehto saattaisi olla mikronisoidun kuparin tai boorin seostaminen mäntyöljyyn, jolloin käsittely pystyttäisiin tekemään yhdellä prosessilla. Monien kuparipohjaisten kyllästysaineiden ongelma on kuitenkin niiden teräksen korroosiota kiihdyttävä vaikutus. Kreosootin korvaavan kyllästysmenetelmän käyttöönotto Suomessa vallitsevissa ilmasto-olosuhteissa ja erityisesti uuden kyllästysaineen soveltuminen Suomessa kasvavalle männylle riittävän pitkäaikaiskestävyyden saavuttamiseksi vaatisi kuitenkin lisätutkimuksia ja mahdollisesti kokeellista kenttätutkimusta.

Taulukko 6.2 esittää joitain puun suojaukseen käytettäviä kyllästysaineita ja niiden ominaisuuksia.

Taulukko 6.2 Puun suojaukseen tarkoitettuja kyllästysaineita (US Forest Service 2012).

Standardized use	Preservative	Solvent characteristics	Surface/handling restrictions	Color	Odor	Fastener corrosion
All uses	Creosote	Oil-type	Oily, not for frequent human contact	Dark brown	Strong, lasting	No worse than untreated
All uses	Ammoniacal copper zinc arsenate	Water	Dry, but contains arsenic	Brown, possible blue areas	Mild, short term	Worse than untreated wood
All uses	Chromated copper arsenate	Water	Dry, but uses are restricted by the EPA*	Greenish brown, weathers to gray	None	Similar to untreated wood
All uses (except in seawater)	Pentachlorophenol in heavy oil	No. 2 fuel oil	Oily, not for frequent human contact	Dark brown	Strong, lasting	No worse than untreated wood
All uses (except in seawater)	Copper naphthenate	No. 2 fuel oil	Oily, not for frequent human contact	Green, weathers to brownish gray	Strong, lasting	No worse than untreated wood
All uses (except in seawater)	Alkaline copper quat	Water	Dry, okay for human contact	Greenish brown, weathers to gray	Mild, short term	Worse than untreated wood
All uses (except in seawater)	Copper azole	Water	Dry, okay for human contact	Greenish brown, weathers to gray	Mild, short term	Worse than untreated wood
Aboveground, fully exposed	Pentachlorophenol in light oil	Mineral spirits	Dry, okay for human contact if coated	Light brown, weathers to gray	Mild, short term	No worse than untreated wood
Aboveground, fully exposed	Oxine copper	Mineral spirits	Dry, okay for human contact	Greenish brown, weathers to gray	Mild, short term	No worse than untreated wood
Aboveground, partially protected (such as millwork)	IPBC + permethrin	Mineral spirits	Dry, okay for human contact	Colorless	Mild, short term	No worse than untreated wood
Indoors (usually for insect protection)	Borates	Water	Dry, okay for human contact	Colorless, blue dye often added	None	No worse than untreated wood

6.2.3 Kyllästysaineen tunkeutuvuus

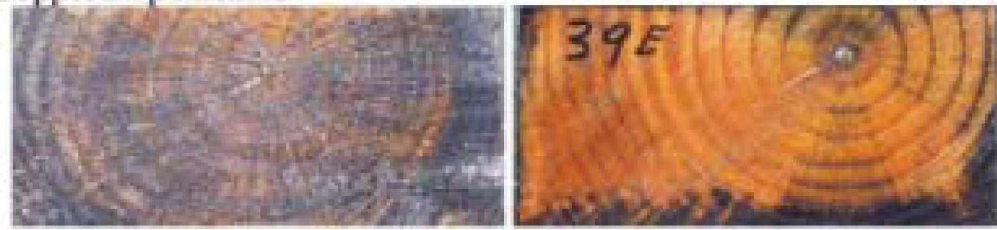
Vaikka kyllästysaine olisi tehokas lahoa vastaan, ei se vielä takaa tehokasta kyllästystä. Merkittävässä roolissa on myös kyllästysaineen tunkeutuminen puuhun. Paine-kyllästettäessä ratapölkkyjä kyllästysaine tunkeutuu lähinnä pintapuuhun ja tiiviimpi sydänpuu jää vaille kyllästysainetta. Sydänpuun lahonsietokyky on kuitenkin selkeästi parempi verrattuna pehmeämpään pintapuuhun. Esimerkiksi Suomessa käytettävän männyn sydänpuu on biologisesti paljon kestävämpää. Kestävyys johtuu puun solujen välisten huokosten sulkeutumisesta ja huokoskalvolle kerrostuneista uutteista, jotka ovat vahingollisia lahottajaisienille. Kuva 6.5 esittää suomalaisista mäntypuuratapölkkyistä otettuja näytteitä. Näytteistä voidaan havaita selkeästi kyllästysaineen tunkeumasyyvyys. Kyllästysaineen tunkeumaan vaikuttavat sydänpuun osuus sekä puun syiden paksuus. Sydänpuun lahoamista kasvattaa puussa iän myötä tapahtuva halkeilu. Halkeamat voivat ulottua kyllästysainetta sisältävän puun läpi kyllästämättömään puuhun, jolloin lahottajaisienet pääsevät tunkeutumaan halkeamia pitkin kyllästämättömään puuhun. Tämä kiihdyttää sydänpuun lahoamista. (Boren 2010, Tunninen 2007)



Kuva 6.5 Koekappaleita kreosoottikyllästetyistä mäntypuuratapölkkyistä (Tunninen 2007).

Australiassa puuratapölkkyjen valmistukseen on käytetty kovapuuta, mutta rajallisten kovapuuresurssien johdosta puisten ratapölkkyjen valmistukseen on alettu käyttää istutusmetsissä kasvavaa Montereynmäntyä. Montereynmännyn ominaisuuksista johtuen se pitää kyllästä käyttöiän pidentämiseksi. Ongelmaksi on kuitenkin muodostunut sydänpuun tiiveys, mikä estää kyllästysaineen tunkeutumisen puuhun. Australiassa on kehitetty puun mikroaallottamismenetelmää kyllästysaineen tunkeuman parantamiseksi. (Vinden et al. 2011)

Puussa oleva vesi alkaa höyrystyä mikroaallotuksessa aiheuttaen puun solukoihin repeämiä, jotka muodostavat käytäviä puun keskipistettä kohti. Kyllästämiseen käytettävä aine pääsee kulkeutumaan käytäviä pitkin sydänpuuhun. Kuva 6.6 havainnollistaa kyllästämisen jälkeisen eron mikroaaltokäsitellyn ja mikroaaltokäsittämättömän puun poikkileikkauksissa. Tutkimuksessa todettiin mikroaallotukseen tarvittavan energian olevan noin 75-110 kWh/m³ riippuen mikroaallotettavan puun kosteuspitoisuudesta. Tätä suuremmat mikroaallotustehot lisäsivät edelleen puun läpäisevyyttä, mutta johtivat pölkyn muodonmuutoksiin ja merkittävään lujuuden heikkenemiseen. Mikäli suositeltua energiamäärää ei ylitetä, pölkkyssä tapahtuva halkeilu ja muodonmuutokset ovat vähäisiä. Tutkimuksessa haasteelliseksi osoittautui tarvittavan energiamäärän arvioiminen. Syynä tähän oli pölkkykohtaisesti vaihteleva sydänpuun ja pintapuun määrä. Sydänpuun kosteuspitoisuus on noin 35-55 % ja pintapuun kosteuspitoisuus 120-160 %. Ratapölkyn vaihteleva kosteuspitoisuus vaikuttaa käsittelyssä tarvittavaan energiamäärään. (Vinden et al. 2011)



Kuva 6.6 Vasemmalla mikroaallottamalla käsitelty ja kuparinaftenaatilla kyllästetty puu ja oikealla mikroaallottamaton kuparinaftenaatilla kyllästetty vertailukappale (Vinden et al. 2011).

Tutkimuksessa käytettiin kolme eri kyllästysainetta. Kyllästysaineina olivat kuparinaftenaatti, kreosootti ja CCA. Mikroaallotus lisäsi kyllästysaineen menekkiä 1,8-4,5-kertaiseksi käytetystä kyllästysaineesta riippuen. Lisääntyneen kyllästysaineen tunkeutuvuuden oletettiin parantavan merkittävästi ratapölkyn säilyvyyttä. Tutkimuksessa käytetyllä kaupallisella 400 kW mikroaallotuslaitteistolla pystytään käsittelemään noin 100000 ratapölkkyä vuodessa. Vinden et al. 2011)

Suomessa CCA-kyllästeet ovat kiellettyjä ja kreosoottikyllästeet ollaan mahdollisesti kieltämässä.

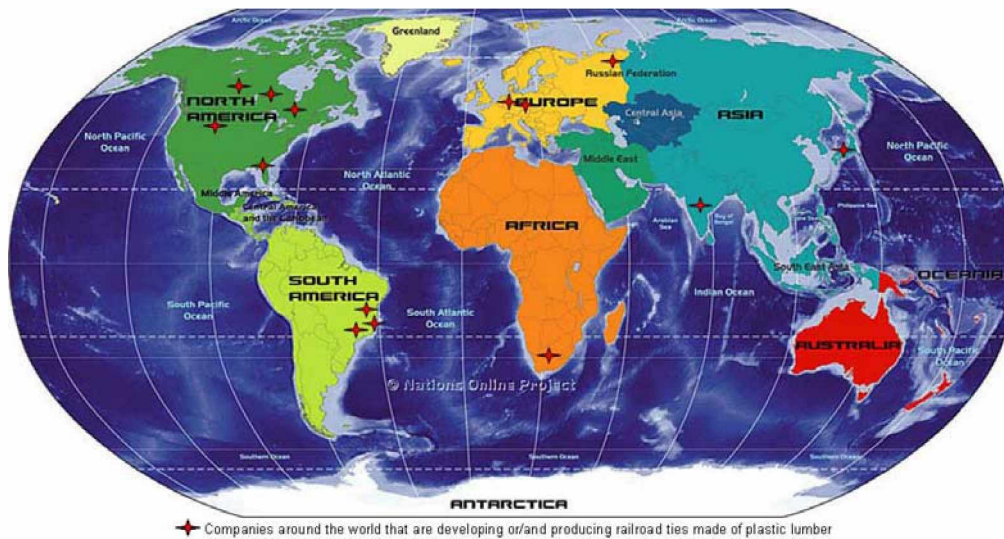
6.3 Synteettiset materiaalit

Ratapölkkyjen valmistamiseen sopivan kovapuun saatavuuden heikkeneminen ja tehokkaiden, mutta ympäristölle ja ihmisille haitallisten kyllästysaineiden kieltäminen tai mahdollinen kieltäminen on aikaansaanut uusien pölkky materiaalien kehittämisen kiihtymisen. Yleisin puisen ratapölkyn korvaaja on ollut betoniratapölkky. Betoniratapölkyn selkeästi erilaiset ominaisuudet, kuten suurempi rakenteellinen jäykkyys, aiheuttavat ongelmia useissa puuratapölkkykohteissa. Puista ratapölkkyä pidetään usein parempana vaihtoehtona esimerkiksi vaihteisiin ja varsinkin terässilloille. Esimerkiksi vaurioituneen puuratapölkyn vaihto vaihteessa on selkeästi helpompaa verrattuna betonisen ratapölkyn vaihtamiseen vaihteessa. Syynä tähän on se, että kiskonkiinnitysten paikat pystytään poraamaan radalla haluttuihin kohtiin. Mikäli vaihteessa on betoniratapölkky, tulee tarvittavien kiskonkiinnitysten paikkojen olla jo tiedossa ratapölkkyä valmistettaessa tehtaalla. (AREMA 2003, Manalo 2011, Zarembski 1993)

Betoniratapölkkyjen ominaisuudet eroavat merkittävästi puuratapölkkyjen ominaisuuksista. Tämä on johtanut uusien pölkky materiaalien kehitykseen. Uusien pölkky materiaalien avulla pyritään valmistamaan ratapölkkyjä, joiden ominaisuudet olisivat hyvin lähellä puuratapölkyn ominaisuuksia. Viime aikoina onkin kehitetty ratapölkkyjä kierrätysmuovista, kumista ja erilaisista lasikuituvahvisteisista komposiittimateriaaleista. Uusien materiaalien etuina on muun muassa se, että pölkkyt voidaan valmistaa leveydeltään ja korkeudeltaan samankokoisiksi kuin puuratapölkkyt. Pölkkyt voidaan myös valmistaa lähes minkä mittaisiksi tahansa. Lisäksi pölkkyjen massat ovat hyvin lähellä puuratapölkkyjen massaa. Pölkkyjen käyttöikä on arvioitu selkeästi pidemmäksi puisiin ratapölkkyihin verrattuna. Synteettisistä materiaaleista valmistettujen ratapölkkyjen pidempi käyttöikä perustuu muun muassa siihen, että materiaali ei kärsi puun tavoin lahoamisesta. Radan kunnossapitokustannusten on arvioitu myös vähenevän siirryttäessä synteettisten pölkky materiaalien käyttöön. (Manalo 2011, UIC 2008)

Synteettisistä materiaaleista valmistettuja pölkkyjä voidaan useimmiten työstää samoilla työvälineillä kuin puuratapölkkyjä. Pölkkyjen pieni massa myös helpottaa pölkkyjen käsittelyä radalla ja esimerkiksi vaihepölkkyjen osalta kiskonkiinnitysten reiät voidaan porata vasta siinä vaiheessa, kun pölkky on asennettu oikeaan paikkaan. (SEKISUI 2012, Manalo 2011)

Viime vuosien aikana erilaisten synteettisten pölkkymallien kehittäminen ja valmistaminen on lisääntynyt jonkin verran. Kuvassa 6.7 olevalla kartalla on esitetty synteettisestä materiaalista valmistettavien ratapölkkyjen kehitys- ja valmistuspaikkoja.



Kuva 6.7 Synteettisten ratapölkkyjen kehitys- ja valmistuspaikkoja maailmalla (Woidasky et al. 2008).

Ratapölkkyjen valmistusmateriaalina on tutkittu ja käytetty muun muassa kierrätysmuovia ja kierrätys- ja uusiokumia sekä luonnonkumia. Yhdysvalloissa on esitelty muovisista kierrätyspulloista valmistettu lasikuituvahvisteinen pölkky. Pölkyn fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet ovat hyvin lähellä puun ominaisuuksia. Pölkyn massa on alhainen ja sitä pystytään työstämään samoilla työvälineillä kuin puuratapölkkyä. Kyseistä pölkkyä on alettu käyttää Intiassa silloilla. (Manalo 2011)

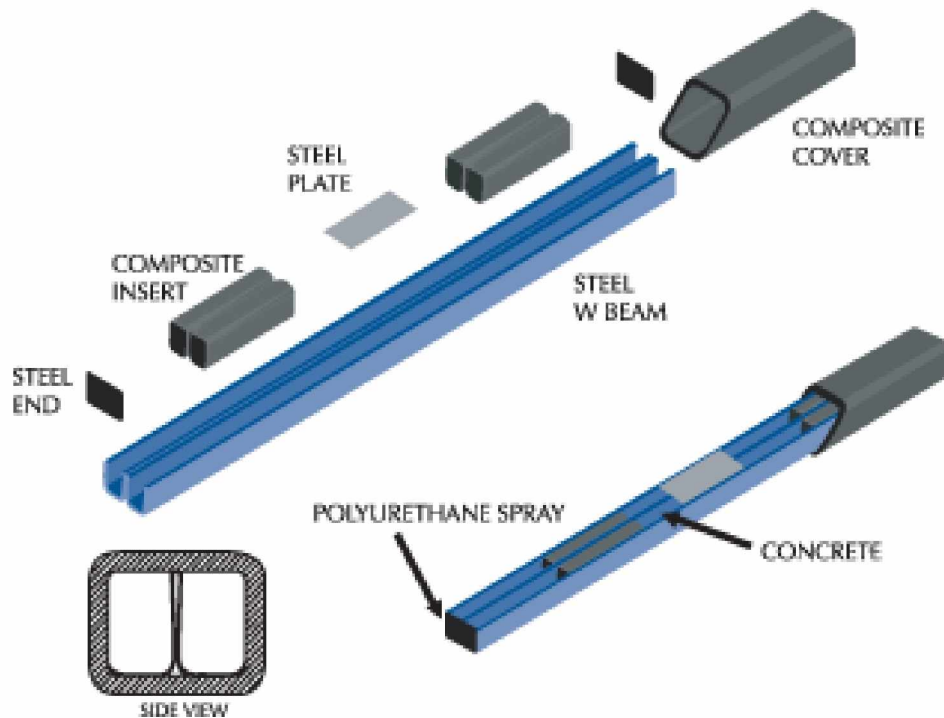
Myös Iso-Britanniassa on kehitetty kierrätysmateriaaleista valmistettu ratapölkky. Transport Research Laboratoryn kehittämä pölkky on jäykkydeltään samanlainen verrattuna pehmeästä puusta valmistettuun ratapölkkyyn. Pölkkyssä on kuitenkin puupölkkyä suurempi lujuus ja raideruuvien sekä ratanulojen ulosvetovastus. (Manalo 2011)

Saksassa on kehitteillä ratapölkky, jonka valmistusmateriaalina on muovi- ja lasikuitujäte sekä eräät muut apuaineet. Niin sanotun RailWaste-pölkyn oletetaan täyttävän kaikki mekaaniset vaatimukset ja samalla sääolosuhteiden sietokyvyn arvioidaan olevan ylivoimainen verrattuna puuratapölkkyyn. (Manalo 2011)

Tällä hetkellä maailmalla on joitain ratapölkkyjä kierrätetystä muovista ja lasikuitukomposiiteista valmistavia yrityksiä. Näillä pölkkyillä sanotaan olevan korkea lujuus ja niiden sanotaan olevan myös kestävämpiä puuratapölkkyihin verrattuna.

Dynamic Composites, LCC valmistaa ratapölkkyjä kierrätysmateriaaleista. Valmistusmateriaaleina on kierrätetty korkeatiheyksinen polyeteeni, kierrätetty kumi, teräs

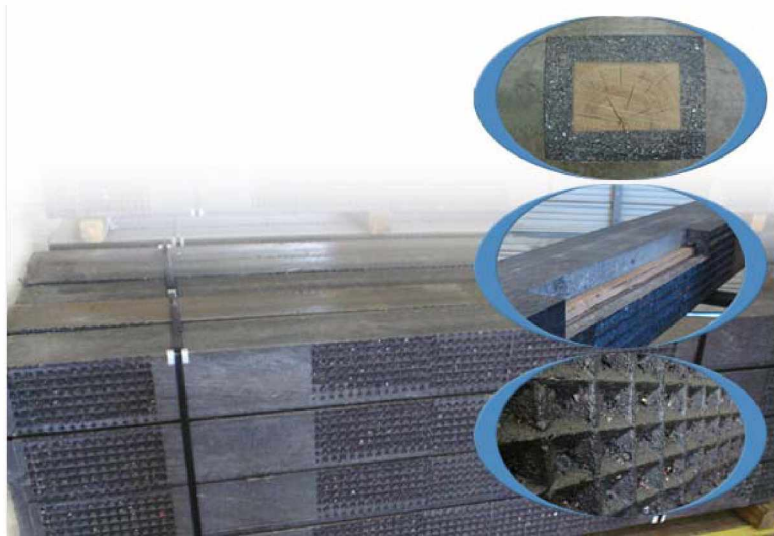
ja betoni. Kuva 6.8 esittää Dynamic Composites, LCC:n valmistamaa ratapölkkyä. Pölkyn poikkeuksellisen rakenteen sanotaan tekevän pölkystä selkeästi puupölkkyä kestävämmän ja käyttöiän on arvioitu olevan yli 60 vuotta. (LCC 2012)



Kuva 6.8 Dynamic Composites, LCC:n valmistama pölkky (LCC 2012).

Yhdysvaltalainen TieTek™ valmistaa ratapölkkyjä kierrätysmuovista, vanhoista autonrenkaista saatavasta kumista, lasikuitujätteestä ja mineraalitäyteaineesta. Pölkkyt ovat todettu vahvoiksi ja ne kestävät hyvin myös luonnon ankaria olosuhteita. Pölkkyjen käyttöiäksi on arvioitu yli 40 vuotta ja pölkkyjä on alettu käyttää yhä enenevässä määrin Yhdysvalloissa ja Iso-Britanniassa. Tutkimuksissa on todettu radan jäykkyyden pysyvän samana, kun puisten ratapölkkyjen tilalle on asennettu komposiittipölkkyt. Lisäksi radassa tapahtuvan värähtelyn on todettu jopa pienenevän puuratapölkkyraiteeseen verrattuna. (TieTek 2012)

Kuvassa 6.9 olevassa IntegriCO composite:n valmistamassa komposiittipölkkyssä puinen suorakaiteenmuotoinen ydin on päällystetty kumin ja muovin seoksella. Kumin ja muovin seos estää kosteuden pääsyn pölkkyyn ja kosteuden pääsyn estyminen tekee pölkystä pitkäikäisen. Yritys valmistaa myös kokonaan muovista ja kumista tehtyjä pölkkyjä. (InteriCO 2012)



Kuva 6.9 *IntegriCO composite:n valmistama puusydäminen komposiittiratapölkky (InteriCO 2012).*

Japanissa Sekisui Chemical Co. Ltd. kehitti vuonna 1978 kovetetusta polyuretaanista valmistetun lasikuituvahvistetun ratapölkyn. FFU (Fibre reinforced Foamed Urethane)-pölkkyjen laajempi valmistaminen aloitettiin vuonna 1980 ja sen käyttö on yleistynyt merkittävästi alkuajoista. Tällä hetkellä FFU-pölkkyjä on käytössä yli 870 km matkalla. Pääasialliset käyttökohteet ovat vaihteissa, terässilloilla ja tunneleissa eli kohteissa, joissa dynaaminen kuormitus on suurta ja kunnossapito sekä pölkyn vaihto on hankalaa. Noin 30 vuoden käyttökokemukset ovat osoittaneet FFU-pölkkyjen käyttöä olevan jopa yli 50 vuotta.

FFU-pölkkyt katkaistaan tehtaalla 12 m määrämittäisiksi kappaleiksi. Valmistustapa mahdollistaa myös pidempien pölkkyaihioiden valmistamisen. Pölkkyaihioiden mitan rajoittavaksi tekijäsi valmistuksen sijasta muodostuukin kuljetuskaluston kapasiteetti. (SEKISUI 2012)

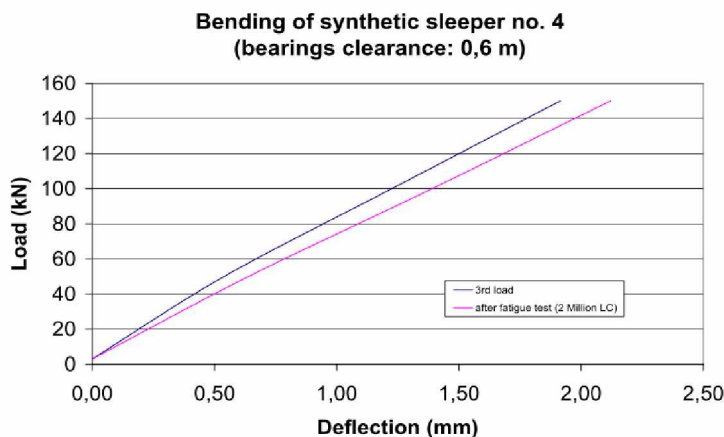
Vuonna 2004 ensimmäinen FFU-pölkkyjen asennuskohde Euroopassa oli Itävallan Wienissä sijaitseva silta. Tämän jälkeen FFU-pölkkyjä on alettu käyttää myös Saksassa ja Serbiassa.

Taulukko 6.3 kertoo FFU-pölkyn ominaisuuksia uutena sekä 10 ja 15 vuoden käytön jälkeen. Vertailukohtana taulukossa on esitetty uusi koivusta valmistettu ratapölkky. Taulukosta voidaan havaita, että FFU-pölkyn ominaisuudet eivät ole juurikaan muuttuneet käytön aikana.

Taulukko 6.3 *FFU-pölkyn ominaisuuksia uutena ja käytettynä (SEKISUI 2012).*

Item	Unit	Birch sleeper	Synthetic sleeper (Grade 1)			Test method	
		New	New	after 10 years	after 15 years		
Specific gravity	—	0.75	0.74	0.74	0.74	JIS Z2101	
Bending strength	MPa	80	142	125	131	JIS Z2101	
Young's modulus of bending elasticity	MPa	7100	8100	8000	8160	JIS Z2101	
Vertical compression strength	MPa	40	58	66	63	JIS Z2101	
Shear strength	MPa	12	10	9.5	9.6	JIS Z2101	
Shear strength in adhesion	—	—	Breakage of material	Breakage of material	Breakage of material	JIS K6852	
Hardness	MPa	17	28	25	17	JIS Z2101	
Impact bending strength	20°C	J/cm ²	20	41	—	—	JIS Z2101
	-20°C	J/cm ²	8	41	—	—	JIS Z2101
Water absorption	mg/cm ²	137.0	3.3	—	—	JIS Z2101	
Destructive voltage	DRY	kV	8	Min.25	Min.25	Min.25	JIS C2110
	WET	kV	Max.1	Min.25	Min.25	Min.25	JIS C2110
Insulation resistance	DRY	Ω	6.6×10 ⁷	1.6×10 ¹³	2.1×10 ¹²	3.6×10 ¹²	JIS K6911
	WET	Ω	5.9×10 ⁴	1.4×10 ⁹	5.9×10 ¹⁰	1.9×10 ⁹	JIS K6911
Dog spike pull-out strength	kN	25	28	28	23	RTRI type	
Screw spike pull-out strength	kN	43	65	—	—	RTRI type	

FFU-pölkkyjen ominaisuuksia on testattu Münchenin teknillisessä yliopistossa (Freudenstein 2008). Pölkkyille muun muassa tehtiin väsytytkuormituskokeita ja staattisia kuormituskokeita. Kokeista saadut tulokset osoittivat pölkkyjen täyttävän niille asetettavat vaatimukset. Esimerkiksi pölkyn pään väsytytkuormituskokeessa maksimikuorma oli 150 kN ja pohjavoima 30 kN. Väsytytkuormituskokeen ei havaittu aiheuttaneen minkäänlaisia vaurioita pölkkyyn ja pölkyn jäykkyyskin oli pienentynyt vain hieman, kuten kuvasta 6.10 voidaan havaita.



Kuva 6.10 FFU-pölkyn pään kuormituskokeen voima-taipuma-kuvaaja ennen (ylempi) ja jälkeen (alempi) väsytytkuormituskokeen (Freudenstein 2008).

Pölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa tukivälin ollessa 1500 mm pölkkyä kuormitettiin jopa 240 kN kuormitustasolle. Edes 240 kN kuormitus ei aiheuttanut halkeamia vetopuolelle. Vertailun vuoksi samoilla koejärjestelyillä kuormitettiin pyökistä valmistettu mitoiltaan vastaava ratapölkky, joka murtui 80 kN kuormitustasolla. (Koller 2009)

University of Southern Queensland on, yhteistyössä useiden Australialaisten rautatiealan yritysten kanssa, useissa projekteissa yrittänyt kehittää nykyisistä pölkky-

leista poikkeavaa komposiittipölkkyä. Uudenmallisen pölkyn kehityksen lähtökohtana on ollut kovapuisten ratapölkkyjen korvaaminen rautateillä. Yksi ensimmäisistä CEEFC:n (The Centre of Excellence in Engineered Fibre Composites) kehittämistä pölkkykymälleistä on esitetty alla olevassa kuvassa 6.11. Pölkky on valmistettu lasikuituvahvistetusta polymeeribetonista ja on tarkoitettu korvaamaan puu- ja betoniratapölkkyjä sekä uusilla että olemassa olevilla radoilla. Ratapölkky painaa vain 61 kg ja pölkkyyn voidaan asentaa tavallisia kiskonkiinnityksiä. Pölkyn sähköneristävyys on erittäin hyvä ja pölkky onkin ollut koekäytössä. Koeosuudelta saadut tulokset ovat osoittaneet ratapölkyn toimivan hyvin nykyisissä radan olosuhteissa. Pienestä massasta huolimatta pölkky vastustaa vaakasuuntaista liikettä poikkeuksellisen muotoilunsa ansiosta hyvin. (Manalo 2011)



Kuva 6.11 CEEFC:n kehittämä uusi pölkky malli (Manalo 2011).

Taulukko 6.4 esittää kehitettyjä ja kehitettäviä komposiittiratapölkkyjä ja taulukko 6.5 esittää kaupallisesti saatavilla olevien pölkkyjen mekaanisia ominaisuuksia.

Taulukko 6.4 Maailmalla kehitettyjä komposiittiratapölkkyjä (Manalo 2011).

Country	Description	Type of application	Level of development
Australia	Polymer concrete with glass fibres	Standard sleepers	Trial application
	Composite sandwich with carbon fibre strips	Transoms	Trial application
	LVL with glass fibre wraps	Turnout sleepers	R & D
Austria	Hard polyurethane foam and glass fibres	Transoms	Actual application
Germany	Mixed plastic consumer waste	Standards sleepers	R & D
India	FRP sleepers and Composite plastic sleepers	Standard sleepers Bridge transoms	Trial application
	Japan	Hard polyurethane foam and glass fibres	Standard sleepers Turnout sleepers
South Africa	Composite polymer	Underground railway	Trial application
Thailand	Engineered natural rubber	Standard sleepers	R & D
UK	Recycled plastic sleeper	Standard sleepers	R & D
US	Glass fibre reinforced recycled-plastic	Standard sleepers	Actual application

Taulukko 6.5 Joidenkin komposiittiratapölkkyjen mekaanisia ominaisuuksia. E_{sleeper} on kimmomoduuli, σ_b taivutuslujuus, SSW on raideruuvien ulosvetolujuus ja σ_c on puristuslujuus (Manalo 2011).

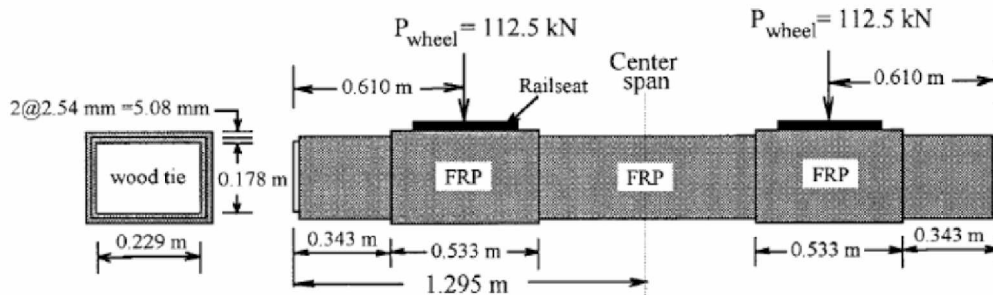
Komposiittipölkky	E_{sleeper} GPa	σ_b MPa	SSW kN	σ_c MPa
Dynamic Composites LLC	1,73	17,92	17,81	310,15
IntegriCo	2,00	24,23	16,62	15,26
Tietek™	1,24	13,79	17,83	206,74
Eslon Neo Lumber (FFU)	8,10	142,00	65,03	58,06
RailWaste	1,36	18,92	-	-

6.3.1.1 Nykyisten pölkky materiaalien parantaminen

Viimevuosina maailmalla on ollut käynnissä joitain tutkimuksia, joissa on pyritty kehittämään menetelmiä, joilla pystytään vahvistamaan nykyisiä pölkky materiaaleja. Tutkimuksissa on kuitenkin pääasiassa pyritty parantamaan pölkkyjen mekaanisia ominaisuuksia eikä niinkään parantamaan esimerkiksi puupölkkyjen lahonkestokykyä.

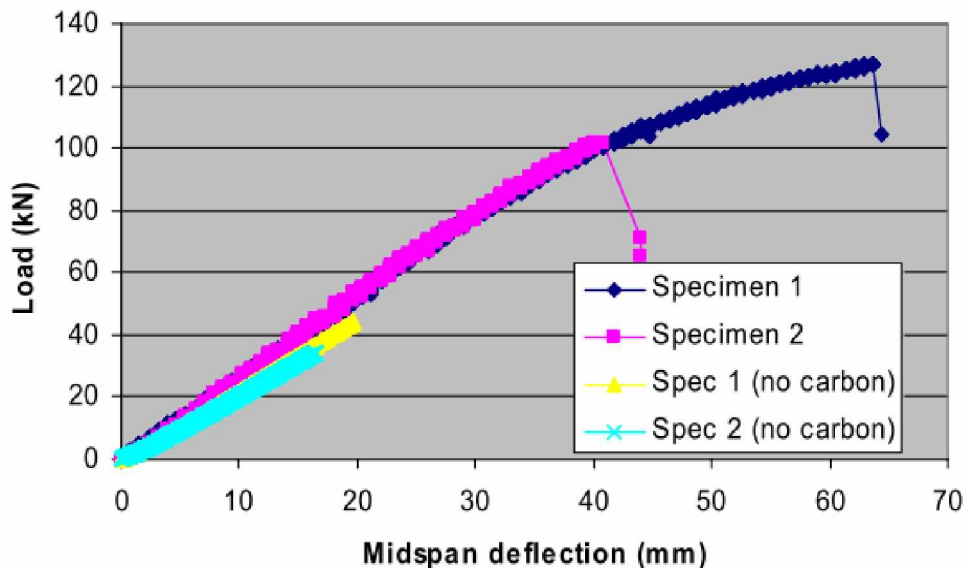
Qiao et al. (2008) ovat suunnitelleet ja mallintaneet lasikuituvahvisteisella polymeerillä (glass fibre reinforced polymer GFRP) päällystettyä puuratapölkkyä. Tutkimus osoitti GFRB:llä vahvistetun puupölkyn ominaisuuksien parantuneen merkittävästi. Komposiittivahvistus kasvatti pölkyn jäykkyyttä ja lisäsi maksimikuormien kestoa

samalla vähentäen pölkkyyn kohdistuvia jännityksiä ja sepelin pölkkyä kuluttavaa vaikutusta. Lisäksi komposiittikerroksen arvioitiin pienentävän aluslevyn painumista pölkkyyn. Komposiittikerros toimii myös tehokkaana suojana kosteutta vastaan. Kosteuden pääsyn estämisen vaikutus pölkyn pitkäaikaiskestävyyden paranemiseen vaatii kuitenkin lisätutkimuksia. Kuva 6.12 esittää mallikuvan GFRB:llä päällystetystä puuratapölkystä.



Kuva 6.12 Mallikuva GFRB:llä päällystetystä puuratapölkystä (Qiao et al. 2008).

Humbreys et al. (2004) tekivät Australiassa alustavia tutkimuksia kuituvahvistetuista puuratapölkkyistä. Tutkimusten tuloksena voitiin todeta, että puuratapölkyn vahvistaminen hiilikuituverkolla kasvattaa merkittävästi pölkyn kuormankantokykyä. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin, että hiilikuituverkko saattoi irrota ennenaikaisesti pölkkyä kuormitettaessa, jolloin verkosta saatava hyöty pieneni. Vaikka pölkyn vahvistaminen paransikin pölkyn lujuutta, ei menetelmällä pystytty suojaamaan pölkkyä ympäristöolosuhteilta. Kuva 6.13 esittää pölkyn keskiosan kolmipistekuormituskokeissa saatuja tuloksia tukivälin ollessa 2012 mm.



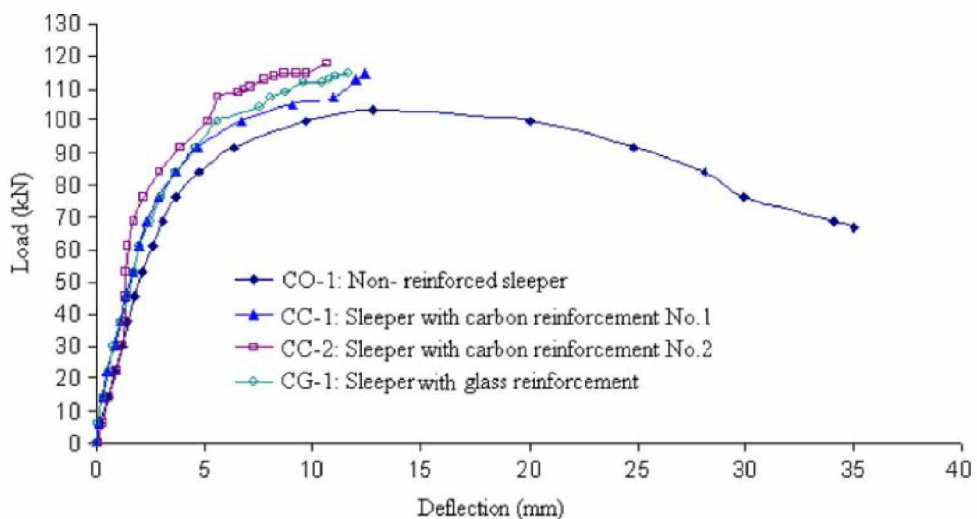
Kuva 6.13 Pölkyn keskiosan kolmipistekuormituksen tuloksia vahvistetuille ja vahvistamattomille (no carbon) ratapölkkyille (Humphreys & Francey 2004).

Shokrieh & Rahmat (2006) tutkivat hiilikuitu- ja lasikuituvahvistuksen vaikutusta betoniratapölkyn ominaisuuksiin. Tutkimuksissa todettiin kahden lasikuitukerroksen olevan taloudellisempi vaihtoehto verrattuna yhteen hiilikuitukerrokseen. Kaksi lasikuitukerrosta kasvatti ratapölkyn kuormankantokykyä suurin piirtein saman verran kuin yksi hiilikuitukerros. Kuvassa 6.14 on esitetty keskiosaltaan vahvistettu betoniratapölkky ja halkeaman muodostumiskohta vahvistettuun ratapölkkyyn.



Kuva 6.14 Vasemmalla pölkyn yläpinnasta keskeltä vahvistettu ratapölkky ja oikealla halkeaman syntykohta (Shokrieh & Rahmat 2006).

Kuva 6.15 esittää neljän eri ratapölkyn voima-taipuma-kuvaajat Shokriehin ja Rahmatin tutkimuksissa. Kuvaajasta voidaan havaita, että hiilikuitu- ja lasikuituvahvistus kasvattivat ratapölkyn jäykkyyttä ja murtokuormaa. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin, että vahvistettuja ratapölkkyjä voitaisiin käyttää myös laadultaan heikompien tukikerrosmateriaalien kanssa ja vahvistus vähentäisi ratapölkyn väsymisestä aiheutuvia vaurioita. Vahvistamiseen käytettävän verkon arvioitiin vähentävän pölkyn pituus-suuntaisten halkeamien syntyä ja kasvua, sillä verkko vahvistaa pölkkyä myös poikisuunnassa. Pölkkyissä ei ollut poikittaista raudoitusta.



Kuva 6.15 Neljän testatun ratapölkyn voima-taipuma-kuvaajat (Shokrieh & Rahmat 2006).

Transportation Technology Centre Coloradossa on tutkinut lasikuitukankaalla vahvistettuja puuratapölkyjä. Tutkimuksissa havaittiin kankaan parantavan ratapölkyn kestävyyttä (Manalo 2011). Puuratapölkyn vahvistaminen muilla materiaaleilla ei kuitenkaan paranna puun lahonsietokykyä.

Yhteenveto

Nykyisten pölkkyjen parantamisen lisäksi maailmalla on tutkittu vaihtoehtoisia materiaaleja nykyisille pölkkyateriaaleille. Monien tutkimuksien päämääränä on kuitenkin ollut kehittää lähinnä vaihtoehtoisia pölkkyateriaaleja niihin suppeisiin kohteisiin, joihin esimerkiksi teräksestä tai betonista valmistetut pölkkyt eivät sovellu. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivätkö materiaalit sopisi myös tavallisten linjaratapölkkyjen valmistukseen.

Useiden tutkimusten myötä on valmistettu erinäisiä koekäyttöön tarkoitettuja prototyyppimalleja, mutta varsinaisia laajamittaisessa käytössä olevia synteettisiä pölkkyateriaaleja on vähän. Esimerkiksi Japanissa on kuitenkin jo pitkä kokemus synteettisistä materiaaleista valmistetuista ratapölkkyistä. Japanissa 870 km radasta on varustettu SEKISUI:n valmistamilla ratapölkkyillä, joiden ominaisuudet ovat erittäin hyvät verrattuna puuratapölkkyyn. SEKISUI:N valmistamien pölkkyjen ominaisuuksissa ei ole havaittu muutosta käytön aikana. Hyvistä ominaisuuksista huolimatta kehitystyön tuloksena syntyneiden pölkkyjen suurin ongelma on niiden hinta. Pölkkyistä muodostuvat kustannukset eivät useinkaan ole kilpailukykyisiä tällä hetkellä käytettävien pölkkyateriaalien kanssa varsinkaan linjaratapölkyn korvaajana. Hinnan lisäksi ongelmia aiheuttavat myös pölkkyjen valmistusmäärät. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää sitä, että todennäköisesti suurin synteettisten pölkkyjen valmistaja SEKISUI valmisti vuonna 2006 noin 100000 pölkkyä. SEKISUI:n vuoden 2006 tuotanto ei olisi riittänyt kattamaan Suomen rataverkolla vuosittain tarvittavien uusien puupölkkyjen määrää.

Synteettisten pölkkyjen käytön todennäköinen lisääntyminen ja kilpailun kasvaminen mahdollistavat synteettisistä pölkkyateriaaleista valmistettujen pölkkyjen hinnan kilpailukyvyyn parantumisen yleisesti käytettyihin pölkkyateriaaleihin verrattuna. Eräs suuri kysymys ajateltaessa synteettisten pölkkyateriaalien käyttöä Suomessa on materiaalien pakkasenkesto. Synteettisiä pölkkyateriaaleja käytetään tällä hetkellä lähinnä suhteellisen leutojen talvien alueilla. Tästä johtuen pölkkyjen pakkasenkestokyky täytyy selvittää ennen kuin pölkkyjen käyttöä voidaan harkita Suomessa.

6.4 Betoni

Betoniratapölkkyjen käyttö on yleistynyt voimakkaasti eripuolilla maailmaa. Betoniratapölkky ei kuitenkaan sovellu kaikissa tilanteissa puuratapölkyn korvaajaksi. Betoniratapölkyn on yleisesti arvioitu edellyttävän paksumpaa ja paremman tuennan tarjoavaa tukikerrosta sekä raskaampaa kiskoa. Tämä lisää radan rakennuskustannuksia, mikä on ongelmallista erityisesti vähäliikenteisillä radoilla. Tukikerroksen pitää myös olla laadukasta raidesepeliä, sillä huonot tukikerroksen ominaisuudet saattavat aiheuttaa betonipölkkyihin kuormitusyösklimäärän kasvaessa vaurioita. Lisäksi betoniratapölkkyt eroavat mekaanisilta ominaisuuksiltaan merkittävästi puuratapölkkyistä. Erityisesti betoniratapölkyn rakenteellinen jäykkyys on merkittävästi puuratapölkyn jäykkyyttä suurempi. Kun puuratapölkkyä hajavaihdetaan betoniratapölkkyihin, suurempi jäykkyys aikaansaa kuormien keskittymisen betoniratapölkkyihin, mikä puolestaan

johtaa halkeamien muodostumiseen. (Gonzalez-Nicieza et al. 2008.) Tämä on osasy, miksi betoniratapölkkyillä ei voida korvata yksittäisiä vaurioituneita puuratapölkkyjä. Ongelmia aiheuttavat myös betoniratapölkyn poikkeavat mitat puiseen ratapölkkyyn verrattuna. (Manalo 2011)

Australiassa on kehitetty maailman ensimmäinen puuratapölkkyä korvaava esijännitetty betoniratapölkky. Pölkky on esitetty kuvassa 6.16. Muista betoniratapölkkyistä poiketen kehitetyllä pölkkyllä on samat mitat kuin puuratapölkkyillä, joten pölkkyt voidaan asentaa helposti puuratapölkkyraiteeseen. Kehitettyjen betoniratapölkkyjen etuna on erityisesti parempi raidelevyden säilyvyys. Austrakin kehittämää TRS-pölkkyä (Timber Replacement Sleeper) on asennettu rataan yli 50000 kappaletta. (Manalo 2011)



Kuva 6.16 Australiassa kehitetty puuratapölkkyjä korvaava betoniratapölkky (Manalo 2011).

Australian lisäksi Ruotsissa on kehitetty betoniratapölkkyä, jonka rakenteelliset ominaisuudet olisivat lähellä puuratapölkyn ominaisuuksia. Kuten Suomessa, myös Ruotsissa ollaan kieltämässä kreosoottijäy puuratapölkkyjen kyllästysaineena. Tämä on aikaansaanut tarpeen uudenlaiselle betoniratapölkylle. Kehitystyön tuloksena on syntynyt betoniratapölkky, jolla pystytään korvaamaan yksittäisiä puuratapölkkyjä radan pystysuuntaisen jäykkyyden juurikaan muuttumatta. Kehitetty betoniratapölkky on ollut koekäytössä yli kahden vuoden ajan ja saatujen käyttökokemusten perusteella pölkky täyttää kehitystyön alussa asetetut vaatimukset. (Abetong 2013)

7 Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

Betoniratapölkkyjä on käytetty vuosikymmenten ajan eri puolilla maailmaa, ja tällä hetkellä betoni onkin puun ohella käytetyin pölkyn valmistusmateriaali. Betoniratapölkkyistä saadut käyttökokemukset ovat pääasiassa hyviä, vaikka tosin erityisesti Pohjois-Amerikassa myös huonoja. Esimerkiksi betoniratapölkkyraiteella on selvästi suurempi pituussuuntainen jäykkyys ja vastus kuin raiteella, jonka ratapölkkyt on valmistettu muista materiaaleista. Hyvistä käyttökokemuksista huolimatta pölkkyissä esiintyvät vauriot ja niiden aiheuttajat eivät ole täysin ymmärrettyjä.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella pölkkyt vaurioituvat mekaanisten rasitusten ja rapautumisen johdosta. Useassa kirjallisuuslähteessä yleisimmäksi ratapölkkyissä esiintyvien halkeamien aiheuttajaksi on arvioitu yksittäisiä erittäin suuria iskukuormia. Iskukuormien aiheuttajia ovat erinäiset liikkuvan kaluston ja kiskon viat, joista haitallisimmaksi on arvioitu lovipyörä. Iskukuormien aiheuttamat halkeamat muodostuvat kiskon lepopinnan kohdalle ratapölkyn alareunaan.

Ratapölkkyjen rasitusten kannalta haitallisiksi on havaittu pölkkyjen ja tukikerroksen välissä olevat raot, eli niin sanotut roikkuvat pölkkyt. Raot ovat erityisen haitallisia suurnopeusjunien raiteissa, joihin kohdistuu suuria dynaamisia voimia. Ratapölkkyyn kohdistuva pystysuuntainen voima myös kasvaa hitausvoimien vaikutuksesta junan nopeuden kasvaessa. Hitausvoimat vaikuttavat sekä ratapölkkyssä että raidesepeleissä.

Mahdollinen vaurioiden aiheuttaja ratapölkkyihin on tukikerroksen ominaisuuksien heikkeneminen muun muassa tukikerroksen epätasaisen tiivistymisen, sepelin hienontumisen ja epätasaisen routanousun seurauksena. Tällöin ratapölkyn pohjapaine alkaa kohdistua yhä enenevässä määrin ratapölkyn keskelle, eli ratapölkky alkaa kantaa keskeltä. Tällöin ratapölkyn keskelle muodostuvat rasitukset voivat kasvaa merkittävästi ja halkeamien muodostuminen ratapölkyn keskelle sen yläpintaan on mahdollista.

Tukikerrokseen kohdistuvien rasitusten johdosta ratapölkyn alapinnan pinta-alan pitää olla riittävän suuri, jotta keskimääräinen tukikerrokseen kohdistuva pohjapaine jää raidesepeleiden hienontumisen ja alempien rakennneosien pysyvien muodonmuutosten minimoimiseksi mahdollisimman alhaiseksi. Viimeaikoina on kehitetty uusia pölkkytyyppejä, kuten kehäpölkky ja leveä ratapölkky. Näiden uusien pölkkytyyppien tarkoituksena on ollut pienentää tukikerrokseen kohdistuvaa painetta. Hyvistä kokemuksista huolimatta uudet pölkkytyypit ovat suhteellisen vähän käytettyjä.

Vaikka ratapölkkyissä esiintyy eri syistä johtuvia halkeamia, tulisi ratapölkkyjen suunnittelun tavoitteena olla halkeilematon ratapölkky. Tämä johtuu siitä, että taivutusmomentista johtuvat halkeamat betonissa johtavat esijännityspunosten jännitystason suureen nousuun halkeamakohdassa taivutusrasituksen aikana. Kirjallisuuslähteissä on esitetty, että esijännityspunosten kasvaneet jännitykset voivat johtaa jänneterästen väsymiseen ja tätä kautta jänneterästen väsymismurtoon. Lisäksi on esitetty arvioita halkeamien merkityksestä jänneterästen korroosion nopeutumiseen.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella merkittävä ratapölkkyjen käyttöikään vaikuttava tekijä on rapautuminen. Useissa maissa kemiallinen rapautuminen on ollut merkittävässä roolissa ajatellen ratapölkkyjen lyhentynyttä käyttöikää. Yleisimmät ratapölkkyissä esiintyvät kemiallisen rapautumisen aiheuttajat ovat ettringiitti ja alkaliki-

viainesreaktio. Haitallisen ettringiittireaktion aiheuttajaksi on havaittu liian korkea lämpökäsittelylämpötila, joka viivästyttää ettringiitin kiteytymistä. Ettringiitin kiteytyminen tapahtuu vuosien aikana aiheuttaen betoniin säröjä ja täyttäen betonissa olevia suojahuokosia. Tämä saattaa pakkasrasituksen kanssa aiheuttaa huomattavaa rapautumista ratapölkkyissä lyhentäen näin niiden käyttöikä. Esimerkiksi Ruotsissa ettringiitti on aiheuttanut laajoja rapautumisvauriota 1990-luvun alkupuolella. Myös Suomessa käytössä olleissa ratapölkkyissä on havaittu 1960-1980 luvuilla ettringiitin aiheuttamaa rapautumista, mutta ongelma on poistunut betonin kovettumislämpötilan rajoittamisen myötä.

Rapautumista voivat myös aiheuttaa alkalikiviainesreaktiot, joiden yleisin muoto on alkali-silikareaktio. Alkali-silikareaktio on aiheuttanut laajoja rapautumisvaurioita muun muassa Kiinassa. Suomessa kyseistä rapautumismuotoa ei ole havaittu ongelmaksi. Syynä on Suomessa käytettävä kiviaines, mikä ei ole erityisen altis aiheuttamaan alkalikiviainesreaktiota.

Suomessa merkittävin rapautumisen muoto on todennäköisesti pakkasrapautuminen. Osassa 1960- ja 1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkkyissä rapautuminen on ollut ongelma. Syynä on pakkasrapautumisen ja ettringiitin yhteisvaikutus, mikä on aikaansaanut voimakastakin rapautumista.

Valmistuksen aikaiset virheet ovat mahdollinen, mutta tarkkaan valvotun ja ohjeistetun, sekä pitkälle kehitetyn tuotantoprosessin johdosta epätodennäköinen vaurioiden aiheuttaja. Useimmiten ratapölkkyissä esiintyvät puutteet ja vauriot havaitaan jo tehtaalla. Yleisimpiä valmistuksenaikaisia vaurioita ovat harvavalut.

Betoniratapölkkyjen kuntoa arvioidaan useimmiten silmämääräisesti radalla tehtävien kävelytarkastusten yhteydessä. Nykyään markkinoille on tullut konenäköjärjestelmiä, joiden avulla pystytään tekemään ratapölkkyjen kunnon tarkastusta. Tarkastuskohteina voivat olla esimerkiksi pölkkyssä esiintyvät halkeamat ja kiskonkiinnitysten paikallaanolo. Konenäön etuina verrattuna ihmisen tekemään tarkastukseen ovat tarkastuksen nopeus ja tarkkuus tietyin edellytyksin. Ongelmana konenäössä on kuitenkin se, että tietty järjestelmä pystyy tarkastamaan vain tiettyjä asioita. Tämän johdosta ei vielä ole pystytty kehittämään konenäköjärjestelmää, jolla pystyttäisiin täysin korvaamaan ihmisen tekemät kävelytarkastukset. Lisäksi konenäöllä tehtäviä tarkastuksia vaikeuttavat muuttuvat olosuhteet, jotka voivat heikentää tarkastuksen luotettavuutta.

Betonin ohella puu on merkittävä ratapölkkyjen valmistusmateriaali. Puuratapölkkyjä on valmistettu erinäisistä kovapuulajeista, mutta myös kovapuuta pehmeämmistä puulajeista, kuten mäntypuista. Pehmeämpien puulajien pitkäaikaiskestävyyttä joudutaan parantamaan kyllästysaineilla. Yleisin kyllästysaine on ollut kreosoottijöly. Kasvaneen ympäristötietoisuuden ja kreosoottijölyn haitallisuuden johdosta on jouduttu pohtimaan kreosoottikyllästetyn puuratapölkyn korvaamista ympäristöystävällisemmällä pölkkyillä. Vaihtoehtoisiksi ratkaisuihin on noussut eri tavalla kyllästetty puu tai kokonaan puun korvaava materiaali. Kreosoottijölyn korvaavien kyllästysaineiden ongelma on useimmiten kreosoottia heikompi suojaustaso tai selkeästi korkeampi hinta. Vaihtoehtoisen kyllästysmenetelmän lisäksi puu voidaan korvata toisella materiaalilla. Yleisimmät korvaavat materiaalit ovat betoni, teräs ja erinäiset synteettiset materiaalit. Teräspölkkyjä on käytetty jonkin verran eri puolilla maailmaa. Teräspölkkyjen suurin ongelma on korkea hinta ja hinnan lisäksi pölkkyistä saadut käyttökokemukset eivät ole kaikilta osin hyviä. Viimeaikoina perinteisten

pölkkyateriaalien rinnalle on kehitetty erinäisiä synteettisistä materiaaleista valmistettuja pölkkyjä. Vaikka synteettisistä materiaaleista valmistettujen pölkkyjen ominaisuudet ovat lähellä puuratapölkyn ominaisuuksia ja niiden käyttöikä on puuratapölkkyä pidempi, on synteettisten pölkkyjen hankintahinta puuratapölkkyä selkeästi korkeampi. Tästä syystä synteettisistä materiaaleista valmistettuja pölkkyjä käytetään lähinnä suppeissa kohteissa, kuten vaihteissa ja silloilla. Pääsääntöisesti puun korvaamiseen käytetty materiaali on betoni. Betoniratapölkyn ongelma on kuitenkin se, että yleisen käsityksen mukaan ne eivät sovellu soratukikerrokselliseen raiteeseen. Lisäksi betoniratapölkkyllä on erilaiset mekaaniset ominaisuudet verrattuna puuratapölkkyyn. Erilaisten ominaisuuksien johdosta perinteisillä betoniratapölkkyillä ei voida korvata yksittäisiä puuratapölkkyjä. Ruotsissa ja Australiassa on kuitenkin kehitetty betoniratapölkkyjä, joilla voidaan korvata myös yksittäisiä puuratapölkkyjä. Tämän hetkiset käyttökokemukset uusista pölkkyistä ovat lupaavia.

8 Jatkotutkimusehdotukset

Betoniratapölkkyjen rapautumisominaisuuksien arvioiminen

- Eri ikäisten radasta poistettujen betoniratapölkkyjen kunnan arvioiminen rapautumistutkimuksin.
- Testattavaksi eri puolilta Suomea radasta otettuja Parman ja Lujan alkupään tuotannon pölkkyjä.
- Kokeina esimerkiksi pakkas-suolakoe, jäädytyssulatuskoe, suojahuokostestaus ja ohuthienäytteet.

Betoniratapölkkyjen ominaisuuksien testaaminen kuormituskokeiden avulla

- Standardin EN 13230-2 mukaisia kuormituskokeita käyttämättömille ja käytössä poistetuille pölkkyille. Kokeina staattiset kuormituskokeet ratapölkyn päälle ja keskiosalle, sekä dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn päälle. Lisäksi standardin ulkopuolelta dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn keskiosalle.
- Vaurioiden merkityksen arvioiminen, kun ratapölkkyt ovat samaa tyyppiä, mutta eriasteisesti vaurioituneita.

Halkeaman merkityksen arvioiminen.

- Betoniratapölkkyjen väsymisen arvioiminen. Kuormituskokeissa kuorman suuruus esim. 30 %, 40 %, ... 90 % staattisesta maksimikuormasta.
- Kokeellisten tutkimusten tulosten tarkastelu laskennallisin keinoin.

Ratapölkkyjen toiminta radassa

- Betoniratapölkkyjen rasiutusten määrittäminen erilaisilla tukikerroksilla ja pölkkytyypeillä.
- Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen rasiutusten mittaus ja pohjapainejakauman määrittäminen. Mittaukset kolmena eri vuodenaikana (kevät, kesä ja talvi).
- Betoniratapölkkyjen laskennallinen tarkastelu
- Suomalaisten ratapölkkyjen kestävyyslaskelmat.
- Ratapölkkyjen laskenta alustalukutarkastelun avulla.

Kirjallisuusluettelo

Abetong 1989. Parman betoniratapölkkyjen laskelmat. 24.8.1989

Abetong 2010a. Internet: http://www.heidelbergcement.com/se/sv/abetong/vara_produkter/licens-verksamhet/sparteknik/sliprar.htm

Abetong 2010b. Kokous Växjössä Abetongin tiloissa 1.9.2010.

Abetong 2013. Abetong utvecklar ny betongsliper som kan ersätta kreosotimpregnerade träsliprar. Viitattu: 20.1.2013 Saatavissa: <http://www.mynewsdesk.com/se/pressroom/abetong/pressrelease/view/abetong-utvecklar-ny-betongsliper-som-kan-ersaetta-kreosotimpregnerade-traesliprar-793744>

Aguilar J.J., Lope M., Torres F., Blesa A. 2005. Development of a stereo vision system for non-contact railway concrete sleepers measurement based in holographic optical elements. *Measurement* 38, pp. 154-165

Aimonen P. 2010. Konenäön sovelluskohteita, *Ohutlevy* , 1/2010. s.18-20

AREMA. 2003. Basic track components. http://www.arena.org/publications/pgre/Practical_Guide/PGChapter3.pdf

Asanuma K. 2004. Ladder track structure and performance. *Railway Technology Avalanche* No.6, September 1, 2004, 3 p.

Augustin S., Gudehus G., Huber G. & Schünemann A. 2003. Numerical model and laboratory tests on settlement of ballast track. In *System Dynamics and Long-term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade*, Berlin, pp. 317-336.

Bakharev T. & Struble L.J. 1997. Microstructural Features of Railseat Deterioration in Concrete Ties. *Journal of materials in civil engineering*, August, 1997, pp. 146-153.

Bakker R. 1988. Initiation period. In Schiessl, P. (editor). *Corrosion of steel in concrete*. London. Chapman and Hall. Pp. 22-55

Banverket 2002. Tekniska bestämmelser för sliprar av betong. Standard BVS 522.30. 07.01.2002.

Banverket 2004. Miljösäkrad slipershantering. Handbok. BVH 809.1. 2004-05-01.

Banverket 2007. Mängdförteckningar med beskrivning enligt AMA 98. BVH 581.1901-1922. 2007-02-01.

Banverket 2010. DEF-sliprar. Besiktning. Standard BVS 1522.37. Version 2.0. 01.01.2010.

Boren H. 2010. Tulevaisuuden sähköpylväs. *Energiatoteollisuus ry/Energiatutkimuspooli*, p.145

Blomberg L. 2001. Pituussuuntaan haljenneet ratapölkkyt. *Muistio*, 10.12.2001 7 s.

by 32 1989. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus. BY, Suomen Betoniyhdistys r.y.

BY 42 2002. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002. Helsinki. Betoniyhdistys. 178 p.

BvSys. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: http://www.bvsys.de/index.php/products_2/railway-inspection-systems_6/

Collepari M. 1999. Damage by delayed ettringite formation. *ACI's Concrete International*, January 1999, 6 p.

Cybernetix Railway Activity, esittelymateriaali. [Viitattu 25.7.2011]

Edwards J.R., Hart J.M., Sawadisavi S., Resendiz E., Barkan C.P.L., Ahuja, N. 2009. *Advancements in Railroad Track Inspection Using Machine-Vision Technology*. AREMA Conference Proceedings, Chicago, Illinois, p.29

EN 15528:2008. Railway applications. Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure. European standard. European committee for standardization, CEN. March 2008.

Esveld C. 2001. *Modern Railway Track*, Second Edition. MRT-Productions. ISBN 90-800324-3-3

EURAILSCOUT. [Viitattu 21.10.2011]. Saatavissa: http://www.eurailscout.com/1-1-visual-switch-inspection_en.html

European Railway Review. 2009. ZSX Twin Sleeper: the special sleeper made by Leonhard Moll. *European Railway Review*, Issue 2, 2009.

Fib. 2006. *Precast concrete railway track systems*. International Federation for Structural Concrete. 32 p.

FIP Commission on Prefabrication. 1987. *Concrete railway sleepers*. FIP state of art report, Thomas Telford, London, 22 p.

Freudenstein S. & Romstötter M. 2004. Wide sleeper perform well in comparative tests. *International Railway Journal*, May, 2004 pp. 44-46.

Freudenstein S. 2008. Investigation on FFU synthetic wood sleeper. Munich's University of Technology.

Georgetown Rail. AURORA. [Viitattu 25.7.2011]. Saatavissa: <http://grex-sps.com/aurora.php>

Getzner 2009. *Sleeper Pads for Ballasted Track*. Getzner Werkstoffe GmbH. Esite 03-2009.

Grantham M. (editor) 2011. *Concrete repair – A practical guide*. New York, Taylor & Francis. 302 p.

Grundfelt P. 1980 *Betoniratapölkkyjen rapautuminen*. Rautatieopillinen kurssi.

Grundfelt P. 1982. Betoniratapölkyn ikä. Muistio 22.10.1982.

Grundfelt P. 1985. Betoniratapölkyn pidentäminen 2500 mm:stä 2600 mm:iin. Muistio, Valtionrautatiet, Rtt/Raidejaosto.

Grundfelt P. 2010. Haastattelu 18.11.2010 Lauttasaarella Helsingissä. Lisäksi luovutti materiaalia kansiostaan, yhteensä 20 sivua, osa alkuperäisiä.

Gustavson R. 2002. Structural behaviour of concrete railway sleepers, Doctoral Dissertation, Chalmers Concrete Structures, Gothenburg. Chalmers University of Technology, Sweden. November 2002, 157 pp

Hakulinen M. 2003. Teräs pohja- ja maarakentamisessa. Oppimateriaali, 2003, 114 s.

Haukijärvi M. 2002. BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus. Suomen betoniyhdistys r.y., 174 s.

Heinz J. 2000. Prestressed concrete tie production-Summary of the World wide most common used prestressed Concrete Tie Production Systems, in AREMA Conference. Dallas, TX. 36 p.

Holm G., Bengtsson P-E., Carlsten P., Johansson L. O. & Larsson R. 2002 Befintliga banker vid ökad tåglast och högre tåghastighet. Statusbestämning av befintliga banker. Förbättrings- och förstärkningsåtgärder under driftsförhållanden. "State of the art" Upgrading of existing railway lines for increased axle loads and speed. Diagnosis and improvement methods. State of the art) Swedish Geotechnical Institute, SGI. Linköping. Varia 520. 102 p.

Honkala T. 2010. Koneenäön soveltuvuus tiiliverhouselementtien laaduntarkkailuun, Opinnäytetyö, Keski-Pohjanmaan Ammattikorkeakoulu, Toukokuu 2010

Hsiang-Yu H., Nanming C., Ching-Lung L. 2007. Visual Recognition System of Elastic Rail Clips for Mass Rapid Transit Systems, JRCICE2007-40080, Colorado, USA 13-16, March, 2007. p.1-7

Humphreys M.F. Francey K.L. 2004. An investigation into the rehabilitation of timber structures with fibre composite materials. Queensland University of Technology, Australia, p.6

IHHA 2009. Guidelines to Best Practices For Heavy Haul Railway Operations. Infrastructure Construction and Maintenance Issues. International Heavy Haul Association. ISBN Number 1930566743 / 9781930566743 U.S.A.

IntericoCO composites. [Viitattu 5.6.2012]. Saatavissa: <http://www.integrigo.com>

Iso-Mustajärvi P. 2004. Betonitekniikka. Luentomoniste.

Jaakkola R. 2010. Tehdaspäällikkö, Lujabetoni Oy. Siilinjärvi. Haastattelu 25.1.2010

Jernbaneverket 2010a. Overbygning. Banedivisjonen. Sporkonstruksjoner. Regler for prosjektering.

Jernbaneverket 2010b. Overbygning. Banedivisjonen. Sviller. Regler for vedlikehold.

Jernbaneverket 2010c. Overbygning. Infrastruktur. Generelle tekniske krav. Regler for prosjektering.

Jimenez R., Davis D., LoPresti J. Final Results of Steel Tie Testing at FAST" Technology Digest TD00-015, Transportation Technology Center, Association of American Railroads, August 2000.

Järveläinen M. 2010. Tehdaspäällikkö, Parma Oy. Forssa. Haastattelu 13.1.2010

Kaewunruen S. & Remennikov A.M. 2008. Impact damage classification of railway prestressed concrete sleepers. Conference on Railway Engineering, Perth, Australia, September 10-12, 2008, pp. 97-102.

Kaewunruen S. & Remennikov A.M. 2007. Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system. Proc. IMechE Vol.221 Part F:J. Rail and Rapid Transit., pp. 495-507.

Kaewunruen Sakdirat & Remennikov Alex M. 2010. Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads. Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No. 6.

Kalliainen A., Luomala H., Jäniskangas T., Nurmikolu A., Kolisoja P. 2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuus tutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. 152 s.

K-Betonia Oy. 1986. B86 –Betoniratapölkkyjen työmenetelmäselostus, Hämeenlinna, 4 s.

K-Betonia Oy. 1987. Betoniratapölkkyjen valmistusmenetelmät. 9.9.1987, 11 s.

Kim, D.-S., Kim S. D. & Lee J. 2006. Easy Detection and Dynamic Behavior of Unsupported Sleepers in High Speed Ballasted Track. 7th World Congress on Railway Research (WCRR), June 4-8, 2006, Montréal, Canada. KRRI, Uiwang, Korea & KNR, Daejeon, Korea.

Kohler M. 2002. Der Bettungsmodul für den Schotteroberbau von Meterspurbahnen. Abhandlung. DISS. ETH Nr. 14580. Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.

Koller G. 2009. The use of sleepers made of FFU synthetic wood in Europe. RTR, pp. 28-32

Konenäkö. [Viitattu 15.10.2011]. Saatavissa: <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/puutuoteteollisuus/automaatio/konenako/index.html>

Korkeamäki S. 2010. Haastattelu TTY:lla Tampereella 1.6.2010.

Kuosa H. & Vesikari E. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1. Perusteet ja käyttöikämitoitus. VTT-tiedotteita. 141 s.

Kuosa H. 2002. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Miten huokostuksen laatu tutkitaan kovettuneesta betonista ja betonimassasta. Sisäinen raportti RTE40-IR-17/2002.

Kuosa H. [Viitattu 20.1.2013] Pakkas-projekti. 7 s. Saatavissa: www.betoni.com/Download/21781/BL_2000_2_s30_36.pdf

Lahti O. 2008. Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella. Ratahallintokeskuksen julkaisu A12, 90 s.

Laitinen T. 2010. Christian Berner Oy, tuotepäällikkö. s-posti 11.2.2010

LCC. Dynamic Coposites. [Viitattu 9.6.2012]. Saatavissa: <http://www.dynamic-cci.com/product.htm>

Leemann A. 2012. Alkali-aggregate reaction in Switzerland. 27.3.2012

Lehtomäki J. 1999. Liikkuva kalusto. 54 s.

Lei X. & Mao L. 2004. Dynamic response analyses of vehicle and track coupled system on track transition of conventional high speed railway. Journal of Sound and Vibration, 271 (3-4), pp. 1133-1146.

Leong J.& Murray M.H. 2008. Probabilistic analysis of train-track vertical impact forces. Institution of Civil Engineering, Transport [6], 2008 pp.15-21.

Leonhard Moll Betonwerke GmbH & Co KG. 2012. ZRX Twin sleeper. [Viitattu 23.7.2012]. Saatavissa: <http://www.moll-betonwerke.de/en/pdf/1.15.pdf>

Leivo M. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja – varmistus. VTT tiedotteita. 13 s.

Levomäki M., Valtonen J., 2001. Raidetutkimus 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Julkaisu A3, 90 s.

Lichtberger B. 2005. Track Compendium. Formation, permanent way, maintenance, economics. Eurail press. Linz. ISBN: 978-3-7771-0320-4

Liikennevirasto 2010a. Rataverkon kuvaus 1.7.2010. Liikenneviraston väylätietoja 02/2010. Helsinki 2010.

Liikennevirasto 2010b. Betoniratapölkkyraiteet. Rataverkon keskeiset ominaisuudet 31.12.2010.

Liikennevirasto 2010c. Hyväksytyt betonin jälkihoitoaineet. 9.9.2010.

Lundqvist A. & Dahlberg T. 2005. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. Proc. IMechE Vol. 219 Part F: J. Rail and Rapid Transit, pp.67-77.

Luomala H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010.

Manalo A. 2011. Behaviour of Fibre Composite Sandwich Structures: A case study on railway sleeper application. Doctoral thesis, University of Southern Queensland, Australia, February, 2011, p. 247

Mangesh S., Shruti D.P., Parijat M., Nakul B. & Sandeep, G.P. Prestressed concrete sleeper. National Institute of Technology Karnataka. India, 17 p.

Mannonen R. 2010. Betoniyhdistys, kehitysjohtaja, haastattelu Helsingissä 18.11.2010

Marx L., Moßmann D. & Kullmann H. 2003. Work procedures for maintenance of the permanent way of the DB Netz AG – 6th revised and supplemented edition. Heidelberg-Mainz and Deutsche Bahn AG, 792 p.

Menegotto M. 2005. A Presentation of fib Commission 6 “ Prefabrication”. São Carlos, Espanja, 3-4 November, 2005, 6 p.

MerMec Group. 2010. Automating Track Inspection through the use of Automatic Machine Vision Systems, esittelymateriaali, Orlando, Florida.

MerMec. 2011. <http://www.mermecgroup.com/> [Viitattu 8.8.2011]

MerMec. 2011. Track surface measuring systems, <http://www.progressiverailroading.com/railproducts>, [Viitattu 19.8.2011]

Metsäteho Oy. 2004. Puun laadun säilyttäminen. Metsäteho Oy, Helsinki, p.24

Mohammad S.P. 2008. Machine vision for automating visual inspection of wooden railway sleepers, Master Thesis, Högskolan Dalarna, p.45

Neville, A. 1995. Properties of concrete. Essex. Longman group. 844 p.

Nummelin M. & Ojanperä K. 1996. Betoniratapölkkyjen kiskonkiinnitysten teknistaloudellinen vertailu. Ratahallintokeskus, 5 p.

Nielsen J.C.O. & Igeland A. 1995. Vertical dynamic interaction between train and track – Influence of wheel and track imperfections. Journal of Sound and Vibration, pp.825-839.

Pandrol e-kiinitys. [Viitattu 24.1.2010]. Saatavissa: <http://www.pandrol.com/html/products/eclip.htm>.

Pandrol e-kiinitys-2. [Viitattu 24.1.2010]. Saatavissa: <http://www.pandrol.com.au/html/products.html>.

Parma ja Ratahallintokeskus sopineet ratapölkkytoimitusten jatkosta. Eero Kujala, yksikönjohtaja. [Viitattu 21.2.2010]. Saatavissa: <http://www.parma.fi>.

Parrott, L.J. 1987. Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. Wexham Springs. 42 p.

Pfleiderer Aktiengesellschaft. 2012. Wide sleeper track. [Viitattu 23.8.2012] Saatavissa: http://www.railone.com/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/breitschwelle_en.pdf

Pelkonen A. 2010. VR Track Oy. Haastattelu puhelimitse 9.12.2010.

Peltokangas O. 2012. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma.

Peltokangas O., Luomala H., Nurmikolu A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/20113. 190 s. +13 liites.

Pihlajavaara S. E. 1970. Betonin karbonatisoitumisesta. Rakennustaito 9, pp.337-338.

Podder T. 2010. Analysis & study of AI techniques for automatic condition monitoring of railway track infrastructure. Master Thesis, Högskolan Dalarna, p.61

Profillidis V. A. 2000. Railway Engineering, 2. ed. Aldershot: Ashgate, cop. 291 p.

Punkki, J., Suominen, V. 1994. Alkali reactivity of aggregate in Norway – and in Finland? Betoni 2/1994. Helsinki. Suomen Betonitieto Oy. Pp. 30-32

Qiao P., Davalos J.F., Zipfel M.G. 2008. Modelling and optimal design of composite-reinforced wood railroad crosstie. Composite Structures, 41, pp.87-96

Quinhua J., Weiqing L. & Liang T. 1997. Investigations on concrete railway ties suffering from alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research Vol.27 No1, 1997, pp. 107-113.

Queiroz, R.C. 2006. Longitudinal Track-Ballast Resistance of Railroad Tracks Considering Four Different Types of Sleepers. 7th World Congress on Railway Research (WCRR), June 4-8, 2006, Montréal, Canada. Sao Paulo State University, Bauru (SP), Brazil.

RailOne. 2010. Wide sleeper. [Viitattu 6.3.2010] Saatavissa:
<http://www.railone.com/en/main-nav/products/railways-and-commuter-traffic/ballasted-track-systems/special-track-systems/wide-sleeper-track.html>

RakMK B4 2005. Betonirakenteet. Ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö.

RATO 1. 1995. Yleiset perusteet. Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Ratahallintokeskus 1.12.1995.

RATO 3. 2008. Ratatekniset ohjeet. Osa 3 Radan rakenne. Ratahallintokeskus 16.5.2008.

RATO 11. 2002. Radan päällysrakenne. Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Ratahallintokeskus 2.7.2002. 921/731/02.

Raymond G. P.. 1978. Soil-Structural Interaction and Concrete Tie Design. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. 2, February 1978, pp. 249-265

Ratahallintokeskus 1999-2002. Useat tarkastus- ja takuutarkastusraportit.

Ratahallintokeskus. 1999. Vossloh Skl 14-kiskonkiinnityksen holkin irtoaminen ja vaihto.

Ratahallintokeskus 1999a. Raideruuvien käyttö kiilattaessa SKL14-kiinnitystä. 20.4.1999.

Ratahallintokeskus 1999b. Tohmajärven suojelualueella haljenneiden betoniratapölkkyjen tutkiminen. Tutkimusraportti, 8 s.

Ratahallintokeskus 2008. Esijännitetyt betoniratapölkkyt. Tekniset toimitusehdot. 1942/042/2008.

Ratahallintokeskus 1993. Joustavat Vossloh-kiskonkiinnitykset. 7 s.

Remennikov A.M. & Kaewunruen S. 2007. Experimental determination of energy absorption capacity for prestressed concrete sleepers under impact loads. 4th International Conference on Structural Engineering and Construction, Melbourne, Australia, September 26-28, 2007, pp.381-386.

Remennikov A.M., Murray M.H. & Kaewunruen S. 2008. Dynamic design guidelines for prestressed concrete sleepers. 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Toowoomba, Queensland, Australia, December 2-5, 2008, 6 p.

Resendiz E., Molina L.F., Hart J.M., Edwards J.R., Sawadisavi S.V., Ahuja N., Barkan C.P.L. 2010. Development of a machine vision system for inspection of railway track components. 12th WCTR, Lisbon, Portugal, 11-15, July 2010. p.22

Riessberger K. 2000. Frame sleeper adapt ballasted track to modern needs. Railway Gazette International, February, 2000, pp. 92-94.

Riessberger K. 2011. Enroute to a More Durable Ballast Track. IHHA 2011. p.3

Rothlisberger Ets. 2008. History and development of the wooden sleeper. www.corbat-holding.ch

RTT 2010 (internet). Työmaan aloituskokouksen valmisbetonin toimitussuunnitelma. Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Valmisbetonijaos. PL 11 (Unioninkatu 14) 00131 HELSINKI. Internet (betonityomaaohje.doc):
<http://www.rudus.fi/download.aspx?intFileID=468&intLinkedFromObjectID=9441>

Sadeghi J.M. & Babaee A. 2006. Structural optimization of B70 railway prestressed concrete sleepers. Iranian Journal of Science and Technology Transaction B Engineering Vol. 30, August, 2006, pp.461-473.

Sahu S. & Thaulow N. 2004. Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. Cement and Concrete Research 34, 2004, pp.1675-1681.

Samppala P. 2011 Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot. Tampereen teknillinen yliopisto. 134 s.

Sawadisavi S., Edwards J.R., Resendiz E., Hart J.M., Barkan C.P.L., Ahuja N. 2008. Machine-Vision Inspection of Railroad Track. AREMA Conference Proceedings, Landover, Maryland, p.23

Sawadisavi S., Edwards J.R., Resendiz E., Hart J.M., Barkan C.P.L., Ahuja N. 2009. Machine-Vision Inspection of Railroad Track. Proceedings of the TRB 88th Annual Meeting, Washington DC, January, 2009, p.19.

Schilder R. 2009. Application of under sleeper pads (USP) in OeBB's track network. ÖBB-Infrastruktur Betrieb AG. Wien, 15.7.2009

SEKISUI. FFU Synthetic Railway Sleepers. SEKISUI Chemical GmbH. [Viitattu 8.6.2012]

SFS-EN 1991-2. 2009. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat

Shan M. 2010. Automated Visual Inspection / Detection of Railroad Track, Final Report, University of Central Florida, July, 2010, p.45.

Shokrieh M.M., Rahmat M., 2006. On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials. Composite Structures, 76, pp. 326-337

Singh M., Singh S., Jaiswal J., Hempshall J. 2006. Autonomous Rail Track Inspection using Vision Based System. IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, Alexandria, USA, 16-17, October, 2006. p.56-59

Skoglund K. A. 2010. Sähköpostitiedonanto– Antti Nurmikolu 18.5.2010, viitattu 9.6.2010.

Smith S.T. 2007. A cost-benefit analysis of creosote-treated wood vs. non-treated wood materials. January 2007. p.8

Soini A. Konenäkö, [Viitattu 9.10.2011]. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Suomen automaatioseura ry. s.3

Spenncon AS 2010. <http://www.consolis.com/Spenncon/?node=14.5.1#nsb-95> Internet 27.7.2010.

SSL 2010. Stahlbetonschwellenwerk Linz, Hollitzer Baustoffwerke. Austria. Internet 8.6.2010 <http://www.ssl-linz.at/hds1-sleeper.pdf>

Stark J. & Bollmann K. Delayed Ettringite Formation in Concrete. [Viitattu 8.7.2010]. Bauhaus-University, Weimar, Germany, 25 p.

STI-Global. Optical Track Inspection Systems, esittelymateriaali. [Viitattu 16.9.2011]. Takai H., Sato Y. & Sato K. 2006. Japanese Twenty Five Years Experiences and Standardization of Synthetic Sleeper. 7th World Congress on Railway Research (WCRR), June 4-8, 2006, Montréal, Canada. Railway Technical Research Institute, Tokyo (e.g.), Japan.

Tepponen P. & Eriksson B.-E. 1987. Damages in concrete railway sleepers in Finland. Nordic concrete research No. 6, pp. 199-209.

Thun H. 2006. Assessment of Fatigue Resistance and Strength in Existing Concrete Structures, Doctoral thesis, Luleå University of Technology.

Thun H., Utsi S., Elfgren L., Nilsson P. & Paulsson, B. 2001. Load carrying capacity of fasteners in concrete railway sleepers. International Symposium on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, Germany, September, 10-12, 2001, pp.774-784.

Thun Håkan, Elfgren Lennart ja Ohlsson Ulf 2001. Concrete fatigue capacity. A study of deformations at tensile forces. Osa "Paper C" Håkan Thunin lisensiaatintyössä "Evaluation of concrete structures". Luleå university of technology.

Thun Håkan, Utsi Sofia & Elfgren Lennart. 2003. Spruckna betongsliprars bärförmåga vid utmattande last. Teknisk rapport 2003:04. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Luleå university of technology.

Tiehallinto. 2007. Siltatekniikka. Siltojen korjaus, SILKO 1.201. Betonirakenteet, yleiset laatuvaatimukset. 11/07.

TieTek™ composite sleepers. [Viitattu 27.6.2012]. Saatavissa: <http://www.tietek.com/product.php>

TSI 2009. Draft Commission Decision concerning a technical specification for interoperability relating to the 'infrastructure' sub-system of the trans-European conventional rail system. Working document. Final draft TSI Infrastructure. http://www.transportstyrelsen.se/Global/Jarnvag/TSD/English/STo2EN01_CR_INF_Annex.pdf?epslang=e=sv

Tulonen J. et al. 2013 . Rautatiesiltojen vaurioituminen. *Tulossa julkaisuna: Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä (x/20113)*.

Tunna J. 2010. Haastattelut helmikuussa 2010 TTY:lla Tampereella.

Tunninen N. 2007. Vähäliikenteisten ratojen päällysrakennevaihtoehdot, Teknillinen korkeakoulu. Helmikuu, 2007, 83 s +10 app.

Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Stockholm. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Research 4:82. 304 p.

Twin-block sleeper. [Viitattu 5.3.2010 a]. Saatavissa: <http://www.railway-technical.com/Track-twin-block.gif>.

Twin-block sleeper. [Viitattu 5.3.2010 b]. Saatavissa: <http://www.consolis.com/files/pictures/TGVParis2.jpg>.

UIC 713 R Design of monoblock concrete sleepers. 1st edition, November 2004

UIC. 2008. Consequences of possible EU banning on the use of creosote impregnated sleepers. Technical Report, p.5

US Forest Service. Types of Wood Preservatives. [Viitattu 11.6.2012]. Saatavissa: <http://www.fs.fed.us/t-d/pubs/pdfpubs/pdf06772809/pdf06772809dpi72pt03.pdf>

Viitala T. 2011. RASU 2011 opintomateriaali.

Vinden P., Torgovnikov G., Hann J. 2011. Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, Volume 69, 1.5.2011, pp 271-279

Vossloh kiskonkiinitys. [Viitattu 24.3.2010]. Saatavissa: http://www.vossloh-fastening-systems.de/cms/en/products/system_w14/system_w14.html.

Vossloh. 2012. Sleeper anchors. [Viitattu 5.6.2012]. Saatavissa: www.vossloh.com

VR Track. 2011. Jatkuvakiskoraidetekniikka. Hitsausyksikkö/koulutushitsaamo. 7.4.2011.

Woidasky J., Nioac de Salles A.N. 2008. Railway Sleepers from Mixed Plastic Wastes – RAILWASTE- Fraunhofer-Institute for Chemical Technology, Germany.

Yella S, Dougherty M.S, Gupta N.K. 2006. Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing. *Insight Vol 48 No 1*, January, 2006, pp.10-20.

Zarembski A.M. 1993. Concrete vs. wood ties: Making the economic choice. *Conference on Maintaining Railway Track: Determining Cost and Allocating Resources*, Arlington, p.13

Zarembski A.M. Wood Cross-Tie Benefits. ZETA-TECH Associates. p.5

Zeman J.C., Edwards J.R., Barkan C.P.L. & Lange D.A. 2009a. Failure Mode and Effect Analysis of Concrete Ties in North America. *International Heavy Haul Conference*, Shanghai, China, June 2009, 10 p.

Zeman J.C., Edwards J.R., Lange D.A. & Barkan C.P.L. 2009b. Investigating the Role of Moisture in Concrete Tie Rail Seat Deterioration. *Annual AREMA Conference*, 2009, 21 p.

Zhai W. & Cai Z. 1997. Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. *Computers and Structures*, 63 (5), pp. 987-997.

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

Äijälä M. 2012. Siltojen ylläpito ja korjaus. Luentokalvot 25.9.2012, Tampereen teknillinen yliopisto.

Haastattelututkimus

Liikennevirasto

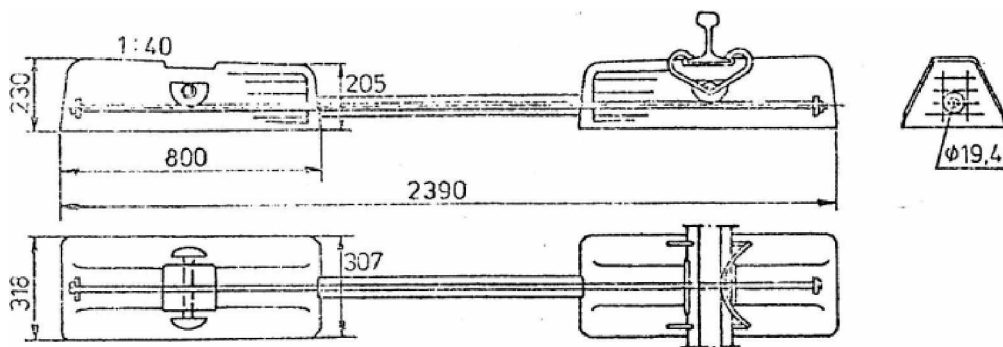
Pirkko Grundfelt

Haastattelu 18.11.2010 Lauttasaarella Helsingissä.

DI, TKK siltatekniikka. Tuli töihin VR:lle v. 1967 ja toimi ensimmäiset kaksi vuotta rautatiesiltojen suunnittelijana.

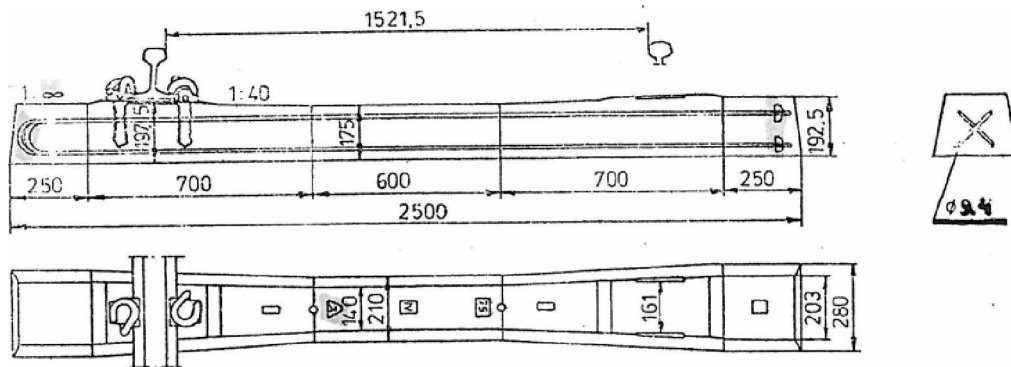
VR:n raidejaostossa töissä vuodet 1969 – 1996 (vuoden alku). Vastuualueena ratapölkkyt sisältäen hankinnat, mitoituksen tarkistaminen, vastaanotto, tehdaskäynnit ja työmaakäynnit eli asennusten seuraaminen.

Kaksiosaista VR 101 -betoniratapölkkyä valmistettiin vuosina 1964–65 yhteensä 32500 kappaletta Raj:n piirustuksen n:o 1151A mukaisesti (Grundfelt 2010), ks. kuva 8.1.



Kuva 8.1 VR 101 -betoniratapölkky, Fist -kiskonkiinnitys (Grundfelt 2010).

B63 ratapölkky oli saksalainen pölkky malli ja myös saksalaisten suunnittelema. Rata-pölkky on jälkijännitetty siten, että poikkileikkauksessa on neljä terästankoa. Käytännössä rauditus muodostuu kahden jälkiasennettavan u-lenkin avulla siten, että lenkien u:n muotoiset päät toimivat passiivipäinä ja kierteistettyihin aktiivipäihin kierrettiin mutterilla ankkurikappale. Kummila Oy (myöhemmin K-Betonia) valmisti nämä ratapölkkyt Suomessa.



Kuva 8.2 B75-betoniratapölkky, Pandrol-kiskonkiinnitys (Grundfelt 2010).

B63 ratapölkky ei Grundfeltin laskelmien mukaan myöhemmässä vaiheessa kestänyt suomalaisia kuormituksia, joten Grundfelt kehitti uuden pölkkytyypin B63:n pohjalta korottamalla pölkkyä kiskon kohdalta yläpinnasta. Korotetulle ratapölkkyllä annettiin tunnus B75, ks. kuva 8.2.

Valmistusmäärät, yhteensä miltei 1200000 kpl:

- B63 / Fist-kiskonkiinnitys 100000 kpl vuosina 1964-66
- B63 / RN-kiskonkiinnitys 80000 kpl vuosina 1964-67
- B63 / Pandrol-kiskonkiinnitys 314700 kpl vuosina 1965-75
- B75 / Pandrol-kiskonkiinnitys 671000 kpl vuosina 1976-86

1960-, 1970- ja 1980-luvuilla betoniratapölkkyjä valmistettiin Kummilan (K-Betonia Oy, Hämeenlinna) tehtaan lisäksi myös useissa muissa tehtaissa (Grundfelt 2010): Elementtituote Oy, Nastola; Elementtiteknikka Oy, Kerava ja Partek Oy Tampere. Elementtiteknikka Oy:n nimeksi myöhemmin tuli Pantekno Oy ja se valmisti myös 2-osaisia betonipölkkyjä.

Asennus tehtiin pitkään kaivinkoneasennuksena. Tasaiselle alustalle ladottiin ensin pölkkyt. Näihin kiinnitettiin kiskot, jonka jälkeen viimeisteltiin sepelikerros. Ratapölkkyt pysyivät näin varmemmin paikallaan sepelitäytön aikana ja sepelitäyttö sitoi raiteen paikalleen. Kiskojen pituus asennusvaiheessa oli 25 m. Pääradoilla alkoi 1960-luvulla kiskojen jatkuvaksi hitsaaminen.

Ratahallintokeskus on arvioinut ratapölkkyjen kestoikäksi:

- kyllästetty puuratapölkky: 28... 30 vuotta,
- betoniratapölkky: 40 vuotta.

Betonisen ratapölkyn kokonaishinta oli vuonna 1987 noin 13 % pienempi puurata-pölkkyyn verrattuna.

Riihimäen ratapihalle asennettiin v. 1986 ja Luumäki-Riihimäki -rataosuudella v. 1988 alle kilometrin matkalla Rautaruukki Oy:n valmistamia teräspölkkyjä. Grundfeltillä on valokuva vuodelta 1987, jossa näitä pölkkyjä on näkyvissä. Ongelmiksi kokeilussa muodostuivat halkeamat alkaen kiskonkiinnitysrei'istä, teräksen syöpyminen ja taipuminen. Korjauskustannukset arvioitiin tuolloin korkeiksi. Tämän jälkeenkin on käyty neuvotteluja teräspölkkyjen käytön aloittamiseksi, mutta neuvottelut ovat kariutuneet teräspölkkyjen korkeaan hintaan.

Grundfelt kirjoitti betonisista ratapölkkyistä Valtionrautatiet 1962-1987 -julkaisuun sivut 125-128.

Yrjö Tuovinen

Haastattelu 18.11.2010 Lauttasaarella Helsingissä.

Insinööri, opiskellut työuran aikana. Töihin VR:lle vuonna 1959. Ratahallintokeskuksessa 1995-2001, jolloin eläkkeelle.

Noin vuonna 1962 tuotiin ulkomailta muutamia betonisia ratapölkkyjä koekäyttöön. Pölkkyt olivat erityyppisiä; osa oli kaksiosaisia, joita yhdisti terästanko. Kaksiosaisilla betonipölkkyillä on radoilla korvattu yksittäisiä puupölkkyjä.

Kevyemmillä radoilla Tuovisen aikana korvattiin edelleen puuratapölkkyjä puisilla pölkkyillä. Hintakilpailu hiljalleen ratkaisi materiaalivalinnan betonin eduksi. Puuratapölkkyssä muodostavat teräsosat ison osan ratapölkyn kokonaishinnasta.

Raide tarkistettiin esimerkiksi yhden kilometrin matkalla kahden tasoristeyksen välillä kävelemällä ja tarkkailemalla. Tarkastus kohdistettiin yleensä vanhojen ratojen ratapölkkyihin, kiskoihin ja kiinnityksiin. Myös vuosittaisia kävelytarkistuksia tehtiin rata-alueilla.

Puupölkkyjä vaihdettiin myös yksittäin, esimerkiksi Huutokoski-Savonlinna -rataosuudella (kiskon paino 30 kg/m) joka viides ratapölkky vaihdettiin. Vaihdossa poistetuista puisista ratapölkkyistä osa otettiin käyttöön, lähinnä ratapihoille. Tuovisen aikana siirryttiin käyttämään lauttavaihto -menetelmää lähinnä raiteen tasaisuustarpeen vuoksi.

Raiteen asennusta varten mitattiin ja asennettiin paikalleen ensin puutapit, joko raiteen keskelle tai sivulle. Ratapölkkyt nostettiin nosturilla noin viiden pölkyn ryhmänä siten, että pölkkyt oli terästangolla kiinnitetty toisiinsa 600 mm jaolla. Terästanko oli kiinnitetty Pandrol-jousen reikiin koukuilla. Sepelin asentamisen yhteydessä kone oikoi raiteen lopulliseen asemaansa.

Tukemistyön aikana sepelin laskukone laskee sepelin betonisen ratapölkyn alle kiskon molemmille puolille. Joskus sepeliä saattoi siirtyä hieman pölkyn keskiosan allekin. Tällöin ratapölkky saattoi kantaa myös keskiosaltaan, minkä vuoksi ratapölkkyyn saattoi muodostua halkeama keskikohtaan yläpinnalle.

Vuonna 1995 oli n. 20 % pääratojen ratapölkkyistä betonisia ja vuonna 2001 yli 40 %.

Tuomo Viitala

Haastattelu 19.11.2010 liikenneviraston kokoushuoneessa Helsingissä.

Diplomi-insinööri, konetekniikka, Otaniemi. Vastuualueena liikennevirastossa ratapölkkyt.

Vastaavassa tehtävässä toimineet ja toimivat:

- Irene Kalervo-Vähäkallio (DI, asuu Lauttasaarella), eläkkeelle 1989,
- Pirkko Grundfelt (ks. erillinen haastatteluosuus),
- Lasse Blomberg (asuu Hämeenlinnassa), eläkkeelle 2002,
- Raimo Hämäläinen toimi samoissa tehtävissä samaan aikaan Blombergin kanssa ja siirtyi myöhemmin Parman ratapölkkyjen vastaanottotehtäviin,
- Tuomo Viitala vuoden 2002 heinäkuusta lähtien,
- Ville-Pekka (Ville) Lilja, DI TKK konetekniikka, vuodesta 2009 lähtien vastuualueena laadunvalvonta.

Ratapölkkyt siirtyvät Liikenneviraston omaisuudeksi, kun vastaanottaja on ne hyväksynyt. Käytännössä tämä tapahtuu jo tehtaalla. Liikenneviraston omia rataosuuksia rakennettaessa ratapölkkyt ovat koko ajan Liikenneviraston omaisuutta. Asentajat eivät siis osta niitä välillä omakseen. Yksityisraiteille asentajat ostavat ratapölkkyt suoraan tehtailta.

Ratapölkkyjen asennuksessa on kaksi päävaihtoehtoista työtapaa: Veera -raiteenvaihtokoneen käyttö tai konetyö kaivinkoneella. Kaivinkonetyö on hyvin erilaista riippuen siitä, vaihdetaanko kokonainen osa raidetta vai irrallisia ratapölkkyjä. Irrallisten ratapölkkyjen vaihto on hyvin vaativa tehtävä ja sen aikana on suurempi pölkyn vaurioitumisriski. VR Track omistaa Donelli -asennuskoneen, jolla voi asentaa Pandrol -kiinnikkeillä varustettuja pölkkyjä.

Liikennevirastossa Tuomas Virtanen huolehtii ratapölkkyjen laskutuskäytännöstä. Tehtävää on pitkään hoitanut Risto Koskenniemi, joka on jäämässä pois tehtävästä puolen vuoden siirtymäajan aikana. Juha-Heikki Pasanen vastaa sopimusasioista. Täten Tuomo Viitalan tehtäviin eivät kuulu edellä mainitut kaupalliset asiat. Mahdollisissa reklamaatioasioissa hän on mukana.

Lujabetoni Oy:llä Mauno Parviainen vastaa kaupallisista asioista. Parma Oy:llä näistä asioista vastaa tehdaspäällikkö Markku Järveläinen itse. Lujabetoni Oy toimittaa ratapölkkyjä Siilinjärven varastoalueelle, Parma Oy Toijalan varastoalueelle. Liikennevirasto omistaa nämä vartioimattomat alueet. Varastoalueilla ei ole henkilökuntaa jatkuvasti paikalla.

Nykyisissä betonisissa ratapölkkyissä ei ole ollut merkittäviä teknisiä puutteita. Joskus on havaittu pintahalkeilua, jonka syyksi on päätelty ongelmia sementtiliimassa.

Tekniset toimitusohjeet ovat perusrakenteeltaan olleet hyvin samanlaiset jo pitkän aikaa, pakkas-suola-kokeiden avulla tehdystä betonikehitystyöstä lähtien.

VR Track Oy

Jyrki Pennanen, VR Track Oy, haastattelu 1.11.2010 puhelimitse

Jyrki Pennanen on liikenneviraston rautatieosaston valtuuttama valvoja, joka valvoo Lujabetonin ratapölkkytuotannon ja laadunvarmistustyön sopimuksenmukaisuutta sekä raportoi liikenneviraston sopimusyhdyshenkilölle (laatu), ylitarkastaja Ville Liljalle (Tuomo Viitalalle).

Lujabetoni Oy'n Siilinjärven ratapölkkytehdas toimittaa viikko- ja muutosraporttiyh-teenvedot kerran vuodessa tilaajalle. Muut asiakirjat säilytetään tehtaan omissa ti-loissa (arkisto 15 v). Jyrki Pennanen tarkistaa viikoittain raportit ja hyväksyy ne alle- kirjoituksellaan. Mahdolliset muutokset hyväksyy liiketoiminnan sisäinen valvoja (Fi- se-pätevyys) DI Seppo Heikkinen, Rak. suunn. tsto Nylund Oy. Tällaisia muutoksia ovat esimerkiksi sementtitoimittajan tai punosten maahantuojan vaihtuminen.

Valmistaja tekee itse jokaista muottipöytää kohden ratapölkyn koekuormituksen sekä muodon mittauksen. Valvoja voi myös vaatia koekuormituksen haluamastaan petistä milloin vain harkitsee sen tarpeelliseksi.

Pölkyn paksuutta, reikien auki oloa ja reikien kulmia mitataan optisesti ja käytetään mustesuihkumerkitsemistä ja automaattista hälytystä. Jos hälytyksen jälkeen pölkky halutaan 1-luokkaan, pitää pölkky tarkistaa manuaalisesti.

Poikkeamat luokitellaan asteikolla vakava, melko vakava ja lievä. Vakavan poik- keaman vuoksi prosessi pysäytetään ja vialliset tuotteet poistetaan. Melko vakavan ja lievän poikkeaman vuoksi toimittaja tekee vastineen ja korjaa prosessin.

Betonilujuutta seurataan koekuutioiden avulla. Linjan kylmimmässä osassa pressun alla säilytetään 2 sarjaa koekuutioita. Koekuutiot koekuormitetaan eli puristetaan 8... 8,5 tunnin iässä. Jos vaatimus ei täyty, odotetaan yksi tunti ja puristetaan uudet koe- kuutiot.

Tehtaan sisätiloista kostutustunnelista n.7 vrk ikäisenä ratapölkkyt yleensä kuljetetaan joko Siilinjärven asemalle tai tehtaan pihaan. Tällöin ne ovat molemmissa tapauksis- sa tilaajan omaisuutta.

Siilinjärven aseman varastoalueelle on tiivistetty 600 mm murskekerros, jonka pin- taan on asennettu betonipaaluja "alajuoksuiksi" eli pinojen perustuksiksi. Aseman ratapölkkyvaraston valvonnasta ei liikennevirasto ole tehnyt sopimusta VR Trackin tai Lujabetonin kanssa. Käytännössä Lujabetoni havainnoi ratapölkkypinojen tilannetta toimittaessaan varastoon uusia pölkkyjä. Tila on avoin eli aitaamaton. Joskus tihu- työn tekijät ovat pudotelleet päällimmäisiä pölkkyjä.

Varastoidut ratapölkkyt voi tunnistaa jokaiseen pölkkyyn tunnistevallettujen valmistus- tietojen avulla. Lisäksi tunnistusta varten käytetään värikoodeja:

- Kiskotyyppiä 60 varten käytetään vihreää väriä
- Kiskotyyppiä 54 varten ei käytetä mitään väriä
- Kiskotyyppiä 43 varten käytetään valkoista väriä
- Sähköpölkkyä (S) varten käytetään sinistä väriä
- Siltapölkkyä (SX) varten käytetään ruskeaa väriä

Ratapölkkyjä kuljetettaessa ja varastoitaessa pölkkyt nostetaan tarttumalla tarraimella pölkkyjen päästä. Kerralla nostettavan pakan suuruus on tyyppillisesti 4*8 eli 32 pölk- kyä.

Lujabetonin tehtaalla ratapölkkyjen valmistuksen järjestelmä toimii hyvin ja prosessi on parantunut vuosien myötä. Tehtaalla pölkkyyn tehtävien valmistumisaikaporaus- ten päivämäärän oikein kirjaaminen on tärkeä asia. Tähän yksityiskohtaan liittyy mahdollinen kehittämistarve. Jos poranterä katkeaa ja merkintä jää puutteelliseksi,

pitäisi myöhemmin mahdollisessa poikkeamatilanteessa pölkylle pystyä määrittelemään valmistusajankohta, jonka perusteella pölkynvalmistukseen liittyvät tiedot on löydettävissä.

VR Track'n Raimo Hämäläinen toimii Parman tehtaalla vastaavassa tehtävässä. Hämäläinen ja Pennanen ovat tehneet ns. ristiinauditoinnin eli J. Pennanen on arvioinut Parman tehtaan toiminnan ja R. Hämäläinen Lujabetonin tehtaan toiminnan.

Antti Pelkonen, VR Track Oy, haastattelu 9.12.2010 puhelimitse

Projektipäällikkö Antti Pelkonen on 1970-luvun puolivälistä asti toiminut ratarakentamistehtävissä VR:n palveluksessa. Hänen toimipisteensä on Seinäjoella.

Jos ratatyömaalle kuljetettavien ratapölkkyjen määrä on suuri, kuljetetaan ne rautateitse. Jos määrä on pienempi, esim. alle 1000 kpl, järjestetään kuljetus rekkakuljetuksena. Pölkkyt lastataan ajoneuvoon yleensä joko Toijalassa tai Siilinjärvellä. Rautateitse ratapölkkyt kuljetetaan suoraan työkohteelle, jossa VR Track huolehtii ratapölkkyjen purkamisesta rataluiskaan. Purku tehdään kuvassa 8.3 esitettävällä kaivinkoneeseen liitetyllä Desec -purkulaitteella. Laite purkaa viisi ratapölkkyä kerralla. Tarvittava kappalemäärä eli jako radan pituussuunnassa lasketaan etukäteen tarkasti sekä kaikkien pölkkyjen vaihdossa että irrallisten pölkkyjen vaihdossa eli ns. hajavaihdossa.



Kuva 8.3 Desec -purkulaite (<http://www.desec.com/other3.html>).

Ahtaissa paikoissa, esimerkiksi ratapihoilla, purku tehdään pääosin kaivurin trukkipiikeillä rekalta nippu kerrallaan ja varastoidaan välivarastoon. Välivarastosta ratapölkkyt kuljetetaan työkohteen lähelle Desec- purkulaitteella. Nykyiset ratapölkkyt ovat raskaita, raskaampia kuin esimerkiksi B75-pölkkyt, ja niitä ei enää pysty siirtämään ilman koneita. Vastaanoton yhteydessä tehdään silmämääräinen vastaanottotarkastus, jossa todetaan ehjyys, kiskojen kiinnitysosat ja rahtikirjojen mukaiset kappalemäärät.

Asennusmenetelmä 1

Ratapölkkyjen asennuksessa sovelletaan kolmea eri työmenetelmää riippuen liikennekatkon pituudesta ja työn laajuudesta. Jos liikenteessä on pitkäaikainen katko ja ratapölkkyjen asennustyön esteenä ei ole kiskoja, voidaan käyttää kaivinkoneeseen liitettyä hydraulista pölkkyjen jakolaitetta, joka käsittelee viittä pölkkyä jakaen pölkkyt automaattisesti oikein pölkkyvälein. Raiteen sijainti on merkitty spray-maalilla tai linja-langalla pölkkyjen päiden kohtaan. Pohjasepeli on ennalta tiivistetty ja tasattu. Mittausryhmä mittaa raiteen keskilinjain sijainnin ja merkitsee sen puupaaluilla, joiden koko on 50*50 mm². Nykyisin mittaus tehdään vaihtoehtoisesti automaattisen mittauslaitteen ja latan avulla, jolloin tiedossa olevien koordinaattien avulla voidaan merkitä ratapölkkyjen päiden sijainti suoraan sepelin pintaan. VR Track tekee raiteen asennusmittaukset pääosin itse.

Asennusmenetelmä 2

Jos ratapölkkyjä vaihdetaan olemassa olevaan raiteeseen lyhyiden liikennekatkojen aikana, merkitään kiskoon uusien pölkkyjen sijainnit ja tehdään vaihto suoraan kiskoja alle. Sijainnit mitataan kiskoja päällä liikkuvalla, työnnettävällä mittalaitteella ja merkitään spraymaalilla kiskon selän ulkoreunaan molempiin kiskoihin. Menetelmällä voidaan varmistaa pölkkymerkintöjen suoruus junan etenemissuunnassa.

Ennen vanhojen ratapölkkyjen poistoa liikennekatkon aikana on irrotettu kiskoja kiinnikkeet. Tämän jälkeen kaivinkoneella irrotetaan ja nostetaan raidesepeleitä ratapölkkyjen väleistä ja päistä siten, että vanha pölkky pystytään vetämään paikaltaan pölkyn pituussuuntaan. Vanha ratapölkky siirretään rataluiskaan uusien ratapölkkyjen suhteen vastakkaiselle puolelle. Uudet ratapölkkyt siirretään kiskopyöräkaivinkoneen kauhan leukoja avulla raiteeseen. Kauhan leuat on muotoiltu ratapölkyn muotoon sopiviksi, jolloin kauha ei vahingoita pölkkyjä ja ote pölkyn keskeltä tai päästä on tasainen. Pölkky liikkeessään auraa sepeliä tieltään pois.

Uuden ratapölkyn sijainnin ei heti tarvitse olla täsmällinen. Kun ratapölkky on siirretty raiteen sivulta molempien kiskoja alle, ottaa kaivinkone otteen pölkyn keskeltä ja nostaa pölkyn kiskoja alapintaa vasten. Tässä vaiheessa kaksi apumiestä siirtää pölkyn täsmällisesti merkien kohdille ja kiinnittää paikalleen.

Kaivinkone ja kaksi apumiestä muodostavat yhden asennusyksikön. Liikennekatkon aikana on radalla 1 – 10 asennusyksikköä. Seinäjoen radalla on käytetty kuutta yksikköä. Kiskopyöräkaivurien kuljettajat ajavat kaivurit pois radalta ja raide tuetaan ennen kunnostettavan rataosan liikenteelle luovuttamista.

Asennusmenetelmä 3

Veera-raiteenvaihtokone on massiivinen laite raiteen vaihtamiseksi ja muistuttaa lyhyttä junaa. Koneella voidaan vaihtaa joko pelkät ratapölkkyt tai sekä pölkkyt että kiskot samalla kerralla. Asennusmenetelmä edellyttää usean tunnin pituista liikennekatkoa. Koneen perään voidaan kiinnittää tyhjiä vaunuja, joihin vanhat pölkkyt siirretään. Perässä kulkevista vaunuista otetaan myös uudet ratapölkkyt. Ennen koneen käyttöä irrotetaan ratapölkkyjen kiskonkiinnikkeet. Kone kulkee hitaasti eteenpäin ja koneen perässä kulkeva työryhmä kiristää uudet pölkkyt kiinni kiskoihin. SKL-kiinnitys toimii hyvin, koska irrallisia kiskonkiinnitysosia ei tarvita.

Muut suomalaiset

Tuomo Kovanen, Lujabetoni Oy, betonikehityspäällikkö, haastattelu 1.11.2010 puhelimitse

Tämä osuus vain liikennevirastolle tiedoksi erillisessä raportissa.

Ari Taskinen, Insinööritoimisto Kari Kolari Oy, haastattelu 1.11.2010 puhelimitse

Ari Taskinen on ollut aiemmin työssä Lujabetoni Oy:n suunnitteluosastolla yhdessä Seppo Heikkisen kanssa. He ovat olleet yhdessä mukana Bg7 -ratapölkyn suunnittelussa ja molempien nimet on merkitty 15.4.1997 päivätyn piirustuksen nimiöön joko piirtäjäksi tai suunnittelijaksi.

Parma Oy:n piirustus oli silloisen Ratahallintokeskuksen tarjouspyynnössä liitteenä. Lujabetoni oli perustamassa ratapölkkytehdasta ja suunnitteli myös tehtaan tuotannon itse. Pölkyn rakenteeseen haluttiin muutoksia tuotannollisista syistä, jolloin piti tehdä tuotesuunnittelu ja rakennelaskelmat alusta lähtien itse. Laskelmat omalle ratapölkkymuotoilulle tehtiin omalla suunnitteluosastolla ja rakennelaskelmien tarkistuksen teki Jarno Berghäll Finnmapista.

Laskelmat sekä käyttötilassa että murtorajatilassa perustuivat silloisiin teknisiin toimitusehtoihin. Myös vaatimukset tulivat toimitusehdoista, jolloin ei tarvinnut itse arvioida pölkkyyn kohdistuvien kuormitusten suuruutta.

Lisäksi laskettiin käsittelyn ja varastoinnin aiheuttamia rasituksia. Arvioitiin mm. miten korkeaan pinoon pölkkyjä voi varastoida. Tässä puuvälikkeiden kokoonpuristuminen oli tärkeänä kriteerinä.

Ensimmäisille ratapölkkyille tehtiin teknisten kuormitusehtojen edellyttämät staattiset ja dynaamiset kuormituskokeet, jonka jälkeen RHK hyväksyi Bg7 -ratapölkyn uudeksi tyyppiksi ja radoille käyttöön.

Seppo Heikkinen, Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, haastattelu 1.11.2010 puhelimitse

Lujabetonin ratapölkyn Bg7 pääsuunnittelija

Betoni- ja tuoteprosessien ulkoinen valvoja, muutokset ja poikkeamatilanteet alisteaan hänen arvioitavakseen. Valvoo jänneterästen jännitystason mittauksia. On mukana laatuvalvonnassa ja auditoinnissa. Ottaa kantaa mahdollisten ratapölkyn päässä havaittujen punosliukumien vaikutukseen.

Tarkistaa laatudokumentoinnin vuosiaineiston, ennen kuin se luovutetaan Liikenneviraston käyttöön. Arkistointiaika on 15 vuotta.

Seppo Heikkisen mukaan Lujabetonin tuote, tuotanto ja jälkikäsittely ovat luotettavia ja laatutaso on hyvä.

Valmistuksessa kehitettävää saattaisi löytyä punosten jännitysmittauskäytännöstä. Rakenteen toiminnan kannalta on tärkeää, että ratapölkkyssä on oikean suuruinen

pituussuuntainen esijännitys. Tällä hetkellä punosvoima mitataan tunkin avulla ja arvioidaan punosvenymän mittauksen kautta. Olisi hyvä, jos jännevoima voitaisiin mitata suoraan punoksesta tai passiivipäähän lisätyn mittauslaitteen avulla.

Ratapölkyn keskialueen poikkileikkaus on herkkä halkeamaan ja ratapölkky on tältä osin vaativa tuote asennuksen onnistumisen suhteen, jotta keskialueelle ei muodostu pystysuuntaista tukea radassa. Itse pölkkyä on kuitenkin vaikea tältä osin muuttaa. Teräsprofiilin lisäystä kaltevaan asentoon pölkyn keskelle alapintaan on kokeiltu ja testattu TTY:lla.

Kari Paakkonen, Inspecta Oy, tarkastusinsinööri, haastattelu 5.11.2010 puhelimitse

Kari Paakkonen työskentelee Inspecta Oy:n tuotesertifiointiosastolla ja on betonielementtien laadunvarmistuksen tarkastajana nyt Lujabetonin tehtaalla, myös ratapölkkytehtaalla. Alkuvuonna hän on ollut tarkastajana myös Parman ratapölkkytehtaalla. Kesän 2010 jälkeen Forssassa on toiminut toinen tarkastaja. Ratapölkkyt ovat jännitettyjä ja siten 1-luokan betonirakenteita. Tällöin tarkastajallakin pitää olla virallinen pätevyys toimiakseen kantavien 1-luokan betonirakenteiden tarkastajana.

Normaalit säännölliset elementtivalmistuksen sertifikaatin mukaiset tarkastukset tehtaalla tehdään 3 kertaa vuodessa. Yleensä ratapölkkytuotannon tarkastus ajoitetaan muiden tuotteiden tarkastuksen yhteyteen. Tarkastus tehdään vain osana muiden tuotteiden tarkastusta. Käytännöt pyritään käymään läpi vähintään kerran vuodessa, mikä ei välttämättä aina toteudu. Pelkästään ratapölkkyvalmistukseen liittyviä tarkastuksia ei tehdä. Inspectan tarkastaja ilmoittaa aina etukäteen, koska on tulossa.

Tehtaalla tarkastaja varmistaa, että kaikki tuotantoprosessiin liittyvät olennaiset asiat ovat kunnossa. Erityisen tärkeää on jännitetyissä tuotteissa tarkastaa punosten jännitystyö ja jännittämiseen liittyvät pätevydet, koneet, materiaalit ja laitteet sekä tehtaan ilmoituksen mukainen laadunvalvonnan toteutuminen. Liikenneviraston vaatimia laadunvalvonnan kriteereitä ei ole ollut Inspectan tiedossa, joten ratapölkkytuotannon tarkastus perustuu tehtaan suulliseen informaatioon. Tarkastajan mukaan tämä ei ole ongelma ja voidaan olettaa, että saadaan oikeaa informaatiota. Tehtaiden puolelta ei ole kertaakaan ollut havaittavissa mitään salailua.

Ratapölkkytuotannon tarkastajina ratapölkkytehtailla toimivat sekä VR Track että Inspecta. Inspectan edustajan mukaan Inspectan rooli ja tarve ratapölkkyjen tarkastuksessa on epäselvä. VR Track'n ja Inspectan valvojat eivät ole olleet samaan aikaan tehtaalla ja keskinäistä keskustelua tehtävänkuvista ei ole käyty. Tehtaan edustajat saattavat kertoa, että suurta tarvetta tarkastukseen ei ole, koska tarkastus tehdään joka tapauksessa viikoittain. Täten roolien selkeyttämiseen on selvä tarve.

Risto Mannonen, Betoniyhdistys, kehitysjohtaja, haastattelu Helsingissä 18.11.2010

TkT Risto Mannonen työskenteli Lohja Oy:llä vuosina 1989 – 1992. Vuonna 1992 Lohja Oy ja Partek Oy yhdistyivät ja useita henkilöitä irtisanottiin. Mannonen toimi Lohjan sementtitehtaan teknisen palvelun päällikkönä ja hänen tehtäviinsä sisältyi myös tuotannon laadunvalvontatehtäviä. Tämän hän jälkeen siirtyi TKK:lle (nykyisin Aaltoyliopisto) tutkijaksi ja väitteli ratapölkkybetonista. Mannosella on kemistin perustutkinto.

Betoniratapölkkyt olivat alussa jälkijännitettyjä ja niitä valmistettiin Hämeenlinnassa Kummilan tehtaalla. Betoni lämmitettiin kovettumisen aikana lähes 100 °C lämpötilaan. Betonimassa oli kuivapuristettua, jolloin muotti voitiin kääntää ja nostaa pois ja betoni säilytti muotonsa kovettumisen aikana. Kovettuvia, tässä vaiheessa raudoittamattomia ratapölkkyjä säilytettiin hallissa pressun alla. Valua seuraavana päivänä ratapölkkyt jännitettiin. Valussa muodostettuun reikään asennettiin terästangot, jotka kiristettiin tankojen päissä olevien kierteiden avulla. Ratapölkkyjen valmistaminen oli alussa pääasiassa käsityötä, jolloin nostoissa käytettiin vinssiä ja tuotantomäärät olivat pienet.

Lämpökäsittely tehtiin kuuman vesihöyryn avulla ja se aiheutti ongelmia tuotteen pitkäaikaiskestävyyteen. Muodostui ettringiittiä ja betoni rapautui joskus jo hyvin lyhyessä ajassa pakkasrasituksessa. Tämän vuoksi lämpökäsittely kiellettiin noin vuonna 1980 – 1985.

VR järjesti 1980-luvun loppupuolella tarjouskilpailun betonisten ratapölkkyjen valmistamiseksi. Tilaja sai noin 10 – 15 tarjousta, joista Parma oli edullisin. Parmalla yhteyshenkilönä toimi Eero Kujala. Parma olikin ainoa toimittaja melko pitkän ajan, koska voitti myös seuraavan tarjouskilpailun muutaman vuoden päästä.

Alussa ratapölkkyjen valmistamisessa käytettiin nopeasti lujittuvaa saksalaista PZ 55 -sementtiä. Suomessa haluttiin kehittää oma nopeasti kehittyvä sementti Forssan ratapölkkytarpeeseen. Lohjan Virkkalassa kehitettiin Super Rapid sementti. Laatuvaatimukset olivat korkeat, koska samanaikaisesti piti kaikki seuraavat vaatimukset täyttää: korkea lujuus, pakkas-suola-kestävyys, työstettävyys ja nopea lujittuminen. Näistä pakkas-suola-kestävyys oli haasteellisin. Hyvä pakkas-suola-kestävyys olisi saavutettu huokoistamalla, jolloin lujuus ja työstettävyys olisivat heikentyneet.

Silikalla olisi saavutettu korkea lujuus, mutta seosaineita ei saanut käyttää, koska haluttiin välttää haurautta ja pelättiin, että ratapölkyn dynaamiset kuormitusvaatimukset eivät täytyisi. Tällöin luovuttiin huokoistamisesta ja pyrittiin saavuttamaan riittävä pakkas-suola-kestävyys alhaisen vesi-sementti-suhteen (<0,45) avulla.

Ratapölkkybetonin kehitystyö oli pitkälti kokeellista. Pakkas-suola-kokeita tehtiin paljon. Tehonotkistin SP-3 (naftaleenisulfonaatti) oli käytössä. Jos massasta tuli kittimäistä, niin betoni ei tiivistynyt riittävän hyvin.

Vaatimuksia kohdistui myös kiviainekselle. Pakkas-suola-kokeissa havaittiin, että kivirakeet saattoivat olla säröillä. Kiviaineksen valmistuksessa murskaaminen pitää tehdä vaiheittain.

Kehitystyö oli tehtaan omaa työtä ja oli erittäin haasteellista. Koko ajan oli myös tiedossa, että toimivaa reseptiä ei ehkä löytyisi lainkaan.

John Tunna

Tekniikan tohtori John Tunna työskentelee Yhdysvalloissa Transportation Technology Center'ssä (TTCI) hiljattain perustetussa matkustajaliikennetoimintayksikössä (Passenger Rail Business Unit) yksikönjohtajana. Olli Kerokoski haastatteli häntä Tampereella 11.2.2010.

Kun rautateiden toimintaa on seurattu 150 vuoden ajan, voidaan todeta, että ratojen suunnittelu on ollut riittävän hyvää. Tänä ajanjaksona lähinnä materiaalit ovat muuttuneet, perusidea on säilynyt. (Tunna 2010)

Ratapölkkyjen päämateriaalit ovat: puu, teräsbetoni, jännebetoni, teräs ja komposiitti (yhdistelmä- tai liittorakenne). Viimemainittu koostuu esim. puusta ja/tai muovista. (Tunna 2010)

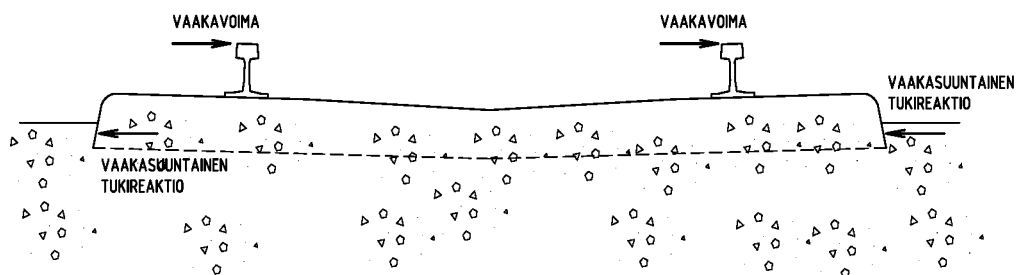
Yhdysvalloissa käytetään betonisia ratapölkkyjä vain erityiskohteissa.

Lovipyöräongelmaa esiintyy erityisesti tavarajunissa.

Ratapölkyn tehtävät

Ratapölkyn päätehtävä on pienentää pystykuorman aiheuttamaa painetta. Kiskon yläpinnalla on kontaktipinta pieni ja paine hyvin suuri verrattuna ratapölkyn alapinnan paineeseen. Myös kiskon alapinnalla paine on melko suuri. (Tunna 2010)

Toinen oleellinen ratapölkyn tehtävä on tarjota radalle sivuttainen tuki, sekä kaarteessa että suoralla rataosuudella. Sivutuenta tarvitaan myös kaltevassa kaarteessa, missä kaltevuus normaalisti vastaanottaa noin puolet vaakavoimasta. Ennen kaikkea ratapölkkyjen päät ottavat vaakakuormat vastaan. Kaksiosainen ratapölkky (twin-block) on tässä parempi, koska siinä on kaksi päätä molempiin suuntiin. Kitka toimii sekä ratapölkyn pohjalla että sivuilla. Puupölkky on pehmeä, jolloin raidesepelin terävät rakeet tunkeutuvat osin puun sisään ja parantavat kitkaa. Erityisesti tämä korostuu pitkällä suorilla sivuilla. Sama ilmiö toteutuu osin myös muovista tehdyillä komposiittiratapölkkyillä. Betoniratapölkkyjen sivut on muotoiltuja, mikä puolestaan parantaa niiden kykyä vastaanottaa raiteeseen kohdistuvia poikittaisia voimia. Teräsratapölkkyjen vaakavoimat siirtyvät erityisesti päiden välityksellä raidesepeliin, ks. kuva 8.4. Teräspölkkyjen tyypillinen ainevahvuus on 10 mm. (Tunna 2010)



Kuva 8.4 Teräsratapölkyn vaakavoimat ja tukireaktiot päädyissä (Tunna 2010).

Raiteen pituussuuntaiset rasitukset aiheutuvat junan kiihdytyksestä ja jarruttamisesta sekä lämpötilamuutoksista. Kiskot pitää hitsata toisiinsa kiinni ns. neutraalilämpötilassa, noin +25°C. Tunnan mukaan kiskoissa ei saisi koskaan olla puristusvoimaa, jotta nurjahdusta ei pääsisi tapahtumaan (Tunna 2010). [Viimeksi mainittu poikkeaa esim. UIC:n suunnitteluohjeista.]

Vaurioitumistavat valmistusmateriaalin mukaan

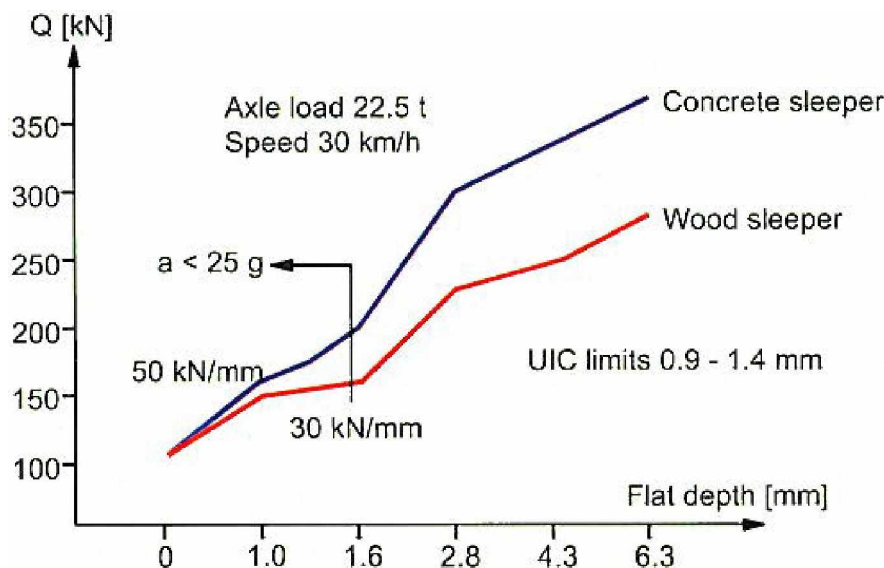
Puuratapölkky lahoaa ja/tai halkeilee ajan myötä. Kun halkeama syntyy, pääsee sadevesi ratapölkkyyn syvemmälle, ja lahoaminen kiihtyy. Puumateriaalin

ominaisuudet ovat oleellisia arvioitaessa puupölkyn pitkäaikaiskestävyyttä. Pehmeän puun ominaisuudet ovat hyvin erilaiset kovapuuhun verrattuna. Ominaisuudet tosin vaihtelevat paljon samasta puutyypistä tehtyjen ratapölkkyjen välilläkin.

Puupölkkyjen lahosuojaus on tärkeää. Kreosoottia on käytetty suoja-aineena, mutta se ei ole ympäristöystävällistä. Ilman suoja-ainetta ratapölkyn käyttöikä vaihtelee 2 ja 30 vuoden välillä, keskiarvon ollessa noin 10 vuotta. Lahoamista tapahtuu erityisesti raideruuvien kohdalla, jolloin ruuvien kiinnitys löystyy. Ruuviin kohdistuvat toistuvat kuormitukset edesauttavat löystymistä.

Puuratapölkkyjen etuja ovat edullisuus ostohetkellä ja paikallinen saatavuus; yleensä puuratapölkkyjä on tarjolla joka puolella Yhdysvaltoja.

Puupölkkyt absorboivat dynaamisia voimia hyvin, kuten kuvasta 8.5 voidaan havaita. ORE D 161:n testien mukaan 22,5 tonnin akselikuorman junan kulkiessa 30 km/h nopeudella kohdistuu rataan suurempi voima käytettäessä betonipölkkyjä kuin jos oltaisiin käytetty puupölkkyjä. Ero kasvaa lovipyörän loven kasvaessa. Mittaukset on tehty loven syvyyteen 6,3 mm asti. Julkaisun UIC 510-2 mukaan Ø1000 - 630 mm pyörissä loven syvyys saa olla korkeintaan 0,9 - 1,4 mm. Tällä lovisyvyydellä mittaustulosten mukaan dynaaminen pyöräkuorma kasvaa arvosta 30 kN/mm (puu-) arvoon 50 kN/mm (betoniratapölkky). (Esveld 2001)



Kuva 8.5 Mitattuja dynaamisen pyöräkuorman arvoja lovipyörän loven syvyyden vaihdellessa (Esveld 2001).

Betoniratapölkkyissä on ollut seuraavanlaisia ongelmia:

- Kiskon kohdassa ratapölkyn yläpinta on kulunut välilevyn alla. Kuluminen seurauksena kiskon kiinnitys saattaa irrota.
- Ratapölkyn pohja kuluu. Ilmiö on yleinen toistuvien rasiusten ja liikkeiden seurauksena.
- Halkeamat ratapölkyn pohjalla kiskon kohdalla tai yläpinnalla ratapölkyn keskikohdalla, tuennan sijainnista riippuen.

Teräsratapölkkyt tehdään ns. tavallisesta rakenneteräksestä. Teräspölkkyt ovat ruostesuojaamattomia ja ne ruostuvat kuten ruostuva teräs tyypillisesti ulkotiloissa ruostuu. Toinen teräspölkkyjen ongelma liittyy teräsmateriaalin väsymiseen,

erityisesti kiskonkiinnikkeen kohdalla. Kiskonkiinnityksenä käytetään sekä suoraa hitsaamista että kiinnityspultteja. Molempiin kiinnitystapoihin liittyy väsymisriski.

Komposiittiratapölkyissä vaurioitumisriski on päämateriaalin mukainen. Muovisissa ratapölkyissä toistuva kuormitus löystyttää raidepultit. Pääasiassa puusta tehdyissä ratapölkyissä on samantyyppisiä ongelmia kuin varsinaisissa puuratapölkyissä, esim. lahoaminen ja kiskonkiinnitysten löystyminen.

