

TOMMI RANTALA

## Betoniratapölkyn vaurioitumismekanismit





Tommi Rantala

# Betoniratapölkyn vaurioitumismekanismit

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2013

Liikennevirasto  
Helsinki 2013

*Kannen kuva: Tommi Rantala*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-300-3

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Tommi Rantala: Betoniratapölkyn vaurioitumismekanismit.** Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2013. 84 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-300-3.

**Avainsanat:** Betoniratapölkky, vaurio, halkeama, rapautuminen, kuormituskoe, iskukuorma.

## Tiivistelmä

Työhön kuuluu betoniratapölkkyille ja niissä esiintyviä vaurioita sisältävä kirjallisuusselvitys, Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa tehty kokeellinen tutkimus ja niiden perusteella tehdyt johtopäätökset. Päähuomio on kiinnitetty yksiosaisiin betoniratapölkkyihin ja niissä esiintyviin vaurioihin sekä vaurioiden aiheuttajiin.

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

Kokeellisessa tutkimuksessa tehtiin kuormituskokeita standardin SFS-EN 13230 mukaisesti. Kuormituskokeina olivat staattinen kuormituskoe ratapölkyn päälle ja keskiosalle sekä dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn päälle ja keskiosalle. Ratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe ei sisälly EN-standardiin. Kuormituskokeita tehtiin käytöstä poistetuille ja käyttämättömille ratapölkkyille. Käytöstä poistettuja ratapölkkyjä oli kolmea eri tyyppiä, mitkä olivat B63, B75 ja BV75. Käyttämättömät ratapölkkyt olivat nykyään Suomen rataverkolle hankittavat B97 ja BP99.

Suomessa käytetyt ratapölkkyt voidaan arvioida kuormituskokeista saatujen tulosten perusteella pääsääntöisesti hyväksi. Kuormituskokeissa havaittiin myös käytöstä poistettujen ratapölkkyjen täyttävän yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta uusille ratapölkkyille asetettavat kriteerit, joskin käytön aikana syntyneitä halkeamia esiintyi useissa ratapölkkyissä. Tällöin ei pystytty määrittämään ensimmäisen halkeaman syntyyn vaadittavaa kuormaa.

**Tommi Rantala: Betongsliperens skademekanismer.** Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 35/2013. 84 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-300-3.

## Sammanfattning

Denna avhandling innehåller en litteraturstudie över olika betongslipermodeller och skadorna som förekommer i dem, en empirisk undersökning utförd i Tammerfors tekniska universitets laboratoriehall och slutledningarna som dragits utifrån dessa. Avhandlingen fokuserar på helgjutna sliprar och de skador och faktorer som orsakar skadorna.

Litteraturstudien visade att en viktig faktor som orsakar sprickor i betongsliperna 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 under 1960- och 1980-talen lyckats minska söndervittringsproblemen som påträffats i vissa slipertyper genom att sänka betongens härdningstemperatur.

Den empiriska undersökningen innehöll belastningsprov enligt standarden SFS-EN 13230. Belastningsproven bestod av ett statiskt belastningsprov ovanpå och i mitten av slipern samt ett dynamiskt belastningsprov ovanpå och i mitten av slipern. Det dynamiska belastningsprovet på sliperns mittparti ingår inte i EN-standarderna. Belastningsproven gjordes på avskaffade och oanvända sliprar. Det fanns tre olika typer av avskaffade sliprar: B63, B75 och BV75. De oanvända sliprarna var av typerna B97 och BP99 som nu används i Finlands bannät.

Resultaten av belastningsproven visar att sliprarna som används i Finland i huvudsak kan anses vara av god kvalitet. Belastningsproven visade också att de avskaffade sliprarna med några undantag fyllde kriterierna som uppställts för nya sliprar, även om det uppstod sprickor i flera sliprar under användningen. I sådana fall var det inte möjligt att fastställa vilken belastning som krävs för att orsaka den första sprickan.

**Tommi Rantala: Damage mechanisms of a concrete sleeper.** Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 35/2013. 84 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-300-3.

## Summary

The thesis consists of a literature review of concrete sleeper models and the damage types that occur in them, an experimental study conducted in the laboratory hall of the Department of Civil Engineering at Tampere University of Technology and conclusions drawn on them. The main focus has been monoblock sleepers and the types and causes of damage that occur in them.

On the basis of the literature review, the individual dynamic top loads, resulting from rail and rolling stock faults, that impact on railway sleepers proved to be the most significant causes of cracks in concrete sleepers. The quality of the support layer was also shown to play a central role in the wide range of damages to sleepers. Furthermore, the weathering of concrete sleepers was found to have a significant impact on the service life of railway sleepers. However, the weathering problems related to some concrete sleepers in Finland from the 1960's to the 1980's, have been brought under control by limiting the hardening temperature of the concrete.

In the experimental study, loading tests were performed according to standard SFS-EN 13230. The loading tests consisted of a static and a dynamic loading test on the rail seat section and a static and a dynamic loading test on the centre section of the sleeper. The dynamic loading test on the centre section of the sleeper is not included in the EN standard. The loading tests were performed on used and unused railway sleepers. Three different types of railway sleepers that were taken out of use were tested: B63, B75 and BV75. The unused railway sleepers were of type B97 and BP99, the main types used in Finland's rail network nowadays.

The railway sleepers used in Finland have for the most part been good on the basis of the results of the loading tests. The loading tests also showed that the railway sleepers that have been taken out of use also generally meet the criteria set for new railway sleepers, although cracks, which had formed during use, were found in several used railway sleepers. It was not possible to determine the load required to produce the first crack in them.

## Esipuhe

Tämän tutkimuksen on tehnyt Tommi Rantala diplomityönä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksella, Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ on osa Liikenneviraston rahoittamaa Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelmaa

Työtä ohjasivat vanhemmat tutkijat Antti Nurmikolu ja Olli Kerokoski TTY:ltä. Työn tarkastajina toimivat prof. Pauli Kolisoja TTY:ltä ja dipl.ins. Tuomo Viitala Liikennevirastosta.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto  
Infra- ja ympäristöosasto



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	9
2	BETONIRATAPÖLKKY .....	10
2.1	Tehtävät .....	10
2.2	Mitat ja muoto .....	10
2.3	Materiaalit ja niiden vaatimukset.....	11
2.3.1	Betoni	11
2.3.2	Jänneteräksset.....	12
2.3.3	Kiskonkiinnitys .....	13
2.4	Valmistus ja varastointi.....	15
2.5	Betoniratapölkkytyypit.....	17
2.5.1	Yksiosainen ja kaksiosainen betoniratapölkky.....	17
2.5.2	Leveä ratapölkky.....	18
2.5.3	Kehäpölkky .....	19
2.5.4	Tikapuuratapölkky .....	20
3	YLEISIMMÄT BETONIRATAPÖLKYN VAURIOTYYPIT .....	21
3.1	Jänneteräspunosten väsyminen ja korroosio .....	21
3.2	Kiskonkiinnityksen irtoaminen .....	22
3.3	Betonin rapautuminen.....	23
3.3.1	Pakkasrapautuminen.....	24
3.3.2	Kemiallinen rapautuminen .....	25
3.4	Liikennekuormituksen aiheuttama halkeilu .....	27
3.4.1	Tukikerroksen ominaisuuksien heikkenemisen aiheuttamat vauriot...	29
3.4.2	Liikkuvan kaluston ja kiskon vikojen aiheuttamat vauriot .....	33
3.5	Muut.....	35
3.5.1	Valmistuksen aikaiset vauriot.....	35
3.5.2	Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset vauriot.....	35
3.5.3	Kiskon lepopinnan kulumisvauriot .....	36
4	LABORATORIOKOKKEET JA TESTATUT BETONIRATAPÖLKYT .....	38
4.1	Yleiskuvaus.....	38
4.2	Koeohjelma .....	38
4.3	Kuormituslaitteisto .....	38
4.4	Testatut ratapölkyt.....	41
4.4.1	Käyttämättömät ratapölkyt.....	41
4.4.2	Käytetyt ratapölkyt .....	41
4.5	Mittalaitteet kuormituskokeissa .....	43
4.5.1	Venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet.....	43
4.5.2	Siirtymäantureihin perustuvat mittalaitteet.....	44
4.5.3	Voima-anturit.....	44
4.5.4	Halkeamien mittaus.....	45
4.5.5	Mittalaitteiden asennus .....	45
4.6	Kuormituskokeet .....	47
4.6.1	Koekuormien määrittäminen .....	47
4.6.2	Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe.....	51
4.6.3	Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe.....	52
4.6.4	Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe .....	54
4.6.5	Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe.....	55
4.7	Pakkassuolakoe .....	55

5	TULOKSET .....	58
5.1	Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe .....	58
5.2	Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe .....	62
5.3	Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe .....	63
5.4	Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe .....	65
5.5	Ratapölkkyistä mitatut venymät .....	65
	5.5.1 Ratapölkyn pään kuormituskokeissa mitatut venymät .....	66
	5.5.2 Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa mitatut venymät .....	67
5.6	Ratapölkyn taipumat .....	69
5.7	Pakkassuolakokeet .....	72
6	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET .....	75
6.1	Rapautuminen ja valmistus .....	75
6.2	Kuormituskäyttäytyminen .....	75
	6.2.1 Pölkyn pään kuormituskäyttäytyminen .....	76
	6.2.2 Pölkyn keskiosan kuormituskäyttäytyminen .....	77
6.3	Jatkotutkimusehdotukset .....	78

## LIITTEET

Liite 1      Ratapölkkyjen kuormituspöytäkirjat

# 1 Johdanto

Esijännitetty betoniratapölkky on Suomen rataverkon pääradoilla pääasiallinen ratapölkkytyyppi. Ratapölkky on yksi merkittävimmistä komponenteista radan toiminnan kannalta. Sen tärkeimpinä tehtävinä ovat voimien välittäminen tukikerrokseen, kiskon tukeva kiinnittäminen ja raidelevyden 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 silmäääräisesti, 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.

Yleisimpiä vauriotyyppejä ovat eri syistä johtuvat halkeamat ja kiskon kiinnikkeiden irtoaminen. Kemiallisen rapautumisen ja pakkasrapautumisen merkitys on pienentynyt merkittävästi uusien ratapölkkyymallien markkinoilletulon myötä. Noin 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 käyttöikään. Toisin sanoen milloin vauriot ovat niin vakavia, että ratapölkky ei pysty enää täyttämään sille asetettavia vaatimuksia.

Tässä työssä ongelmaa lähestytään luvuissa 2–3 raportoitavalla kirjallisuustutkimuksella ja luvuissa 4–5 esitettävillä laboratoriokuormituskokeilla ja pakkas-suolakestävyyskokeilla. Tarkoituksena on tarkastella betoniratapölkkyissä ilmenneitä vaurioita ja vaurioiden aiheuttajia sekä vaurioiden merkitystä ajatellen jäljellä olevaa käyttöikää.

Kuormituskokeet tehdään standardin SFS-EN 13230 mukaisesti ja kokeina on staattisia ja dynaamisia kuormituskokeita. Kokeita tehdään niin käyttämättömille kuin käytöstä poistetuille ratapölkkyille. Testauksen tavoitteena on arvioida vaurioiden merkitystä ratapölkyn jäljellä olevaan lujuuteen. Lisäksi kuormitettaville ratapölkkyille tehdään pakkas-suolakestävyyskokeita standardin SFS 5449 mukaisesti. Niiden avulla voidaan arvioida eri ratapölkkyymallien sisältämän betonin pakkasenkestävyyttä.

## 2 Betoniratapölkky

### 2.1 Tehtävät

Ratapölkky on yksi tärkeimmistä komponenteista radan toimintaa ajatellen. Sen tärkeimpinä tehtävinä on [9]:

- 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

Suomessa käytettävien B63...B75-betoniratapölkkyjen käyttöikätaavoite on noin 30 vuotta [57]. Vuoden 1982 jälkeen valmistettujen betoniratapölkkyjen käyttöiän lasketaan olevan 40 vuotta. Esimerkiksi Parman Oy:n valmistamista ratapölkkyistä arvioidaan 40 vuoden käytön jälkeen 95 % olevan vielä käyttökuntoisia [48].

### 2.2 Mitat ja muoto

Vuonna 1987 ”FIP Commission on Prefabrication” on antanut yleisohjeistuksen [10] yksiosaisen betoniratapölkyn mittojen ja muodon suunnitteluun. 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. [10;39]

FIP Commission on Prefabricationin antaman ohjeistuksen mukaisesti ratapölkyn alapinnan tulee olla pinta-alaltaan sellainen, että keskimääräinen tukikerrokseen kohdistuva pohjapaine jää alle raja-arvon, joka on tyypillisesti 0,4–0,5 MPa [18]. Kyseisiä raja-arvoja käyttäen Parma Oy:n valmistama BP99 pystyisi pohjapinta-alansa puolesta vastaanottamaan 260–325 kN:n pystyvoiman. Vastaavasti Lujabetoni Oy:n valmistama B97 pystyisi vastaanottamaan 269–337 kN:n pystyvoiman. Kyseisten pystyvoimien vastaanottaminen edellyttäisi kuitenkin kuormituksen jakautumista tasaisesti koko ratapölkyn pohjapinta-alalle. Ratapölkyn rasitusten kannalta pohjapaineen tasainen jakautuminen ei kuitenkaan ole toivottua. Yleisesti pohjapaineen tavoitellaan ja oletetaan keskittyvän ratapölkyn päihin, jolloin keskiosa ei tukeudu sepeliin.

Ratapölkkyjen päätyjen tulee olla riittävän kokoisia ja sopivan muotoisia, jotta ratapölkky kykenisi yhdessä tukikerroksen kanssa tarjoamaan maksimaalisen vastuksen raiteen poikittaissuuntaista liikettä vastaan. Poikittaissuuntaiset voimat syntyvät liikuvasta kalustosta sekä raiteessa itsessään lämpötilavaihteluiden aiheuttamien kiskojen lämpöliikkeiden seurauksena [10;18]. Vaikuttava päätekijä raiteen poikkisuun-

taiseen vastukseen on kitka ratapölkyn ja sepelin välillä. Merkittävänä tekijänä on myös ratapölkyn molemmissa päissä oleva sepelistä koostuva pallo [18].

Koska esijännityspunokset ovat suoria ja samansuuntaisia ratapölkyn pohjan kanssa, voidaan poikkileikkaus suunnitella erilaiseksi pölkyn eri kohdissa. Poikkileikkaukset tulisi suunnitella siten, että punosten epäkeskisyyden vastaa parhaiten kyseisen kohdan taivutusmomentin suuruutta ja suuntaa. Tästä syystä ratapölkyn muoto on kapeneva korkeussuunnassa ja joskus leveysuunnassa siten, että kiskojen kiinnityskohdissa poikkileikkaus on pinta-alaltaan suurempi kuin ratapölkyn keskellä. Kyseisellä muotoilulla pyritään jännityshuippujen rajoittamiseen [10;18].

Maailmalla käytössä olevien yksiosaisten betoniratapölkkyjen pituus on raideleveydeltään 1435 mm olevilla radoilla pääsääntöisesti 2500–2600 mm, joskin 2300 mm ja 2750 mm pitkiä ratapölkkyjäkin on käytössä [10]. Suomessa alkujaan käytettyjen betoniratapölkkyjen pituus on 2500 mm, mutta vuonna 1985 tehdyn päätöksen mukaisesti siirryttiin hankkimaan ja käyttämään 2600 mm pituisia betoniratapölkkyjä. Pidemmän ratapölkyn eduiksi arvioitiin mm. suurempi massa ja isompi pohjapinta-ala, joiden ansiosta kunnossapitokustannuksien arvioitiin laskevan [16]. Eri ratapölkkyjen mittakuvia on esitetty kokeellisen osuuden yhteydessä kappaleissa 4.4.1 ja 4.4.2.

Liikenneviraston (v. 2009 asti Ratahallintokeskus) esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen [54] mukaisesti Suomessa hankittavien ratapölkkyjen pituuden tulee olla 2600 mm, suurimman leveyden mm ja suurimman korkeuden 220 mm kiskon keskilinjalla. Raideleveyden nimellismitta on 1524 mm. Tarvittaessa myyjä voi esittää tilaajalle pienehköjä valmistusmenetelmän ja raudoitusjärjestelmän vaatimia muutoksia. Liikenneviraston rautatieosasto hyväksyy betoniratapölkyn lopullisen muodon ja mitat.

## 2.3 Materiaalit ja niiden vaatimukset

### 2.3.1 Betoni

Ratapölkkyjen valmistuksessa käytettävän betonin tulee olla korkealaatuista ja kestävä. Sen pitää koostua korkealaatuisesta sementistä, laadukkaasta runkoaineesta ja siinä tulee olla alhainen vesi-sementtisuhte (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. [10;23]

Betonissa käytettävän runkoaineen valinnalla on merkitystä pyrittäessä ehkäisemään rapautumista. Esimerkkinä tällaisesta rapautumisesta on kappaleessa 3.3.2 tarkemmin käsiteltävä alkali-kiviainesreaktio, mikä on aiheuttanut ongelmia betonin pitkäaikaiskestävyyteen ympäri maailmaa. Lisäksi runkoaineen tulee olla hyvin kulutuksen kestävä, mikä ennaltaehkäisee hioutumien muodostumista eritoten kiskon lepoppinnalle [10]. Runkoaine ei myöskään saa sisältää raekooltaan liian suurta kiviainesta. Syynä tähän on sementtipastan kutistuminen kuivussa. Tällöin kuivumiskutistuma aiheuttaa mikrohalkeamia/säröilyä suurten runkoainepartikkelien ympärille, mikä saattaa johtaa pitkäaikaiskestävyyden heikentymiseen [50].

Esijännitetyissä betoniratapölkyissä käytetään usein korkean alkulujuuden omaavaa Portland-sementtiä, jolta käytettävästä runkoaineesta riippuen vaaditaan alhaista alkalipitoisuutta. Jälkijännitetyissä sekä kaksiosaisissa ratapölkyissä (luku 2.5.1) voidaan käyttää perinteistä Portland-sementtiä, sillä kyseisissä ratapölkytyypeissä korkea alkulujuus ei ole niin merkittävää verrattuna esijännitettyihin betoniratapölkyihin. [10]

Suomessa käytettävien betoniratapölkyjen teknisten toimitusehtojen mukaisesti betoniratapölky suunnitellaan ja valmistetaan Suomen ympäristöministeriön rakennusmääräyskokoelman mukaisen rakenneluokan K60-1 ja ympäristöluokan Y1, tai vastaavan kunkin EU-maan viranomaisten määräysten mukaan. [54]

Betonin puristuslujuuden on oltava 7 vuorokauden ikäisenä vähintään 55 MN/m<sup>2</sup> tai 28 vuorokauden ikäisenä vähintään 60 MN/m<sup>2</sup>. Puristuslujuuden on oltava jännevoimien siirtohetkellä vähintään 30 MN/m<sup>2</sup>. Taivutusvetolujuuden on oltava 7 vuorokauden ikäisenä vähintään 5 MN/m<sup>2</sup>. Pakkaskestävyysluku 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 (luku 3.3.2) ei sallita lainkaan. [54]

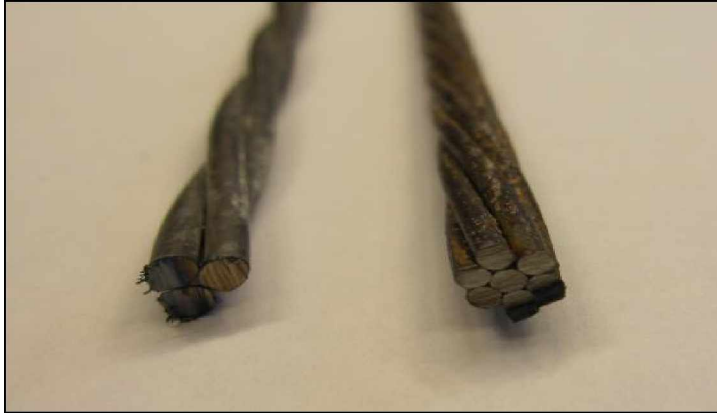
### 2.3.2 Jänneteräokset

Esijännitetyissä betoniratapölkyissä jänneteräostankojen tai -punosten lyhyt tartuntapituus on erittäin tärkeää. Tämä johtuu siitä, että ratapölkyissä jänneteräosten tartunnan pitää toimia erittäin lyhyellä matkalla ratapölkyn molemmissa päissä, joihin muodostuu suuria jännityksiä kiskon lepopintaan kohdistuvien kuormien johdosta [10]. Jänneteräosten/punosten tartuntaan vaikuttaa adheesio, kitka sekä muu mekaaninen toiminta. Nämä mekanismit vaikuttavat eri vaiheissa punoksen liukumisen kasvaessa [17].

Rikard Bolmsvikin (aiempi nimi Gustavson) tekemässä tutkimuksessa [17], jossa tutkittiin punoksen tartuntakapasiteettia, todettiin adheesio kasvaneen punoksen ja sitä ympäröivän betonin välillä merkittävästi, kun punoksen pinnan mikrokarheutta lisättiin. Lisäksi adheesio havaittiin kasvavan kohtalaisesti lisättäessä betonin tiiveyttä punoksen ja betonin rajapinnassa. [17]

Kitka vaikuttaa erittäin merkittävästi punoksen tartuntakapasiteettiin heti alkuliukuman jälkeen. Kitkan kasvattaminen kasvattaa myös tartuntakapasiteettia, joskaan sillä ei ole vaikutusta alkuliukumaan. [17]

Mekaaninen toiminta aikaansaadaan punoksen langoissa olevalla profiloinnilla. Kyseinen mekanismi on suurin yksittäinen tekijä profiloitun punoksen tartuntakapasiteettiin. Profilointi eli loveukset aiheuttavat kuitenkin normaalisuuntaisia jännityksiä betonin ja punoksen rajapintaan. Tästä johtuen betoniin syntyy puristusjännityksiä ja riski betonin halkeamiseen kasvaa. [17]



Kuva 1. Vasemmalla halkaisijaltaan 6,5 mm oleva kolmilankainen jänneteräspunos ja oikealla halkaisijaltaan 6,4 mm oleva seitsemänlankainen jänneteräspunos.

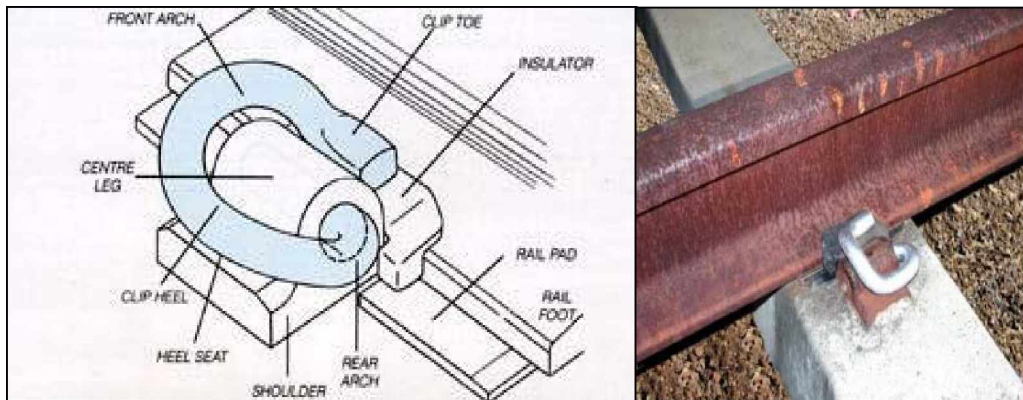
Esijännitetyissä betoniratapölkyissä käytetään mm. halkaisijaltaan 5 mm teräslankoja,  $\varnothing$  9,3 mm seitsemänlankaisia punoksia ja  $\varnothing$  6,3 mm kolmelankaisia punoksia [10]. Tällä hetkellä Suomessa valmistettavissa ratapölkyissä käytetään halkaisijaltaan 6,5 mm kolmelankaisia jänneteräspunoksia (kuva 1). Jänneteräksissä käytettävän teräksen on oltava korkealaatuista [54].

### 2.3.3 Kiskonkiinnitys

Suomessa betoniratapölkyissä käytetään pääasiassa kahdentyyppisiä kiskonkiinnityksiä. Käytetyt kiinnitykset ovat Vossloh Skl 14 (kuva 2) ja Pandrol e-clip (kuva 3), joista ensimmäinen on pääasiallinen kiskonkiinnitys nykyään Suomeen hankittavilla betoniratapölkyillä. Pandrol e-clip-kiinnityksellä varustettuja ratapölkkyjä valmistetaan vain rataosille, joissa kiskonkiinnityksenä on e-clip ja korvattavia ratapölkkyjä ei ole suuria määriä [25].



Kuva 2. Vossloh Skl 14-kiinnitys. Oikeanpuoleisessa kuvassa raideruuviholkki, välilevy, raideruuvi, kiinnitysrousu ja kulmakappale [79].



Kuva 3. Pandrol e-clip-kiinnitys [46;47]

Yleisinä tehtävinä ja vaatimuksina nykyaikaisille kiskonkiinnityksille voidaan pitää [55]:

- Raidelevyden ja kiskon kallistuksen säilyttäminen tietyissä raja-arvoissa.
- Värähtelyn ja iskukuormien vaimentaminen niin paljon kuin mahdollista.
- Raiteesta tulevien pystysuuntaisten, sivuttaissuuntaisten ja pituussuuntaisten kuormien siirtäminen turvallisesti ratapölkylle.
- Väsymisestä ja kulumisesta johtuvien vaurioiden välttäminen kiinnityksessä.
- Riittävän kiskon läpivetovastuksen tarjoaminen, jotta 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 pitäisi voida asentaa ja purkaa yksinkertaisesti, sekä koneellisesti että käsin.

Jatkuvakiskoraiteilla tarvitaan joustavia kiskonkiinnityksiä betoniratapölkkyillä, sillä betoniratapölkkyt ovat herkkiä iskukuormille ja dynaamisille kuormille. Joustavuutta kiinnitykselle tuo ratapölkyn ja kiskon välissä sijaitseva välilevy. Sen tehtävinä on jakaa junista kiskon välityksellä tulevat kuormitukset kiskon lepopinnalle 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. [9]

Kiskonkiinnityksen tulee olla riittävän suuri läpivetovastus eli kyky vastustaa kiskojen pituussuuntaista liikettä. Mikäli kiskoihin kohdistuu poikkeuksellisen suuria pituussuuntaisia voimia kiskonkiinnitykset eivät päästä kiskoa liikkumaan, vaan koko ratapölkky liikkuu tukikerroksessa [9]. RATO 11 määrittää läpivetovastuksen minimiarvoksi 9 kN/kiinnitys. Läpivetovastuksen minimiarvo täyttyy niin Pandrol e-clip kuin Vossloh Skl 14-kiinnityksellä [42;53].

Kiskonkiinnityksen tulee olla myös rakenteeltaan ja materiaaleiltaan sellainen, että se pystyy tarjoamaan riittävän sähköisen eristyskyvyn kiskon ja ratapölkyn välille. Eristyskyvyn vähimmäisvaatimus on 5000 Ohmia [57]. Esimerkiksi Pandrol e-clip tarjoaa 34400 Ohmin eristyskyvyn, kun taas Vossloh Skl 14 eristyskyky on 23000–80000 Ohmia [42].



Vossloh Skl 14-kiskonkiinnityksen etuna on mm. 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 ratapölkyn. Vossloh Skl 14 sopii 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 routakiilaus on mahdollista, mutta ei suositeltavaa, sillä tuolloin voimat eivät siirry kulmakappaleen vaan ruuvien kautta pölkkyyn [42].

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 sepeliharja saattaa irrottaa jousia. Kyseisen kiskonkiinnityksen heikkoutena on myös jousen ja kiskon välissä olevan eristimen käyttöikä, mikä on ainoastaan noin 10 vuotta. [25;42]

## 2.4 Valmistus ja varastointi

Suomessa aloitettiin laajemmat betoniratapölkkyjen käyttökokeilut 1960-luvun alussa ja ensimmäiset Suomessa valmistetut betoniratapölkkyt asennettiin rataan vuonna 1964 [15]. Betoniratapölkkyjen valmistuksessa voidaan käyttää joko esi- tai jälkijännitystekniikkaa. Nykyään Suomessa valmistetaan ainoastaan esijännitettyjä betoniratapölkkyjä. Vielä 1980-luvulla Suomessa valmistettiin dywidag-jännitystekniikalla jälkijännitettyjä betoniratapölkkyjä. Kyseisellä tekniikalla jännittäminen tapahtuu vasta kun betoni on saavuttanut riittävän puristuslujuuden. Jänneterästangot asennetaan valun aikana pölkkyssä olleiden matriisien tekemiin kanaviin, minkä jälkeen jänneterästangot jännitetään tunkeilla tavoitejännitykseen. Kun tavoitejännitys on saavutettu, esiasennetut mutterit kierretään ankkurointikappaletta vasten. Tämän jälkeen jänneterästen ympärillä oleva tyhjätila injektoidaan injektointilaastilla umpeen [25;31].

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 määristä. Esimerkiksi vuonna 1997 betoniratapölkkyjen tarve oli noin 700000 kappaletta, kun taas vuonna 2009 betoniratapölkkyjä valmistettiin alle 300000 kappaletta. [24;25]

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 (kuva 4). [24;54]

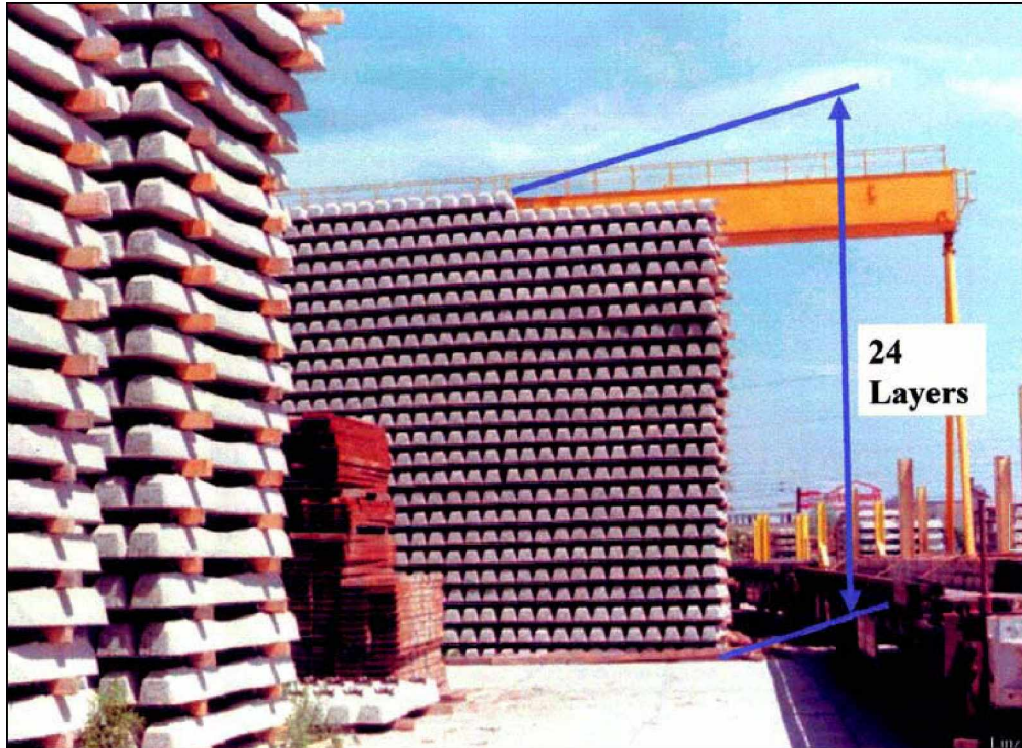
Useissa maissa betoniratapölkkyjä on lämpökäsitelty muottikierron nopeuttamiseksi. Suomessakin ratapölkkyjä on lämpökäsitelty. Lämpötilan aiheuttamien ongelmien johdosta varsinaisesta lämpökäsittelystä on kuitenkin luovuttu. Liikenneviraston teknisten toimitusehtojen mukaisesti ratapölkkyjen lämpötila kuivumisen aikana ei saa ylittää 55 astetta. Lämpötilan ylittyminen saattaa johtaa haitalliseen ettringiitin muodostumiseen (ks. luku 3.3.2) ja tätä kautta betoniratapölkkyjen pitkäaikaiskestävyyden heikkenemiseen. [54;56]

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 °C lämpötilassa. Lämpötilan nousu ja lasku saa olla korkeintaan 15 °C tunnissa. Betoniratapölkky on suojattava kuivumiselta. [54]



*Kuva 4. Lujabetoni Oy:n käyttämä jälkikäsitelytila, jossa ratapölkkyt pidetään riittävän kosteina seitsemän vuorokauden ajan ilman jälkihoitoainetta.*

Betoniratapölkkyjä varastoidaan ratapölkkytehtailla, varastoalueilla sekä työmailla. Suomessa ratapölkkyt pinotaan enintään 20 päällekkäisen pölkyn pinoiksi [57]. Ulkomailla ratapölkkyjä varastoidaan edellä mainittua korkeampiinkin kasoihin, kuten kuvasta 5 voidaan huomata. 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 [57].



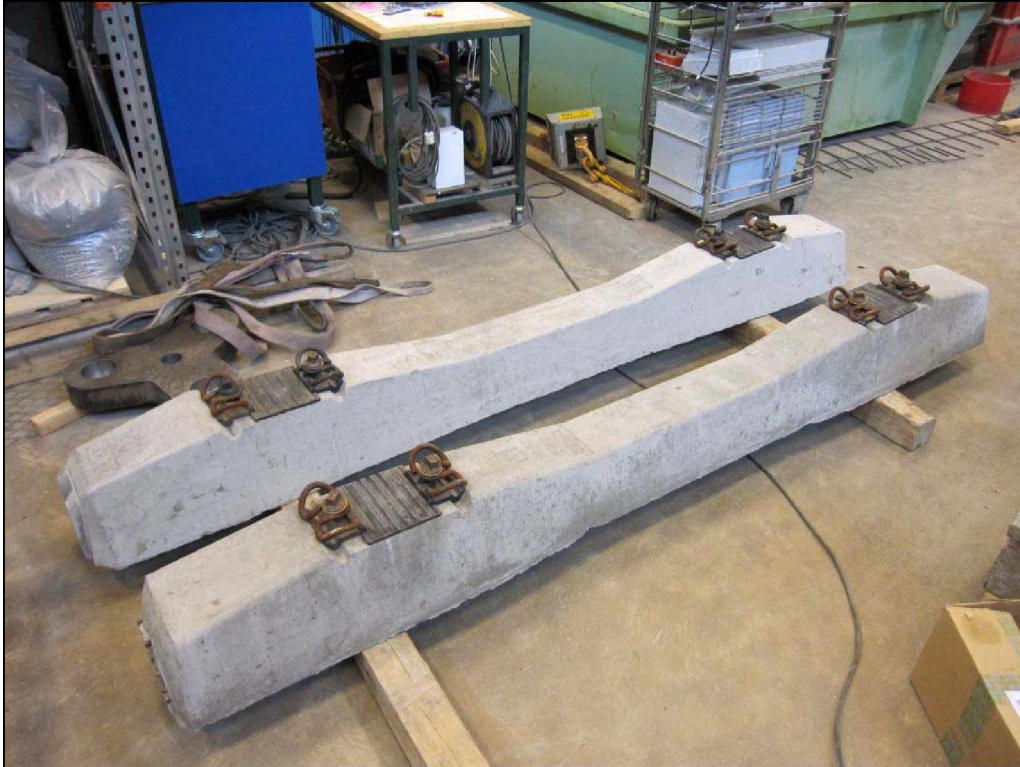
Kuva 5. Betoniratapölkkyjen varastopino [21]

## 2.5 Betoniratapölkkytyypit

### 2.5.1 Yksiosainen ja kaksiosainen betoniratapölkky

Maailmalla yleisimmin käytetyt betoniratapölkkytyypit ovat yksiosainen betoniratapölkky (monoblock sleeper) ja kaksiosainen betoniratapölkky (twin-block sleeper). Yksiosainen betoniratapölkky (kuva 6) on lähtöisin Iso-Britanniasta. Nykyään sitä käytetään laajasti ympäri maailmaa mm. 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. [9;10]

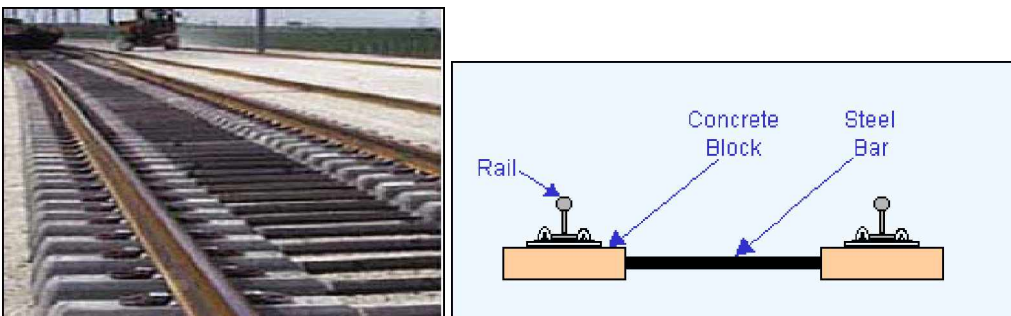
Suomessa käytetty betoniratapölkky malli on yksiosainen, joskin myös kaksiosaisia betoniratapölkkyjä on ollut käytössä 1980-luvun alkupuolelle asti [15]. Tällä hetkellä Suomen rataverkolla olevia ratapölkkyjä on valmistettu sekä esi-, että jälkijännitystekniikalla, mutta uudet Suomeen hankittavat ratapölkkyt valmistetaan esijännittämällä.



Kuva 6. Yksiosaiset betoniratapölkkyt B97 ja BP99 (lähimpänä B97).

Yksiosaisen betoniratapölkky mallin etuja verrattuna esimerkiksi kaksiosaiseen betoniratapölkkyyn ovat alhaisempi hinta ja hieman pienempi alttius halkeamille kiskon lepopinnan kohdalla. Pienempi halkeama-alttius johtuu siitä, että yksiosainen betoniratapölkky pystytään jännittämään. [9;10;37]

Kaksiosainen betoniratapölkky, jossa terästanko yhdistää kaksi betonilohkoa (kuva 7), on kehitetty Ranskassa ja sitä käytetään laajalti Euroopassa, Intiassa, Brasiliassa ja Meksikossa. Sen etuina ovat hyvin määritetyt tukipinnat ja suuri sivuttaissuuntainen vastus tukikerroksessa. [9;10;37]



Kuva 7. Kaksiosainen betoniratapölkky [76;77]

### 2.5.2 Leveä ratapölkky

Saksassa on kehitetty leveä ratapölkky malli (kuva 8) vastaamaan tulevaisuuden vaatimuksia kasvavien junakuormien ja junien nopeuden johdosta. Leveän betoniratapölkyn raidesepeliin aiheuttama pintapaine on havaittu noin 50 % pienemmäksi ja sivusuuntainen stabiilius 15 % suuremmaksi perinteiseen ratapölkkyyn verrattuna [9].

Leveä betoniratapölkky on 570 mm leveä ja ratapölkkyvälinä käytetään 600 mm. Ratapölkkyjen väliin asennetaan kuminen päällys/suoja, mikä estää sadeveden ja kasvillisuuden pääsyä ratapölkkyjen väliin ja lisää siten radan rakennekerrosten käyttöikää [9;38]. Edellä mainituista syistä johtuen myös kunnossapidon tarpeen on todettu vähenevän, joskin radan rakennuskustannukset ovat arviolta noin 10–20 % suuremmat verrattuna perinteiseen rataan [9]. Saksaan rakennetulla koeosuudella 200 miljoonan bruttotonnin aikana ei tukemista tarvinnut suorittaa [38]. Leveän betoniratapölkyn on arvioitu soveltuvan kantavuudeltaan huonolle radalle tavanomaista ratapölkkyä paremmin [9].



Kuva 8. Leveä betoniratapölkky BBS1 [80]

### 2.5.3 Kehäpölkky

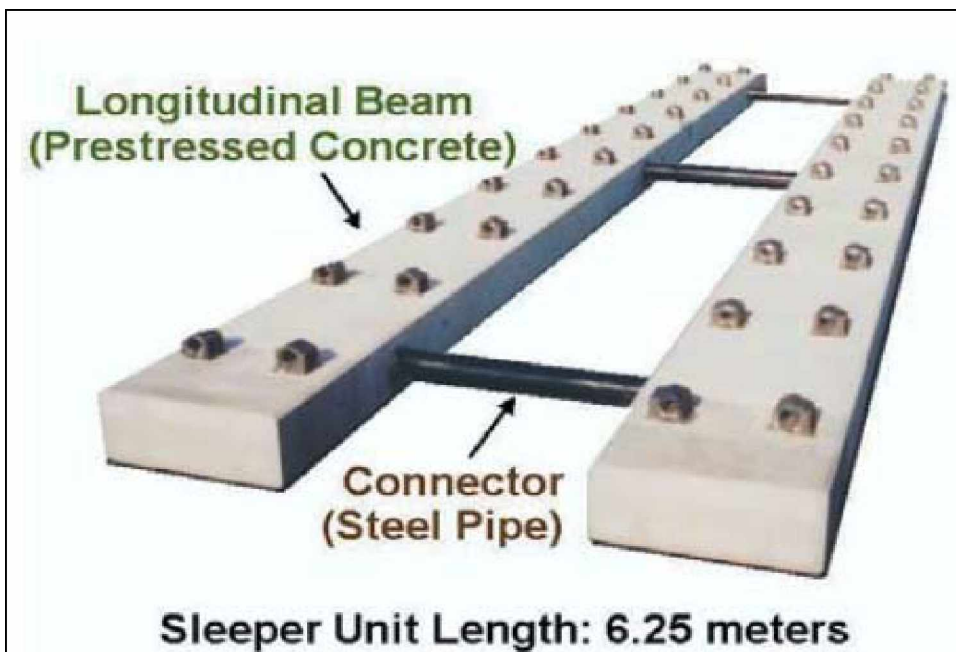
Itävallassa on kehitetty kehäpölkky (frame sleeper), joka on suunniteltu kohtaamaan nykypäivän akselipainojen ja nopeuden nostoista syntyneet haasteet. Kyseistä ratapölkkyä voidaan ajatella kahtena ratapölkkyä, jotka on yhdistetty toisiinsa kiskon kiinnityskohdista (kuva 9). Kuten leveän ratapölkyn kohdalla, 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 [9;63]. Kehäpölkky tarjoaa kauttaaltaan paremman tuen kiskolle. Kisko lepää kiskonkiinnitysten välissä olevan betonin päällä aikaansaaden näin näennäisjatkuvan kiskon tuennan [9].



Kuva 9. Kehäpölkky [9]

#### 2.5.4 Tikapuuratapölkky

Japanissa on kehitelty tikapuurataa (ladder track), jossa perinteiset ratapölkkyt on korvattu tikapuumallisilla ratapölkkyillä (ladder sleeper). Kyseinen pölkky koostuu kuvan 10 mukaisesti kahdesta 6,25 metriä 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 suoritetussa kokeessa 150 miljoonan bruttotonnin jälkeen kyseinen rataosuus ei vaatinut kunnossapitoa, kun taas vertailukohteena ollut yksiosaisista ratapölkkyistä rakennettua rataa jouduttiin tukemaan viidesti. Lisäksi kokeessa käytetty peräti 175 kN staattinen pyöräkuorma ei aiheuttanut yhtään halkeamia tai muitakaan vaurioita ratapölkkyelementteihin. [1]



Kuva 10. Tikapuuratapölkky [1]

## 3 Yleisimmät betoniratapölkyn vauriotyypit

### 3.1 Jänneteräspunosten väsyminen ja korroosio

Ratapölkyn pitäisi olla halkeilematon, sillä taivutusmomentista johtuvat halkeamat betonissa johtavat esijännityspunosten jännitystason suureen nousuun halkeamakohtassa taivutusrasituksen aikana. Tämä saattaa johtaa punosten väsymismurtoon [18]. Lisäksi halkeamat saattavat altistaa jänneteräkset korroosiolle.

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 edellyttää käytännössä, että ilman suhteellisen kosteuden on oltava vähintään 60 %. Suomalaisissa olosuhteissa ylittyy suhteellisen kosteuden arvo 60 % ulkoilmassa lähes aina. Korroosio kiihtyy, kun epäpuhtauksia kuten suoloja, happoja ja mikrobeja kerääntyy teräksen pinnalle. Kyseiset aineet rikkovat jatkuvasti terästä suojaavan oksidikalvon. Riskiympäristöjä ovat mm. eloperäisten aineiden, maantiesuolan ja teollisuuden kemikaalien vaikutusalueet. [19]

Betonin raudoitus on uutena hyvin suojattu ruostumiselta, koska alkalinen huokosvesi passivoi teräspinnan muodostaen siihen suojaavan kalvon. Ajan myötä ilman hiilidioksidi kuitenkin kulkeutuu betonin sisään neutraloiden alkaliyhdisteitä - betoni karbonatisoituu, ja ruostuminen pääsee alkamaan. Karbonatisoitumisen nopeus riippuu betonin laadusta ja pinnan rasitusoloista. 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 korroosiota. [49]

Betonin karbonatisoitumista pystytään tarkastamaan poraamalla näyte betonista. Sivelemällä näytteen betonipintaan fenoliftaleiinin ja alkoholin seosta värjäätty karbonatisoitumaton kerros punaiseksi, joten värjäntymättömän kerroksen paksuus antaa arvion karbonatisoituneen kerroksen paksuudesta. [49]

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 saattavat kiihdyttää korroosiota entisestään. 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 kappaleissa 3.3 ja 3.4 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. [15;19;23;49]

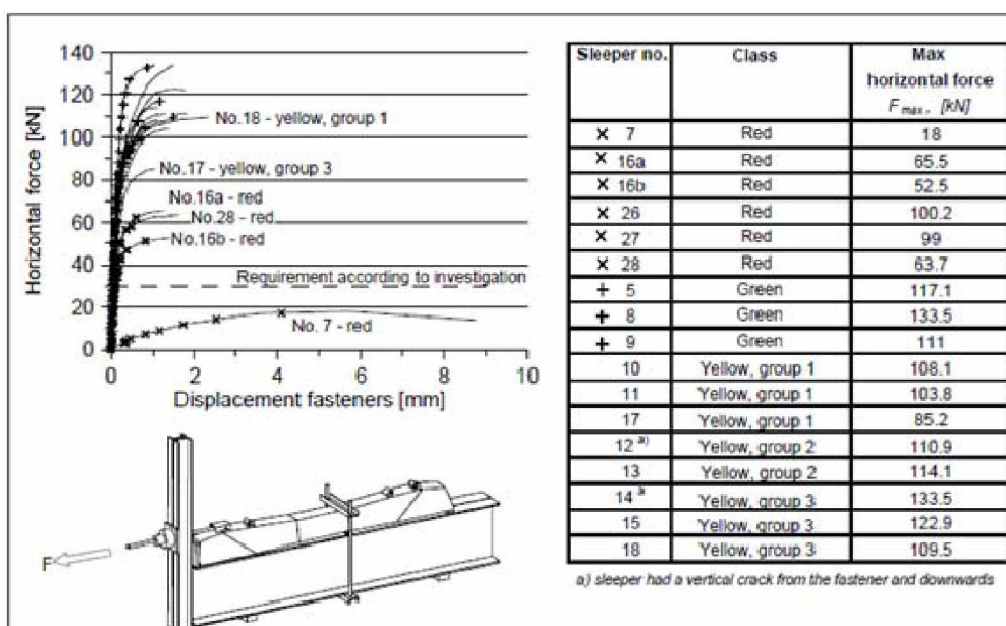
## 3.2 Kiskonkiinnityksen irtoaminen

Dynaamiset kuormat aiheuttavat ratapölkkyssä oleviin kiskonkiinnityksiin suuria rasituksia. Dynaamisten kuormien alaisuudessa kiskon kiinnikkeet saattavat löystyä ja muoviset raideruuviholkit saattavat vaurioitua [38]. Vossloh Skl 14-kiinnityksessä vioittunut raideruuviholkit voidaan kuitenkin poistaa ja tilalle voidaan asentaa uusi raideruuviholkit. Mikäli normaalia holkkia ei voida enää asentaa, voidaan käyttää ulkohalkaisijaltaan pienempää raideruuviholkkia [59].

Kiskonkiinnityksen kunnan heikentyminen lisää kiskon siirtymiä kiskoa kuormitettaessa. Kiinnityksen jäykkyyden pienentymisen seurauksena, kiskon pystysuuntaiset siirtymät kasvavat jopa 60-70 %. Tämän lisäksi kiskon kiihtyvyydet lisääntyvät huomattavasti [83]. Kiskon pystysuuntainen liike saattaa aiheuttaa kiinnikkeisiin rasitustiloja, jotka voivat johtaa kiinnikkeiden täydelliseen irtoamiseen. Varsinkin Pandrol eclip-kiinnitys saattaa irrota tärinän vaikutuksesta. [42].

Ruotsissa tehdyissä kiskon kiinnikkeiden sivusuuntaisissa vetokokeissa [74] havaittiin, että vähäinen tai kohtalainen määrä halkeamia ei vaikuta merkittävästi kiskonkiinnitysten kapasiteettiin ottaa sivusuuntaisia voimia vastaan. Mikäli ratapölkkyssä on runsaasti halkeamia, kiskonkiinnitysten sivusuuntainen kuorman vastaanottokyky pienenee merkittävästi. Mikäli huonokuntoisen ratapölkyn ympärillä on hyväkuntoiset ratapölkkyt, pystyy huonokuntoinen ratapölkky kuitenkin täyttämään tehtävänsä [73;74]. Kuvassa 11 on esitetty 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 11. Ruotsissa suoritetun kiskonkiinnityksen vetokokeiden tuloksia [73].



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 [56]. Äärimmäisessä tilanteessa ratapölkky voi haljeta kuvan 12 mukaisesti raideruuvien linjalta. 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 12. Pituussuuntaan haljenneita ratapölkkyjä.

Mahdollinen syy kuvan 12 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 [25]. Edellä mainitut tekijät eivät kuitenkaan selitä kaikkia ratapölkyn pituussuuntaisia halkeamisia, sillä ratapölkkyjä on haljennut kyseisellä tavalla jopa niiden kuljetuksen aikana [5].

### 3.3 Betonin rapautuminen

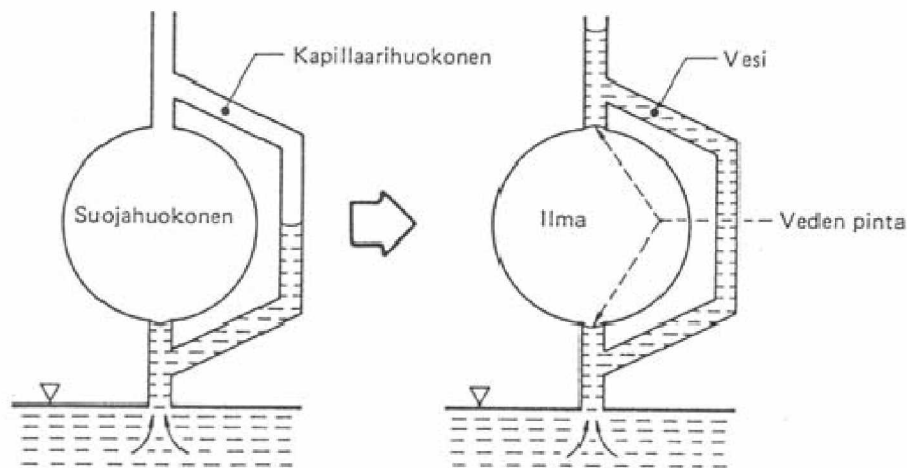
Betonin rapautumiseksi kutsutaan vaurioitumismekanismia, joissa betonin sisään muodostuva ylipaine saa aikaan sisäisiä säröjä ja halkeamia. Rapautuminen johtaa edetessään lopulta siihen, että betoni menettää lujuutensa ja koossapysyvyytensä. Suomen olosuhteissa pakkasrapautuminen on selvästi merkittävin rapautumisilmiö. Muut rapautumisilmiöt ovat huomattavasti harvinaisempia. Eri rapautumisilmiöiden aiheuttamat näkyvät vauriot ovat samankaltaisia, joten rapautumisen syyn selvittäminen edellyttää laboratoriotutkimuksia. [20]

Silmämääräisesti betonin rapautumisen huomaa ensimmäisenä ratapölkkyjen päistä, joihin muodostuu verkkohalkeamia. Tämän jälkeen pinnasta alkaa irtautua betonia ja ratapölkkyyn syntyy pituussuuntaisia halkeamia. [15]

Betonin rapautuminen saattaa nopeuttaa jänneterästen korroosiota ohentuneen suo- jabetonipeitteen sekä halkeamien kautta kulkeutuvan kosteuden ja kemiallisten yh- disteiden johdosta. Jänneterästen kannalta pahimpia halkeamia ovat ratapölkyn pi- tuussuuntaiset halkeamat. Ratapölkkyssä oleva jännitys ei vaikuta kyseisessä suun- nassa, joten halkeamat eivät sulkeudu. Suuret rapautumisvauriot saattavat aiheuttaa ratapölkkyssä jännityksen laukeamisen, kiskonkiinnityksen irtoamisen, raidelevyden muutoksen tai muun vastaavan betoniratapölkyn vaihtoon johtavan vaurion. [15]

### 3.3.1 Pakkasrapautuminen

Pakkasrasitus aiheutuu betonin huokosverkostossa olevan veden jäätymislaajeneman synnyttämästä paineesta, jota kasvattaa edelleen jääkiteen tilavuuden kasvu lämpötilan jälleen noustessa. Betonin kapillaarihuokosissa oleva vapaa vesi laajenee jäätyes- sään 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 jäätymislaajen- tumisen aiheuttama hydraulinen paine ei voisi synnyttää betoniin murtumia, on beto- nissa oltava ilmatiloja, jotka eivät täyty vedellä kapillaarivoimien vaikutuksesta, ja joihin laajeneva vesi voi tunkeutua. Näitä erillisiä pallomaisia ilmahuokosia, eli suoja- huokosia (kuva 13), on oltava riittävän tiheässä ja tasaisesti jakautuneena sementti- kiveen. [20;23]



Kuva 13. Betonin suojahuokosen pysyminen ilmatäytteisenä veden imeytyessä betonin kapillaarihuokosiin [6].

Pakkasvaurioiden syntyyn ei riitä pelkästään se, että betoni on normien mukaan pak- kasta kestäväntöntä. Tämän lisäksi pakkasrasitustason on oltava riittävän korkea sekä rakennetyypin sellainen, että kosteusrasitus johtaa betonin korkeaan vedellätyt- misasteeseen jäätymistilanteessa. [20]

Alhainen vesisementtisuhte johtaa korkeampaan lujuuteen ja tiiveyteen, joka pienentää vedenimunopeutta sekä jäätyvän veden kokonaismäärää. Vaurioiden syntymiseen

vaikuttavat yleisesti myös rasitusolosuhteet ja rasitusyökkien lukumäärä. Rannikko-seudun ja Etelä-Suomen pakkasrasitusolosuhteet ovat ankarammat kuin sisämaassa ja Pohjois-Suomessa. [20;23]

Pakkasvaurioituminen ilmenee betonin säröilyinä. Säröt vaikuttavat betonin lujuuteen ja läpäisevyyteen. Rapautuvan betonin vedenimuneisuus kasvaa voimakkaasti säröilyn ja halkeamien lisääntyessä, joten rapautuminen on kiihtyvää. Pitkälle edennyt pakkasrapautuminen ilmenee mm. 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 vasa-roimalla, vaan se edellyttää tarkempia tutkimuksia. [20]

### 3.3.2 Kemiallinen rapautuminen

#### 3.3.2.1 Ettringiitti

Ettringiittireaktioksi kutsutaan kovettuneessa sementtikivessä tapahtuvia sulfaattimineraalien kemiallisia reaktioita, joihin liittyy reaktiotuotteiden voimakas tilavuudenkasvu. Reaktiossa muodostuva ettringiittimineraali kiteytyy ilmatäytteisten huokosten eli suojahuokosten (kuva 14) seinämille, jolloin suojahuokosten tilavuus pienenee ja betonin pakkaskestävyys heikkenee. Reaktion jatkuessa varsinainen vaurioituminen voi tapahtua joko pakkasrapautumisena heikentyneen pakkaskestävyyden johdosta tai siten, että ettringiitin kiteytymisen aiheuttama paine säröyttää betonia. Ettringiitin aiheuttamat vauriot muistuttavat pakkasrapautumisen aiheuttamia vaurioita, joten näiden kahden erottaminen vaatii laboratoriotutkimuksia. [20]



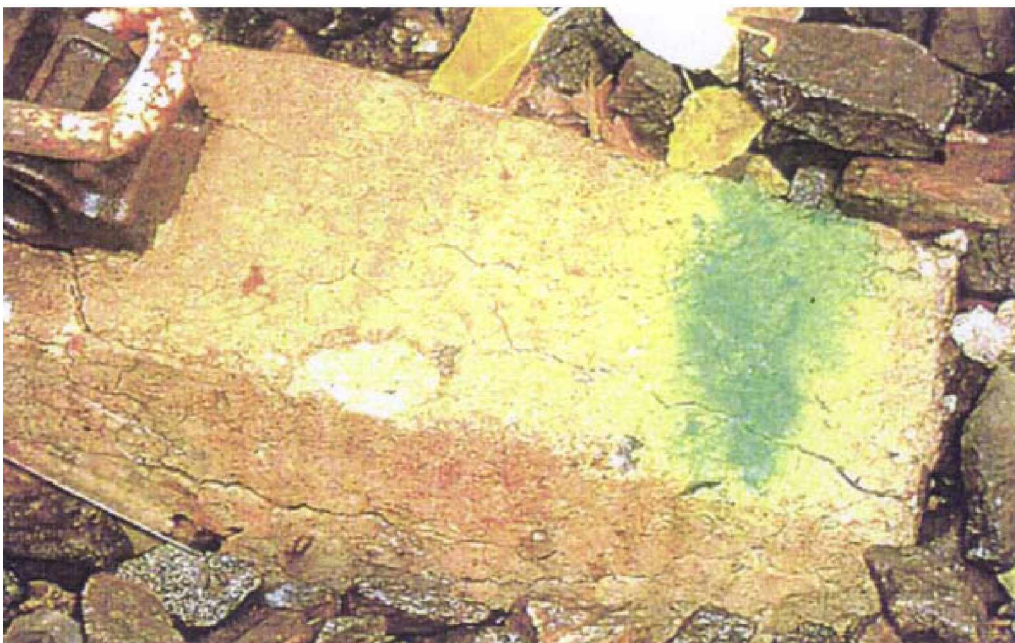
Kuva 14. Ettringiittiä betonin ilmahuokosissa. Ilmahuokokset ovat tyypillisesti halkaisijaltaan noin 0,025-0,05 mm [71].

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. [7;20]

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 ettringiitti-reaktioksi eli ettringiitin uudelleen kiteytymiseksi. Sulfaatin kestävä betonin käyttö on varmin tapa estää vaurioita. Haitallinen ettringiittireaktio voi aiheutua joko ulkoisesta sulfaattilähteestä tai sisäisesti esimerkiksi korkean hydrataatiolämpötilan vuoksi. [7;66;69]

Suomessa 1960-1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkyissä on havaittu ettringiitistä johtuvia vaurioita. Syynä tähän oli tuolloin käytetty lämpökäsittely (höyrykarkaisu), jonka avulla nopeutettiin betonin hydrataatiota. Lämpötila nostettiin 75oC-80oC:een, mikä mahdollisti ettringiitin uudelleen kiteytymisen. 1980-luvulla tehtyjen tutkimusten perusteella lämpökäsittelystä luovuttiin, jonka jälkeen ettringiitistä johtuvia vaurioita ei ole havaittu [72].

Ruotsissa on havaittu 1992-1996 välisenä aikana valmistetuissa betoniratapölkyissä runsaasti rapautumisen aiheuttamia vaurioita (kuva 15). 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. [66;73]



Kuva 15. Ettringiitin aiheuttamaa halkeilua betoniratapölkyissä Ruotsissa [66].

### 3.3.2.2 Alkali-kiviainesreaktio

Alkali-kiviainesreaktio on betonin kiviaineksessa tapahtuva sementtikiven alkalisuudesta aiheutuva paisumisreaktio, joka voi rapauttaa betonia. Alkali-kiviainesreaktio on mahdollinen, jos kaikki seuraavista kolmesta edellytyksestä täyttyvät: sementin tulee sisältää runsaasti alkaleja, kiviaineksessa on heikosti alkalisuutta kestäviä mineraaleja sekä betonin kosteuspitoisuus on riittävän korkea. [20] Yleisin alkali-kiviainesreaktio on alkali-silikareaktio.

Suomessa olevat tiiviit syväkivilajit ovat pääsääntöisesti kemiallisesti hyvin kestäviä. Tästä johtuen alkali-kiviainesreaktio on Suomessa harvinainen ilmiö. Murskatun kiviaineksen käyttö saattaa kasvattaa alkali-kiviainesreaktion riskiä, koska kallioperän mahdolliset vaihtelut ovat homogenisoituneet irtomaalajeissa. [20]

Alkali-kiviainesreaktiosta kärsiville betonirakenteille on tyypillistä pinnan laikkaisuus ja epäsäännöllinen sekä tiheä verkkohalkeilu ja paisuminen. Halkeamissa voidaan havaita myös geelimäistä reaktiotuotetta. Alkali-kiviainesreaktion vauriot muistuttavat pakkasrasituksen ja ettringiitin aiheuttamia vaurioita, joten silmämääräisten havaintojen perusteella ei pääsääntöisesti pystytä sanomaan, mikä kyseisistä vaurioiden aiheuttajista on syyppää vaurioihin. [20;52]

Alkali-silikareaktio on aiheuttanut Kiinassa ongelmia kostean ilmaston alueilla. Esimerkiksi Quinhua Jin et. al. tekemässä tutkimuksessa [52] tarkasteltiin Shanghain 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 [52]. Myös Norjassa on havaittu merkittävässä määrin alkali-kiviainesreaktion vaurioittamia ratapölkkyjä. Norjassa on aloitettu runkoaineena käytettävän kiviaineksen testaus, jotta alkali-kiviainesreaktion aiheuttamilta vaurioilta vältyttäisiin [70].

### 3.4 Liikennekuormituksen aiheuttama halkeilu

Betoniratapölkyn suunnittelun tavoitteena tulee olla halkeilematon ratapölkky. Käytännössä ratapölkkyissä kuitenkin esiintyy halkeamia eri syistä johtuen. Halkeamat syntyvät, kun betonin vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden [10]. Ääritilanteissa rasitukset voivat kasvaa niin suuriksi, että ratapölkky murtuu.

Ratapölkkyjä mitoitettaessa on otettava huomioon pitkän aikavälin akselipaino- ja nopeustavoitteet [57]. Taulukossa 1 on esitetty RATO 11 mukaisesti Suomessa käytettäville ratapölkkyille sallitut akselipainot ja nopeudet.

Taulukko 1. Suomessa betoniratapölkkyille ja kiskoprofiileille sallitut suurimmat akselipainot ja nopeudet [57].

Suurin nopeus km/h	Suurin akselipaino (t)				
	B75 ja vanhem- mat	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

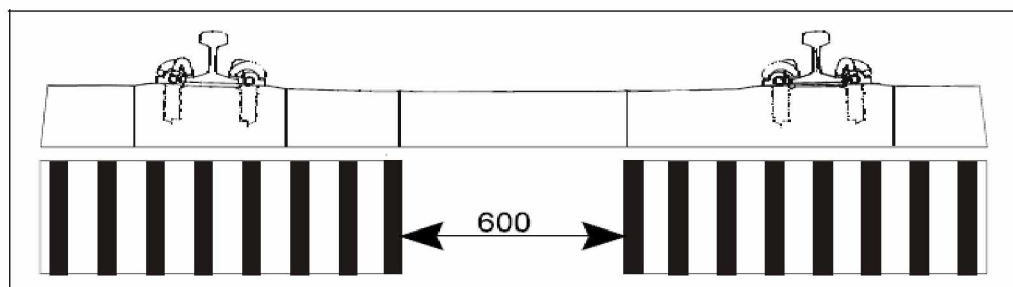
Betoniratapölkkyissä esiintyvät liikennekuormituksen aiheuttamat halkeamat ovat todennäköisimmin joko kiskon lepopinnan kohdalla ratapölkyn alapinnassa tai yläpinnassa ratapölkyn keskellä. Kiskon lepopinnan kohdalla alapinnassa olevat halkeamat johtuvat pääsääntöisesti suurista iskukuormista, jotka useimmiten aiheutuvat kisko- ja kalustuvioista [10;49]. Kyseiset halkeamat ovat yleisiä. Vaikka edellä mainitut halkeamat saattavat lyhentää ratapölkyn käyttöikää, eivät ne yleensä estä ratapölkkyjä täyttämästä niiden ensisijaisia tehtäviä. Näitä ovat mm. raidelevyden säilyttäminen ja ratapölkkyyn kohdistuvien kuormien välittäminen tukikerrokseen. 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 [10].

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 halkeilu riski pienenee. [10]

Ratapölkyn pituussuuntainen halkeaminen saattaa aiheutua kiskonkiinnityksen sopimattomuuden tai jänneterästen vääränlaisen sijainnin seurauksena. Kyseisessä punosten vääränlaisessa sijoittelussa punoksia on sijoitettu liikaa yhteen kerrokseen. [10]

### 3.4.1 Tukikerroksen ominaisuuksien heikkenemisen aiheuttamat vauriot

Tukikerroksen ominaisuuksilla on suuri merkitys ajateltaessa ratapölkkyyn kohdistuvia jännitystiloja. Ideaalitapauksessa ratapölkkyihin kohdistuva liikenteestä ja tuennasta aiheutuva kuormitus jakautuu reilun kolmasosan pituudelle ratapölkyn päihin (kuva 16) [57]. Tukikerroksen ominaisuuksien, kuten ratapölkyn päiden alla tapahtuvan tiivistymisen ja sepelin hienontumisen seurauksena kuormituksen jakautuminen muuttuu huomattavasti ideaalitapauksesta. Kuvassa 17 [64] on esitetty hypoteettisia pohjapaineen jakautumiskuvioita erilaisissa tukikerrosolosuhteissa.

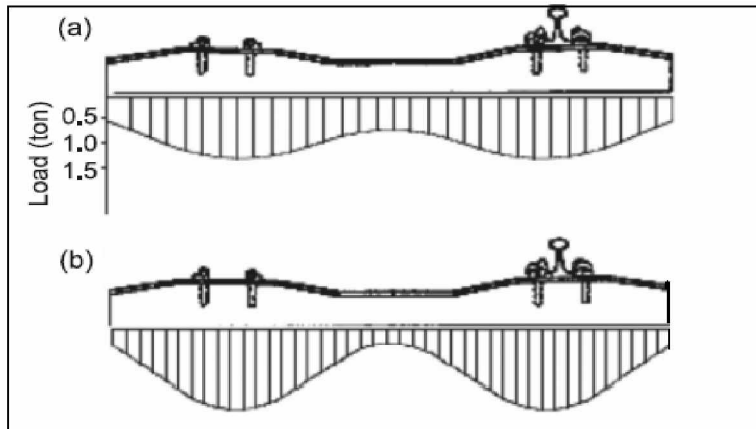


Kuva 16. Kuormituksen jakautuminen ratapölkkyllä [57].

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 17. Hypoteettisia pohjapaineen jakautumiskuvioita [64].

Sadeghin [65] tekemien kenttätutkimusten perusteella betoniratapölkyn pohjapaineen jakautuminen on lähellä paraboloidista käyrää (kuva 18). Kuten kuvasta voi huomata, juuri raiteen tukemisen jälkeen pohjapaine on keskittynyt kiskon lepoppinnan alapuoliselle osuudelle (kuva 18 b). Kuormituksen aikaansaaman tiivistymisen seurauksena pohjapaine siirtyy enenevässä määrin pölkyn keskelle (kuva 18 a), toisin sanoen ratapölkky alkaa kantaa yhä enemmän keskeltä [65]. Tästä saattaa olla seurauksena halkeamien synty yläpintaan ratapölkyn keskelle.

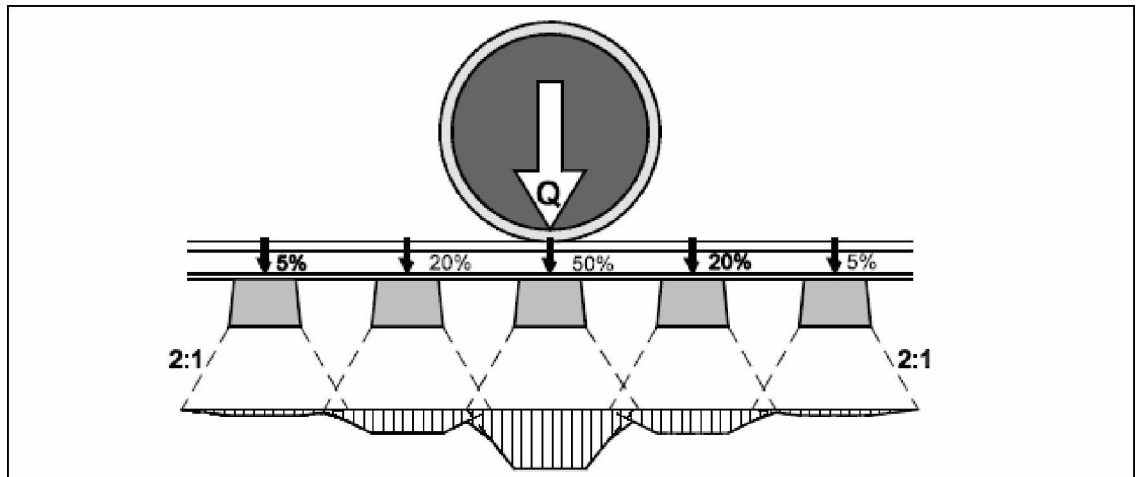


Kuva 18. Kenttätutkimusten perusteella saatu pohjapaineen jakautuminen ratapölkyn alla: (a) ennen tiivistämistä, (b) tukemisen jälkeen [65].

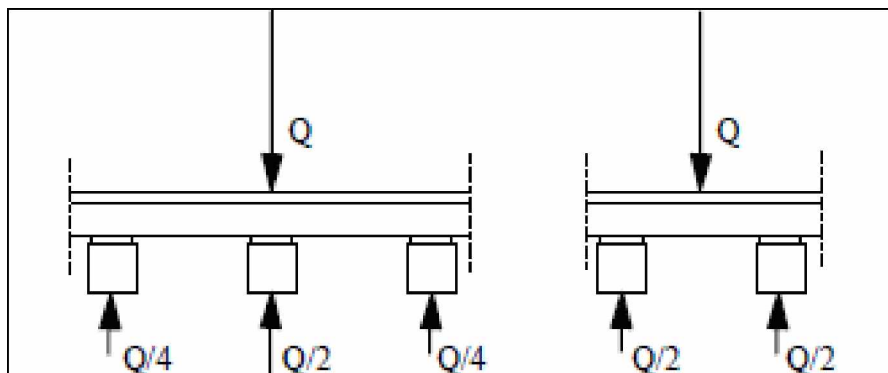
Nurmikolon [43;44] tekemien syklisten kuormituskokeiden perusteella esitetystä ajatusmallissa tasalaatuisessa pengerrakenteessa ratapölkyn sepeliin kohdistama kuormitus siirtyy enenevässä määrin pölkyn keskelle. Tilanne voi edetä enintään siihen, että ratapölkyn alapinnan tuenta on jakautunut tasaisesti koko pölkyn alalle. Pölkyn päiden pienempi tuenta verrattuna keskiosaan edellyttäisi, että ratapölkyn päissä oleva rakennekerros olisi jäykkydeltään heikompi. Tällainen jäykkyysero voidaan ajatella toteutuvan ratapenkereen rajallisen leveysulottuvuuden johdosta. Jäykkyyseroa voi aiheuttaa myös tukemiskoneen sekä dynaamisten kuormien aiheuttama sepelin hienontuminen pölkyn päissä.

Ajateltaessa ratapölkkyyn kohdistuvia rasituksia olennaista on pohjapaineen jakautuminen yksittäisellä ratapölkkyllä. Yhtä olennaista on kuitenkin tietää myös liikennekuormien jakautuminen peräkkäisten ratapölkkyjen kesken. Kuvassa 19 on esitetty pystysuorien kuormien jakautuminen pölkkyistä tukikerrokseen RATO 11 mukaisesti ja kuvassa 20 Ruotsissa käytettävän Banverketin ohjeistuksen mukaisesti.



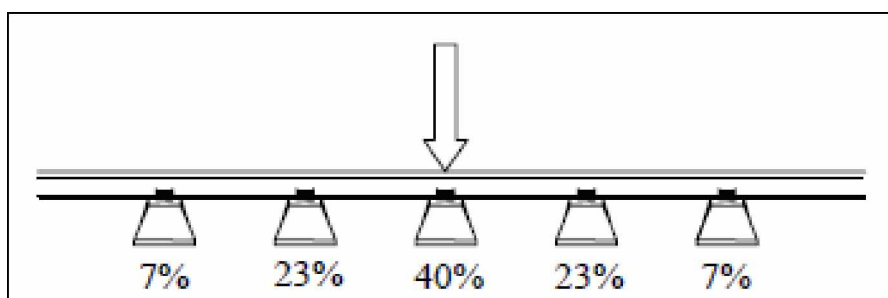


Kuva 19. Pystysuorien kuormien jakautuminen pölkystä tukikerrokseen.[57]



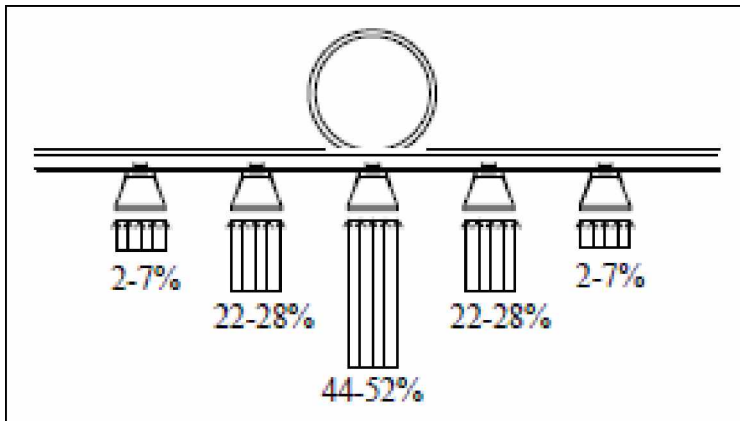
Kuva 20. Pyöräkuormien jakautuminen ratapölkkyille.[73]

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty poikkeavia pystykuormien jakautumisia eri ratapölkkyjen kesken. Esimerkiksi mittausten ja mallintamalla saatujen tulosten perusteella yhdelle ratapölkylle kohdistuva maksimikuorma on 40 % akselikuormasta (kuva 21) [51].



Kuva 21. Pyöräkuormien jakautuminen ratapölkkyille. [51]

Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa [22] havaittiin pyöräkuormien suuruuden vaikuttavan kuormien jakautumiseen viereisten ratapölkkyjen kesken. Tutkimuksessa arvioitiin akselikuormien kasvun johtavan kuormien keskittymiseen juuri kuorman alapuolella olevaan ratapölkkyyn (kuva 22). Esimerkiksi 30-tonnin akselikuorman alla jopa 60 % kuormituksesta kohdistuu yksittäiseen ratapölkkyyn, jolloin ratapölkkyyn voi kohdistua suuria rasituksia.



Kuva 22. Pyöräkuormien jakautuminen ratapölkyille. [22]

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 ja varsinkin iskukuormien aiheuttamat rasitukset kasvavat ratapenkereen liian suuren jäykkyyden myötä [27].

Erityisen kriittisiä osuuksia radassa ovat kohdat, joissa ratapenkereen jäykkyys muuttuu nopeasti. Radan pituussuunnassa esiintyvät ratapenkereen jäykkyysmuutokset luovat edellytykset dynaamisten kuormien synnylle [34]. Betoniratapölkky on erityisen herkkä taajuudeltaan 25–300 Hz oleville dynaamisen kuormituksen aiheuttamalle värähtelylle [9]. Ratapenkereen pituussuuntaisia jäykkyysmuutoksia esiintyy tavallisimmin tunnelien ja kallioleikkausten päädyissä, tasoristeyksissä, silloilla tai muissa samankaltaisissa paikoissa. Jäykkyysmuutoksen luoma edellytys dynaamisen kuormituksen synnylle syntyy siitä, että pehmeämpi ratapenger joustaa junan painon alla jäykkää ratapengertä enemmän. Tämän seurauksena jäykkyysmuutosalueelle kehitty korkeusero, jonka ylityksen seurauksena junan aiheuttama dynaaminen kuormitus syntyy. Ratapenkereen jäykkyysmuutoksen yhteydessä raiteeseen voi myös ajan kuluessa syntyä epätasaisuuskohta johtuen esimerkiksi erilaisten ratapengerrakenteiden erilaisesta painumakäyttäytymisestä [34].

Ratapenkereen jäykkyys vaikuttaa yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvan kuormituksen suuruuteen ja ratapölkyn alla olevan raideseppelin kuormitukseen. Raideseppelin kuormitukset määräytyvät suurelta osin raideseppelin ja ratapölkyn välisen kontaktipinta-alan mukaan. Kontaktipinta-alan kasvattamiseksi on kehitelty erilaisia rakenneratkaisuja, joita ovat mm. ratapölkyn pohjaimet (under sleeper pad, USP), joiden elastisempi rakenne mukautuu betonia paremmin raideseppelin epätasaiseen pintaan [9]. Pohjaimet ovat ratapölkyn pohjaan kiinnitettäviä elastisia mattoja, jotka edellä mainitun lisäksi vaimentavat suuria dynaamisia kuormia ja värähtelyä. Elastisuuden ansiosta akselikuormat jakautuvat pidemmälle alueelle radassa, mikä suojaa tukikerrosta ja alusrakennetta. Tämä vähentää kunnossapitotarvetta ja pidentää radan käyttöikä. [38]

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

ja niiden aiheuttama värähtely ja epätasainen kuormitus, joka saattaa johtaa tukikerroksen ominaisuuksien heikkenemiseen, kuten tukikerroksen epätasaiseen tiivistymiseen, sepelin kulkeutumiseen pois ratapölkyn alta sekä sepelin hienontumiseen. Kyseiset asiat vaikuttavat pysyvien muodonmuutosten syntymiseen tukikerroksessa. Yksittäisen junan aiheuttamat muodonmuutokset ovat äärimmäisen pieniä, mutta tuhansien ylityskertojen aikaansaamat muodonmuutokset ovat jo merkittäviä. Tämä voi aiheuttaa tyhjän tilan muodostumisen ratapölkyn alle. [28;36] Joissain tilanteissa tämä voi johtaa yksittäisten ratapölkkyjen ja tukikerroksen kontaktin häviämiseen kokonaan, jolloin ratapölkky jää tukemattomana kiskojaan varaan. Augustin et al. [2] 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 kuormituslisänsä edessä kuin myös jäljessä olevaan ratapölkkyyn. Kuormituslisä sisältää niin junasta johtuvan staattisen lisän, kuin myös radan jäykkyyden muutoksesta johtuvan dynaamisen lisän. 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 joutuu muuttamaan nopeasti suuntaansa ja samalla aiheutuu kuormituslisänsä ratapölkkyyn. Kyseisessä tilanteessa tukikerrokseen tukeutumattoman ratapölkyn jälkeiseen ratapölkkyyn kiskon lepopinnan kohdalle muodostuvat jännitykset kasvavat merkittävästi [28;36;84]. Betoniratapölkyn kannalta kriittisin tilanne on, kun yksittäistä tuettua ratapölkkyä ympäröi molemmin puolin tukikerrokseen tukeutumattomat ratapölkkyt [36].

Lundqvistin & Dahlbergin [36] tekemän mallinnuksen mukaan tukematon ratapölkky, joka on tukemattomana 1 mm etäisyydellä raideseppelin pinnasta, aiheuttaa raiteeseen jäykkyydenmuutoksen, jonka seurauksena tukemattoman ratapölkyn jälkeisen ratapölkyn ja raideseppelin välinen kontaktivoima kasvaa 50 kN:sta 84 kN:iin ja ratapölkyn siirtymä kasvaa noin 40 % nopeuden ollessa 90 m/s. Lisäksi kyseiseen ratapölkkyyn kiskon alapuolelle muodostuva jännitys kaksinkertaistuu verrattuna normaaliin tilanteeseen. Ratapölkyn ja raideseppelin kontaktivoimat ovat 60 m/s ja 30 m/s nopeuksilla vastaavasti 73 kN ja 67 kN:ia. Näin ollen nopeuden kasvulla on suuri merkitys tukemattoman ratapölkyn jälkeiseen ratapölkyn ja tukikerroksen kontaktivoiman suuruuteen. Tästä johtuen myös ratapölkyn painuma sekä pölkyn syntyvät jännitykset kasvavat. Ratapölkky, joka on tukemattomana 0,5 mm etäisyydellä tukikerroksesta, aiheuttaa kuormituksen yhteydessä kaikilla edellä mainituilla nopeuksilla lähes samansuuruinen eli noin 65 kN kuormituksen viereisen ratapölkyn ja raideseppelin välille. [36]

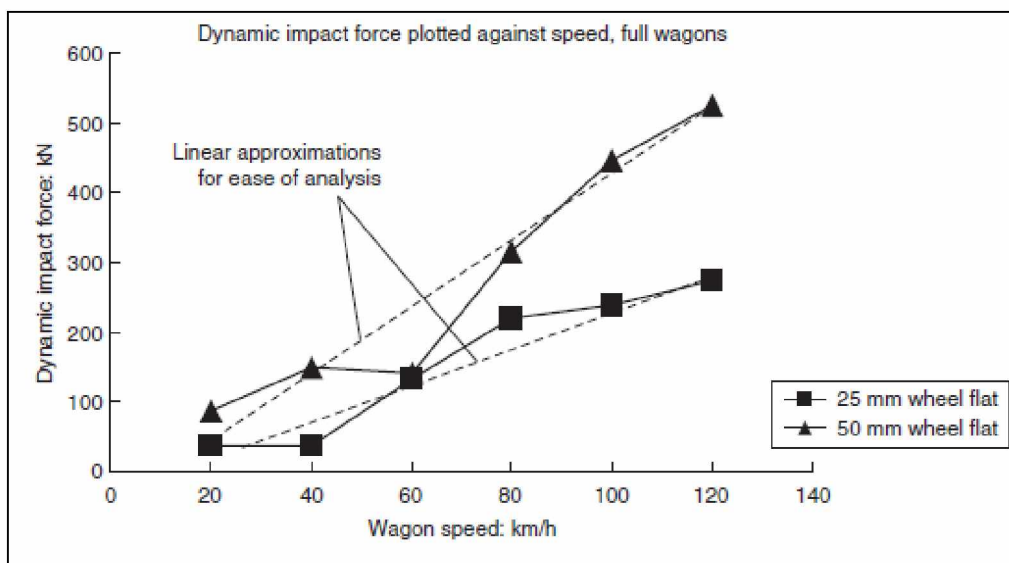
Tukemattomassa ratapölkkyssä kuormituksen aikana esiintyvät jännitykset ovat melko vähäisiä. Tukematon ratapölkky alkaa kuitenkin värähdellä pyöräkerran ylitettyä sen. Lundqvistin & Dahlbergin [36] tekemän mallinnuksen mukaan nopeuden ollessa 90 m/s värähtelyn aiheuttama jännitysamplitudi on suurempi kuin viereisiin ratapölkkyihin muodostuva jännitysamplitudi. Pyöräkerran aiheuttama värähtely voikin aiheuttaa väsymislujuuden pienenemistä ja näin ollen betoniratapölkyn väsymisestä johtuvia halkeamia voi esiintyä. [36;45]

### 3.4.2 Liikkuvan kaluston ja kiskon vikojen aiheuttamat vauriot

Suurimmat dynaamiset iskukuormat johtuvat kalustossa ja kiskoissa olevista vioista. Vioista johtuvat dynaamiset kuormat ovat luonteeltaan lyhytkestoisia, mutta pahim-

millaan erittäin suuria. Esimerkiksi tyypillinen lovipyörän aiheuttama kuorma on kestoltaan 1–10 ms, mutta suuruudeltaan jopa kuusinkertainen suhteessa staattiseen kuormaan [9;60;62]. 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 [32;33].

Yleisesti ottaen iskukuormissa noin 70 % pyörä-kisko kontaktista syntyvistä voimista kohdistuu kiskon lepopinnalle [35;62]. Junan nopeus vaikuttaa erittäin merkittävästi dynaamisten iskukuormien suuruuteen. Nopeuden kasvaessa esimerkiksi lovipyörän aiheuttama kuormitus kasvaa merkittävästi (kuva 23) [35].



Kuva 23. Nopeuden vaikutus lovipyörän aiheuttamaan iskukuormaan [35].

Betoni käyttäytyy eri tavalla iskukuormien kuin staattisten kuormien alaisuudessa. Yleisesti ottaen betoni lujuus ja jäykkyys ovat suurempia, kun iskukuormien suuruus kasvaa. Lujuuden ja jäykkyyden kasvu johtuu iskukuormien aiheuttamien halkeamien taipumuksesta edetä suoraan runkoainerakeiden läpi, kun taas staattisen kuormituksen alaisena halkeamat pyrkivät kiertämään runkoainerakeita. [60]

Wollongongin yliopistossa Australiassa on suoritettu laajamittaisia tutkimuksia betoniratapölkkyyn kohdistuvien iskukuormien tiimoilta. Taulukosta 2 voidaan havaita, että kuormituskokeissa saatujen tulosten perusteella ensimmäiseen halkeamaan vaadittu taivutusmomentti on iskukuormilla noin 23 % suurempi verrattuna staattisiin kuormiin. Vastaavasti murtoon vaadittava taivutusmomentti on iskukuormilla noin 12 % suurempi staattisiin kuormiin nähden.

Taulukko 2. Australiassa Wollongongin yliopistossa tehtyjen staattisten ja dynaamisten kuormituskokeiden tuloksia [60].

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

## 3.5 Muut

### 3.5.1 Valmistuksen aikaiset vauriot

Oikealla ja huolellisella valmistustekniikalla on merkitystä ratapölkyn pitkäaikaiskestävyyteen ja vaurioihin. Huolellinen ja riittävä 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. [23;24;25]

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. [25;58]

Suomessa käytettävissä Vossloh 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 kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla. Raideruuviholkin pidikkeen katkeaminen on kuitenkin harvinaista. [25;58]

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. [25]

### 3.5.2 Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset vauriot

Betoniratapölkkyjen varmaton 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 [58]. Myös kaivinkoneella ratapölkkyjä vaihdettaessa käytettävä kahmarikauha saattaa aiheuttaa betonikappaleiden lohkeamisia.

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.

Tukikerroksen paksuuden tulisi olla vaadittu 550 mm. Suomessa on ilmennyt yksittäistapauksia, joissa ratapölkkyissä esiintyvien halkeamien aiheuttajaksi on arveltu vajavaista tukikerroksen paksuutta. Vaadittua ohuempi tukikerros ei pysty vastaanottamaan toistuvia dynaamisia kuormia, vaan ratapölkkyjen päiden alla oleva sepeli alkaa jauhaantua. Sepelin jauhaantuminen aiheuttaa tuennan keskittymisen pölkyn keskelle ja halkeamilla on edellytykset syntyä. [75]

### 3.5.3 Kiskon lepopinnan kulumisvauriot

Suurten akselipainojen rautateillä Pohjois-Amerikassa on havaittu vaurioita betoniratapölkkyissä kiskon alapuolella (kuva 24). Eri toimijoille suunnatussa kyselytutkimuksessa kyseinen kiskon kiinnityskohdan kuluminen/vaurioituminen (rail seat deterioration = RSD) on arvioitu kriittisimmäksi vauriotyypiksi [81]. 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 raidelevyden oikeana säilymiseen. Lisäksi ongelman huomaaminen sen alkuvaiheessa on erittäin hankalaa ja korjaaminen kallista. Äärimmäisissä olosuhteissa betoniratapölkky voi vaurioitua kiskon alapuolelta jo 1-2 vuodessa [82].



Kuva 24. Ratapölkyn kuluminen. Kiskon kiinnityskohta on kulunut enemmän toiselta laidalta, koska ratapölkky on sijainnut kaarteessa [82].

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 läsnä, jotta kulumista tapahtuisi. Liikennöintimäärät ja nopeudet, kaarresäteet sekä radan kaltevuus vaikuttavat lähinnä kulumisen ja vaurioiden suuruuteen. [81;82]

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 kuormitusyhtäysten alaisena. Tämä kiihdyttää entisestään betoniratapölkyn kulumista ja sitä kautta vaurioitumista kiskon alapuolelta. [81;82]

Yhdysvalloissa tehtyjen tutkimusten perusteella betoniratapölkyn vaurioituminen kiskon alapuolelta on pääsääntöisesti usean vaurionaiheuttajan summa. Yhtenä tärkeimmistä 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 (kuva 25). Kosteudella on suuri merkitys tähän, sillä kovettu-  
nut betoni kestää kosteana heikommin mekaanista kulutusta [82].



*Kuva 25. Sementtipasta on kulunut pois jättäen jäljelle kovemman runkoaineen [82].*

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. [3;81;82]

## 4 Laboratoriokokeet ja testatut betoniratapölkkyt

### 4.1 Yleiskuvaus

Kuormituskokeita tehtiin käyttämättömille ja eri syistä käytöstä poistetuille ratapölkkyille. Kokeet tehtiin standardin SFS-EN 13230-2 [68] mukaisesti. Kokeiksi valittiin staattiset kuormituskokeet ratapölkyn päälle ja keskiosalle sekä dynaaminen kuormituskoe ratapölkyn päälle. Lisäksi standardista poiketen tehtiin dynaamisia kuormituskokeita ratapölkyn keskiosalle. Standardin asettamien vaatimusten lisäksi kuormituskokeiden aikana mitattiin ratapölkyn pystysiirtymiä ja betonin venymiä.

Kuormituskokeiden tarkoituksena oli vertailla käyttämättömien ja käytöstä poistettujen ratapölkkyjen eroja. Lisäksi tehtyjen kuormituskokeiden tuloksista saatiin vertailutietoa aiemmin Suomessa tehtyjen Liikenneviraston betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen [54] mukaisiin kuormituskokeisiin.

Kuormituskokeiden lisäksi tehtiin pakkassuolakokeita standardin SFS 5449 [67] mukaisesti. Pakkassuolakokeilla tutkittiin betonin pakkasenkestävyyttä, minkä avulla pystyttiin arvioimaan ratapölkkyjen pitkäaikaiskestävyyttä rapautumisen osalta.

### 4.2 Koeohjelma

Staattisia kuormituskokeita tehtiin 28 kappaletta ja dynaamisia kuormituskokeita kahdeksan kappaletta. Kuormituskokeita tehtiin käyttämättömille ja käytöstä poistetuille ratapölkkyille taulukon 3 mukaisesti.

*Taulukko 3. Tehdyt kuormituskokeet.*

Kuormituskoe	Käyttämätön	Käytöstä poistettu
Staattinen ratapölkyn pää	4	10
Staattinen ratapölkyn keskiosa	4	10
Dynaaminen ratapölkyn pää	2	2
Dynaaminen ratapölkyn keskiosa	2	2

Pakkassuolakokeita tehtiin 42 näytteelle, jotka oli otettu kuormitetuista ratapölkkyistä.

### 4.3 Kuormituslaitteisto

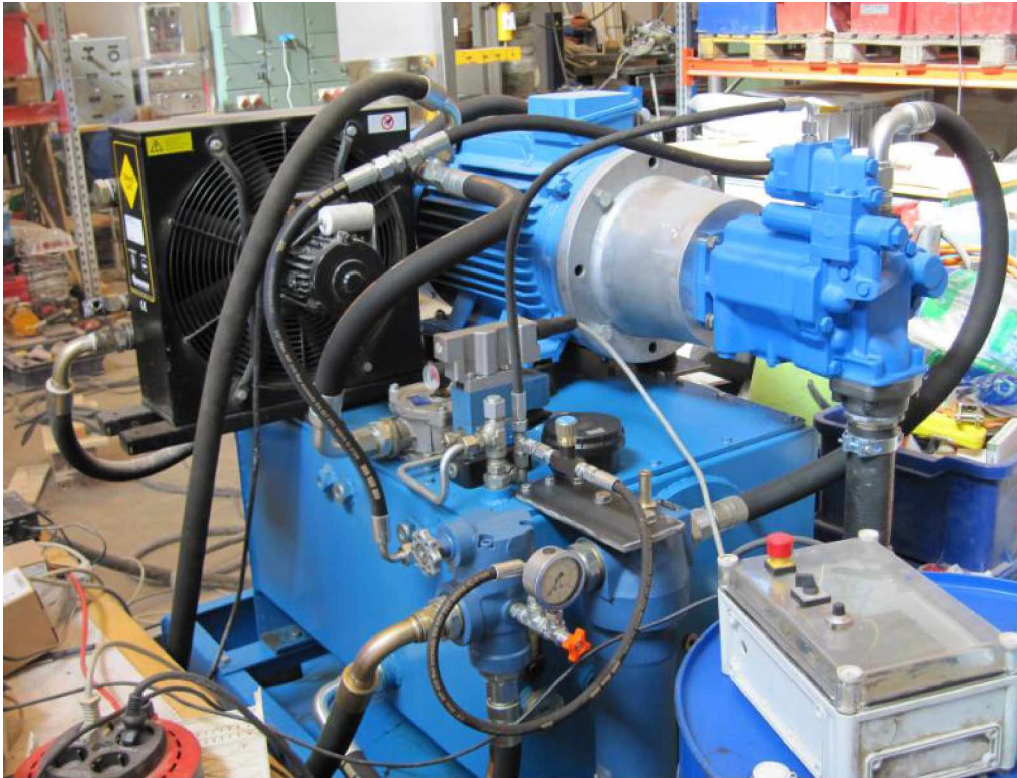
Kuormituskokeita varten rakennettiin laboratorioon kuormituskehä (kuva 26), jolla pystyttiin tekemään niin ratapölkyn pään kuin keskiosankin kuormituskokeet. Ratapölkkyyn kohdistettua voimaa mitattiin hydraulisyylinterit yhdistävän teräslevyn alle asennetulla voima-anturilla tai yhtä hydraulisyylinteriä käytettäessä sylinterin varren päähän asennetulla voima-anturilla.





*Kuva 26. Kokeita varten rakennettu kuormituskehä.*

Standardissa SFS-EN 13230-2 olevaa dynaamista kuormituskoetta varten jouduttiin kokoamaan uusi hydraulikoneikko (kuva 27). Syynä tähän oli kokeessa muodostuvat suuret pystysuuntaiset siirtymät yhdistettynä suuriin voimiin. Pystysiirtymät asettivat suuret vaatimukset koneikon öljyntuotolle. Käytetty hydraulipumppu on aksiaalimäntäpumppu, jonka malli on EATON Vickers PVH98QIC. Pumpun voimanlähteenä toimi 22 kW sähkömoottori. Kyseisellä moottorilla varustettuna pumpun öljyntuotto oli noin 150 l/min ja se kykeni tuottamaan lähes 160 barin paineen.



Kuva 27. Kuormituskokeissa käytetty hydraulikoneikko.

Kuormituskehässä oli ratapölkyn pään kuormituskokeita varten kolme sisähalkaisijaltaan 160 mm ja iskupituudeltaan 600 mm hydraulisynteriä. Syntierien varret oli kiinnitetty 80 mm paksuiseen teräslevyyn, johon varret olivat upotettu 50 mm. Syntieristä pystyttiin saamaan 160 barin paineella noin 960 kN voima.

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa käytettiin kuormituskehässä olevan ylälevyn keskelle kiinnitettyjä sisähalkaisijaltaan 80 mm ja 125 mm ja iskupituudeltaan 600 mm olevia hydraulisynterejä. Kuvassa 28 on esitetty ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen muokattu kuormituskehä. Sisähalkaisijaltaan 80 mm hydraulisynterillä saavutettiin noin 75 kN voima ja 125 mm hydraulisynterillä 180 kN voima.



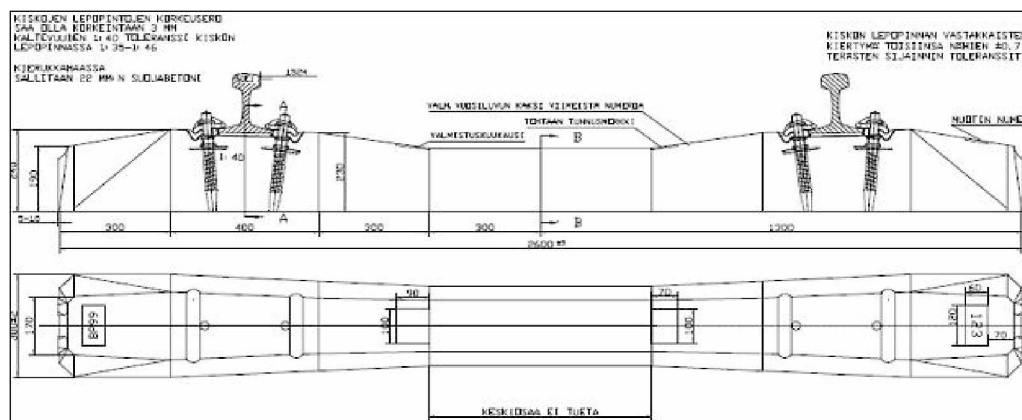
Kuva 28. Ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen muokattu kuormituskehä.

Kuormituslaitteiston ohjaamiseen ja mittausdatan talteen ottamiseen käytettiin DasyLab nimistä tietokoneohjelmistoa. DasyLab-ohjelmistoon pystyttiin ohjelmoimaan staattisissa ja dynaamisissa kuormituskokeissa käytetyt kuormituskäyrät.

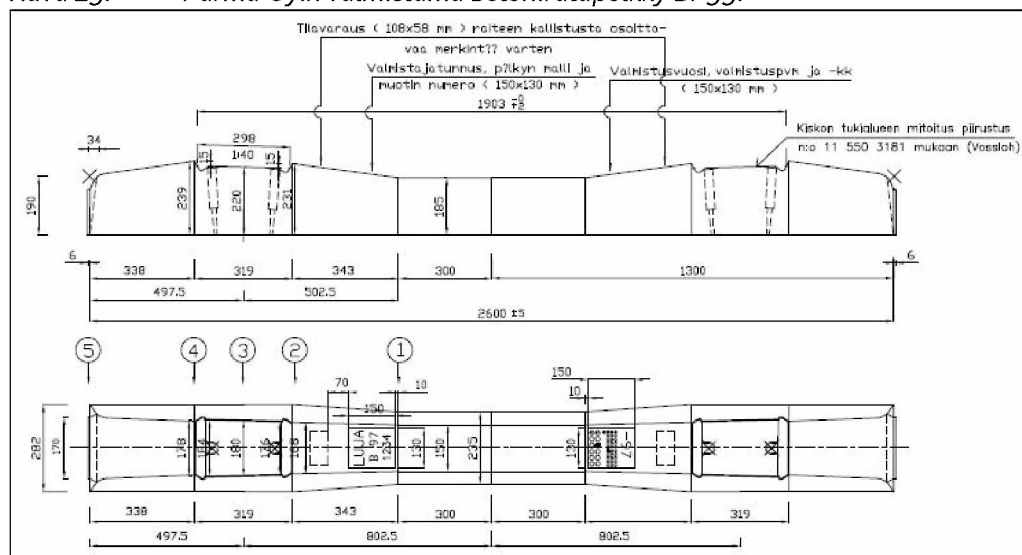
## 4.4 Testatut ratapölkkyt

### 4.4.1 Käyttämättömät ratapölkkyt

Kuormituskokeita ja pakkassuolakokeita tehtiin kahdelle käyttämättömälle ratapölkkykymallille. Ratapölkkykymalleja edustivat Parma Oy:n BP99 (kuva 29) sekä Lujabetoni Oy:n B97 (kuva 30). Parma Oy:n pölkkyt oli valettu 30.11.2009 ja Lujabetoni Oy:n pölkkyt 13.3.2009.



Kuva 29. Parma Oy:n valmistama betoniratapölkky BP99.



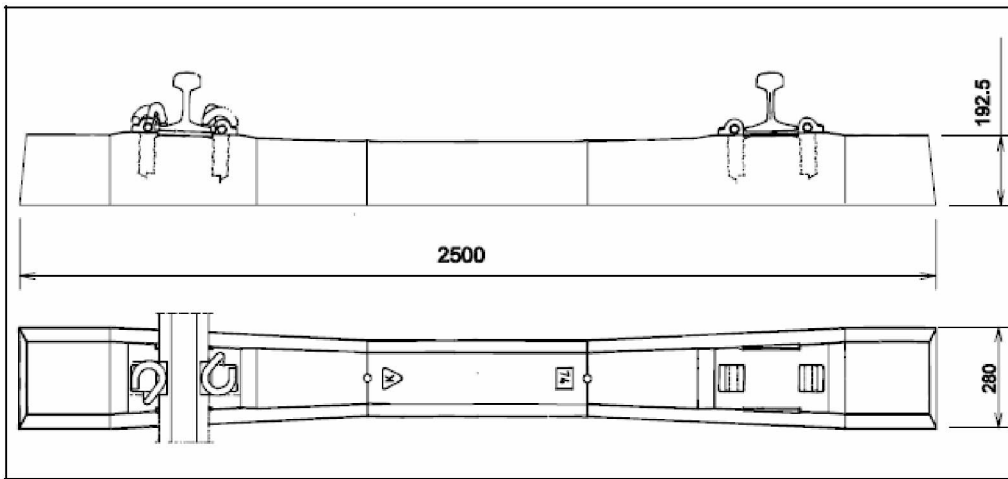
Kuva 30. Lujabetoni Oy:n valmistama betoniratapölkky B97.

### 4.4.2 Käytetyt ratapölkkyt

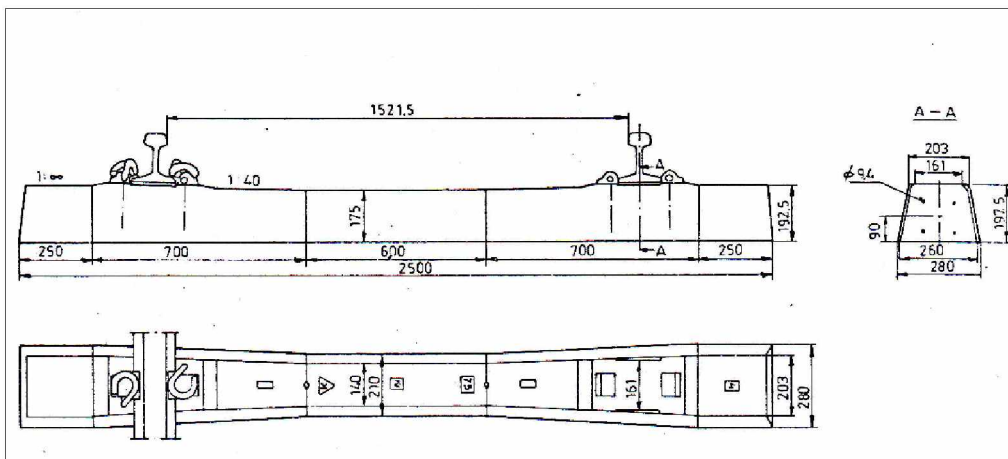
Käytöstä poistetut betoniratapölkkyt valikoitiin Kajaanissa sijaitsevalta varastoalueelta, johon niitä oli toimitettu eri puolilta Suomea. Toimitetut ratapölkkyt sisälsivät sekä vaurioituneita että vaurioitumattomia yksilöitä. Osa ratapölkkyistä oli poistettu käytöstä uusien kiskoprofilien asennuksen vuoksi, kun uudet kiskot eivät soveltuneet jalan mittojen vuoksi radassa olleisiin ratapölkkyihin.

Testattavaksi toimitettuja ratapölkkyjä oli kolmea eri tyyppiä, jotka olivat B63, B75 ja BV75. B63- ja B75-ratapölkkyt ( kuvat 31–32) ovat ulkomitoiltaan muuten identtisiä, mutta B75-ratapölkkyt ovat hieman korkeampia kiskon lepopinnan kohdalta. B63- ja B75-ratapölkkyjen valmistuksessa on käytetty jälkijännitystekniikkaa. Jänneteräksinä oli käytetty halkaisijaltaan 9,4 mm terästankoja. BV75 on valmistettu esijännitystekniikkaa hyväksikäyttäen. Kyseisessä ratapölkkyssä on 12 kappaletta seitsemänlankaisista jänneteräspunosta, jotka olivat halkaisijaltaan 6,4 mm (kuva 33).

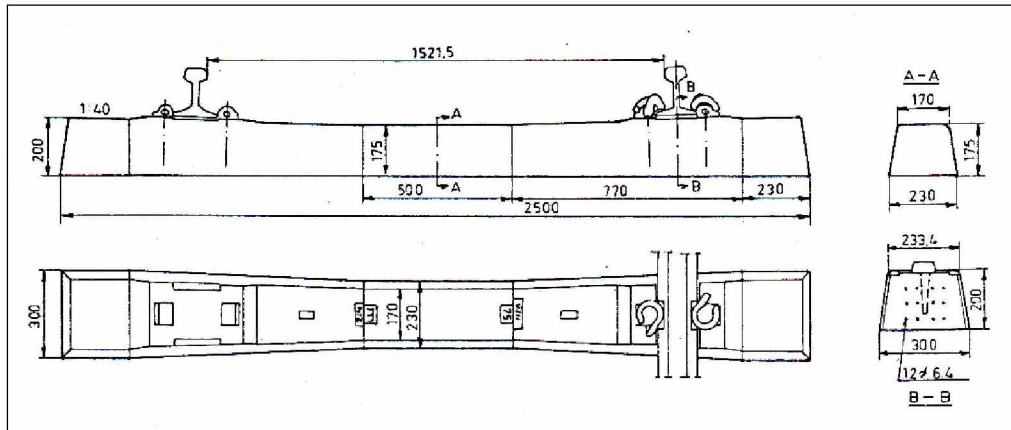
Kaikki toimitetut käytetyt ratapölkkyt olivat 1970-luvulla valmistettuja ja Pandrol eclip-kiinnitysjärjestelmällä varustettuja. B63-ratapölkkyt olivat silmämääräisesti arvioiden selkeästi huonokuntoisimpia sisältäen runsaasti pituussuuntaisia halkeamia ja osasta pölkkyistä oli katkennut noin 100 mm kappale aktiivipäästä. B75 ja BV75 mallin pölkkyt olivat yksittäisiä pienehköjä halkeamia ja betonin lohkeamia lukuun ottamatta silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia.



Kuva 31. Betoniratapölkky B63 [57]



Kuva 32. Betoniratapölkky B75 [15]



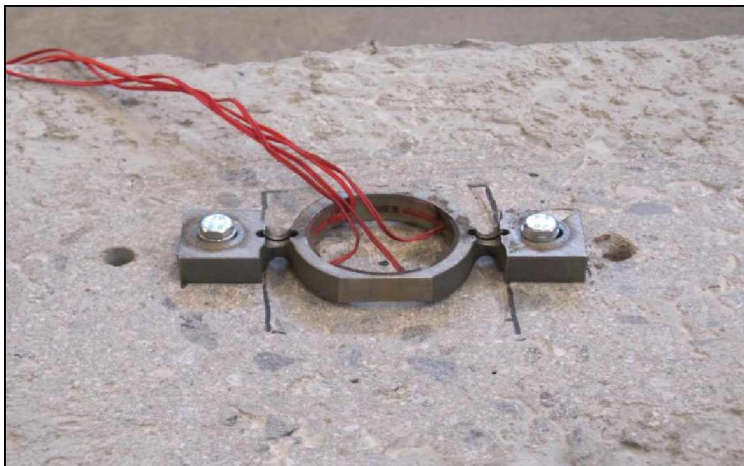
Kuva 33. Betoniratapölkky BV75 [15]

## 4.5 Mittalaitteet kuormituskokeissa

### 4.5.1 Venymäliuskoihin perustuvat mittalaitteet

Kuormituskokeissa betonin venymien mittaamiseen käytettiin TTY:llä kehitettyä silmukkamallista venymäanturia. Anturi koostuu kuvan 34 mukaisesta teräksisestä silmukasta, johon on liimattu neljä venymäliuskaa. Anturi mittaa venymän 100 mm matkalta.

Anturi kiinnitettiin ratapölkkyyn pulteilla, millä vältettiin perinteisissä venymäliuskoissa esiintyvä mahdollisuus venymäliuskan irtoamiseen kuormituksen aikana. Liuskojen irtoaminen on merkittävä ongelma eritoten käytöstä poistettujen betonikappaleiden testauksessa. Perinteisiin venymäliuskoihin verrattuna silmukkamallisen anturin etuna on lisäksi sen kyky jatkaa mittaamista halkeaman synnystä huolimatta.

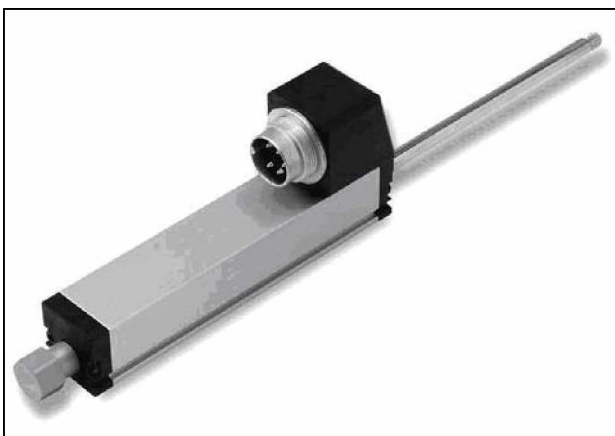


Kuva 34. Kuormituskokeissa betonin venymien mittaamiseen käytetty silmukkamallinen venymäanturi.

Ensimmäinen käytetyistä venymäsilmuista oli valmiiksi kalibroitu ja sen kalibrointikerroin oli  $0,0809 \mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$ . Toinen käytetyistä venymäsilmuista kalibroitiin TTY:n laboratoriossa ja sen kalibrointikerroin oli  $0,0879 \mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$ .

#### 4.5.2 Siirtymäantureihin perustuvat mittalaitteet

Tutkimuksissa käytettiin siirtymäantureita, jotka ovat tyypiltään potentiometrejä. Anturit olivat malliltaan Novotechnik TRS 50 (kuva 35) ja niitä käytettiin pystysuuntaisten siirtymien mittaamiseen. Antureissa on 50 mm liikevara. Käytetyt anturit sopivat hyvin kohteisiin, joissa ne joutuvat värinän vaikutuksen alaisiksi ja kohteisiin, joissa tarvitaan pitkää elinikää. Valmistaja lupaa anturin kestävän  $100 \cdot 10^6$  edestakaista liikettä. Kyseisen anturityypin toimintalämpötila on  $-30 \dots +100$  °C ja antureiden tarkkuus on parempi kuin 0,01 mm [40].



Kuva 35. Käytetty siirtymäanturityyppi Novotechnik TRS 50 [40].

Siirtymäanturit kalibroitiin TTY:n koehallissa. Siirtymäantureiden kalibroinnin tuloksena saatiin kerroin [mm/V]. Kerroin ilmoittaa, kuinka suuri siirtymätila anturilla on mitattavan jännitteen muuttuessa yhden voltin kokeessa käytettävällä syöttöjännitteellä. Kertoimeksi  $K_s$  saatiin 51,894. Kyseisessä kertoimessa on jo huomioitu mittauksessa käytetyn vahvistimen oma syöttöjännite, joka oli 5,248 V.

#### 4.5.3 Voima-anturit

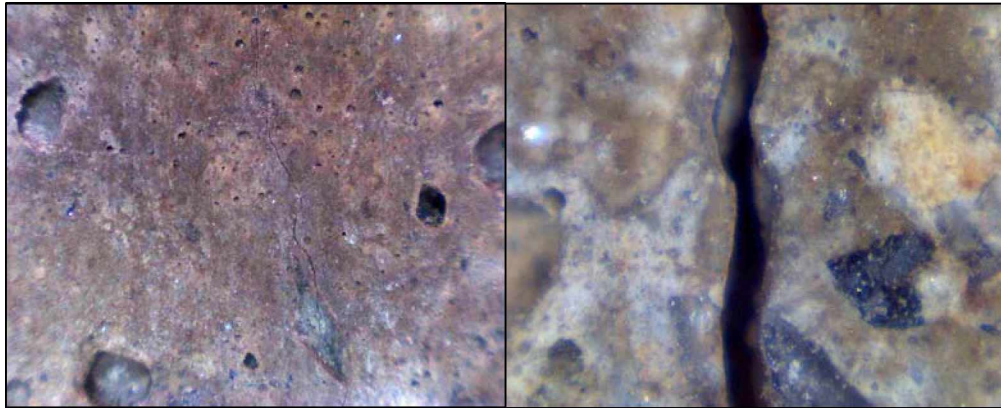
Kuormien mittaukseen käytettiin TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön voimaantureita 4552005 ja 105-455. Voima-anturit ovat tarkoitettu suurten voimien mittaamiseen, niin laboratorioissa kuin maastossakin.

Voima-anturi 105-455 kalibroitiin TTY:n koehallissa. Tieto kerättiin talteen kuormituskokeissa käytetyllä dataloggerilla, jonka malli oli IOTech Personal Daq 3000. Mittausta ohjasi mittausohjelmisto DasyLab, jota käytettiin myös kuormituskokeissa sekä ohjaus- että datan tallioimisohjelmistona. Voima-anturista saatava signaali on mikrovolttien suuruusluokkaa ja se vahvistetaan vahvistimen avulla volttiluokan signaaliksi. Tällöin kalibrointikertoimeksi saadaan kN/ $\mu$ V/V. Voima-anturin kalibrointikertoimeksi saatiin 833292 kN/ $\mu$ V/V. Kertoimen oikeellisuus varmistettiin kuormittamalla anturi toistamiseen kalibrointiin käytetyllä kuormituslaitteistolla.

Voima-anturi 4552005 oli hiljattain kalibroitu ja sen kerroin oli 228919 kN/ $\mu$ V/V. Kertoimen oikeellisuus kuitenkin varmistettiin koekuormittamalla voima-anturi.

#### 4.5.4 Halkeamien mittaus

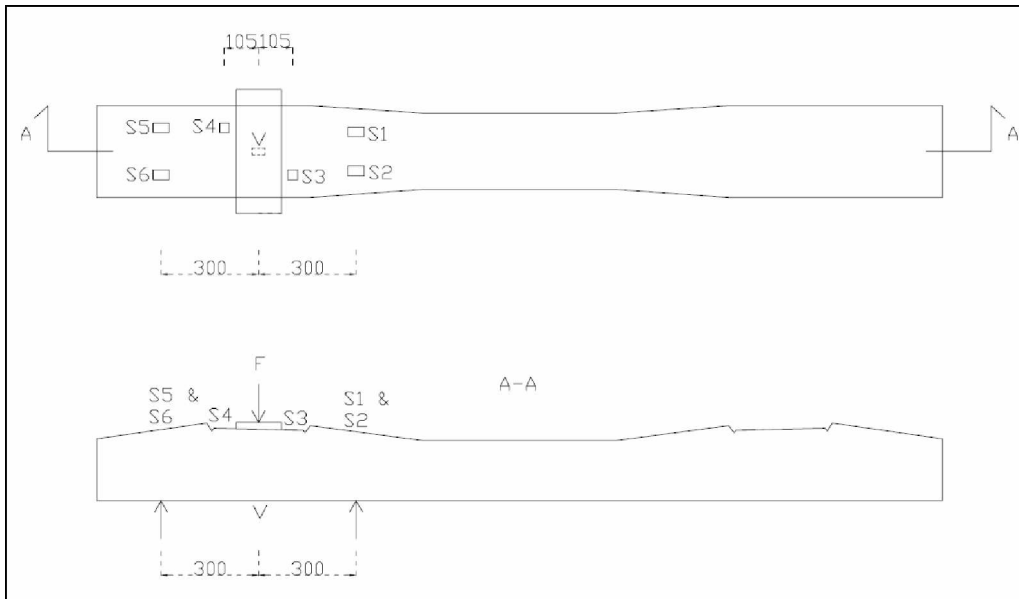
Halkeamien etsimiseen ja mittaukseen käytettiin tietokoneeseen kytkettävää digitaalista mikroskooppia. Mikroskoopilla pystyttiin ottamaan 2 mega-pikselin valokuvia, jotka voidaan siirtää AutoCad-ohjelmaan. AutoCad-ohjelmassa olevien vertailukuvien avulla pystyttiin määrittämään halkeaman leveys. Kuvassa 36 on esitetty tyypilliset 50- ja 200-kertaisella suurennoksella otetut kuvat. Mikroskoopilla päästiin 0,01 mm tarkkuuteen.



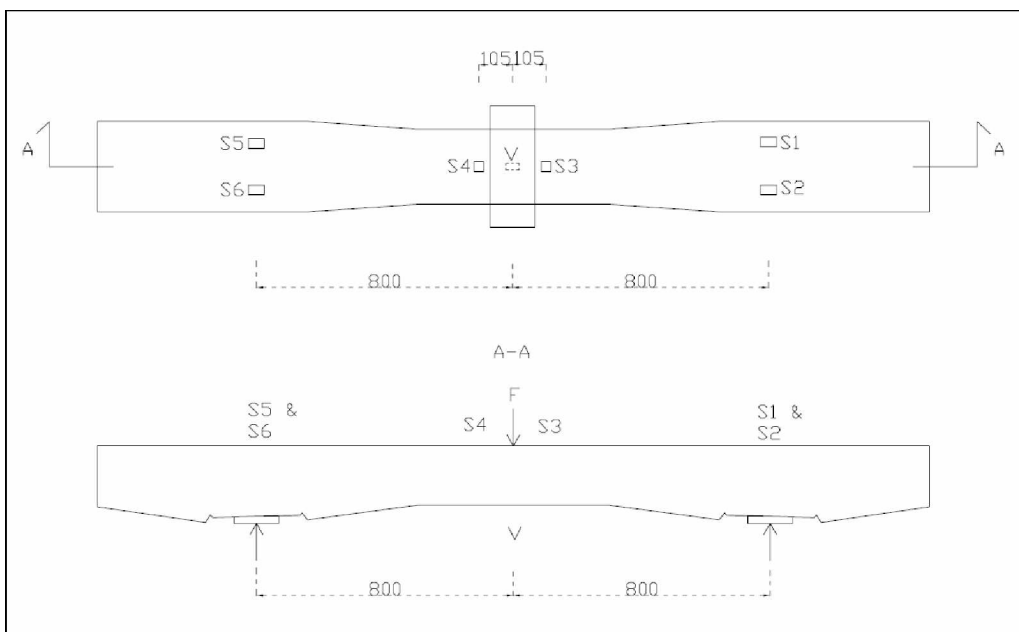
*Kuva 36. Tyypilliset mikroskoopilla otetut kuvat. Vasemmalla 50x suurennos ja oikealla 200x suurennos. Kuvat eivät esitä samaa halkeamaa.*

#### 4.5.5 Mittalaitteiden asennus

Pystysiirtymäantureiden asennusta varten valmistettiin kuormituskehään pulteilla kiinnitettävät telineet (kuva 39). Teräsprofilia oleviin telineisiin kiinnitettiin L-kiskot, joissa itse siirtymäanturit olivat kiinni. Siirtymäanturit sijoitettiin kuvan 37 ja 38 mukaisesti siten, että antureista neljä sijaitsi suoraan ratapölkyn alapuolisten tukien keskilinjalla. Kyseisellä anturien sijoittelutavalla pyrittiin seuraamaan mahdollisia ratapölkyssä tapahtuvia kiertymiä, mitkä saattoivat johtua mm. tukien kohdalta lohjenneista betonin kappaleista. Lisäksi antureista kaksi oli sijoitettu 105 mm etäisyydelle kuormituspisteen keskilinjasta.



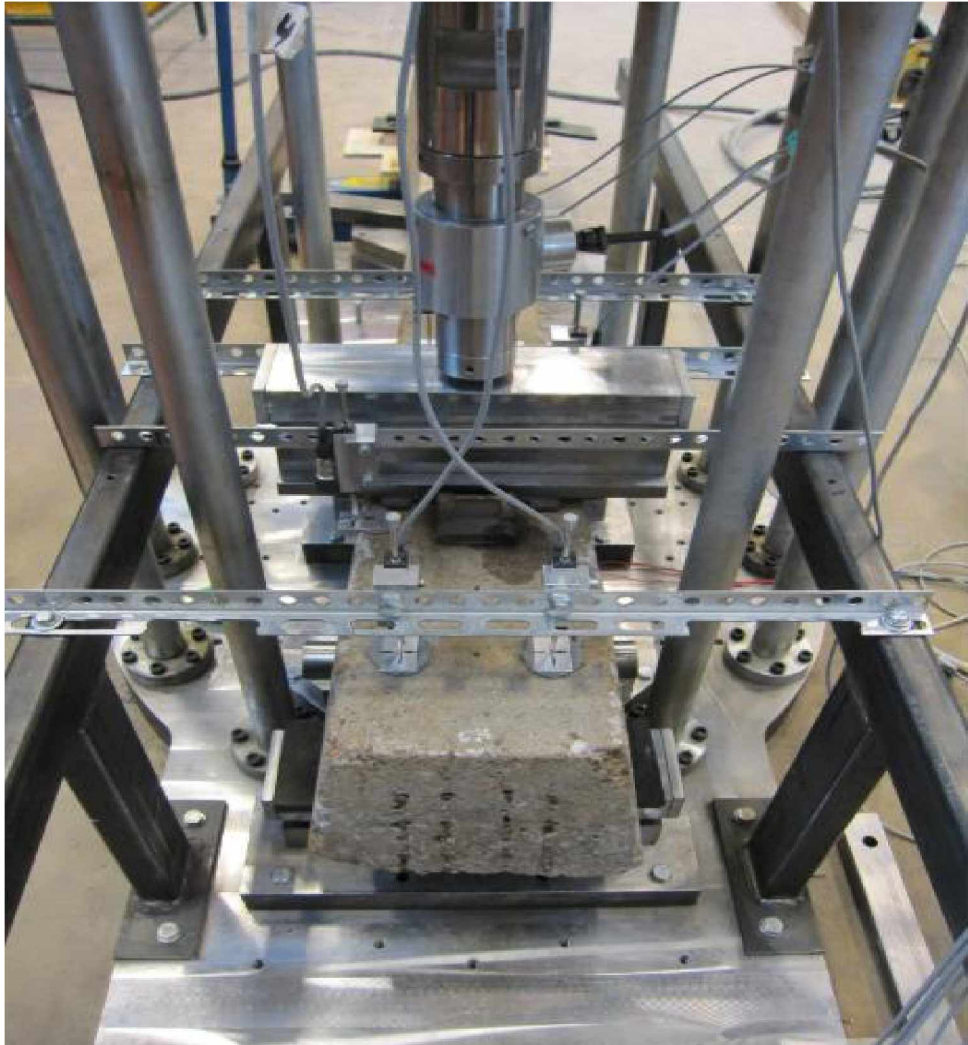
Kuva 37. Ratapölkyn venymäanturin (V) ja ratapölkyn pystysiirtymäantureiden (S) sijoittelukaavio pölkyn pään kuormituskokeessa.



Kuva 38. Ratapölkyn venymäanturin (V) ja ratapölkyn pystysiirtymäantureiden (S) sijoittelukaavio pölkyn keskiosan kuormituskokeessa.

Siirtymäantureita varten ratapölkkyyn kiinnitettiin kooltaan 30x50 mm<sup>2</sup> alumiiniliuskoja, jotka asennettiin vaakatasoon. Kyseisten liuskojen tarkoituksena oli vähentää ratapölkyn mahdollisista pituus- ja sivusuuntaisista liikkeistä pystysiirtymiin aiheutuvaa virhettä. Jo pienikin ratapölkyn liikkuminen olisi aiheuttanut merkittävää virhettä siirtymämittaustuloksiin, mikäli viistoja tai muuten epätasaisia pintoja ei olisi suoritettu alumiiniliuskojen avulla.





Kuva 39. Kuormituskehä siirtymäanturit kiinnitettynä.

Venymämittaus tehtiin suoraan kuormituslinjan alapuolelta, jossa kuormituskokeessa muodostuva taivutusmomentti aikaansaa suurimman venymän. Venymäsilman asennusta varten kiinnityskohta hiottiin tasaiseksi ja silmukan kiinnityspisteiden väliin hiottiin noin yhden millimetrin syvennys. Kyseisellä syvennyksellä varmistettiin se, että silmukka ei kantanut mistään kohdasta mittausalueella ja näin ollen aiheuttanut virhettä venymätuloksiin.

## 4.6 Kuormituskokeet

### 4.6.1 Koekuormien määrittäminen

Standardissa SFS-EN 13230-2 [68] on ohjeistettu ratapölkkykohtainen vertailukoekuormien laskenta. Vertailukoekuormia tarvitaan kuormituskokeissa käytettävien kriteerien määrittämiseen. Standardin määrittämän ensimmäisen kriteerin mukaisesti ratapölkyn tulee kestää kuormituskokeissa vertailukoekuorman suuruinen kuorma halkeamatta. Lisäksi standardi esittää kriteerit kuormalle, mikä vaaditaan pysyvän 0,05 mm halkeaman muodostumiselle, sekä suurimmalle kuormalle, jonka ratapölkyn tulee pystyä vastaanottamaan. Ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa ratapölkyn pitää kestää vertailukoekuorma 1,8-kertaisena ilman pysyvää 0,05 mm halkeamaa ja suurimman kuorman, jonka ratapölkyn on pystyttävä vastaanottamaan on

oltava 2,5-kertainen vertailukoekuorma. Vastaavasti dynaamisessa kuormituskokeessa kertoimet ovat 1,5 ja 2,2.

UIC Code 713 Design of monoblock concrete sleepers [78] on tarkoitettu tukemaan EN-standardia. Ohjeistuksessa opastetaan yksiosaisen betoniratapölkyn suunnittelua ja mitoitustaivutusmomentin määrittämistä. Tässä kappaleessa esitettävien kaavojen 1-4 avulla pystytään määrittämään vertailukoekuormien laskemiseen tarvittavat mitoitustaivutusmomentit. Sijoittamalla kaavoista 3 ja 4 saadut mitoitustaivutusmomentit kaavoihin 5 ja 6 saadaan kuormituskokeissa käytettävät vertailukoekuormat.

Alla on esitetty kaavoissa 1-6 käytettävät merkinnät ja UIC 713:n mukaiset tyypilliset kertoimien arvot.

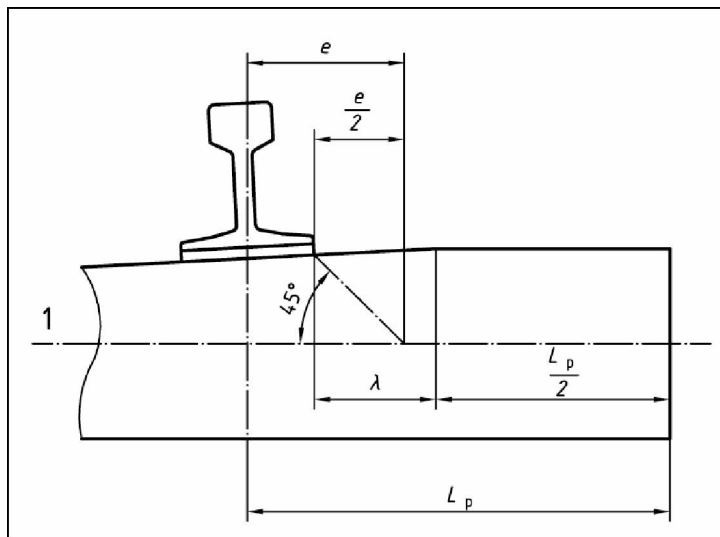
$Q_o$	Staattinen akselikuorma [kN]
$\lambda$	Sisäinen momenttivarsi [m]
$L_p$	Etäisyys kiskon lepopinnan keskilinjalta ratapölkyn päähän [m]
$L_r$	Tukien keskilinjojen väli ratapölkyn pään kuormituskokeissa on 0,6 m, kun $L_p \geq 0,450$ m
$L_c$	Kiskon lepopintojen keskipisteiden välinen etäisyys on 1,6 m
$d$	Ratapölkyn korkeus kiskon lepopinnan keskilinjalta [m]
$e$	Kuorman jakautuman leveys [m] (ks. kuva 40)
$P_d$	Ratapölkkyyn kiskon kohdalle kohdistuva mitoituskuorma [kN]
$M_{dr+}$	Positiivinen mitoitustaivutusmomentti kiskon lepopinnan kohdalla [kNm]
$M_{dc-}$	Negatiivinen mitoitustaivutusmomentti ratapölkyn keskellä [kNm]
$\gamma_p$	Kerroin kiskonkiinnitysten iskukuormien vaimennuskyvyille. Tyypilliset arvot UIC 713:n mukaan ovat: vähäinen vaimennus 1,0, keskitasoinen vaimennus 0,89 ja suuri vaimennus 0,78. Tässä kappaleessa esitettyjen vertailukoekuormien laskennassa käytetty kerroin on 1,0.
$\gamma_v$	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.
$\gamma_d$	Kerroin kuormien jakautumiselle ratapölkkyjen kesken. Suositeltava arvo on 0,5.
$\gamma_r$	Kerroin ratapölkyn tukireaktiolle, jolla huomioidaan tuennan vaihteluita. Tyypillinen arvo on 1,35.
$\gamma_i$	Kerroin dynaamiselle lisälle taivutusmomenttiin. Dynaaminen lisä johtuu epäsäännöllisyyksistä ratapölkyn pituussuuntaisessa tuennassa. Tyypillinen arvo on 1,6.
$I_c$	Jäyhyysmomentti ratapölkyn keskellä
$I_r$	Jäyhyysmomentti kiskon lepopinnan keskellä
$F_{r0}$	Ratapölkyn pään vertailukoekuorma [kN]
$F_{c0}$	Ratapölkyn keskiosan vertailukoekuorma [kN]

Ratapölkkyyn kiskon kohdalla kohdistuvaa mitoituskuormaa käytetään mitoitustaivutusmomentin määrittämiseen. Kiskon lepopinnaa mitoituskuorma voidaan laskea kaavalla 1.

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

Kaavassa 2 on esitetty sisäisen momenttivarren  $\lambda$  laskeminen. Kaavassa  $L_p$  on kiskon lepopinna keskispisteen etäisyys ratapölkyn päähän ja  $e$  on leveys kuorman jakautumalle. Kuvassa 40 on esitetty periaate sisäisen momenttivarren määrittämiseksi. Standardin SFS-EN 13230-2 mukaisesti kuorman jakautuman leveyttä määritettäessä voidaan käyttää olettamusta  $e=0,15/2+d/2$ , kun käytetään kiskoja 60E1. Kaavassa d on ratapölkyn korkeus kiskon lepopinna keskijonalla.

$$\lambda = (L_p - e) / 2 \quad (2)$$



Kuva 40. Periaatekuva sisäisen momenttivarren määrittämiseen [68].

Kaavassa 3 on esitetty kiskon lepopinnaa mitoitustaivutusmomentin määrittäminen. Mitoitustaivutusmomentin avulla pystytään laskemaan vertailukoekuorma ratapölkyn päälle.

$$M_{dr+} = \gamma_i * P_d \lambda / 2 \quad (3)$$

Kaavassa 4 esitetään tapa määrittää mitoitustaivutusmomentti ratapölkyn keskiosalle. Ratapölkyn keskiosan mitoitustaivutusmomentti voidaan tilaajan suostumuksella määrittää ratapölkyn pään mitoitustaivutusmomentin, pölkyn keskiosan ja kiskon lepopinna keskiosan jäyhyysmomenttien avulla.

$$M_{dc-} = 1,2 * M_{dr+} * \frac{I_c}{I_r} \quad (4)$$

Kaavalla 5 määritetään vertailukoekuorma ratapölkyn pään kuormituskokeisiin ja kaavalla 6 määritetään vertailukoekuorma ratapölkyn keskiosan kuormituskokeisiin.

$$F_{r0} = \frac{4M_{dr}}{L_r - 0,1} \quad (5)$$

Suomessa käytettäville ratapölkkipituuksille 2500 mm ja 2600 mm vertailukoekuorma kiskon lepopinna kohdalla on  $F_{ro}[kN]=8M_{dr}[kNm]$ .

$$F_{c0} = \frac{4M_{dc}}{L_c - 0,1} \quad (6)$$

Kaavojen 1-6 avulla pystytään määrittämään vertailukoekuormat, jotka ovat ratapölkky- ja ratakohtaisia. Vertailukoekuormaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ratapölkyn ulkomitat, liikennöivän kaluston akselipaino, käytettävän välilevyn jäykkyys sekä radalla sallittavat junien liikennöintiinopeudet.

Taulukossa 4 on esitetty laskettuja vertailukoekuormia Parma Oy:n valmistamalle ratapölkkytyypille BP99. Kuormituskokeiden tulosten vertailun helpottamiseksi kokeissa käytettiin vain BP99:lle määritettyä vertailukoekuormaa, joka vastasi 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h. Kyseinen vertailukoekuorma vastaa hyvin tarkasti 250 kN akselipainolla määritettyä vertailukoekuormaa, kun junan nopeus on alle 200 km/h. Lisäksi BP99-ratapölkkyille lasketut vertailukoekuormat vastasivat hyvin tarkasti B97-ratapölkyn vertailukoekuormia. Tämä johtui BP99- ja B97-ratapölkkyjen samansuuruisista ulkomitoista kiskon kohdalla ja pölkyn keskellä.

Taulukko 4. Lasketut vertailukoekuormat ratapölkkytyypille BP99.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]	$\lambda$ [m]	$P_d$ [kN]	$M_{dr+}$ [kNm]	$M_{dc-}$ [kNm]	$F_{ro}$ [kN]	$F_{co}$ [kN]
200	>200	0,1575	118,1	14,88	8,85	<b>119,1</b>	<b>23,60</b>
215	>200	0,1575	127,0	16,00	9,51	<b>128,0</b>	<b>25,37</b>
225	<200	0,1575	113,9	14,35	8,53	<b>114,8</b>	<b>22,76</b>
250	<200	0,1575	126,6	15,95	9,48	<b>127,6</b>	<b>25,29</b>
265	<200	0,1575	134,2	16,90	10,05	<b>135,2</b>	<b>26,80</b>

Taulukossa 5 on esitetty eri akselikuormille laskettuja vertailukoekuorman arvoja ja niiden perusteella määritetyt staattisissa kuormituskokeissa käytettävät kriteerit. Taulukossa 6 on esitetty vastaavat standardin määrittämät kriteerit ratapölkyn pään dynaamiselle kuormituskokeelle. Taulukossa  $F_{ro,05}$  on kriteeri pysyväälle leveydeltään 0,05 mm halkeamalle ja  $F_{rB}$  kriteeri kuormitustasolle, jota ei pystytä kasvattamaan pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa.  $F_{cB}$  on kriteeri kuormitustasolle, jota ei pystytä kasvattamaan ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa.

Taulukko 5. Eri akselipainoille laskettuja vertailukoekuormia ja niiden perusteella määritetyt kriteerit staattisissa kuormituskokeissa.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]		$F_{ro}$ [kN]	$F_{ro,05}$ [kN] K1=1,8	$F_{rB}$ [kN] K2=2,5	$F_{co}$ [kN]	$F_{cB}$ [kN] K2=2,5
200	>200		119,1	214	298	23,6	59
215	>200		128,0	230	320	25,4	64
225	<200		114,8	207	287	22,8	57
250	<200		127,6	230	319	25,3	63
265	<200		135,2	243	338	26,8	67

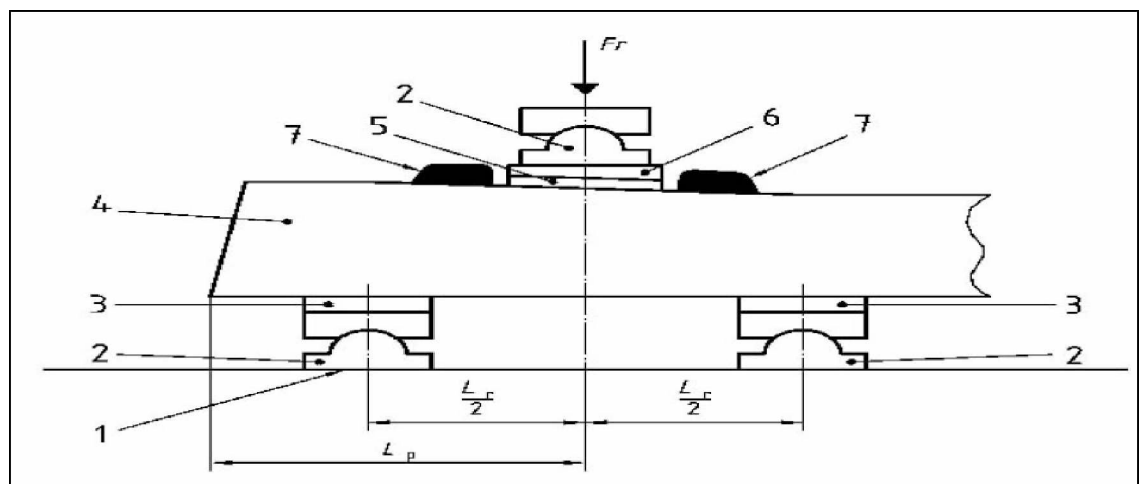
Esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen [54] mukainen kriteeri ensimmäiselle halkeamalle on 150 kN ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa. Vastaavasti pysyvän leveydeltään 0,05 mm halkeaman kriteeri on 240 kN ja kriteeri murtoa vastaan on 300 kN.

Taulukko 6. Eri akselipainoille laskettuja vertailukoekuormia ja niiden perusteella määritetyt kriteerit ratapölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa.

Akselipaino [kN]	Nopeus [km/h]		$F_{r0}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN] K1=1,5 K2=2,2	$F_{rB}$ [kN]
200	>200		119,1	179	262
215	>200		128,0	192	282
225	<200		114,8	172	253
250	<200		127,6	191	281
265	<200		135,2	203	297

#### 4.6.2 Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe

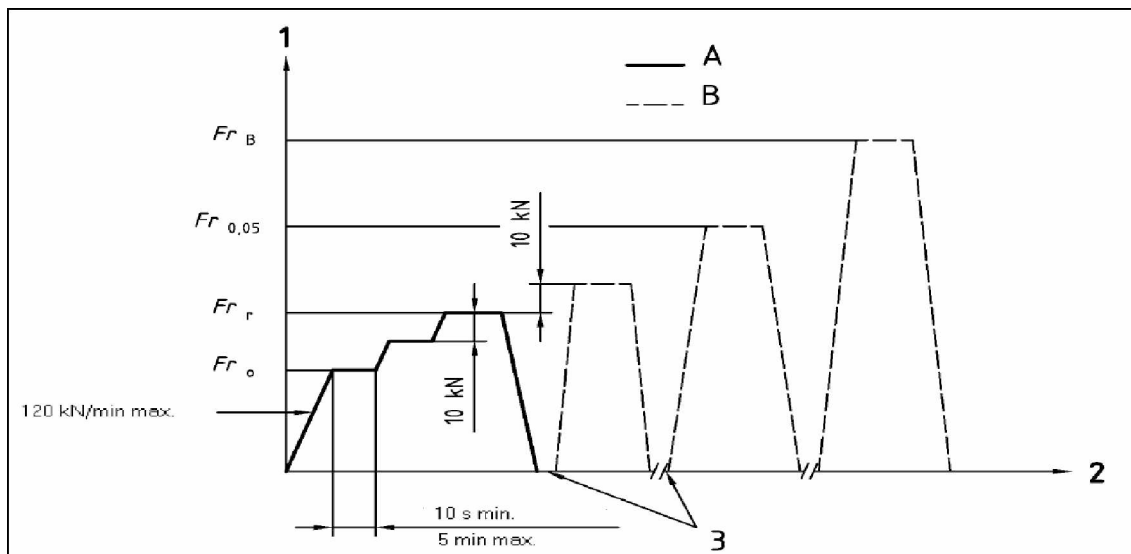
Betoniratapölkyn pään staattisia kuormituskokeita tehtiin yhteensä 14 kappaletta. Kokeet tehtiin standardia SFS-EN 13230-2 [68] noudattaen. Tukijärjestelyt olivat kuvan 41 mukaiset tukien keskilinjan välisen etäisyyden ollessa 600 mm. Tuet olivat 100 mm levyiset. Ratapölkyn alapuolella sijaitsevien tukien ja ratapölkyn välissä oli standardin määräämät 15 mm paksuiset kumilevyt. Kumi oli kovuudeltaan Shore A65. Standardista poiketen kumilevyt olivat 110–120 mm levyiset standardin ohjeistaman 100 mm sijaan. Tällä pystyttiin eliminoimaan kuormituksen aikana tapahtuva kumilevyn siirtyminen pois pölkyn ja tuen välistä.



Kuva 41. Ratapölkyn pään kuormituskokeissa käytetty tuenta- ja kuormitusjärjestely [68]. (Kuvassa: 1. Kiinteä tuki, 2. Niveltuki, 3. Kimmoisa kumilevy, 4. Ratapölkky, 5. Välilevy, mikä oli nykyään hankittavissa ratapölkkyissä oleva välilevy, 6. Viistetty teräslevy, 7. Sivusuuntainen tuki, mikä oli pölkkyissä oleva kiskonkiinnitysjärjestelmä.)

Ratapölkkyjä kuormitettaessa pyrittiin noudattamaan standardissa määritettyä kuormituskäyrää (kuva 42). Kuormituslaitteistosta johtuen yhdellä hydraulisynterillä kuormitettaessa voimat nousivat sallittua 120 kN/min kuormitusnopeutta nopeammin aina noin 90 kN tasolle asti ja kolmella hydraulisynterillä kuormitettaessa noin

220 kN tasolle asti. Kyseisten kuormitustasojen jälkeen voimien nousunopeus oli standardin määräämä 120 kN/min. Sama tilanne toistui voimia pienennettäessä. Kuormien nosto- ja laskunopeuksista johtuen ratapölkkyjen kuormittaminen jouduttiin tekemään siten, että aluksi kuormittaminen aloitettiin yhtä hydraulisyylinteriä käyttäen. Kun kuormitus oli saavuttanut 300 kN kuormitusportaan, siirryttiin käyttämään kaikkia kolmea hydraulisyylinteriä. Voimien nosto kuormitusportaalta toiselle pyrittiin pitämään standardin mukaisesti 10 kN suuruisena. Käytännössä hydraulikoneikon paineensäädöllä voiman nosto tavoitearvoon kyettiin toteuttamaan noin  $\pm 4$  kN tarkkuudella.



Kuva 42. Ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa noudatettu kuormituskäyrä [68].

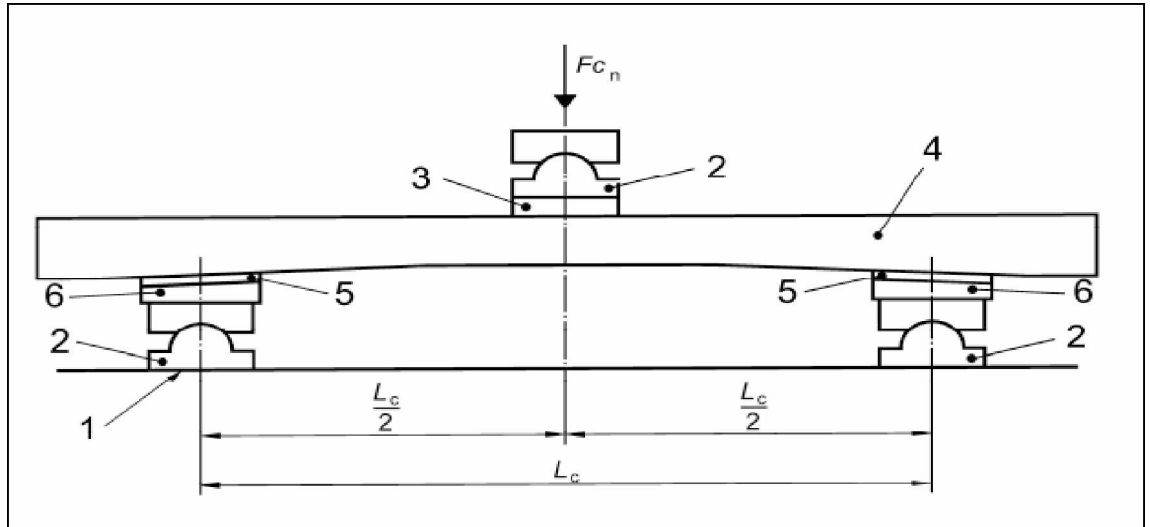
Kuormituskokeissa halkeamien mittaus tehtiin standardin SFS-EN 13230-1 mukaisesti noin 15 mm pölkyn alalaidasta. Käytöstä poistettujen ratapölkkyjen kohdalla halkeamaleveyden mittaus saatettiin joutua tekemään hieman standardin määräämää 15 mm ylempää. Syynä tähän oli käytöstä poistetuista ratapölkkyistä lohjenneet betonikappaleet. Halkeama saattoi syntyä lohkeaman kohdalle, jolloin luotettava halkeamaleveyden mittaus oli mahdotonta lohkeaman kohdalla. Tällöin halkeaman leveys jouduttiin mittaamaan hieman korkeammalta pölkyn kyljestä. Tällä ei ollut kuitenkaan oleellista merkitystä mitattuun halkeamaleveyteen. Pölkyn pään kuormituskokeissa pysyvän halkeaman leveys mitattiin kuormitusportaiden välissä pölkyn ollessa kuormittamattomana.

#### 4.6.3 Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe

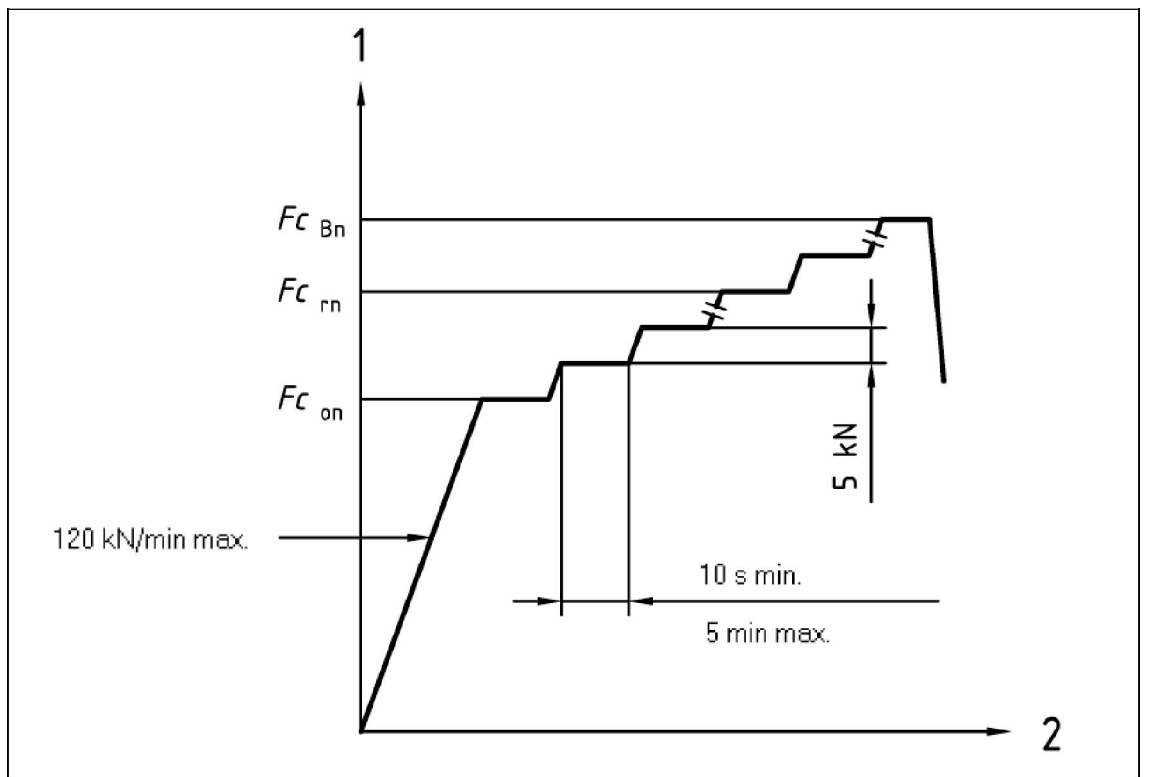
Betoniratapölkyn keskiosan staattisia kuormituskokeita tehtiin 14 kappaletta. Kokeiden aikana jouduttiin poikkeamaan standardin SFS-EN 13230-2 [68] määrittämästä kuormituskäyrästä venymäilmukan irrottamisen ja suuremman hydraulisyylinterin kiinnittämisen yhteydessä. Tuolloin voimat jouduttiin laskemaan toisin kuin standardi ohjeistaa.

Tuenta tapahtui kuvan 43 mukaisesti tukivälin ollessa 1600 mm. Käytetyt tuet olivat samoja kuin pölkyn pään staattisessa kuormituksessa. Kuormat nostettiin aluksi keskiosan vertailukoekuormaan, jonka jälkeen kuormia nostettiin 5 kN portaissa (kuva 44). Pienemmän voimansaantitarpeen johdosta ratapölkyn keskiosan kuormituskoe

keissa pystyttiin käyttämään pienempiä hydraulisylinterejä, kuten kappaleessa 4.3 on kerrottu. Tällöin hydraulikoneikon paineensäädön tarkkuus aiheutti ainoastaan noin  $\pm 0,5$  kN virheen tavoitekuormaan.



Kuva 43. Ratapölkyn keskiosan kuormittamiseen käytetyt tuenta- ja kuormitus järjestely [68]. (Kuvassa: 1. Kiinteä tuki, 2. Niveluki, 3. Kimmoisa kumi levy, 4. Ratapölkky, 5. Välilevy, mikä oli nykyään hankittavissa ratapölkkyissä oleva välilevy, 6. Viistetty teräslevy.)



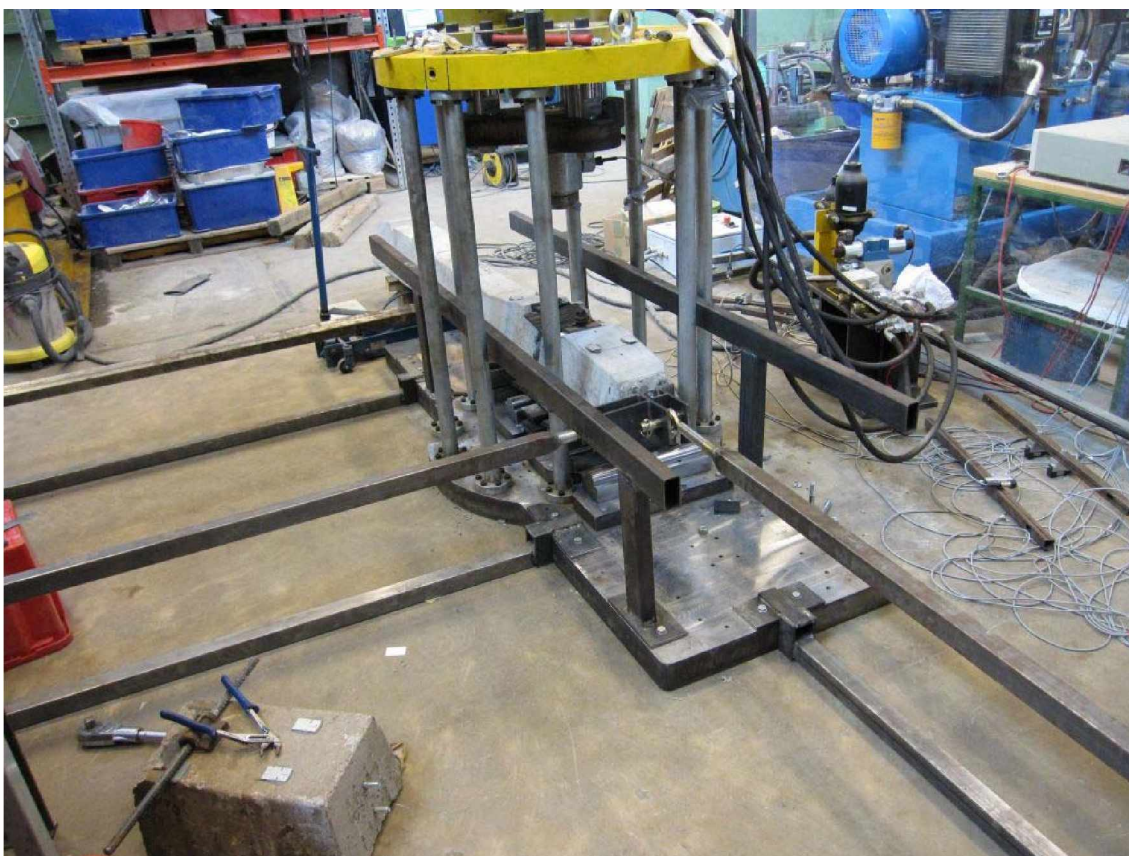
Kuva 44. Kuormituskäyrä ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa [68].

#### 4.6.4 Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe

Ratapölkyn pään dynaamisia kuormituskokeita tehtiin neljä kappaletta. Kuormituskokeissa jouduttiin poikkeamaan standardista SFS-EN 13230-2 [68] kuormituksen ylittettyä 310 kN. Tuolloin siirryttiin käyttämään kaikkia kolmea hydraulisylineriä, jolloin standardin määrittämä viiden minuutin aika kuormitusportaiden välissä ylittyi.

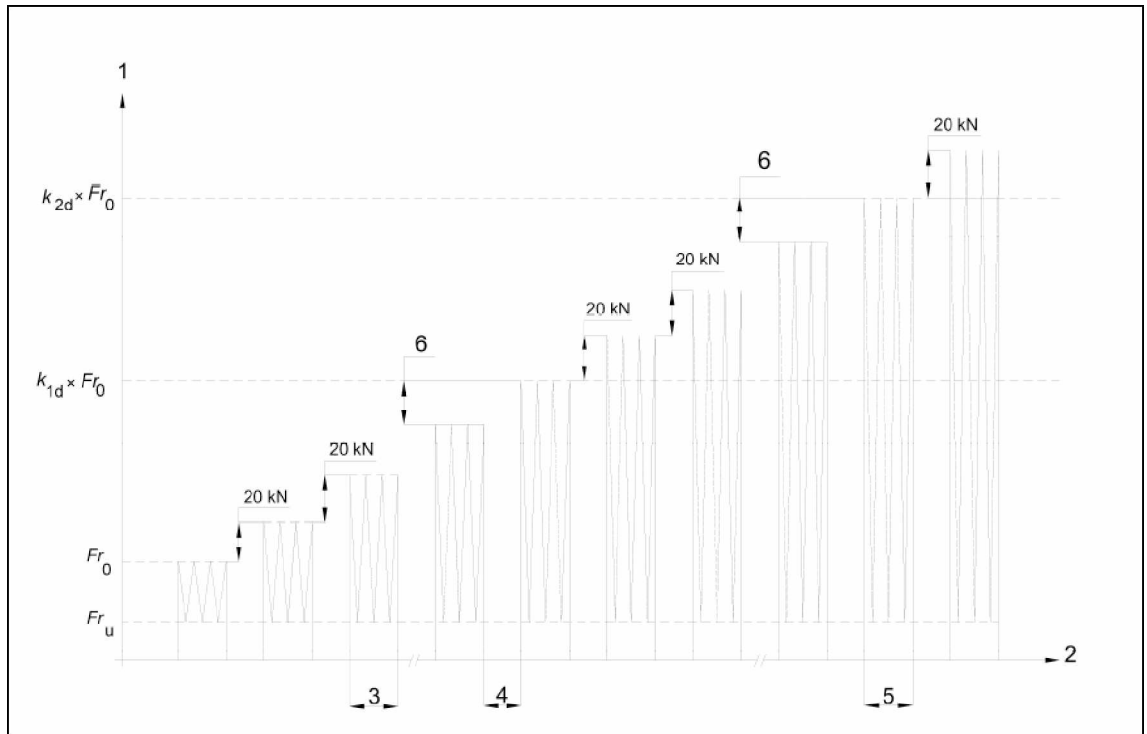
Tukien sijainti oli sama kuin pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa (kuva 41). Lisäksi ratapölkkyyn lisättiin kuvassa 45 näkyvät sivu- ja pituussuuntaiset tuet, jotka estivät ratapölkyn sivu- ja pituussuuntaista liikettä dynaamisen kuormituskokeen aikana. Tuet oli kiinnitetty lattiaan ja kuormituskehään ja kuvassa 45 näkyvät ratapölkkyyn kiinnitettyt aisat oli nivelöity molemmista päistä.

Kuormituskokeiden aikana pohjavoimana, eli voimana jonka alle kuormat eivät laske syklien aikana, käytettiin 50 kN ( $F_{ru}$  kuvassa 46) ja ensimmäinen kuormitusporras oli vertailukoekuorman  $F_{r0}$  suuruisen. Kuormitusportaan nosto oli 20 kN ja jokaisella kuormitusportaalla kuormituspulssia toistettiin 5000 kertaa (kuva 46). Kuormituskokeissa käytetty kuormitustaajuus oli 2 Hz, jolloin yksittäisen kuormitusportaan kesto oli halkeaman mittausta huomioiden hieman alle 50 minuuttia.



Kuva 45. Dynaamisissa kuormituskokeissa käytetyt pituus ja sivusuuntaiset tuet.





Kuva 46. Kuormituskäyrä ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa [68]. (Kuvassa: 1. Kuorma, 2. Aika, 3. 5000 kuormitus sykliä, 4. Maksimi aika kuormitusportaiden välillä 5 min, 5. Taajuus 2-5 Hz, 6. Kuormitusportaat ennen  $k_{1d} \cdot Fr_0$  ja  $k_{2d} \cdot Fr_0$  pienempiä kuin 20 kN.)

#### 4.6.5 Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisia kuormituskokeita tehtiin neljä kappaletta. Kuormituskoe ei sisällynyt standardiin SFS-EN 13230-2, mutta sen katsottiin antavan oleellista tietoa ratapölkyn keskiosan käyttäytymisestä dynaamisen kuormituksen alaisena. Kuormituskokeessa käytettiin samanlaista tuentajärjestelyä kuin ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa tukivälin ollessa 1600 mm (kuva 43). Kokeissa käytetty kuormituskäyrä pohjautui pölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa käytettyyn kuormituskäyrään (kuva 46). Kuormituskokeiden aikana pohjavoi-  
mana käytettiin 15 kN ja ensimmäinen kuormitusporras oli pölkyn keskiosan vertailukoekuorman suuruinen. Kuten ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa jokaisella kuormitusportaalla kuormituspulssia toistettiin 5000 kertaa kuormitustaajuuden ollessa 2 Hz. Pienemmistä kuormista johtuen kuormitusportaan nosto oli 10 kN.

## 4.7 Pakkassuolakoe

Sekä käyttämättömille että käytöstä poistetuille betoniratapölkkyille tehtiin pakkassuolakestävyyskokeita standardin SFS 5449 [67] mukaisesti. Kokeella pyrittiin selvittämään betonin alttiutta pakkasrapautumiselle.

Yhtä pakkassuolakoetta varten tarvittiin kolme samasta ratapölkystä porattua koe-kappaletta. Koekappaleet olivat korkeudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm lieriöitä. Näytteet valmistettiin poraamalla kuvan 47 mukaisesti halkaisijaltaan 100 mm lieriöitä, jotka katkaistiin 100 mm määrämittäisiksi. Koekappaleet pyrittiin ottamaan ratapölkyn eri kohdista siten, että jokainen näytesarja sisältäisi betonia sekä ratapölkyn

keskeltä että pinnasta. Ratapölkkyjen raudoitus ja varsinkin käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä olevat halkeamat rajoittivat näytteiden ottamista. Ennen jäädytys-sulatus-sykliden aloittamista näytteet kyllästettiin vedellä kuvan 48 mukaisesti.



Kuva 47. Ratapölkystä poratut näytteet odottamassa 100 mm korkuisiksi sahaamista.



Kuva 48. Näytteet veteen upotettuina kyllästämisen aikana

Pakkasuolakokeessa koekappaleet altistetaan jäädytys-sulatus-sykleille, joita vaaditaan Liikenneviraston esijännitetyjen betoniratapölkkyjen teknisissä toimitusehdoissa [54] yhteensä 50 kappaletta. Sulatushaude oli vesijohtovettä, jonka lämpötilan tuli olla  $20 \pm 2$  °C. Kylmähauteena tuli standardin mukaan olla kylläinen NaCl-vesiliuos, jonka lämpötila on  $-15 \pm 1$  °C. Sulatus- ja kylmähauteiden liuosten tilavuuden oli oltava vähintään 8-kertainen koekappaleiden yhteistilavuuteen verrattuna.

Kokeet tehtiin muuten standardin SFS 5449 mukaisesti, mutta kylläisen NaCl-vesiliuoksen valmistamiseen käytettiin merisuolaa. Merisuola koostuu pääasiassa natriumkloridista, jota siinä on noin 94 %. Merisuolan pääasiallisina epäpuhtauksina ovat magnesiumsulfaatti ja kaliumsuolat. Epäpuhtauksilla saattoi olla dramaattinen merkitys koekappaleiden jäädytys-sulatuskestävyyteen (ks. luku 5.7).

Tehdyissä kokeissa kylmähaude ja sulatushaude olivat kuvan 48 mukaisissa astioissa, mitkä olivat riittävän suuria koko koekappalemäärälle. Tällä pystyttiin varmistamaan kokeen aikana lähes identtiset olosuhteet kaikille näytekappaleille. Koekappaleet sijoitettiin kylmä- ja sulatushauteeseen siten, että kappaleiden keskinäiset etäisyydet kuten myös etäisyydet altaan seiniin olivat vähintään 20 mm. Jäädytys-sulatuskierros sisälsi 8-tunnin jäädytysvaiheen ja 16-tunnin sulatusvaiheen. Tilapäisten kierrosrytmihäiriöiden aikana koekappaleet pidettiin vesihauteessa.

Pakkasuolakokeella selvitettävää betonin rapautumisalttiutta seurattiin koekappaleiden tilavuuden muutoksen avulla. Kokeesta saatava tilavuudenmuutos oli yksittäisten koekappaleiden tilavuudenmuutoksen keskiarvo. Koekappaleiden prosentuaalinen tilavuuden muutos DV lasketaan kaavalla 7.

$$DV = 100 \frac{(m_2 - m_3) - (m_5 - m_4)}{(m_2 - m_3)} \% \quad (7)$$

Yhtälössä :

$m_2$	Koekappaleen ilmassa punnittu massa imeytyksen jälkeen, [g]
$m_3$	Koekappaleen vedessä punnittu massa imeytyksen jälkeen, [g]
$m_4$	Koekappaleen vedessä punnittu massa jäädytys-sulatuskierrosten jälkeen, [g]
$m_5$	Koekappaleen ilmassa punnittu massa jäädytys-sulatuskierrosten jälkeen, [g]

Pakkasuolakokeen aikaansaaman prosentuaalisen tilavuudenmuutoksen DV avulla voidaan määrittää Esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen vaatima pakkasenkestävyytluku P. Pakkaskestävyytluvun määrittämiseksi kaavaan 8 sijoitetaan prosentuaalinen tilavuuden muutos 50 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen.

$$P = \frac{100}{\Delta V(50)} \quad (8)$$

Pakkasenkestävyytluku tulee olla 50 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen vähintään 25, mikä vastaa enintään 4 % tilavuuden muutosta näytteissä. [54]

## 5 Tulokset

### 5.1 Betoniratapölkyn pään staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn pään kuormituskokeita tehtiin yhteensä neljä kappaletta käyttämättömille ratapölkkyille ja kymmenen kappaletta käytöstä poistetuille ratapölkkyille. Käytöstä poistettujen ratapölkkyjen kunto oli kokonaisuudessaan hyvä. Ratapölkkyjen kyljissä oli havaittavissa yksittäisiä pituussuuntaisia säröjä, joiden pituus oli 50–300 mm ja joistakin ratapölkkyistä oli lohjennut pienehköjä betoninkappaleita. Ainoastaan B63-ratapölkky (kuvat 49 ja 50) oli silmämääräisesti arvioiden heikkokuntoinen. Ratapölkkyssä oli havaittavissa selkeää rapautumista ja leveydeltään 0,08–1,2 mm pituussuuntaisia halkeamia. Halkeamien pituus vaihteli välillä 50–700 mm.



*Kuva 49. Halkeamia B63-ratapölkyn kyljessä.*

*Kuva 50. Halkeamia B63-ratapölkyn päässä.*

Jokaisessa käytöstä poistetussa ratapölkkyssä, mitkä kuormitettiin, oli kiskon lepoppinnan kohdalla jo olemassa ollut pystysuuntainen halkeama. Halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja ne pystyttiin havaitsemaan pölkyn sivuilta usein vasta kuormien noston yhteydessä. Halkeama kuitenkin erottui monesti pölkyn alapinnasta, kuten kuvasta 51 voidaan havaita. Kuvan 50 mukainen halkeama ulottui aina läpi pölkyn ja sen pituus pölkyn sivuilla vaihteli noin 30 mm:stä yli 100 mm:iin.



Kuva 51. Ratapölkkyssä ollut pystysuuntainen halkeama, joka pystyttiin havaitsemaan pölkyn alapinnasta.

Taulukossa 7 on esitetty standardin SFS-EN 13230-2 [68] mukaisissa ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa saadut koetulokset. Taulukossa on esitetty kuormitus, jolla ensimmäinen halkeama on havaittu visuaalisesti, kuormitus, jonka jälkeen pysyvä halkeama on ollut leveydeltään 0,05 mm ja murtokuorma.

Standardin SFS-EN 13230-2 [68] asettamien kriteerien mukaisesti ratapölkyn on kestettävä vertailukoekuorma halkeamatta. Akselipainon ollessa 215 kN ja junan nopeuden ollessa yli 200 km/h vertailukoekuorma on noin 128 kN. Taulukosta 7 voidaan havaita, että B97 ja BP99 täyttivät kyseisen kriteerin hyvin. Standardi asettaa myös kriteerin pysyvälle, leveydeltään 0,05 mm halkeamalle. Kyseinen kriteeri on 230 kN. Taulukosta 7 voidaan havaita BV75-, B97 ja BP99-ratapölkkyjen täyttävän kriteerin hyvin. B75-ratapölkkyt täyttivät kriteerin niukasti ja huonokuntoinen B63-ratapölkky ei täyttänyt kriteeriä. Lisäksi standardi määrittää kriteerin suurimmalle kuormalle minkä ratapölkyn on pystyttävä vastaanottamaan. Kyseinen kriteeri on 320 kN. Kriteeri täyttyy selkeästi eri ratapölkkytyypeillä lukuun ottamatta huonokuntoista B63-ratapölkkyä.

Taulukko 7. Betoniratapölkyn pään staattisen kuormituskokeen tulokset. BV75- rata pölkyt oli valmistettu 1977, B75-ratapölkyt 1976 ja B63-ratapölkyt 1974.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 128 kN *)	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN] (Kriteeri > 230 kN *)	Murtokuorma [kN] (Kriteeri > 320 kN *)
BV75 (koe 3)	-	450	530
BV75 (koe 6)	-	430	548
BV75 (koe 7)	-	420	484
BV75 (koe 8)	-	400	465
BV75 (koe 9)	-	410	477
BV75 (koe 10)	-	370	465
BV75 (koe 11)	-	460	503
B97 (koe 2)	170	310	565
B97 (koe 12)	180	370	511
BP99 (koe 4)	180	340	509
BP99 (koe 13)	190	400	480
B63 (koe 1) (huonokuntoinen)	-	200	300
B75 (koe 14) (hyväkuntoinen)	-	250	387
B75 (koe 5) (hyväkuntoinen)	-	250	397

\* Kriteeri vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

B63- ja B75-ratapölkkyjen käyttäytyminen erosi kuormitettaessa muista ratapölkkytyypeistä. B63- ja B75-ratapölkkyt käyttäytyivät siten, että halkeamaleveydet kasvoivat tasaisesti noin 300 kN kuormitukseen asti. Tämän jälkeen halkeamaleveys kasvoi erittäin nopeasti. Muissa testatuissa ratapölkkytyypeissä halkeamaleveydet kasvoivat tasaisesti lähes koko kuormituskokeen ajan ja murtokuormaa lähestyttäessä halkeamaleveydet olivat B63- ja B75-pölkkyihin verrattuna huomattavasti pienempiä. Kuvassa 52 on esitetty B75-ratapölkky kuormitettuna kuorman ollessa 360 kN. Kuormien poistuttua kuvan 52 halkeaman leveys oli noin kaksi millimetriä.



Kuva 52. B75-ratapölkky kuormitettuna 360 kN voimalla pölkyn pään staattisessa kuormituskokeessa.

Liitteessä 1 on esitetty valokuvat kuormitetuista ratapölkkyistä. Kuvista voidaan huomata, että ratapölkyn pään kuormituksessa murtotapana oli useimmiten taivutusmurto tai taivutus-leikkausmurto, jolloin jänneteräkset eivät lopulta kestäneet niihin kohdistuvia vetorasituksia vaan menivät poikki. Poikkeuksena oli huonokuntoinen B63-ratapölkky, jossa murtotapana oli taivutus-puristusmurto. BV75-ratapölkkyissä huomioitavaa on se, että murto tapahtui aina ennen kuormitusta olemassa olleen halkeaman kohdalta.

Staattisissa kuormituskokeissa ei silmämääräisesti havaittu punosten liukumia yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Poikkeuksena oli BV75, missä havaittiin 0,05 mm pysyvä halkeama 370 kN kuormitustasolla (koe 10). Liukuma selittää pysyvän halkeamaleveyden kasvun muita vastaavan tyyppisiä pölkkyjä aikaisemmin.

## 5.2 Betoniratapölkyn pään dynaaminen kuormituskoe

Dynaamisia ratapölkyn pään kuormituskokeita tehtiin kahdelle käytöstä poistetulle ja kahdelle käyttämättömälle ratapölkylle. Käytöstä poistetut ratapölkkyt olivat kunnoltaan silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia. Taulukossa 8 on esitetty ratapölkyn pään dynaamisen kuormituskokeen tulokset.

Taulukko 8. Betoniratapölkyn pään dynaamisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 128 kN *)	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN] (Kriteeri > 192 kN *)	Murtokuorma ja sykliit [kN] (Kriteeri > 282 kN *)
BV75 (koe 16)	-	230	310 (423 sykliä)
BV75 (koe 17)	-	270	390 (4042 sykliä)
B97 (koe 15)	190	290	430 (2856 sykliä)
BP99 (koe 18)	210	290	390 (4803 sykliä)

\* Kriteeri vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

B97- ja BP99-ratapölkkyissä ensimmäinen halkeama havaittiin 190 kN ja 210 kN kuormitustasolla. Ensimmäiset halkeamat havaittiin hieman suuremmalla kuormitustasolla verrattuna pölkyn pään staattisiin kuormituskokeisiin. Tämä selittyy kuitenkin sillä, että dynaamisissa kuormituskokeissa kuormitusportaiden väli on 20 kN kun staattisissa kokeissa kuormia nostettiin 10 kN portaissa. Tällöin staattisissa kokeissa halkeaman syntymiseen vaadittu kuormitustaso oli lähempänä todellista halkeaman syntyyn vaadittavaa kuormitustasoa.

Dynaamisissa kuormituskokeissa standardin SFS-EN 13230-2 [68] asettama kriteeri ensimmäisen halkeaman osalta on sama kuin staattisissa kuormituskokeissa. Kyseinen 128 kN kriteeri täyttyy B97- ja BP99-pölkkyillä selvästi. Käytöstä poistetuissa pölkkyissä oli halkeama kiskon lepopinnan kohdalla, joten ensimmäistä halkeamaa vastaavaa kriteeriä ei pystytty tarkastelemaan näiden pölkkyjen kuormituskokeissa.

Pysyvän 0,05 mm halkeaman kriteeri on dynaamisessa kuormituskokeessa 192 kN, joten kaikki testatut ratapölkkyt täyttivät sen. Vertailtaessa käyttämättömiä ja käytöstä poistettuja ratapölkkyjä voidaan kuitenkin huomata se, että BV75-pölkkyissä 0,05 mm pysyvä halkeama muodostui pienemmällä kuormitustasolla verrattuna B97- ja BP99-pölkkyihin. Staattisissa kuormituskokeissa tilanne oli päinvastainen.

Kaikki kuormitetut pölkkyt täyttivät myös suurimmalle kuormalle asetetun kriteerin, mikä on 282 kN. Toinen BV75-ratapölkky täytti kriteerin selkeästi, mutta toinen vain niukasti. Mahdollisena tekijänä tähän on pölkkyissä jo olemassa olleiden halkeamien pituus. 310 kN kuormalla murtuneessa ratapölkkyssä ennen kuormittamista olleen halkeaman pituus pölkyn sivuilla oli noin 110 mm, kun taas 390 kN kuormalla murtu-



neessa ratapölkkyssä ennen kuormittamista olleen halkeaman pituus pölkyn sivuilla oli vain 50 mm.

Liitteessä 1 on esitetty kuvat murretuista ratapölkkyistä. Kuvista voidaan havaita, että ratapölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa murtotapana oli taivutusmurto. Tuolloin jänneteräksiin muodostui vetorasituksia, joita ne eivät kestäneet vaan menivät poikki alimmasta jänneteräsrivistä lähtien.

## 5.3 Betoniratapölkyn keskiosan staattinen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan staattisia kuormituskokeita tehtiin kymmenelle käytöstä poistetulle ratapölkylle ja neljälle käyttämättömälle ratapölkylle. Käytöstä poistetut ratapölkkyt olivat silmämääräisesti arvioiden hyväkuntoisia lukuun ottamatta B63-ratapölkkyjä. B63-ratapölkkyissä oli havaittavissa useita pituussuuntaisia halkeamia.

Betoniratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa standardi SFS-EN 13230-2 [68] asettaa ainoaksi kriteeriksi ensimmäisen halkeaman syntyyn vaadittavan kuorman suuruuden. Kyseisen kuorman tulee olla suurempi kuin vertailukoekuorma. Kokeessa käytetty vertailukoekuorma oli 25,4 kN, mikä vastasi 215 kN akselikuormaa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h. Standardissa on kuitenkin lisämainintana tilaajan oikeus asettaa halutessaan lisäkriteerejä kuormituskokeelle. Alla olevassa taulukossa 9 on esitetty kuormituskokeesta saadut tulokset.

Taulukko 9. Betoniratapölkyn keskiosan staattisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977, B75-ratapölkkyt 1976 ja B63-ratapölkkyt 1974.

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN] (Kriteeri > 25 kN *)	Murtokuorma [kN]
BV75 (koe 19)	-	125
BV75 (koe 20)	-	118
BV75 (koe 21)	-	118
BV75 (koe 22)	-	126
BV75 (koe 23)	-	114
BV75 (koe 24)	-	124
BV75 (koe 25)	45	133
B75 (koe 26) (hyväkuntoinen)	-	81
B63 (koe 27) (huonokuntoinen)	45	93
B63 (koe 28) (huonokuntoinen)	35	88
B97 (koe 29)	45	103
B97 (koe 30)	50	109
BP99 (koe 31)	45	100
BP99 (koe 32)	50	102

\* Kriteeri vastaa 215 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa yli 200 km/h tai 250 kN akselipainoa junan nopeuden ollessa alle 200 km/h.

Kuten taulukosta 9 voidaan havaita, käyttämättömät ratapölkkyt tyypiltään B97 ja BP99 täyttivät ensimmäiselle halkeamalle asetettavat kriteerit selkeästi. Käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä oli jo olemassa olleita pystysuuntaisia halkeamia kolmea poikkeusta luukuun ottamatta. Halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja tästä johtuen lähes mahdottomia havaita ennen ratapölkyn kuormittamista.

Murtokuorman suhteen heikoimpia olivat B63- ja B75-ratapölkkyt. Kyseisten pölkky-mallien murtokuormat ovat hieman ristiriitaisia, sillä B75:n murtokuorma oli 81 kN, kun taas silmämääräisesti arvioiden selkeästi huonokuntoisempien B63- ratapölkkyjen murtokuormat olivat 88 kN ja 93 kN. Osaltaan ristiriitaisia murtokuormia saattaa selittää se, että B75-ratapölkkyssä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia kuormitusalueella. B63-ratapölkkyissä ei havaittu ennen kuormittamista olleita pystysuuntaisia halkeamia, vaan B63:ssa oli ainoastaan selkeitä pituussuuntaisia halkeamia ja rapautumisen merkkejä.

Myös BV75-ratapölkkyjen murtokuormat olivat hieman ristiriitaisia verrattuna käyttämättömiin B97 ja BP99 pölkkyihin. BV75:llä on pienempi poikkileikkaus samalla punosmäärällä suhteessa B97 ja BP99:iin, jolloin myös murtokuorman tulisi olla pienempi. Kuitenkin BV75-ratapölkkyillä murtokuormat olivat selkeästi suurimmat vaih-

dellen 114 kN ja 133 kN välillä, kun taas B97 ja BP99 murtokuormat vaihtelivat 100 kN ja 109 kN välillä.

Liitteessä 1 on esitetty kuvat murretuista ratapölkkyistä. Murtotapana oli pääsääntöisesti taivutus-puristumurto. Kaksi BV75-ratapölkkyä murtui kuitenkin puhtaan taivutuksen johdosta, jolloin jännepunosten vetojännitykset kasvoivat niin suuriksi, että punokset menivät poikki alimmasta punosrivistä alkaen.

## 5.4 Betoniratapölkyn keskiosan dynaaminen kuormituskoe

Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisia kuormituskokeita tehtiin kahdelle käytöstä poistetulle ja kahdelle käyttämättömälle ratapölkylle. Standardi SFS-EN 13230-2 [68] ei sisällä kyseistä koetta, joten kokeelle ei ole varsinaisia standardin asettamia kriteereitä.

Taulukossa 10 on esitetty ratapölkyn keskiosan dynaamisissa kuormituskokeissa saadut tulokset. Tuloksista voidaan havaita, että B97- ja BP99-ratapölkkyillä saadut tulokset eivät juurikaan poikkea keskiosan staattisissa kuormituskokeissa saaduista tuloksista. Tulos on hieman yllättävä, sillä pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa murtokuorma oli noin 20 % suurempi verrattuna dynaamisissa kokeissa mitattuun kuormaan.

*Taulukko 10. Betoniratapölkyn keskiosan dynaamisen kuormituskokeen tulokset. BV75-ratapölkkyt oli valmistettu 1977.*

Ratapölkky	Ensimmäinen halkeama [kN]	Pysyvä halkeama 0,05 mm [kN]	Murtokuorma [kN]
BV75 (koe 35)	-	85	105 (3346 sykliä)
BV75 (koe 36)	35	95	115 (2187 sykliä)
B97 (koe 33)	45	85	105 (4842 sykliä)
BP99 (koe 34)	45	85	105 (857 sykliä)

BV75-ratapölkkyissä murtokuormat olivat hieman pienempiä verrattuna staattisissa kokeissa mitattuihin kuormiin. Ero ei ole kuitenkaan merkittävä ja voi selittyä osittain käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä esiintyvien koetulosten suuremmalla hajonnalla.

Koetulosten avulla voidaan esittää varovainen arvio dynaamisten kuormien merkityksestä ratapölkkyyn. Koetulosten perusteella dynaamiset kuormat vaikuttavat kriittisemmin kiskon kohdalla verrattuna pölkyn keskiosaan.

## 5.5 Ratapölkkyistä mitatut venymät

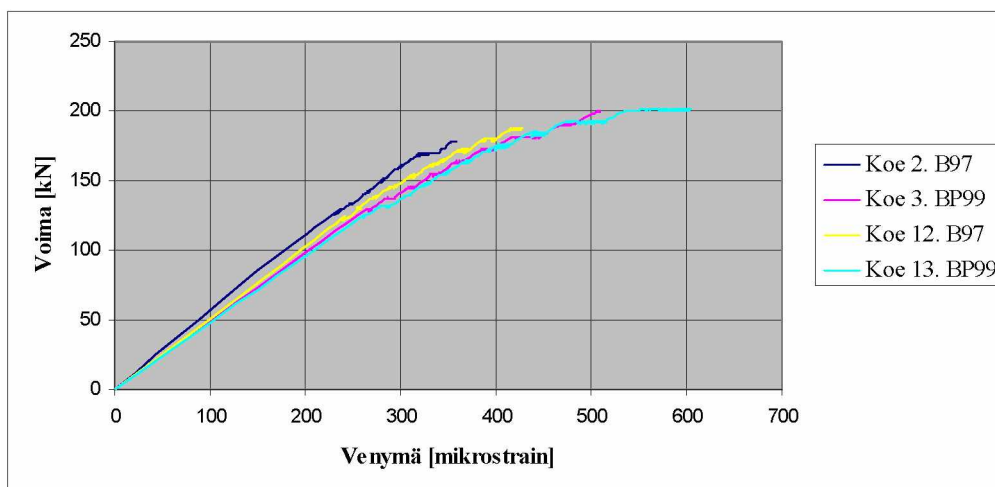
Jokaisessa tehdyssä kuormituskokeessa mitattiin betonin venymiä. Ratapölkkyissä jo olemassa olleet halkeamat muodostuivat ongelmallisiksi venymien mittauksen yhteydessä, vaikka venymien mittaukseen käytetty venymäsilmukka pystyikin jatkamaan mittausta halkeamista huolimatta. Venymämittauksista saadut tulokset ovat

kuitenkin täysin vertailukelpoisia vain niiden ratapölkkyjen osalta, joissa ei ollut halkeamaa ennen kuormittamista ja näidenkin pölkkyjen osalta vain ensimmäisen halkeaman muodostumiseen asti. Kuten kappaleessa 4.5.1 kerrottiin, venymäsilmukka mittaa venymää 100 mm matkalta. Ratapölkkyihin muodostuvat, tai niissä jo ennen kuormittamista olemassa olleet halkeamat eivät välttämättä sijainneet anturin mittausalueella. Tästä johtuen venymämittaustuloksissa saattoi olla suurtakin eroa riippuen siitä oliko halkeama mittausalueella tai esimerkiksi juuri mittausalueen ulkopuolella. Halkeaman muodostuttua anturin mittausalueelle ei halkeaman muodostumisen jälkeen mitattu venymä ollut enää pelkästään betonin venymää vaan mitatuissa venymissä merkittävä osa oli jänneterästen venymää halkeaman kohdalla.

Ratapölkkyyn kohdistuvaa vetoa arvioitaessa tulee huomioida myös esijännityksen aiheuttama puristuma. Esijännityksen aikaansaama puristuma pitää ylittyä ennen kuin betonissa päädytään vedon puolelle. Antti Nurmikolun tekemässä tutkimuksessa [43] määritettiin puristuma BP89-ratapölkylle. BP89-pölkyn ulkomitat kiskon kohdalla ja pölkyn keskellä ovat lähes samansuuruisia verrattuna B97- ja BP99-ratapölkkyihin. Lisäksi punosmäärä ja punoksissa oleva jännitys ovat lähes samat, joten esijännityksen aikaansaama puristuma on sama BP89-, B97 ja BP99-ratapölkkyissä. Näin ollen puristuman suuruus B97- ja BP99-ratapölkkyjen keskiosassa on noin 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  ja kiskon kohdalla suuremman poikkileikkausalan johdosta noin 140  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

### 5.5.1 Ratapölkyn pään kuormituskokeissa mitatut venymät

Kuvassa 53 on esitetty ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa mitatut venymät. B97-ratapölkkyllä ensimmäinen halkeama havaittiin 170 kN kuormitustasolla kokeessa 2 ja 180 kN kuormitustasolla kokeessa 12. Tuolloin mitatut venymät olivat noin 350–400  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vastaavasti BP99-ratapölkkyillä ensimmäinen halkeama havaittiin 180 kN kuormitustasolla kokeessa 3 ja 190 kN kuormitustasolla kokeessa 13. Tuolloin venymät olivat noin 420–470  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Mikäli halkeama muodostui anturin mittausalueelle, alkoivat mitatut venymät kasvaa huomattavasti, kuten kokeen 13 tuloksesta havaitaan.

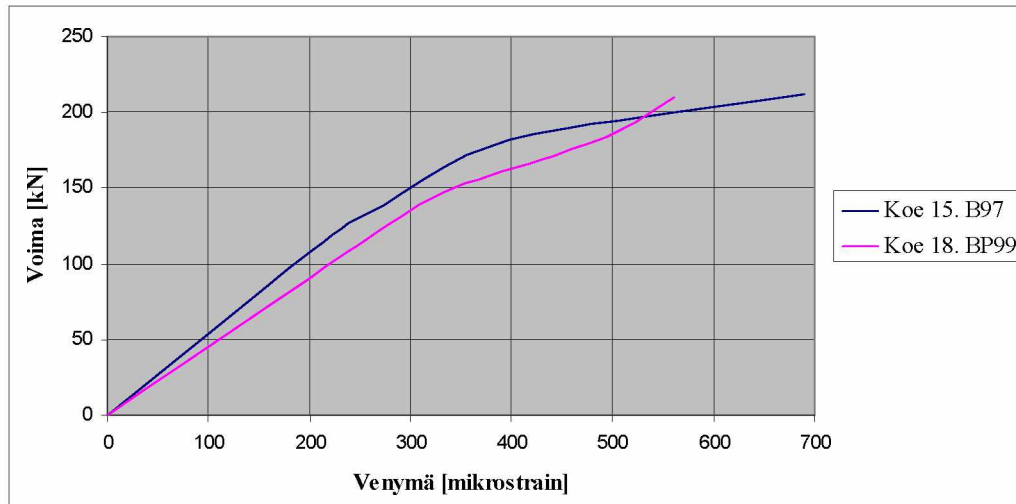


Kuva 53. Venymämittaustuloksia käyttämättömillä ratapölkkytyypeillä ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa.

Kuvassa 54 on esitetty ratapölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa mitatut venymät. B97-ratapölkkyssä ensimmäinen halkeama havaittiin 190 kN kuormitustasolla venymän ollessa tuolloin noin 400  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vastaavasti BP99-ratapölkkyssä ensimmäinen

mäinen halkeama havaittiin vasta 210 kN kuormitustasolla. Tuolloin pölkystä mitatut venymät olivat noin 500  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Dynaamisessa kokeessa mitatut venymät ovat näin ollen samansuuruisia verrattuna staattisissa kuormituskokeissa mitattuihin venymiin.

Venymämittaustuloksissa on huomionarvoista, että ensimmäinen halkeama niin staattisissa kuin dynaamisissa kuormituskokeissa muodostui B97-ratapölkkyyn hieman pienemmällä venymätasolla verrattuna BP99-ratapölkkyyn.



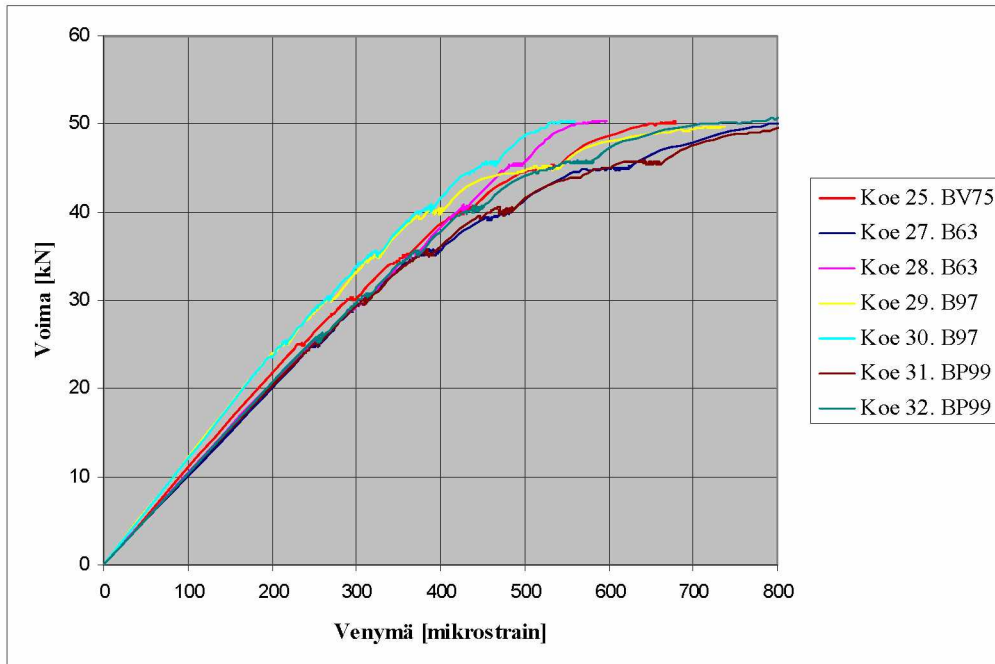
Kuva 54. Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa.

### 5.5.2 Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa mitatut venymät

Kuvassa 55 on esitetty ratapölkkyissä mitatut venymät ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa. Kuvassa olevat venymät ovat pölkkyistä, joissa ei ollut pystysuuntaisia halkeamia ennen kuormittamista.

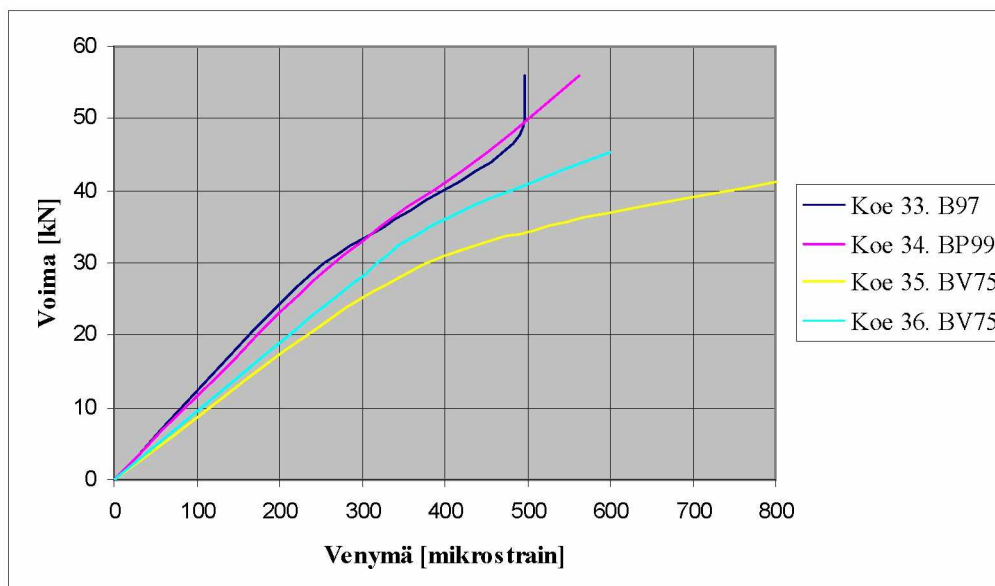
Kuvasta 55 havaitaan, että betoniin muodostuvat venymät kasvoivat suhteellisen tasaisesti aina ensimmäiseen halkeamaan saakka. Kuten pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa, B97-ratapölkkyissä havaittiin halkeama pienimmillä venymätasoilta. Kokeessa 29 havaittiin ensimmäinen halkeama 45 kN kuormitusportaalla. Tuolloin mitatussa venymässä on havaittavissa selkeää kasvua. Vastaavasti kokeessa 30 ensimmäinen halkeama havaittiin 50 kN kuormitustasolla. Näin ollen betonin venymät olivat noin 420–500  $\mu\text{m}/\text{m}$  ensimmäisen halkeaman muodostuessa B97-ratapölkkyyn.

BP99-ratapölkkyillä kokeessa 31 ensimmäinen halkeama havaittiin 45 kN ja 50 kN kuormitustasolla kokeessa 32. Tuolloin betonissa mitatut venymät olivat noin 480–580  $\mu\text{m}/\text{m}$  ollen näin hieman B97-ratapölkkyä suuremmat.



Kuva 55. Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituskokeessa.

Kuvassa 56 on esitetty ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa mitattuja betonin venymiä. Kuvasta voidaan selkeästi havaita halkeamien muodostumiskohdan merkitys venymämittaustuloksiin. Esimerkiksi kokeessa 33 ensimmäinen havaittu halkeama syntyi 45 kN kuormitustasolla venymäanturin ulkopuolelle, jolloin mitattujen venymien kasvu pysähtyi lähes täysin. Vastaavasti ratapölkkyssä kokeessa 35 oli halkeama ennen kuormituskokeen aloittamista ja halkeama sijaitsi anturin mitausalueella. Kuvasta voidaan havaita, että olemassa olleen halkeaman avautuessa venymät kasvoivat voimakkaasti.



Kuva 56. Venymämittaustuloksia eri ratapölkkytyypeillä ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa.

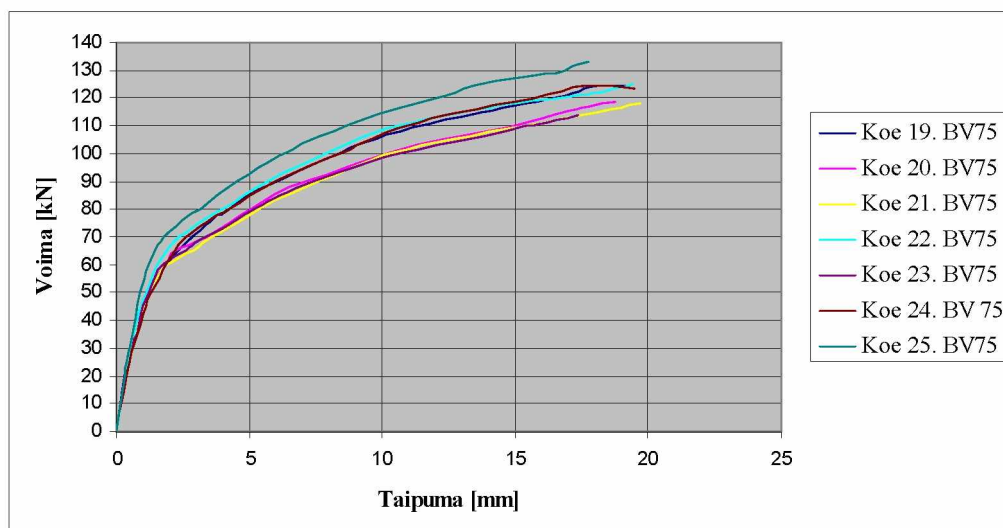
Dynaamisissa pölkyn keskiosan kuormituskokeissa ensimmäinen halkeama havaittiin Bg7- ja BP99-pölkkyissä 45 kN kuormitustasolla. Tuolloin pölkkyistä mitatut venymät olivat noin 450  $\mu\text{m}/\text{m}$  ollen näin hieman pienempiä verrattuna staattisiin kuormituskokeisiin. Vähäisten dynaamisten kuormituskokeiden määrästä johtuen pienempi venymä saattaa selittyä ratapölkkyissä esiintyvillä ominaisuuksien hajonnalla.

Kokeessa 36 BV75-ratapölkkyssä ensimmäinen halkeama havaittiin 35 kN kuormitustasolla mitatun venymän ollessa tuolloin noin 350  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Halkeama muodostui venymäanturin ulkopuolelle. Halkeama on saattanut olla olemassa ennen kuormittamista, mutta ratapölkkyssä oleva esijännitys on pystynyt pitämään sen ummessa aina 35 kN kuormitustasolle asti. Tämä selittäisi selkeästi muita pölkkyjä pienemmän venymän halkeaman havainnointihetkellä.

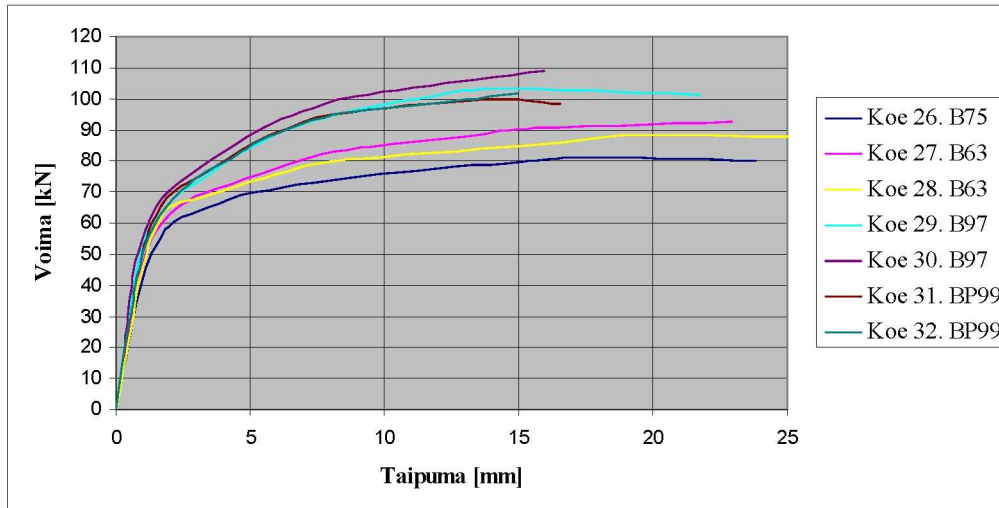
Verrattuna ratapölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa mitattuihin venymiin keskiosan staattisissa kuormituskokeissa ensimmäisen halkeaman syntyessä mitatut venymät olivat hieman suurempia. Tämä selittyy kuitenkin suuremmasta esijännityksen aikaansaamasta puristumasta pölkyn keskellä.

## 5.6 Ratapölkyn taipumat

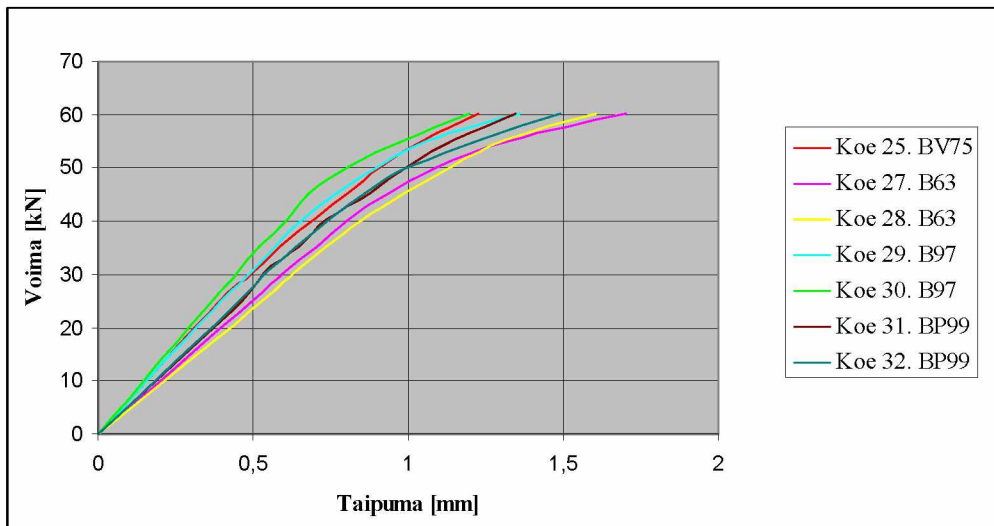
Ratapölkyn keskiosan staattisessa kuormituksessa mitatut taipumat on esitetty kuvasti kuvissa 57 ja 58. Lisäksi kuvassa 59 on esitetty taipumat 60 kN asti ratapölkkyistä, joissa ei ollut halkeamia ennen kuormittamista. Kuvaajissa oleva taipuma ei ole maksimitaipuma vaan keskimmäisten siirtymäantureiden (kuva 37) avulla määritettyjen taipumien keskiarvo. Kokeessa keskimmäiset siirtymäanturit olivat kuitenkin vain 105 mm etäisyydellä kuormituksen keskipisteestä. Tästä johtuen esitettyjen taipumien ero maksimitaipumaan on vähäinen.



Kuva 57. Ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat BV75-ratapölkkyillä.



Kuva 58. Ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat B75-, B63-, B97- ja BP99-ratapölkkyillä.



Kuva 59. Taipumat 60 kN kuormitustasoon saakka ratapölkkyissä, joissa ei ollut halkeamia ennen kuormittamista.

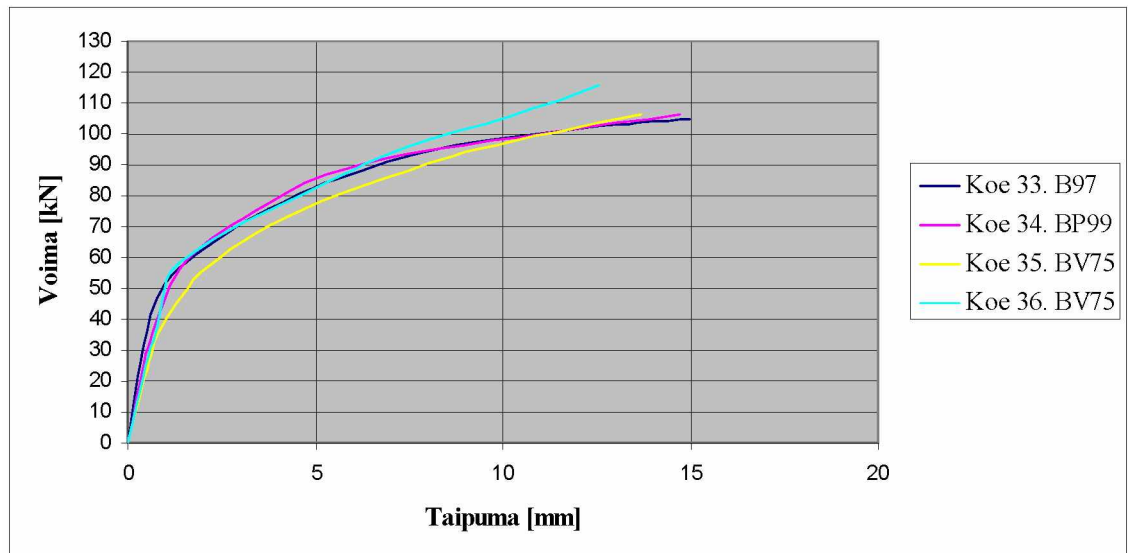
Kuvista 57 ja 58 voidaan huomata ratapölkkytyypistä riippumatta taipumat kasvoivat suhteellisen tasaisesti aina 50–60 kN kuormitustasoon asti. Kuormitustason ollessa 50 kN pölkkytyyppien BV75, B63 ja B75 taipumat olivat 1,1–1,3 mm kuormitetusta pölkystä riippuen. Vastaavasti B97-ratapölkkyjen taipumat olivat 0,8–0,9 mm ja BP99-pölkkyjen 1,0 mm. Yhtenä selittävästä tekijöistä B97- ja BP99-pölkkyjen hieman suurempaan jäykkyyteen kuormituskokeen ensimmäisillä voimaportailta on käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä esiintyneet käytön aikana syntyneet pystysuuntaiset halkeamat. Halkeamat alkoivat avautua kuormien noston yhteydessä aiheuttaen hieman nopeampaa taipumien kasvua. Kuormitustason noustessa yli 60 kN alkoivat B63- ja B75-ratapölkkyjen taipumat kasvamaan muita pölkkytyyppejä nopeammin.

Ratapölkyn keskiosan taipumissa huomionarvoista on taipumien suuruus suurimmilla ratapölkkyjen kuormitustasoilla. Tuolloin B97- ja BP99-ratapölkkyissä taipumat olivat noin 15 mm ja BV75-ratapölkkyillä noin 17–19 mm. Suurimmat taipumat muodostuivat B63- ja B75-pölkkyihin, joissa ne olivat noin 23–25 mm. Lisäksi huomionarvoista on eri ratapölkkytyypeillä ensimmäisen halkeaman havainnointitihetkellä mitattu taipu-



ma. Kyseinen taipuma oli pölkkytyypistä riippumatta vain noin 0,8–1 mm. Yhden millimetrin taipuman muodostuminen ratapölkkyyn todellisissa olosuhteissa on mahdollista tai jopa todennäköistä.

Kuvassa 60 on esitetty kootusti ratapölkyn keskiosan dynaamisista kuormituskokeista mitatut taipumat. Kuten staattisissa kuormituskokeissa taipuma ei kuvaa maksimitaipumaa vaan keskimmäisten siirtymäanturien (kuva 38) keskiarvona määritettyä taipumaa.



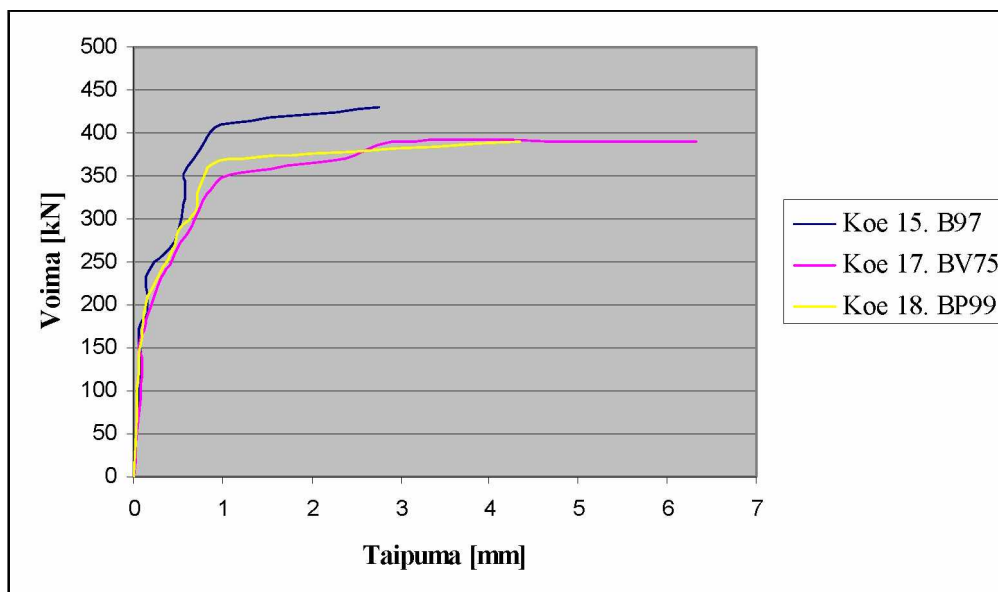
Kuva 60. Ratapölkyn keskiosan dynaamisessa kuormituskokeessa mitatut taipumat.

Dynaamisessa kuormituskokeessa taipumat kasvoivat kokeissa 33, 34 ja 36 tasaisesti noin 50 kN asti, minkä jälkeen taipumien kasvunopeus suhteessa kuormitustasoon kiihtyi huomattavasti. BV75-ratapölkkyllä kokeessa 35 taipumat kasvoivat 35 kN kuormituksen jälkeen hieman muita pölkkyjä nopeammin.

Huomionarvoista dynaamisissa kuormituskokeissa mitatuissa taipumissa on taipumat juuri ennen murtoa. B97- ja BP99-pölkkyissä taipuma oli noin 15 mm, mikä vastasi kyseisillä pölkkytyypeillä staattisissa kokeissa juuri ennen murtoa mitattua taipumaa. BV75-pölkkyillä dynaamisissa kokeissa mitattu taipuma ennen murtoa oli kuitenkin noin 5 mm pienempi verrattuna staattisiin kuormituskokeisiin.

Ratapölkyn pään kuormituskokeissa taipumien mittaus muodostui ongelmalliseksi. Toisin kuin pölkyn keskiosan kuormituskokeissa pölkky ei ennen kuormien nostoa sijainnut tasapainossa pölkyn alapuolisten tukien päällä. Ratapölkkyä ei myöskään voitu tukea vaakatasoon ennen kuormien nostoa, sillä pölkyn alapuolisten tukien ja pölkyn välissä olevat kumit alkoivat painumaan heti kuormitusta nostettaessa. Tämä olisi aiheuttanut kuorman jakautumisen kolmen tuen kesken, jolloin pölkkyyn muodostuvat rasitukset olisivat eronneet merkittävästi tavoitellusta. Tästä johtuen kuormien noston yhteydessä ratapölkky saattoi liikkua, mikä aiheutti virhettä siirtymiin. Lisäksi ratapölkyn alapinta on hyvin epätasainen mikä aiheuttaa ratapölkyn kallistumista ja kiertymistä kuormituksen aikana. Käytetty anturisijoittelu ei pystynyt täysin poistamaan kiertymien ja kallistuman aiheuttamaa virhettä mitattuihin taipumiin. Lisäksi siirtymäanturisignaalien vahvistukseen käytetty vahvistin aiheutti taustakohinaa. Kohina saattoi aiheuttaa enimmillään 0,1–0,2 mm heiton yksittäiseen siirtymämittaukseen. Edellä mainitut virhetekijät ja ratapölkyn päähän muodostuvat erittäin

pienet siirtymät aiheuttivat suuren epäluotettavuustekijän kuormituskokeiden siirtymämittauksiin. Hyvänä esimerkkinä tästä on kuvassa 61 esitetyt pölkyn pään dynaamisissa kuormituskokeissa mitatut taipumat.



Kuva 61. Ratapölkyn pään dynaamisessa kuormituskokeessa mitatut taipumat.

Kuvassa 61 esitetyistä ratapölkyn taipumista voidaan kuitenkin havaita, että ratapölkyn taipumat kasvoivat erittäin hitaasti aina noin 1 mm:iin asti. Tämän jälkeen taipumat kasvoivat erittäin voimakkaasti ollen ennen murtoa 3–6 mm pölkkytyypistä riippuen. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ratapölkkyistä mitatut taipumat olivat ainoastaan noin 0,15–0,2 mm.

## 5.7 Pakkassuolakokeet

Pakkassuolakokeet tehtiin luvussa 4.7 esitetyllä tavalla. Pakkaskestävyyysluku määritettiin yksittäisestä ratapölkystä otetun kolmen näytteen tilavuuden keskiarvon perusteella.

*Pakkassuolakoetuloksia arvioitaessa on huomioitava käytetyn suolaliuoksen epäpuhtaudet (luku 4.7). Epäpuhtaudet saattoivat aiheuttaa erittäin voimakasta rapautumista reagoidessaan käytetyn sementin tai kiviaineksen kanssa. Tätä voimakasta rapautumista ei välttämättä olisi tapahtunut vähemmän epäpuhtauksia sisältävässä liuoksessa.*

BV75-ratapölkkyt saavuttivat yhtä näyte-erää lukuun ottamatta (taulukko 11) Esijännitettyjen betoniratapölkkyjen teknisten toimitusehtojen [54] asettaman pakkaskestävyyksluvun 25. Kokeessa 10 olleessa näyte-erässä pakkaskestävyyysluku oli ainoastaan 3, mikä tarkoittaa noin 33 % tilavuudenmuutosta. Näyte-erän 10 tilavuuden muutos verrattuna toisiin BV75:stä tehtyihin kokeisiin oli lähes samansuuruista, eli alle 1 %, aina 35 jäädytys-sulatussykliin saakka. Tämän jälkeen rapautuminen kiihtyi voimakkaasti tilavuudenmuutoksen ollessa 45 syklin kohdalla lähes 16 % ja 50 syklin kohdalla 33 %. Mahdollisena selittävänä tekijänä voimakkaalle rapautumiselle saattoi olla näytteissä mahdollisesti olemassa olleet säröt. Säröt saattoivat aiheuttaa voimakkaan pakkassuolarasituksen kanssa näytteen tilavuuteen nähden suurehkojenkin betonikappaleiden irtoamisen. Täysin tämä ei kuitenkaan selitä suurta tilavuuden

muutosta. Kyseisen näyte-erän betoni on mahdollisesti pakkastakestämätöntä, mikäli suolaliuoksen epäpuhtaudet eivät aiheuttaneet kokeessa poikkeuksellisen voimakasta rapautumista. Muut BV75:sta otetut näyte-erät täyttivät asetetut kriteerit selkeästi keskimääräisen tilavuudenmuutoksen vaihdella 0,3-1,1 % välillä.

*Taulukko 11. BV75-betoniratapölkkyjen pakkasenkestävyyssluvut. Taulukossa oleva koenumero vastaa staattisissa pölkyn pään kuormituskokeissa käytettyä koenumeroa.*

	BV75 Koe 3	BV75 Koe 6	BV75 Koe 7	BV75 Koe 8	BV75 Koe 9	BV75 Koe 10	BV75 Koe 11
<b>Pakkasenkestävyyssuku</b>	139	317	137	88	247	3	99

B97- ja BP99-ratapölkkyistä otetut näytteet rapautuivat erittäin voimakkaasti 10 - 25 jäädytys-sulatussyklin aikana ollen lähes täysin rapautuneita 25 syklin jälkeen. Rapautumisen etenemisen näkee selkeästi kuvista 62 ja 63, jotka on otettu 17 ja 25 syklin jälkeen. Voimakkaasta rapautumisesta huolimatta betonia ei voida ennen lisäkokeita luokitella pakkasta kestävämmäksi. Syynä tähän on pakkassuolakokeissa käytetyn suolan epäpuhtaudet (luku 4.7), mitkä nykyään betonissa käytettävän sementin tai kiviaineksen kanssa saattavat aiheuttaa erittäin voimakkaan, mutta kokeeseen kuumattoman rapautumisreaktion.



*Kuva 62. Rapautunut näyte-erä 17 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen.*



Kuva 63. Rapautunut näyte-erä 25 jäädytys-sulatus-syklin jälkeen.

B63- ja B75-ratapölkyistä otetut näytteet rapautuivat samankaltaisesti kuin käyttämättömistä ratapölkyistä otetut näytteet. B63:sta otetut näytteet eivät olleet 10 pakas-suolasyklin jälkeen menettäneet tilavuudestaan paljoakaan, mutta jo 25 syklin jälkeen tilavuus oli pienentynyt noin 46 %. B75:stä otetut näytteet rapautuivat selkeästi hitaammin. 25 syklin jälkeen tilavuus oli pienentynyt 1,8–3,5 % minkä jälkeen rapautuminen kiihtyi erittäin voimakkaasti. 35 syklin kohdalla tilavuuden muutos vaihteli 75 %:sta lähes täysin rapautuneeseen. Myös B63- ja B75-ratapölkyjen betonille joudutaan kuitenkin suorittamaan lisäkokeita, jotta voidaan pois sulkea käytetyn suolan mahdollisesti aiheuttama voimakas rapautuminen.

## 6 Päätelmät ja jatkotutkimusehdotukset

### 6.1 Rapautuminen ja valmistus

Kirjallisuustutkimuksen perusteella merkittävä ratapölkkyjen käyttökään 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 alkali-kiviainesreaktio. 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 voi myös aiheuttaa alkali-kiviainesreaktio, jonka yleisin muoto on alkali-silikareaktio. Alkali-silikareaktio on aiheuttanut laajoja rapautumisvaurioita mm. Kiinassa. Suomessa kyseistä rapautumismuotoa ei ole havaittu ongelmaksi. Syynä on Suomessa käytettävä kiviaines, mikä ei ole erityisen altis aiheuttamaan alkali-kiviainesreaktiota.

Suomessa merkittävin rapautumisen muoto on pakkasrapautuminen. Osassa 1960- ja 1970-luvuilla valmistetuissa ratapölkkyissä rapautuminen on ollut ongelma. Syynä on pakkasrapautumisen ja ettringiitin yhteisvaikutus, mikä on aikaansaanut voimakastakin rapautumista. Kuitenkin osana kokeellista tutkimusta tehdyissä pakkassuolakokeissa BV75-ratapölkkyt vastustivat rapautumista yhtä poikkeusta lukuun ottamatta erittäin hyvin. Nykyään Suomessa valmistettavissa ratapölkkyissä ei ole juurikaan havaittu rapautumisen aiheuttamia vaurioita. Tästä johtuen tämän työn yhteydessä tehdyistä pakkassuolakokeista saadut tulokset ovat ristiriitaisia radalla tehtyjen havaintojen kanssa. Syynä tähän saattaa olla pakkassuolakokeissa käytetyn suolan epäpuhtaudet, jotka mahdollisesti aiheuttivat poikkeuksellisen voimakkaan rapautumisreaktion kokeen aikana. Tästä johtuen pakkassuolakokeista saadut tulokset pitää varmistaa lisäkokeilla.

Valmistuksen aikaiset vauriot 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.

### 6.2 Kuormituskäyttäytyminen

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 koh-

dalle ratapölkyn alareunaan. Arviota tukee osana tätä työtä olevien kuormituskokeiden aikana tehdyt havainnot. Kuormituskokeissa havaittiin, että jokaisessa tarkastelussa käytöstä poistetussa ratapölkkyssä oli halkeama kiskon lepopinnan kohdalla pölkyn alapinnassa. Olemassa olleen halkeaman pituus pölkyn sivuilla vaihteli noin 30–100 mm välillä, mutta halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja näin ollen erittäin hankalia havaita ennen kuormittamista. Halkeaman merkityksen arvioiminen ratapölkyn lujuusominaisuuksiin on erittäin hankalaa, sillä kuormituskokeissa ei ollut saman ratapölkkytyypin pölkkyjä sekä haljenneena että halkeamattomana. Tästä syystä vertailu jouduttiin tekemään tällä hetkellä Suomen rataverkolle hankittaviin uusiin ratapölkkyihin. Kuormituskokeista saatujen tulosten perusteella voidaan esittää arvio, että yksittäisillä halkeamilla ei ole juurikaan merkitystä ratapölkyn ollessa staattisen kuormituksen alaisena.

Kirjallisuuslähteissä on esitetty halkeamien aiheuttavan jänneterästen väsymistä ja tätä kautta jänneterästen väsymismurron. Lisäksi on esitetty arvioita halkeamien merkityksestä jänneterästen korroosion nopeutumiseen. Kuormitettujen ratapölkkyjen jänneteräksissä ei kuitenkaan havaittu poikkeavia korroosion merkkejä halkeaman kohdalla. Tämä selittyy sillä että halkeama on pölkkyssä olevan esijännityksen johdosta ummessa silloin, kun ratapölkkyä ei kuormiteta. Tämän perusteella voidaan arvioida, että halkeamalla ei ole juurikaan merkitystä jänneterästen korroosioon silloin, kun jännevoima pystyy sulkemaan halkeaman.

### 6.2.1 Pölkyn pään kuormituskäyttäytyminen

Käyttämättömien ratapölkkyjen B97:n ja BP99:n staattisessa pölkyn pään kuormituskokeessa saadut kuormitustasot pysyvän 0,05 mm halkeaman syntymiselle vaihtelivat 310–400 kN välillä, kun taas BV75-ratapölkkyissä pysyvä halkeama muodostui keskimäärin hieman suuremmalla kuormitustasolla. Kuormat olivat tuolloin 370–460 kN pölkystä riippuen. Selkeästi kuormituskestävyydeltään heikommalla ratapölkkytyypillä B63 ja B75 vaativat 200–250 kN kuorman ennen pysyvän 0,05 mm halkeaman muodostumista. Vastaavasti murtokuorma vaihteli B97- ja BP99- pölkkyillä 480–565 kN välillä kun taas BV75-pölkkyillä murtokuorma vaihteli 465–548 kN välillä. Selkeästi heikoimpina olivat B63- ja B75-pölkkyt, joiden murtokuorma vaihteli 300–397 kN välillä.

Dynaamisissa pölkyn pään kuormituskokeissa kuormituskoetulokset olivat staattisiin kuormituskokeisiin verrattuna pienempiä. B97- ja BP99-ratapölkkyissä pysyvä leveydeltään 0,05 mm halkeama syntyi 290 kN kuormitustasolla ja murto tapahtui 390–430 kN kuormitustasolla. Kuormitustasot BV75-pölkkyillä olivat 230–270 kN 0,05 mm pysyvän halkeaman muodostuessa ja 310–390 kN murron tapahtuessa. Kuormituskokeissa BV75-ratapölkkyjen kuormituskoetuloksissa oli suuri hajonta. Halkeaman merkitystä ei voida luotettavasti arvioida dynaamisen pölkynpään kuormituskokeen osalta, sillä testatut pölkkyt määrät olivat vähäiset. Varovainen arvio voidaan kuitenkin esittää, sillä alhaisemman tuloksen antaneessa ratapölkkyssä olemassa ollut halkeama oli pituudeltaan selkeästi pidempi verrattuna toiseen BV75- ratapölkkyyn. Edellä mainitusta johtuen halkeaman pituudella saattaa olla suurtakin merkitystä ratapölkyn ollessa suurten dynaamisten kuormien alaisena.

Pölkyn pään kuormituskokeiden aikana mitatuissa venymissä ensimmäisen halkeaman syntyessä oli vaihtelua pölkkytyypistä riippuen. B97-pölkkyissä ensimmäinen halkeama havaittiin kiskon lepopinnan kohdalla venymien ollessa noin 350–400  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vastaavasti BP99-pölkkyissä mitatut venymät olivat tuolloin noin 420–

470  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Venymämittaustulosten perusteella BP99-ratapölkky kestää hieman suurempia betonin venymiä verrattuna B97-ratapölkkyyn.

Yhteenvedona pölkyn pään kuormituskokeiden osalta voidaan todeta, että B97- ja BP99- ratapölkkyt täyttivät standardin SFS-EN 13230-2 asettamat kriteerit hyvin ja BV75-ratapölkkyt niiden ikä huomioiden erittäin hyvin. B63- ja B75-pölkkyt kestivät selkeästi heikommin muihin testattuihin pölkkytyyppeihin verrattuna, mutta silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden niidenkin kuormankantokyky oli vähintäänkin tyydyttävä.

### 6.2.2 Pölkyn keskiosan kuormituskäyttäytyminen

Mahdollinen vaurioiden aiheuttaja ratapölkkyihin on tukikerroksen ominaisuuksien heikkeneminen mm. 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. Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa tehdyt havainnot tukevat kirjallisuudessa esitettyjä väitteitä. Useissa käytöstä poistetuissa ratapölkkyissä oli halkeamia pölkyn keskellä yläpinnassa. Kuten pölkyn pään staattisissa kuormituskokeissa, halkeamat olivat lähes täysin ummessa ja näin ollen erittäin hankalia havaita. Kuormien noston yhteydessä halkeamat kuitenkin avautuivat ja jatkoivat kasvua. Kuormituskokeiden tulosten perusteella voidaan kuitenkin esittää oletamus, että yksittäisillä halkeamilla ei ole suurta vaikutusta ratapölkyn lujuusominaisuuksiin staattisen kuormituksen alaisuudessa.

Ratapölkyn keskiosan staattisissa kuormituskokeissa B97- ja BP99-ratapölkkyt täyttivät standardin SFS-EN 13230-2 asettamat kriteerit. Ensimmäistä halkeamaa vastaava kuormitustaso vaihteli 45–50 kN välillä ja murtokuorma vaihteli 100–109 kN välillä. Murtokuorman perusteella arvioitaessa kestävin pölkkytyyppi oli BV75, minkä murtokuorma oli välillä 114–133 kN. BV75-ratapölkkyissä oli yhtä poikkeusta lukuun ottamatta käytön aikana syntyneitä halkeamia, joten kuormitustaso jolla ensimmäiset halkeamat syntyvät on vaikeasti arvioitavissa. Kuten pölkyn pään kuormituskokeissa, selkeästi heikoimmat ratapölkkytyypit olivat B63 ja B75. Kyseisten pölkkyjen murtokuormat vaihtelivat 81–93 kN välillä. Mainittavaa on kuitenkin, että kyseiset pölkkyt olivat kuormien alla käyttäytymiseltään hyvin samanlaisia aina 60 kN asti verrattuna muihin kuormitettuihin pölkkytyyppeihin.

Ratapölkyn keskiosan dynaamisista kuormituskokeista saadut tulokset eivät eronneet merkittävästi keskiosan staattisista kuormituskokeista saatuihin tuloksiin. Vähäisestä testausmäärästä huolimatta voidaan kuitenkin esittää arvio, että kuormituskokeissa dynaamisten kuormien merkitys ratapölkyn keskiosaan ei ole yhtä merkittävä kuin dynaamisten kuormien merkitys pölkyn päähän.

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa muodostuneissa taipumissa huomionarvoista on taipuma, joka vaaditaan halkeaman muodostumiseen. Kokeissa saatujen taipumatulosten perusteella jo noin yhden millimetrin taipuma riittää aikaansaamaan halkeaman pölkyn keskelle. Epätasaisen routanousun tai muutoin tukikerroksen ominaisuuksien heiketessä yhden millimetrin taipuman muodostuminen ratapölkkyyn todellisissa olosuhteissa on mahdollista tai jopa todennäköistä.

Ratapölkyn keskiosan kuormituskokeissa venymät olivat ensimmäisen halkeaman muodostuessa B97-ratapölkkyllä noin 420–500  $\mu\text{m}/\text{m}$  ja BP99-ratapölkkyissä noin 480–580  $\mu\text{m}/\text{m}$ . B63-, B75- ja BV75-ratapölkkyissä mitatut venymät vaihtelivat ensimmäisen halkeaman havainnointihetkellä noin 350–500  $\mu\text{m}/\text{m}$  välillä. Mitatut venymät ovat hieman suurempia verrattuna pölkyn pään kuormituskokeisiin. Tämä selittyy kuitenkin suuremmasta esijännityksen aiheuttamasta betonin puristumasta ratapölkyn keskellä. Tällöin pölkyn keskiosaan syntyy hieman suuremmat venymät ennen ensimmäistä halkeamaa.

Yhteenvedona ratapölkyn keskiosan kuormituskokeista voidaan todeta, että ratapölkyn keskiosan kuormituskokeiden perusteella BV75-pölkkyt ovat vähintään yhtä kestäviä kuin nykyään Suomen rataverkolle hankittavat B97- ja BP99-pölkkyt. Myös B63- ja B75-ratapölkkyt kestivät niiden silmämääräisesti arvioitu kunto huomioiden yllättävän hyvin pölkyn keskiosan kuormituskokeet.

## 6.3 Jatkotutkimusehdotukset

Tutkimuksen tuloksena jatkotutkimuksissa tarkasteltavaksi suositellaan seuraavia aiheita:

- Pakkasrapautuminen, pakkas-suolakokeiden varmistus.
- Ratapölkkyissä esiintyvien halkeamien merkitys standardin SFS-EN 13230-2 mukaisessa väsytyksen-kuormituskokeessa.
- Pohjainten merkitys ratapölkkyyn ja tukikerrokseen kohdistuvien rasitusten pienentämisessä.
- Epätasaisen routanousun vaikutus ratapölkyn taipumiin ja venymiin kenttämittauksin.
- Vaurioiden merkityksen testaaminen kuormituskokein, kun ratapölkkyt ovat samaa tyyppiä, mutta eriasteisesti vaurioituneita.
- Nopean ja luotettavan betoniratapölkyn kunnon arviointimenetelmän kehittämisen visuaalisen arvioinnin tueksi.



## Lähdeluettelo

- 1 Asanuma, K. Ladder track structure and performance. *Railway Technology Avanche* No.6, September 1, 2004, 3 p.
- 2 Augustin, S., Gudehus, G., Huber, G. & Schünemann, A. Numerical model and laboratory tests on settlement of ballast track. In *System Dynamics and Long-term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade*, Berlin, 2003, pp. 317–336.
- 3 Bakharev, T.& Struble, L.J. Microstructural Features of Railseat Deterioration in Concrete Ties. *Journal of materials in civil engineering*, August, 1997, pp. 146-153.
- 4 Bonnett, C.F. *Practical Railway Engineering – second edition*. Imperial College Press, 2005, 190 p.
- 5 Blomberg, L. Pituussuuntaan haljenneet ratapölkkyt. Muistio, 10.12.2001 7 s.
- 6 By 32. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus. BY, Suomen Betoniyhdistys r.y. 1989.
- 7 Collepardi, M. Damage by delayed ettringite foration. *ACI's Concrete International*, January 1999, 6 p.
- 8 Conzalez-Nicieza, C., Alvarez-Fernandez, M.I., Menendez-Diaz, A., Alvarez-Vigil, A.E. & Ariznavarreta-Fernandez, F. Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks. *Engineering Failure Analysis* 15, 2008, pp. 90-117.
- 9 Esveld, C., *Modern Railway Tack – Second Edition*, MRT-productions, 2001, 654 p.
- 10 FIP Commission on Prefabrication. *Concrete railway sleepers. FIP state of art report*, Thomas Telford, London, 1987, 22 p.
- 11 Freudenstein, S. Ballasted track systems for high speed traffic. *The European railway review conference*, Berlin, Germany, September, 24<sup>th</sup> , 2004, 6 p.
- 12 Freudenstein, S. & Haban, F. Prestressed concrete sleepers. *European Railway Review*, 2006, pp.73-79.
- 13 Freudenstein, S. & Romstötter, M. Wide sleeper perform well in comparative tests. *International Railway Journal*, May, 2004 pp. 44-46.
- 14 Gerwick, B.C. *Construction of Prestressed Concrete Structures – second edition*. John Wiley & Sons, 1997, pp.616.
- 15 Grundfelt, P. *Betoniratapölkkyjen rapautuminen. Rautatieopillinen kurssi*, 1980
- 16 Grundfelt, P. *Betoniratapölkyn pidentäminen 2500 mm:stä 2600 mm:iin*. Muistio, Valtionrautatiet, Rtt/Raidejaosto, 1985

- 17 Gustavson, R. Experimental studies of bond response of three-Wire strands and some influencing parameters. *Materials and Structures* Vol. 37, March, 2004, pp.96-106.
- 18 Gustavson, R. *Structural Behaviour of Concrete Railway Sleepers*. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2002.
- 19 Hakulinen, M. *Teräs pohja- ja maarakentamisessa*. Oppimateriaali, 2003, 114 s.
- 20 Haukijärvi, M. *BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus*. Suomen betoniyhdistys r.y., 2002 174 s.
- 21 Heinz, J. *Prestressed concrete tie production*. 36 p.
- 22 Holm, G., Bengtsson, P-E., Carlsten, P., Johansson, L. O. & Larsson, R. *Befintliga banker vid ökad tåglast och högre tåghastighet. Statusbestämning av befintliga banker. Förbättringsoch 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.
- 23 Iso-Mustajärvi, P. *Betonitekniikka*. Luentomoniste, 2004.
- 24 Jaakkola, R., *tehdaspäällikkö*, Lujabetoni Oy. Siilinjärvi. Haastattelu 25.1.2010
- 25 Järveläinen, M., *tehdaspäällikkö*, Parma Oy. Forssa. Haastattelu 13.1.2010
- 26 Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M. Effect of a large asymmetrical wheel burden on flexural response and failure railway concrete sleepers in track system. *Engineering Failure Analysis* 15, 2008, pp. 1065-1075.
- 27 Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M. Impact damage classification of railway prestressed concrete sleepers. Conference on Railway Engineering, Perth, Australia, September 10-12, 2008, pp. 97-102.
- 28 Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M. Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system. *Proc. IMechE Vol.221 Part F:J. Rail and Rapid Transit.*, 2007, pp. 495-507.
- 29 Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M. Progressive failure of prestressed concrete sleepers under multiple high-intensity impact loads. *Engineering Structures* 31, 2009, pp.2460-2473.
- 30 Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M. Relationship between impact energy and fracture toughness of prestressed concrete railway sleepers. The 24<sup>th</sup> Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, Luna Park, Sydney, Australia, September 17-19, 2009 10 p.
- 31 K-Betonia Oy, *B86 –Betoniratapölkkyjen työmenetelmäselostus*, Hämeenlinna, 1986, 4 s.

- 32 Lahti, O. Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella. Ratahallintokeskuksen julkaisu A12, 2008, 90 s.
- 33 Lehtomäki, J. Liikkuva kalusto. 1999, 54 s.
- 34 Lei, X. & Mao, L. 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), 2004, pp. 1133-1146.
- 35 Leong, J.& Murray, M.H. Probabilistic analysis of train-track vertical impact forces. *Institution of Civil Engineering, Transport [6]*, 2008 pp.15-21.
- 36 Lundqvist, A. & Dahlberg, T. Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proc. IMechE Vol. 219 Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2005, pp.67-77.
- 37 Mangesh, S., Shruti, D.P., Parijat, M., Nakul, B. & Sandeep, G.P. Prestressed concrete sleeper. *National Institute of Technology Karnataka. India*, 17 p.
- 38 Marx, L., Moßmann, D. & Kullmann, H. Work procedures for maintenance of the permanent way of the DB Netz AG – 6<sup>th</sup> revised and supplemented edition. *Heidelberg-Mainz and Deutsche Bahn AG*, 2003, 792 p.
- 39 Menegotto, M. A Presentation of fib Commission 6 “ Prefabrication”. São Carlos, Espanja, 3-4 November, 2005, 6 p.
- 40 Mittalaitteet. [Viitattu 20.4.2010]. Saatavissa: <http://www.novotechnik.com/catalogs/pdfs/TRTRS.pdf>.
- 41 Mundrey, J.S. *Railway track engineering – Third Edition*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2000, 659 p.
- 42 Nummelin, M. & Ojanperä, K. *Betoniratapölkkyjen kiskonkiinnitysten teknistaloudellinen vertailu*. Ratahallintokeskus, 1996, 5 p.
- 43 Nurmikolu, A. *Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaus erillaisilla tukikerroksilla*. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet, 2007, 47 s.+ 12 .
- 44 Nurmikolu, A., Kerokoski, O., Rantala, T. & Viitala, T. Cyclic loading tests of concrete sleepers with varying ballast condition. *ASME Joint Rail Conference, Urbana, Illinois, USA*, 27-29 April, 2010, 9 p.
- 45 Nielsen, J.C.O. & Igeland, A. Vertical dynamic interaction between train and track – Influence of wheel and track imperfections. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, pp.825-839.
- 46 Pandrol e-kiinnitys. [Viitattu 24.1.2010]. Saatavissa: <http://www.pandrol.com/html/products/eclip.htm>.
- 47 Pandrol e-kiinnitys. [Viitattu 24.1.2010]. Saatavissa: <http://www.pandrol.com.au/html/products.html>.


- 48 Parma ja Ratahallintokeskus sopineet ratapölkkytoimitusten jatkosta. Eero Kujala, yksikönjohtaja. [Viitattu 21.2.2010]. Saatavissa: <http://www.parma.fi>.
- 49 Pihlajavaara, S. E. Betonin karbonatisoitumisesta. Rakennustaito 9, 1970, pp.337-338.
- 50 Precast concrete railway track systems. Fib state of the art report, bulletin 37, 2006 34 p.
- 51 Profillidis, V. A. Railway Engineering, 2. ed. Aldershot: Ashgate, cop. 2000, 291 p.
- 52 Quinhua, J., Weiqing, L. & Liang, T. Investigations on concrete railway ties suffering from alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research Vol.27 No1, 1997, pp. 107-113.
- 53 Raideruuvien käyttö kiilattaessa SKL14-kiinnitystä. 1999
- 54 Ratahallintokeskus, Esijännitetyt betoniratapölkkyt: Betoniratapölkkyjen tekniset toimitusehdot. 2008.
- 55 Ratahallintokeskus, Joustavat Vossloh-kiskonkiinnitykset. 7 s.
- 56 Ratahallintokeskus, Raidetutkimus 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Julkaisu A3, 2001, 90 s.
- 57 Ratahallintokeskus, Ratatekniset ohjeet radan päällysrakenne (RATO 11). 2002, 87 s.
- 58 Ratahallintokeskus, Useat takuutarkastusraportit.
- 59 Ratahallintokeskus, Vossloh Skl 14-kiskonkiinnityksen holkin irtoaminen ja vaihto. 1999.
- 60 Remennikov, A.M. & Kaewunruen, S. Experimental determination of energy absorption capacity for prestressed concrete sleepers under impact loads. 4<sup>th</sup> International Conference on Structural Engineering and Construction, Melbourne, Australia, September 26-28, 2007, pp.381-386.
- 61 Remennikov, A. & Kaewunruen, S. Simulating shock loads in railway track environments: experimental studies. 14<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibrations, Cairns, Australia, July 9-12, 2007, 8 p.
- 62 Remennikov, A.M., Murray, M.H. & Kaewunruen, S. 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.
- 63 Riessberger, K. Frame sleeper adapt ballasted track to modern needs. Railway Gazette International, February, 2000, pp. 92-94.

- 64 Sadeghi, J.M. & Babaei, A. Structural optimization of B70 railway prestressed concrete sleepers. Iranian Journal of Science and Technology Transaction B Engineering Vol. 30, August, 2006, pp.461-473.
- 65 Sadeghi, J.M. Experimental evaluation of accuracy of current practices in analysis and design of railway track sleepers. Canadian Journal of Civil Engineering, 35, 2008, pp.881-893.
- 66 Sahu, S. & Thaulow, N. Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. Cement and Concrete Research 34, 2004, pp.1675-1681.
- 67 SFS 5449 Betoni. Säilyvyys. Pakkas-suolakestävyys.
- 68 SFS-EN 13230 Railway applications. Track concrete sleepers and bearers. Part 1-2. European committee for standardization. 2009.
- 69 SILKO 1.201 Betoni – yleisohje
- 70 Skoglund Kjell Arne, Sähköpostitiedonanto– Antti Nurmikolu 18.5.2010, viitattu 9.6.2010.
- 71 Stark, J. & Bollmann, K. Delayed Ettringite Formation in Concrete. Bauhaus-University, Weimar, Germany, 25 p.
- 72 Tepponen, P. & Eriksson, B.-E. Damages in concrete railway sleepers in Finland. Nordic concrete research No. 6, 1987, pp. 199-209.
- 73 Thun, H. Assessment of Fatigue Resistance and Strength in Existing Concrete Structures, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2006
- 74 Thun, H., Utsi, S., Elfgren, L., Nilsson, P. & Paulsson, B. 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.
- 75 Tohmajärven suojelualueella haljenneiden betoniratapölkkyjen tutkiminen. Tutkimusraportti, 1999 , 8 s.
- 76 Twin-block sleeper. [Viitattu 5.3.2010]. Saatavissa: <http://www.railway-technical.com/Track-twin-block.gif>.
- 77 Twin-block sleeper. [Viitattu 5.3.2010]. Saatavissa: <http://www.consolis.com/files/pictures/TGVParis2.jpg>.
- 78 UIC CODE 713. Design of monoblock concrete sleepers. 1<sup>st</sup> edition, November 2004.
- 79 Vossloh kiskonkiinnitys. [Viitattu 24.3.2010]. [http://www.vossloh-fastening-systems.de/cms/en/products/system\\_w14/system\\_w14.html](http://www.vossloh-fastening-systems.de/cms/en/products/system_w14/system_w14.html).


- 80 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>
- 81 Zeman, J.C., Edwards, J.R., Barkan, C.P.L. & Lange, D.A. Failure Mode and Effect Analysis of Concrete Ties in North America. International Heavy Haul Conference, Shanghai, China, June 2009, 10 p.
- 82 Zeman, J.C., Edwards, J.R., Lange, D.A. & Barkan, C.P.L. Investigating the Role of Moisture in Concrete Tie Rail Seat Deterioration. Annual AREMA Conference, 2009, 21 p.
- 83 Zhai, W. & Cai, Z. Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. *Computers and Structures*, 63 (5), 1997, pp. 987-997.
- 84 Zhang, S., Xiao, X., Wen, Z. & Jin, X. Effect of unsupported sleepers on wheel/rail normal load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28, 2008, pp. 662-673.

## Ratapölkkyjen kuormituspöytäkirjat

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
1	B63	1974	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn sivuilla oli pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-500 mm ja leveydet noin 0,08-1 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa oli pituussuuntaisia halkeamia, joista pisimmät olivat noin 700 mm ja halkeamaleveydet olivat noin 0,4-1,2 mm.</li> <li>- Ratapölkyn päissä oli verkkohalkeamia.</li> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia kiskon lepopyllyksen kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{c_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{c_B}$	[kN]
-		200		300	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuormitettavana oli ratapölkyn passiivipää.</li> <li>- Viimeisillä kuormitusportailta ennen murtoa taipuma ja halkeamaleveys kasvoi voimakkaasti.</li> <li>- Murron yhteydessä jänneterästagot eivät menneet poikki vaan betonin puristusjännitykset ylittivät betonin puristuslujuuden ja betoni murtui koko pölkyn päästä.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
2	B97	2009 (13.3)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> - Käyttämätön ratapölkky			
$F_{r1}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$ [kN]	
170	310	565	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> - Halkeaman pituus oli noin 20 mm kuormitustasolla 170 kN, 45 mm kuormitustasolla 200 kN, 65 mm kuormitustasolla 240 kN, 100 mm kuormitustasolla 260 kN, 135 mm kuormitustasolla 280 kN.			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			





Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
3	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$	[kN]
-		450		530	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 45 mm kuormitustasolla 130 kN, 95 mm kuormitustasolla 200 kN, 125 mm kuormitustasolla 240 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Ratapölkyn pää halkesi murron yhteydessä punosten suunnassa toista punosrivää pitkin. Pituussuuntaisen halkeaman kohdalla olleet punokset jäivät ehjiksi ja muut punokset menivät poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

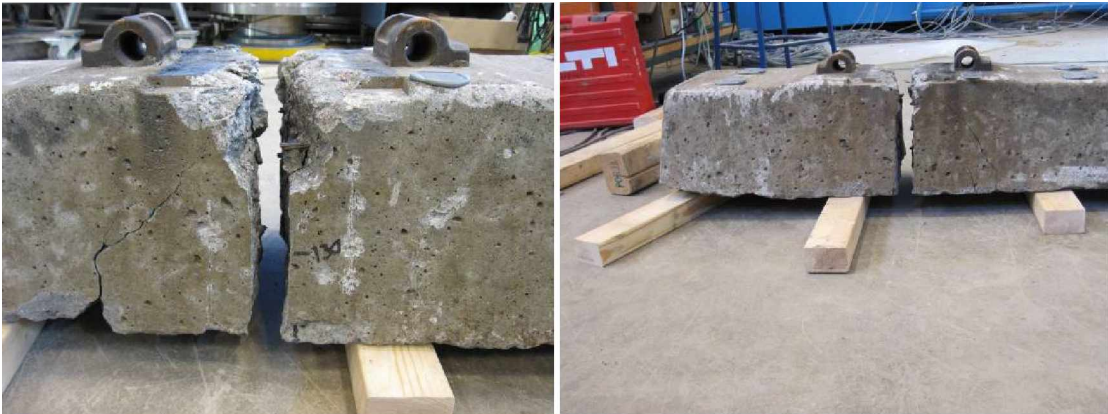
Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
4	BP99	2009 (30.11)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> - Käyttämätön ratapölkky.			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
180	340	509	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> - Halkeaman pituus oli noin 40 mm kuormitustasolla 190 kN, 65 mm kuormitustasolla 220 kN, 95 mm kuormitustasolla 240 kN, 115 mm kuormitustasolla 260 kN.			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
5	B75	1976	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa. Halkeaman pituus oli noin 80 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa oli yksi silmämääräisesti havaittava pituussuuntainen halkeama. Halkeaman pituus oli noin 200 mm.</li> <li>- Ratapölkyn kyljissä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-250 mm.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{c_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{c_B}$	[kN]
-		250		397	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuormitettavana oli ratapölkyn passiivipää.</li> <li>- Halkeaman pituus oli noin 90 mm kuormitustasolla 130 kN, 120 mm kuormitustasolla 200 kN.</li> <li>- Viimeisillä kuormitusportailta ennen murtoa taipuma ja halkeamaleveys kasvoi voimakkaasti.</li> <li>- Murto katsottiin tapahtuneen äkillisen silmämääräisesti havaittavan taipuman kasvun myötä.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
6	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli kaksi käytön aikana syntynyttä pystysuuntaista halkeamaa kiskon lepopinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$ [kN]	
-	430	548	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 40 mm kuormitustasolla 130 kN, 95 mm kuormitustasolla 200 kN, 110 mm kuormitustasolla 240 kN, 150 mm kuormitustasolla 380 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
7	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<p><b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli kaksi käytön aikana syntyneitä pystysuuntaista halkeamaa kiskon lepopinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkyn kyljissä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituus vaihteli noin 50-200 mm välillä. Kiskon lepopinnan kohdalla ei kuitenkaan havaittu pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$	[kN]
-		420		484	
<p><b>Havaintoja kokeen aikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 60 mm kuormitustasolla 130 kN, 110 mm kuormitustasolla 200 kN, 135 mm kuormitustasolla 270 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> </ul>					
<p><b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b></p>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
8	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<p><b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli kaksi käytön aikana syntynyttä pystysuuntaista halkeamaa kiskon lepopinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkyn kyljissä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 100-200 mm. Kiskon lepopinnan kohdalla ei kuitenkaan havaittu pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$ [kN]	
-	400	465	
<p><b>Havainnot kokeen aikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 65 mm kuormitustasolla 130 kN, 120 mm kuormitustasolla 200 kN, 150 mm kuormitustasolla 260 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> </ul>			
<p><b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b></p>			
			



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
9	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<p><b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Kuormitusalueelta pölkyn ylä- ja alalaidasta oli lohjennut pienehköjä betonin-kappaleita.</li> </ul>					
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r0,05}$	[kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$	[kN]
-		410		477	
<p><b>Havainnot kokeen aikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 75 mm kuormitustasolla 140 kN, 120 mm kuormitustasolla 200 kN, 160 mm kuormitustasolla 280 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> </ul>					
<p><b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b></p>					
					


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
10	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkyn keskellä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-200 mm.</li> <li>- Kuormitusalueella oli yksi pituussuuntainen halkeama, jonka pituus oli noin 200 mm.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
-	370	465	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 70 mm kuormitustasolla 140 kN, 130 mm kuormitustasolla 180 kN, 150 mm kuormitustasolla 230 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Ratapölkyn 12 punoksesta kuudessa oli tapahtunut silmämääräisesti havaittavia liukumia. Liukumat olivat noin 2-6 mm. Tartunta ei kuitenkaan pettänyt lopullisesti, koska murron yhteydessä kaikki punokset menivät poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			






Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
11	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Silmämääräisesti arvioiden ratapölkyn kunto oli paras kuormitetuista BV75-pölkkyistä.</li> </ul>					
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r0,05}$	[kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$	[kN]
-		460		503	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 40 mm kuormitustasolla 130 kN, 75 mm kuormitustasolla 150 kN, 110 mm kuormitustasolla 190 kN, 120 mm kuormitustasolla 230 kN, 130 mm kuormitustasolla 260 kN, 175 mm kuormitustasolla 360 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murrettuista ratapölkkyistä</b>					
					


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
12	B97	2009 (13.3)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$ [kN]	
180	370	511	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus oli noin 20 mm kuormitustasolla 180 kN, 65 mm kuormitustasolla 220 kN, 100 mm kuormitustasolla 250 kN, 140 mm kuormitustasolla 280 kN, 175 mm kuormitustasolla 360 kN.</li> <li>- Murren yhteydessä ratapölkyn pää halkesi pituussuunnassa toista punosrivää pitkin ja punokset säilyivät ehjinä. Loput punokset katkesivat.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
13	PB99	2009 (30.11)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> - Käyttämätön ratapölkky.			
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r0,05}$	[kN]
190		400	480
<b>Havainnot kokeen aikana</b> - Halkeaman pituus oli noin 50 mm kuormitustasolla 200 kN, 70 mm kuormitustasolla 220 kN, 110 mm kuormitustasolla 250 kN, 160 mm kuormitustasolla 320 kN, 185 mm kuormitustasolla 420 kN.			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
14	B75	1976	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<p><b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa. Halkeaman pituus oli noin 90 mm.</li> <li>- Ratapölkyn keskiosassa oli pituussuuntaisia halkeamia. Halkeamien pituudet olivat noin 80-400 mm ja leveydet noin 0,02-0,05 mm. Kiskon lepoppinnan kohdalla ei kuitenkaan havaittu pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$ [kN]	
-	250	387	
<p><b>Havaintoja kokeen aikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuormitettavana oli ratapölkyn aktiivipää.</li> <li>- Halkeaman pituus ratapölkyn alapinnasta oli noin 100 mm kuormitustasolla 140 kN, 130 mm kuormitustasolla 200 kN, 140 mm kuormitustasolla 240 kN.</li> <li>- Viimeisillä kuormitusportailta ennen murtoa taipuma ja halkeamaleveys kasvoi voimakkaasti.</li> <li>- Murto katsottiin tapahtuneen äkillisen silmämääräisesti havaittavan taipuman kasvun myötä.</li> </ul>			
<p><b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b></p>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
15	B97	2009 (13.3)	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
190	290	430	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus ratapölkyn alapinnasta oli noin 70 mm kuormitustasolla 210 kN, 140 mm kuormitustasolla 250 kN, 160 mm kuormitustasolla 290 kN.</li> <li>- Murto tapahtui 430 kN kuormitustasolla 2856 kuormitussyklin kohdalla.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
16	BV75	1977	Dynaaminen kuormituskoee (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa. Halkeaman pituus oli noin 100 mm ja leveys kuormittamattomana noin 0,01-0,02 mm.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
-	230	310	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus ratapölkyn alapinnasta oli noin 110 mm kuormitustasolla 150 kN, 145 mm kuormitustasolla 170 kN, 170 mm kuormitustasolla 210 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Murto tapahtui 310 kN kuormitustasolla 423 kuormitusytklin kohdalla.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
17	BV75	1977	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn pää)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama kiskon lepoppinnan kohdalla pölkyn alalaidassa.</li> </ul>					
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$	[kN]
-		270		390	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus ratapölkyn alapinnasta oli noin 120 mm kuormitustasolla 170 kN, 160 mm kuormitustasolla 240 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ratapölkyn käytön aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Murto tapahtui 390 kN kuormitustasolla 4042 kuormitussyklin kohdalla.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murrettuista ratapölkkyistä</b>					
					



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
18	BP99	2009 (30.11)	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn pää)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r1}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$ [kN]	
210	290	390	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Halkeaman pituus ratapölkyn alapinnasta oli noin 85 mm kuormitustasolla 210 kN, 145 mm kuormitustasolla 250 kN, 175 mm kuormitustasolla 290 mm.</li> <li>- Ennen murtoa 390 kN kuormitusportaan aikana katkesi useita yksittäisiä punosten lankoja.</li> <li>- Murto tapahtui 390 kN kuormitustasolla 4803 kuormitussyklin kohdalla.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			







Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
19	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn keskellä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-150 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$	[kN]
-		-		125	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 35 mm kuormitustasolla 30 kN, 50 mm kuormitustasolla 40 kN, 70 mm kuormitustasolla 50 kN, 105 mm kuormitustasolla 60 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Murren yhteydessä alimmat punosrivit menivät poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
20	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn keskellä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-300 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$ [kN]	
-	-	118	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 65 mm kuormitustasolla 30 kN, 75 mm kuormitustasolla 40 kN, 90 mm kuormitustasolla 50 kN, 125 mm kuormitustasolla 70 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


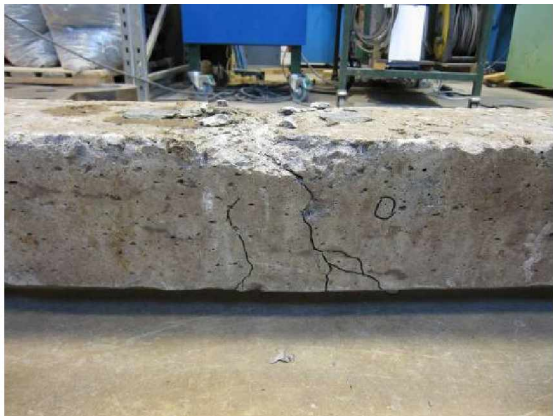
Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
21	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntynyt pystysuuntainen halkeama.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$	[kN]
-		-		118	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 85 mm kuormitustasolla 30 kN, 95 mm kuormitustasolla 40 kN, 115 mm kuormitustasolla 60 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
22	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
-	-	126	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 35 mm kuormitustasolla 30 kN, 45 mm kuormitustasolla 40 kN, 60 mm kuormitustasolla 45 kN, 90 mm kuormitustasolla 50 kN ja 115 mm kuormitustasolla 70 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
23	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn keskellä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia joiden pituudet olivat noin 50-300 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli neljä kappaletta käytön aikana syntynyttä pystysuuntaista halkeamaa.</li> <li>- Silmämääräisesti arvioiden ratapölkyn kunto oli heikoin testatuista BV75-ratapölkkyistä.</li> </ul>					
$F_{r}/F_{Cr}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$	[kN]
-		-		114	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 35 mm kuormitustasolla 30 kN, 50 mm kuormitustasolla 40 kN, 60 mm kuormitustasolla 50 kN, 80 mm kuormitustasolla 70 kN, 125 mm kuormitustasolla 95 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ennen kuormituskoea olleen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Murren yhteydessä alimmat punosrivit menivät poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
24	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$ [kN]	
-	-	124	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli 40 mm kuormitustasolla 30 kN, 55 mm kuormitustasolla 40 kN, 80 mm kuormitustasolla 50 kN, 105 mm kuormitustasolla 60 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
25	BV75	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kuormitusalueella ratapölkyn yläpinnassa ei ollut käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$	[kN]
45		-		133	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus pölkyn yläpinnasta oli 50 mm kuormitustasolla 55 kN, 80 mm kuormitustasolla 60 kN, 115 mm kuormitustasolla 80 kN.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murrettuista ratapölkystä</b>					
					



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
26	B75	1976	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn keskellä oli yksittäisiä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituus oli noin 50-300 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
-	-	81	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli 45 mm kuormitustasolla 35 kN, 65 mm kuormitustasolla 45 kN, 110 mm kuormitustasolla 65 kN.</li> <li>- Murto katsottiin tapahtuneen erittäin nopean taipuman kasvun myötä.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			





Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
27	B63	1974	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa oli pituussuuntainen halkeama, mikä kulki jänneterästangon kohdalla kiskonkiinnityksestä yli puoliväliin ratapölkkyä. Halkeaman leveys oli noin 0,5-1,0 mm.</li> <li>- Ratapölkyn kyljissä pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-300 mm ja leveydet noin 0,01-0,04 mm.</li> <li>- Ratapölkyn alapinnassa pituussuuntaisia halkeamia, joiden leveydet olivat noin 0,02-0,5 mm.</li> <li>- Ratapölkyn keskellä ei havaittu käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$	[kN]
45		-		93	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 55 mm kuormitustasolla 50 kN, 95 mm kuormitustasolla 60 kN.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
28	B63	1977	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<p><b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa oli pituussuuntainen halkeama, mikä kulki jänneterästangon kohdalla. Halkeaman pituus oli noin 700 mm ja leveys oli noin 0,2-0,6 mm.</li> <li>- Ratapölkyn kyljissä oli pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituudet olivat noin 50-300 mm ja leveydet noin 0,01-0,04 mm.</li> <li>- Ratapölkyn alapinnassa oli pituussuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkyn keskellä ei havaittu käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]
35		-	88
<p><b>Havainnot kokeen aikana</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 50 mm kuormitustasolla 40 kN, 65 mm kuormitustasolla 50 kN, 110 mm kuormitustasolla 60 kN.</li> <li>- Murto katsottiin tapahtuneen erittäin nopean taipuman kasvun myötä.</li> </ul>			
<p><b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b></p>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
29	B97	2009 (13.3)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r_{0,5}}/F_{CB}$ [kN]	
45	-	103	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 45 mm kuormitustasolla 45 kN, 110 mm kuormitustasolla 60 kN, 140 mm kuormitustasolla 70 kN.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
30	B97	2009 (13.3)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> - Käyttämätön ratapölkky.			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
50	-	109	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> - Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 60 mm kuormitustasolla 55 kN, 90 mm kuormitustasolla 65 kN, 100 mm kuormitustasolla 70 kN, 135 mm kuormitustasolla 80 kN.			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			


Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
31	BP99	2009 (31.11)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
45	-	100	
<b>Havainnot kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 30 mm kuormitustasolla 45 kN, 75 mm kuormitustasolla 60 kN, 115 mm kuormitustasolla 70 kN, 130 mm kuormitustasolla 80 kN, 140 mm kuormitustasolla 90 kN.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murrettuista ratapölkkyistä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
32	BP99	2009 (31.11)	Staattinen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r1}/F_{Cr}$ [kN]	$F_{r0,05}$ [kN]	$F_{rB}/F_{r0,5}/F_{CB}$ [kN]	
50	-	102	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 40 mm kuormitustasolla 50 kN, 85 mm kuormitustasolla 60 kN, 115 mm kuormitustasolla 70 kN, 135 mm kuormitustasolla 80 kN.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
33	B97	2009 (13.3)	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
45	85	105	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 50 mm kuormitustasolla 45 kN, 115 mm kuormitustasolla 55 kN, 135 mm kuormitustasolla 65 kN.</li> <li>- Murto tapahtui ensimmäisenä havaitun halkeaman kohdalta.</li> <li>- Kuormitus lopetettu usean punoksen katkeamiseen.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
34	BP99	2009 (31.11)	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Käyttämätön ratapölkky.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
45	85	105	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensimmäinen halkeama havaittiin 45 kN kuormitustasolla vain toisella ratapölkyn sivulla.</li> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 40 mm kuormitustasolla 45 kN, 95 mm kuormitustasolla 55 kN, 120 mm kuormitustasolla 65 kN, 140 mm kuormitustasolla 75 kN, 165 mm kuormitustasolla 85 kN.</li> <li>- Punokset eivät menneet poikki.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
			



Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe		
35	BV75	1977	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)		
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä oli yksittäisiä silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia, joiden pituus oli noin 50-200 mm.</li> <li>- Ratapölkyn yläpinnassa keskellä oli käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>					
$F_{r_r}/F_{C_r}$	[kN]	$F_{r_{0,05}}$	[kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$	[kN]
-		85		105	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 55 mm kuormitustasolla 25 kN, 75 mm kuormitustasolla 35 kN, 95 mm kuormitustasolla 45 kN, 120 mm kuormitustasolla 55 kN, 140 mm kuormitustasolla 65 kN.</li> <li>- Murto tapahtui kuormituskokeen aikana syntyneen halkeaman kohdalta.</li> <li>- Alin punosrivi meni poikki.</li> </ul>					
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>					
					

Ratapölkyn numero	Tyyppi	Valmistusvuosi	Tehty koe
36	BV75	1977	Dynaaminen kuormituskoe (ratapölkyn keskiosa)
<b>Kuvaus ratapölkyn kunnosta</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratapölkkyssä ei ollut silmämääräisesti havaittavia pituussuuntaisia halkeamia.</li> <li>- Ratapölkyn keskellä ei havaittu käytön aikana syntyneitä pystysuuntaisia halkeamia.</li> </ul>			
$F_{r_r}/F_{C_r}$ [kN]	$F_{r_{0,05}}$ [kN]	$F_{r_B}/F_{r_{0,5}}/F_{C_B}$ [kN]	
35	95	115	
<b>Havaintoja kokeen aikana</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pisimmän halkeaman pituus ratapölkyn yläpinnasta oli noin 40 mm kuormitustasolla 35 kN, 50 mm kuormitustasolla 45 kN, 85 mm kuormitustasolla 55 kN, 120 mm kuormitustasolla 65 kN, 140 mm kuormitustasolla 75 kN.</li> </ul>			
<b>Valokuvat murretusta ratapölkystä</b>			
