

Betonisten ratapölkkyjen väsytkuormituskokeet

Tommi Rantala, Olli Kerokoski¹ ja Antti Nurmikolu

Tiivistelmä. Väsytkuormituskokeissa kuormitettiin käyttämättömiä suomalaisia betonisia ratapölkkyjä B97 ja BP99. Kuormituskokeiden tarkoituksena oli selvittää ratapölkkyjen väsymisominaisuuksia ja väsymisen vaikutusta ratapölkyn jäykkyyteen. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin halkeaman merkitystä. Kuormitustasot valittiin siten, että väsymisen merkitystä todellisessa käyttötilanteessa voitiin arvioida. Kuormituskokeista johdettu väsymisraja ja laskennallinen halkeilukestävyys ovat selvästi suurempia kuin kenttäkokeissa mitatut rasitukset. Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen murtuminen liikennekuormituksessa väsymisen vaikutuksesta on siis hyvin epätodennäköistä.

Avainsanat: betoniratapölkky, kuormituskoe, väsyminen

Vastaanotettu 24.4.2015. Hyväksytty 17.5.2015. Julkaistu verkossa 3.6.2015

Johdanto

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

Betoninen ratapölkky on ollut Suomessa käytössä 1960-luvun alkupuolelta asti. Nykyisin Suomessa valmistetaan betoniratapölkkyjä kahdessa tehtaassa. Parma Oy:n Forssan tehtaalla on ratapölkkyjä valmistettu yhteensä runsaat viisi miljoonaa kappaletta ja Lujabetoni Oy:n Siilinjärven tehtaalla viimeisten 15 vuoden aikana yli kolme miljoonaa kappaletta.

Betoniratapölkkyistä saadut käyttökokemukset ovat pääasiassa hyviä. Useat tekijät kuitenkin vaikuttavat ratapölkkyille asetetun käyttöikätaavoitteen saavuttamiseen. Tällä hetkellä ratapölkkyjen vaihtotarvetta arvioidaan usein silmämääräisesti, mikä toki on selkeissä vauriotapauksissa hyvä ja nopea tapa. Monissa tapauksissa on kuitenkin epäselvää, onko ratapölkky todella sellainen, että se ei enää pysty täyttämään sille asetettavia vaatimuksia.

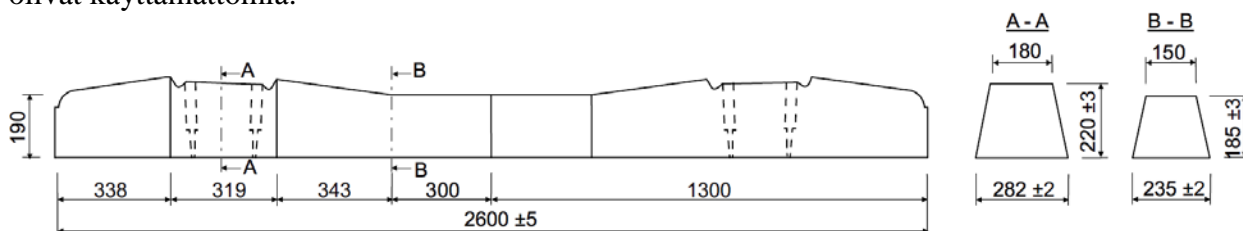
¹ Vastuullinen kirjoittaja. olli.kerokoski@tut.fi

Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) on usean vuoden ajan tutkittu radan ja sen osien toimivuutta laajassa Liikenneviraston tilaamassa tutkimusohjelmassa. Ratapölkkyjen osalta tutkimusohjelmaan on kuulunut sekä laboratorioissa tehtyjä kuormituskokeita että kenttäkokeita. Kenttäkokeissa on mitattu ratapölkkyjen rasituksia todellisilla junakuormilla useilla rataosuuksilla. Laboratorioissa on staattisten kuormituskokeiden lisäksi tehty pitkäkestoisia toistokuormituskokeita sekä painumattomilla tuilla (ratapölkyn väsytyks) että maakerrosten varaan perustettuina. Tässä artikkelissa keskitytään betonisten ratapölkkyjen väsytykseen.

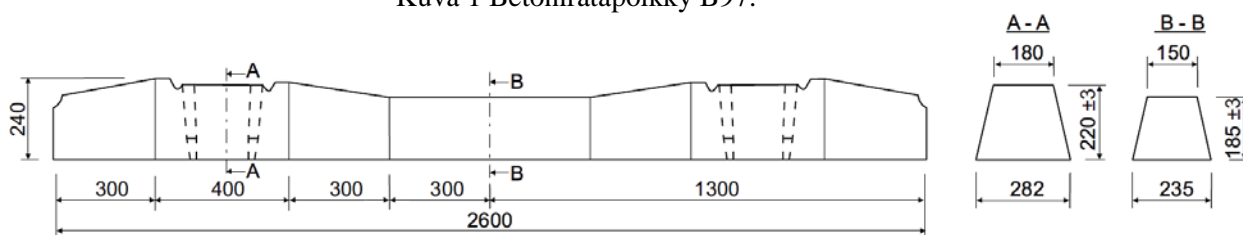
Yleisesti ottaen jännitysvaihtelut halkeamattoman betonin sisällä olevassa jänneteräksessä ovat pieniä, joten ehjässä betonissa teräksen väsymisestä on harvemmin haittaa kuin halkeilleessa betonissa. Edelleen, järkevästi mitoitettu ja oikein toteutettu betonipalkissa väsytyks yleensä ilmenee teräksen lujuuden pienenemisenä, tartunnan ja ankkuroinnin heikkenemisenä yms., mutta betonin väsyminen puristuspuolella on harvoin syynä kantokyvyn menetykseen. [3]

Testattujen ratapölkkyjen ominaisuudet

Pölkyn pään väsytyskuormituskokeissa kuormitettavana oli Luja-betoni Oy:n vuonna 2009 valmistamia B97 pölkkyjä (Kuva 1) ja pölkyn keskiosan kuormituskokeissa Parma Oy:n vuonna 2009 valmistamia BP99 pölkkyjä (Kuva 2). Kaikki kuormitetut pölkkyt olivat käyttämättömiä.



Kuva 1 Betoniratapölkky B97.



Kuva 2 Betoniratapölkky BP99.

Betoniratapölkky suunnitellaan rakentamismääräyskokoelman RakMK mukaisen rakenneluokan K60-1 mukaan. Vastaava eurokoodin mukainen merkintä C50/60. Esijännitetyissä ratapölkkyissä on 12 kpl 3-lankaisia punoksia. Teräsmateriaali on st1630/1860. Punokset ovat suoria päästä päähän. Muuta raudoitusta ei käytetä, joten rakenteen toiminta perustuu siihen, että pienipoikkileikkauksiset punokset ankkuroituvat lyhyellä matkalla pölkyn päissä [2] [4]. Tarkat tiedot punosten sijainnista ja esijännityksen suuruudesta ja muut valmistuksen yksityiskohdat ovat pölkkyvalmistajien liikesalaisuuksia.

Ratapölkkyjen ominaisuuksia on tarkemmin esitelty Liikenneviraston julkaisuissa ”Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit” [1] [2].

Koejärjestelyt

Väsytytkuormituskokeet

Väsytytkuormituskokeita tehtiin käyttämättömille ratapölkkyille yhteensä 11 kpl. Kokeista kahdeksan tehtiin ratapölkyn päälle (Kuva 3) ja kolme pölkyn keskiosalle. Lisäksi yksi ratapölkky kuormitettiin pelkästään staattisesti vertailutuloksen saamiseksi.

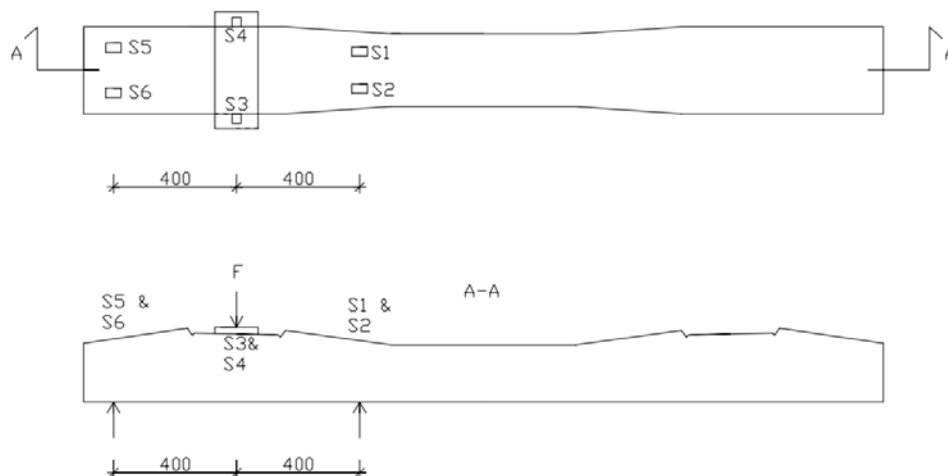


Kuva 3 Pölkyn pään koejärjestely.

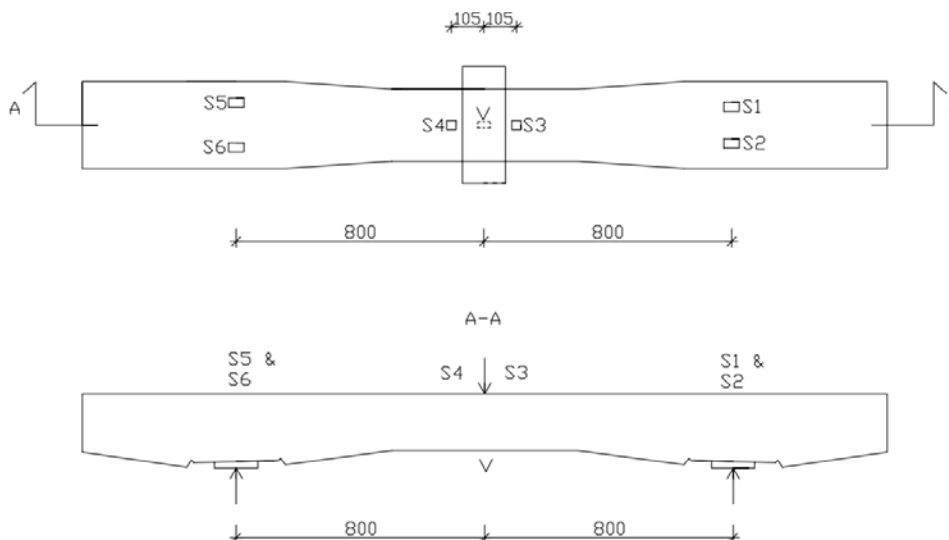
Väsytytkuormituskokeissa jokaiselle koepölkylle tehtiin 200000 syklin kuormitus vakiokuormalla, minkä jälkeen pölkkyt kuormitettiin staattisesti murtoon. Pölkyn pään kuormituskokeissa pohjavoimana, eli voimana minkä alle kuormat eivät sykliden aikana laskeneet, oli 50 kN ja pölkyn keskiosan kokeissa 15 kN. Kuormitustaajuutena käytettiin 2 Hz, paitsi kahdessa pölkyn pään kuormituskokeessa, joissa kuormitusvoimana oli 100 kN ja kuormitustaajuutena 3 Hz.

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa tukiväliksi valittiin 800 mm. Maailmalla useimmiten pölkyn pään kuormituskokeissa käytettävä tukiväli on 600 mm. Testattavien ratapölkkyjen ulkomitoista johtuen päädyttiin kuitenkin käyttämään pidempää tukiväliä. Myös Gustavsson [4] käytti betoniratapölkkyjen kuormituskokeissa 800 mm tukiväliä. Pidemmällä tukivälillä kasvatettiin tukivälin ja kuormituspisteen kohdalla olevan pölkyn korkeuden suhdetta. Pidemmän tukivälin valinnan tarkoituksena oli, että kuormitettava rakenne toimisi yksiaukkoisena palkkina eikä seinämäisenä palkkina.

Voimien lisäksi pölkyn pään ja keskiosan kuormituksissa mitattiin myös pölkyn pystysuuntaisia siirtymiä kuudella siirtymäanturilla. Siirtymäanturit oli sijoitettu kuvissa 4 ja 5 esiteltyihin kohtiin.



Kuva 4 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa käytetty kuorman, tukien ja antureiden sijoittelu.



Kuva 5 Ratapölkyn kuorman, tukien, venymäanturin (V) ja pystysiirtymäantureiden (S) sijoittelukaavio pölkyn keskiosan kuormituskokeessa.

Kuormien valintaperusteet ja valitut kuormat

Väsytytkuormituskokeiden kuormat valittiin siten, että kuormituskokeiden avulla saataisiin selville voimatasot, joilla pölkyissä alkaisi 200000 syklin aikana esiintyä väsymistä. Väsytytkuormitusyölkien jälkeen pölkkyt kuormitettiin staattisesti murtoon. Staattisen kuormituskokeen tarkoituksena oli tarkkailla murtokuorman ja jäykkyyden muutoksia väsytytkuormittamattomaan pölkkyyn verrattuna.

Pienimmät pölkyn pään koekuormat valittiin siten, että ne olivat pienemmät kuin halkeamarajatilan kuormat. Toinen 100 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky oli halkeilematon (koe nro 8) ja toiseen oli staattisesti aiheutettu kaksi halkeamaa ennen kuormitusyölkettä (koe nro 9). Staattisessa kuormituksessa ensimmäinen halkeama syntyi noin 150 kN kuormalla. Kuormien nostoa jatkettiin 180 kN saakka, jolloin

pölkkyssä oli kaksi pystysuuntaista halkeamaa, joiden pituudet olivat noin 90 mm ja 100 mm.

Pölkyn keskiosan kokeissa pienin koekuorma oli aikaisemmin tehdyissä staattisissa kokeissa havaittua halkeamarajatilaa pienempi. Loput kaksi kuormitustasoa olivat halkeamarajatilan yläpuolella. Kuormituskokeiden syklien aikana käytetyt toistuvat kuormat on esitetty alla olevissa taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1 Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa käytetyt koekuormat.

Kokeen numero	Kuorma [kN]
8	100
9	100
14	150
12	170
13	190
16	195
11	220
15	230
10	Staattinen koe

Taulukko 2 Pölkyn keskiosan väsytytkuormituskokeissa käytetyt koekuormat.

Kokeen numero	Kuorma [kN]
6	37
7	55
5	70

Tulokset

Betoniratapölkyn pään kestävyys

Taulukko 3 esittää tehdyt pölkyn pään väsytytkuormituskokeet ja väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehdyistä staattisista kuormituskokeista saadut murtokuormat. Kokeiden 14 ja 12 murtokuormista voidaan havaita, että murtokuormat olivat hieman pienempiä verrattuna muihin kokeisiin. Erityisesti kokeen 12 pienentynyt murtokuorma saattaa viitata väsymiseen. Hieman pienemmät murtokuormat kokeissa 12 ja 14 voivat kuitenkin osittain selittyä myös pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Sen sijaan 195 kN, 220 kN ja 230 kN kuormitustaso väsytytkuormituskokeessa sai aikaan merkittävää väsymistä, sillä kokeessa 16 (195 kN) pölkky murtui 150000 syklin kohdalla, kokeessa 11 (220 kN) pölkky murtui 60000 syklin kohdalla ja kokeessa 15 (230 kN) 37000 syklin kohdalla.

Ainoa selkeästi muista poikkeava tulos on 190 kN kuormitustasolla tehty koe 13. Pölkky ei murtunut syklien aikana ja staattisessa kuormituskokeessa murtokuormaksi saatiin käytännössä sama tulos verrattuna kokeiden 8, 9 ja 10 murtokuormiin. Saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa, että kokeen 13 pölkky on ollut poikkeuksellisen kestävä ja näin ollen väsymistä on voinut tapahtua jo 150 kN kuormitustasolla.

Taulukko 3 Pölkyn B97 pään väsytytkuormituskokeet ja staattisista kokeista saadut murtokuormat.

Kokeen numero	Väsytyskuorma [kN]	Murtokuorma [kN]
8	100 (esihalkaistu)	341
9	100	340
14	150	332
12	170	315
13	190	342
16	195	Murtui 150000 syklin jälkeen
11	220	Murtui 60000 syklin jälkeen
15	230	Murtui 37000 syklin jälkeen
10	Staattinen koe	342

Väsytytkuormituskokeiden aikana murtuneista pölkkyistä katkesivat punokset alimmasta punosrivistä alkaen. Vasta staattisissa kuormituskokeissa murtuneet pölkkyt halkesivat pölkyn pituussuuntaisesti toista punosriviä pitkin, kuten kuva 6 esittää. Näin ollen voidaan esittää varovainen arvio siitä, että pölkyn väsymisen kannalta merkityksellisempää on jänneterästen väsyminen kuin betonin väsyminen.

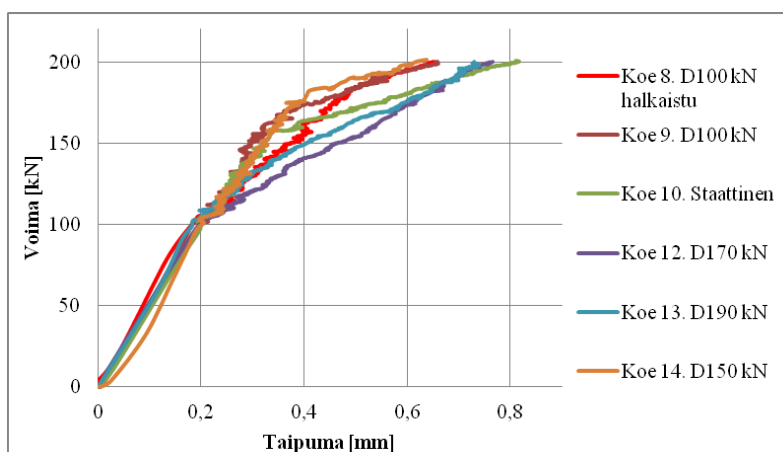


Kuva 6 Väsytytkuormituskokeiden jälkeisessä staattisessa kuormituskokeessa pituussuuntaisesti haljennut pölkky.

Väsytytkuormituskokeissa viisi pölkkyä ei murtunut 200000 syklin aikana. Näille pölkkyille tehtiin staattiset kuormituskokeet, missä ne kuormitettiin hitaasti voimia

nostamalla murtoon saakka. Väsytytkuormituskokeiden pölkkyjen lisäksi staattisesti kuormitettiin vertailukappaleeksi väsytytkuormittamaton pölkky (koe 10). Kuva 7 esittää staattisissa kokeissa kuormitettujen pölkkyjen voima-taipuma kuvaajat 200 kN kuormitustasolle asti. Kuvaajasta voidaan havaita, että kuormituksen kokeiden 8, 12 ja 13 pölkkyjen taipumat olivat hieman suurempia verrattuna muiden pölkkyjen taipumiin. Tulos on odotettu, sillä kokeiden 12 ja 13 pölkkyissä oli väsytytkuormituskokeiden aikana syntyneet halkeamat ja kokeen 8 pölkky oli kuormitettu staattisesti ennen väsytytkuormituskokeita noin 180 kN kuormitustasolle. Tuolloin pölkkyyn oli syntynyt kaksi halkeamaa, joiden pituudet olivat noin 90 mm ja 100 mm. Halkeamat selittävät pölkkyjen pienemmän jäykkyyden verrattuna muihin pölkkyihin. Ennen staattista kuormitusta halkeaman sisältäneiden pölkkyjen taipumat olivat 150 kN kuormitustasolla noin 0,4-0,5 mm, kun taas muissa pölkkyissä taipumat olivat noin 0,3 mm.

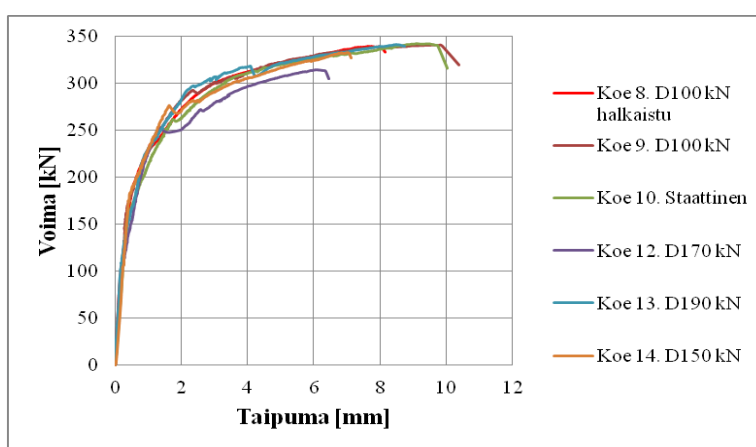
Voima-taipumakuvaajasta voidaan havaita halkeamien syntykohdat niiden pölkkyjen osalta, joihin ei syntynyt halkeamia väsytytkuormituskokeiden aikana. Halkeaman synty voidaan havaita pölkyn jäykkyyden muutoksena. Esimerkiksi kokeessa 10 olleeseen pölkkyyn syntyi ensimmäinen halkeama hieman 150 kN kuormitustason jälkeen taipuman ollessa hieman yli 0,3 mm.



Kuva 7 Väsytytkuormituskokeissa olleiden pölkkyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 200 kN kuormitustasolle asti.

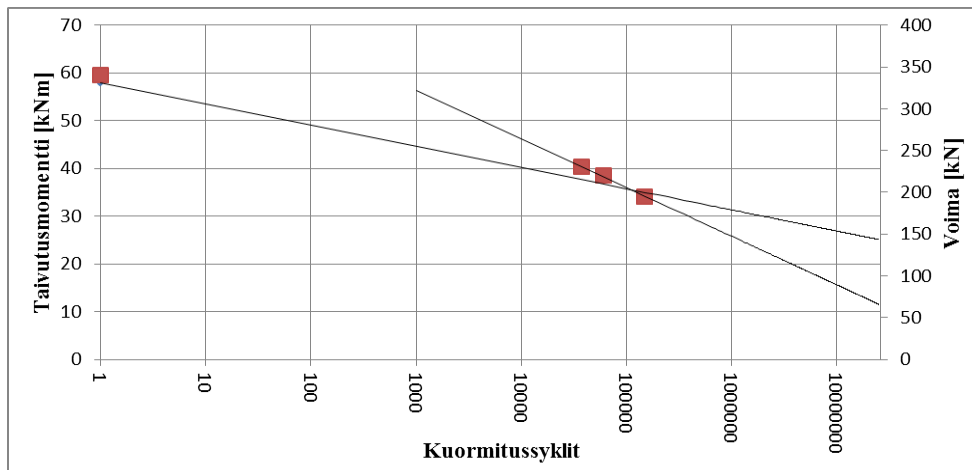
Kuva 8 esittää väsytytkuormituskokeiden jälkeisten staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat murtokuormaan asti. Kuvaajasta voidaan havaita, että eri pölkkyjen jäykkyydet ovat hyvin lähellä toisiaan. Ainoa selkeä poikkeus on kokeen 12 pölkky, jonka taipumat kasvavat hetkellisesti muita nopeammin noin 250 kN kuormitustason jälkeen. Nopeampi taipumien kasvu selittyy punosten liukumisella. Punosten tartunta ei kuitenkaan pettänyt lopullisesti vaan punosten liukumisen jälkeen pölkky alkoi ottaa voimia vastaan. Punosten liukumia ei mitattu, mutta liukumia olivat havaittavissa tarkasteltaessa pölkyn päätä kuormituskokeiden jälkeen. Joissain testatuissa pölkkyissä osa punoksista oli vetäytynyt silmin havaittavasti betonin sisään. Myös kokeiden 13 ja 14 pölkkyjen voima-taipumakuvaajissa on havaittavissa taipumien selkeää kasvua samanaikaisesti, kun kuormitusvoima on pudonnut hieman. Taipumien kasvu voi johtua punosten liukumasta, mikä on kuitenkin ollut vähäisempää verrattuna kokeessa 12 ilmenneeseen liukumaan.

Kuvaajasta voidaan havaita pölkyissä juuri ennen murtoa ollut taipuma. Murtokuormat on esitetty taulukossa 3. Taipuma vaihteli noin 6-10 mm välillä. Suurimmat taipumat olivat kokeiden 9 ja 10 pölkyissä, joista toinen oli pelkästään staattisesti kuormitettu ja toinen kuormitettu väsytytkuormituskokeessa ilman halkeamaa 100 kN kuormitustasolla. Muiden pölkyjen murtumishetken taipumat ovat sitä pienempiä, mitä suuremmalla voimalla pölkyä on kuormitettu väsytytkuormituskokeessa. Poikkeuksena oli 190 kN kuormitustasolla kuormitettu kokeen 13 pölky. Kyseisen pölkyän taipuma maksimikuormalla oli kolmanneksi suurin. Pienentynyt maksimikuorman aiheuttama taipuma saattaa johtua väsymisestä, sillä väsytyksokokeissa pölkyyn jäänyt pysyvä taipuma on erittäin vähäinen. Osa taipumaeroista saattaa kuitenkin selittyä myös pölkyissä esiintyvillä vaihteluilla.



Kuva 8 Pölkyän pään väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima- taipumakuvaaja murtoon asti.

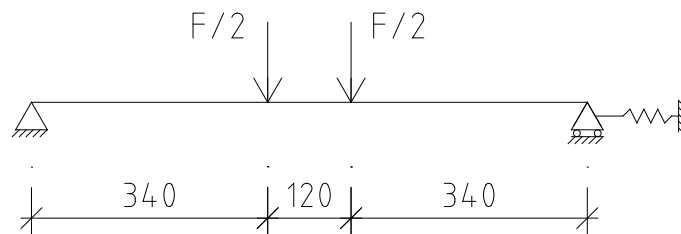
Väsytytkuormituskokeista saatujen tulosten perusteella pyrittiin tekemään väsymismalli, jolla pystyttäisiin arvioimaan tietyllä rasitustasolla tapahtuvaa väsymistä. Betoniratapölkyän pään väsymismalli on esitetty alla olevassa kuvassa 9. Suurin epävarmuustekijä väsymismallissa on mallin perustana olevien kokeiden vähäinen määrä. Näin ollen pölkyissä esiintyvää vaihtelua ei ole voitu arvioida väsymismallia tehtäessä. Malli kuitenkin mahdollistaa todellisiin kuormituskoe tuloksiin perustuvan ratapölkyän väsymisen karkean arvioinnin. Kuvassa 9 on esitetty sekä yhden syklin eli staattisen kokeen huomioiva arvio että pelkästään kolmeen väsytyskoe tulokseen perustuva arvio. Arviot on jatkettu 25 miljoonaan sykliin asti.



Kuva 9 Betoniratapölkyn pään väsytytkuormituskokeiden perusteella tehdyt väsymismallit pölkyn päälle.

Betoniratapölkyn pään vertailulaskelmat

Ratapölkyn yläpinnan teräslevyn ja sen alapuolisen kumilevyn kuormaa kahdeksi rinnakkaiseksi pystykuormaksi jakava vaikutus on huomioitu kahden rinnakkaisen kuorman arvioidun keskinäisen etäisyyden 0,12 m avulla kuvan 10 mukaisesti. Teräslevyn pituus pölkyn pituussuunnassa oli 140 mm ja levy oli viistetty. Levyn paksuus oli toiselta laidalta 24 mm ja toiselta laidalta 20 mm.



Kuva 10 Kuormitusjärjestelyt: tunkin alapuolisen teräslevyn vaikutus taivutusmomentin määrittämiseen.

Tuentakohtilla heti pölkyn alapinnalla oli 15 mm paksu ja 100 mm pitkä kumilevy, jonka kyky pölkyn taipumisesta johtuvan alapinnan vaakasuuntaisen liikkeen rajoittamisessa arvioitiin merkityksettömäksi. Taulukossa 4 esitettävät betoniratapölkyn pään väsytytkuormituskokeiden taivutusmomentit lasketaan keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväli $L = 0,8$ m täten seuraavasti: $M = F \cdot (L - 0,12\text{m}) / 4 = 0,17\text{m} \cdot F$.

Taulukko 4 Pölkyn B97 pään väsytytkuormituskokeita vastaavat taivutusmomentit kiskon kohdalla.

Kokeen numero	Väsytytkuorma [kN]	Toistuva taivutusmomentti [kNm]	Taivutusmomentti murtotilanteessa [kNm]
8	100 (esihalkaistu)	17	58
9	100	17	58
14	150	26	56
12	170	29	54
13	190	32	58
16	195	33	(Väsymismurto)
11	220	37	(Väsymismurto)
15	230	39	(Väsymismurto)
10	Staattinen koe	-	58

Lujan ratapölkyn B97 halkeilurajatilalaskelmaa vastaava taivutusmomentti kiskon kohdalla on $M_{R,halkeilu} = 23,9$ kNm [2]. Vastaavasti palkkiteoriaan pohjautuvan laskelman mukainen taivutusmurtomomentti $M_{R,murto} = 45,7$ kNm. Kokeessa 9 ratapölkky ei siis haljennut ja kokeissa 11-15 ratapölkyn toiminta vastasi halkeilurajatilan jälkeistä rakenteen toimintaa. Kokeessa 15 kuormitus vastasi 85 % laskennallisen taivutusmurtomomentin arvosta noin 70 % staattisten koe kuormitustulosten mukaisesta taivutusmomentista.

Kokeenaikaisten havaintojen perusteella kokeessa 14 ei syntynyt taivutushalkeilua. Koska betonin vetolujuudella on suuri hajonta, oli ko. ratapölkkyssä halkeilua vastaava taivutusmomenttikestävyys suurempi kuin laskennallinen halkeamaa vastaava taivutusmomentti.

Kahdessa staattisessa kuormituskokeessa [2] lyhyemmällä jännevälillä 0,6 m murtoa vastaavat taivutusmomentit olivat 68 and 61 kNm tälle samalle ratapölkkytyypille maltillisella lausekkeella $0.12m \cdot F$ laskettuna. Jänneväli siis vaikutti kokeellisen taivutuskestävyyden suuruuteen. Mitatut murtokuormaa vastaavat taivutusmomentit väsytykskokeen jälkeen olivat täten melko lähellä näiden aiempien staattisten kuormituskokeiden tuloksia. Näissä aiemmissä kokeissa ensimmäistä halkeamaa vastaavien taivutusmomenttien arvot olivat 20 ja 22 kNm.

Betoniratapölkyn keskiosan kestävyys

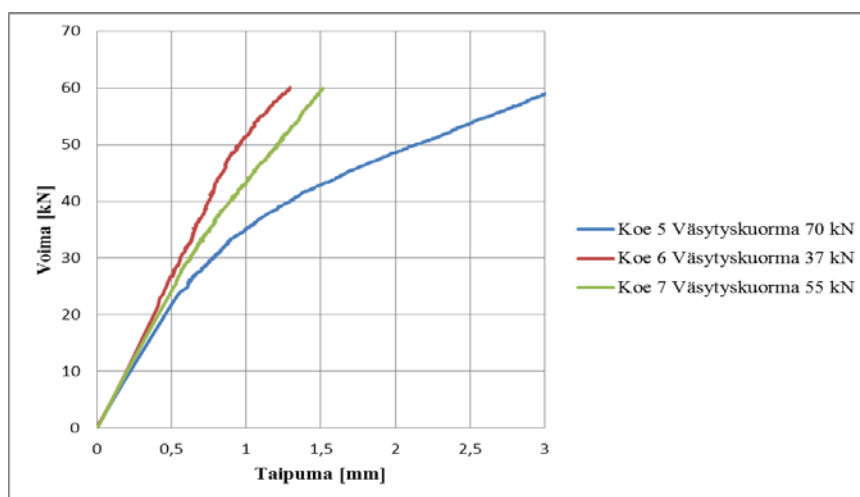
Taulukko 5 esittää tehdyt väsytytkuormituskokeet ja väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehdyistä staattisista kuormituskokeista saadut murtokuormat. Kokeessa 6 väsytytkuormitustasoksi valittiin 37 kN, mikä on aikaisempien kuormituskoe tulosten perusteella halkeamarajatilan alapuolella oleva kuorma. Kokeen 7 kuormitustasoksi valittiin 55 kN, mikä on hieman halkeamarajatilan yläpuolella ja kokeessa 5 kuormitustaso oli 70 kN, mikä on selvästi halkeamarajatilan yläpuolella oleva kuorma. Kuormitustasoilla 55 kN ja 70 kN havaittiin ensimmäiset halkeamat heti kokeen alussa.

Taulukosta voidaan huomata, että 37 kN ja 55 kN kuormitustasoilla kuormitettujen pölkkyjen staattisista kokeista saadut murtokuormat ovat lähes samat. Murtokuormat vastaavat myös standardin EN 13230-2 mukaan käyttämättömille ratapölkkyille tehdyissä staattisissa kokeissa saatuja murtokuormia [2]. Tästä johtuen murtokuormien perusteella ei voida todeta, että väsymistä olisi tapahtunut. Sen sijaan 70 kN kuormitustasolla kuormitetun pölkyn murtokuorma on pudonnut selvästi, joten väsytytkuormituskokeen aikana on tapahtunut merkittävää väsymistä. Pienempi murtokuorma oli odotettu tulos, sillä väsytytkuormituskokeen aikana ainakin kolme punoksen lankaa katkesi. Ensimmäinen lanka katkesi noin 180000 syklin kohdalla ja kaksi seuraavaa 195000-199000 syklin välillä.

Taulukko 5 Pölkyn BP99 keskiosan väsytytkuormituskokeet ja staattisista kokeista saadut murtokuormat.

Kokeen numero	Väsytytkuorma [kN]	Murtokuorma [kN]
6	37	106
7	55	104
5	70	84

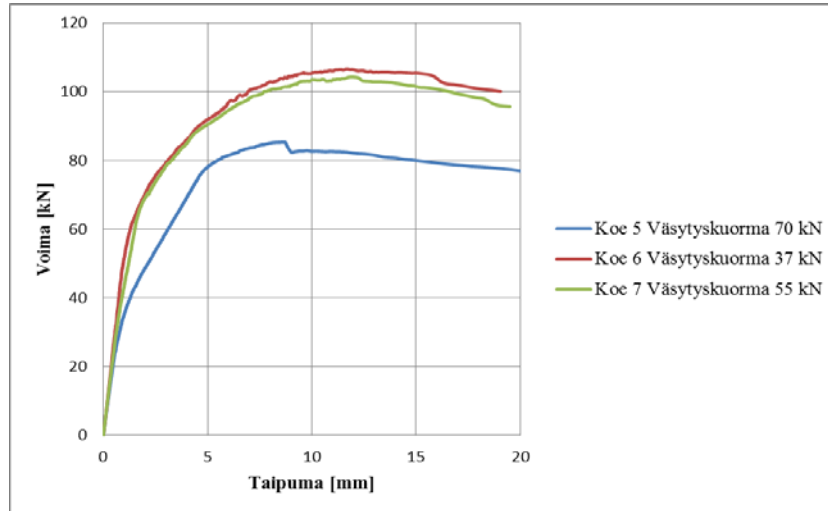
Kuva 11 esittää väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasoon saakka. Kuvasta voidaan havaita, että kuormituksen alkuvaiheilla jäykkyydeltään selvästi heikoin oli kuormitustasolla 70 kN kuormitettu kokeen 5 pölkky. Pölkyn taipuma 60 kN kuormitustasolla oli hieman yli kolme millimetriä. Kokeiden 6 ja 7 pölkkyjen jäykkyydessä oli vain vähäinen ero. Kokeen 6 pölkyn taipuma oli 60 kN kuormitustasolla noin 1,3 mm ja kokeen 7 pölkyn taipuma 1,5 mm.



Kuva 11 Väsytytkuormituskokeiden jälkeen pölkyn keskiosalle tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat 60 kN kuormitustasolle asti.

Kuva 12 esittää pölkyn keskiosan väsytytkuormituskokeiden jälkeen tehtyjen staattisten kokeiden koko voima-taipumakuvaajat. Kuvasta voidaan huomata, että kokeen 5

pölkkyssä on selkeästi pienempi jäykkyys kuin kokeiden 6 ja 7 pölkkyissä. Kokeiden 6 ja 7 pölkkyjen jäykkyydessä ei ole juurikaan eroa. Maksimikuorman aikaansaama taipuma oli kokeissa 6 ja 7 noin 12 mm ja kokeessa 5 noin 8 mm.



Kuva 12 VäsytySKUORMITUSKokeiden jälkeen pölkyn keskiosalle tehtyjen staattisten kuormituskokeiden voima-taipumakuvaajat.

Taulukko 6 esittää pölkyn keskiosan väsytySKUORMITUSKokeiden aikana mitattuja taipumia noin 50000 syklin välein. Taipumat ovat ilmoitettu millimetreinä. Taulukossa on esitetty pohjavoiman, eli voiman jonka alle kuormat eivät pudonneet kokeen aikana, aikaansaama taipuma ja maksimikuorman aikaansaama taipuma. Taulukosta voidaan huomata, että kokeessa 6 mitatut taipumat pysyivät lähes samana koko kokeen ajan. Tästä voidaan arvioida, että 200000 sykliä ei aikaansaanut väsymistä kuormitustasolla 37 kN. Kokeessa 7 maksimikuorman aikaansaama taipuma kasvoi hieman kokeen aikana. Tämä saattaa olla merkki väsymisestä, joskin väsyminen on ollut vähäistä. Tästä syystä aikaisemmin esitetty staattinen murtokuorma ei ollut muuttunut. Kokeessa 5, jossa kuormitustasona oli 70 kN, havaittiin selkeää väsymistä. Pohjavoiman aikaansaama taipuma kasvoi hieman ja maksimikuorman aikaansaama taipuma merkittävästi. Suurinta taipuman kasvu oli 150000-200000 syklin välillä. Tämä selittyy yksittäisten punosten lankojen katkeamisilla, jolloin pölkyn jäykkyys on alentunut selvästi.

Taulukko 6 Väsytyskuormituskokeissa syklien aikana mitatut taipumat [mm].

		Syklit				
		10000	50000	100000	150000	200000
Koe 6,	0-15 kN	0,31	0,31	0,31	0,31	0,35
	37 kN	0,68	0,67	0,69	0,69	0,72
Koe 7,	0-15 kN	0,35	0,36	0,34	0,41	0,39
	55 kN	1,27	1,26	1,33	1,46	1,45
Koe 5,	0-15 kN	0,47	0,5	0,55	0,54	0,87
	70 kN	2,7	2,94	3,12	3,24	4,38

Pölkyn keskiosan vertailulaskelmat

Taulukossa 7 esitettävät betoniratapölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeiden taivutusmomentit keskeiselle kuormitukselle F ja jänneväliille $L=1,6\text{m}$ lasketaan seuraavasti: $M = F \cdot (L-0,08\text{m})/4 = 0,38\text{m} \cdot F$. Ratapölkkyjen yläpinnalla kuormitus välitettiin 100 mm leveän teräslevyn välityksellä (vrt. Kuva 10). Teräslevyn paksuus oli 50 mm.

Taulukko 7 Pölkyn BP99 keskiosan väsytyskuormituskokeita vastaavat taivutusmomentit.

Kokeen numero	Väsytyskuorma [kN]	Toistuva taivutusmomentti [kNm]
6	37	14
7	55	21
5	70	27

Parman ratapölkyn BP99 halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti ratapölkyn keskikohdalla on $M_{R,halkeilu} = 15,2 \text{ kNm}$ [2]. Vastaavasti taivutusmurtomomentti $M_{R,murto} = 33,7 \text{ kNm}$. Kokeessa 6 ratapölkky ei siis haljennut ja kokeissa 5 ja 7 ratapölkyn toiminta vastasi halkeilurajatilan jälkeistä rakenteen toimintaa. Kokeessa 5 kuormitus vastasi 80 % laskennallisen taivutusmurtomomentin arvosta.

Väsytyskuormituskokeista saatujen tulosten perusteella tehtiin ratapölkyn päälle väsymismalli, jolla pystyttiin arvioimaan tietyllä rasitustasolla tapahtuvaa väsymistä (Kuva 9). Pään väsymismallin perusteella voidaan tehdä myös karkea väsymismalli ratapölkyn keskiosalle määräämällä venymä ε yhtä suureksi kiskonkohdan alapinnalla ja keskikohdan yläpinnalla. Uusille ratapölkkyille saadaan laskennan tuloksena taivutusmomenttien suhteeksi 1,96 ja kiskon kohdan taivutusmomenttia $M = 26 \text{ kN}$ vastaavaksi momentiksi $M = 13 \text{ kN}$. Väsytykskokeen kuormitusjärjestelyillä toistuvaksi kuormaksi keskikohdalla saadaan täten 34 kN, joka on hieman pienempi kuin keskikohdan kuormitusjärjestelyissä käytetty pienin väsytyskuorman arvo.

Yhteenveto ja päätelmät

Pölkyn pään kuormituskäyttäytyminen

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa kaikki testatut pölköt olivat käyttämättömiä B97-pölkkyjä. Kyseisten pölkkyjen staattinen pistekuorman kestävyys on noin 340 kN, kun tukiväli on 800 mm ja kuorma sijaitsee tukivälin keskellä. Väsytytkuormitustason ollessa 150 kN 200000 sykliä alensivat staattista murtokuormaa noin 10 kN ja väsytytkuormitustason ollessa 170 kN staattinen murtokuorma oli alentunut noin 25 kN. Alentuneet murtokuormat voivat ainakin osittain selittyä pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Kokeissa selvää väsymistä havaittiin kuormitustason ollessa noin 200 kN. Ratapölköt murtuivat alle 200000 kuormitussyklin aikana, kun kuormitustaso oli 195 kN tai enemmän. Selvä poikkeus oli 190 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky. Väsytytkuormituskokeen jälkeen tehdyssä staattisessa kokeessa murtokuorma oli noin 340 kN, joten murtokuorma ei ollut laskenut lainkaan verrattuna väsytytkuormittamattomaan pölkkyyn. Näin ollen 190 kN kuormitustasolla kuormitettu pölkky voidaan olettaa poikkeuksellisen kestäväksi. Väsytytkuormituskokeiden tulosten perusteella luotiin ratapölkyn kohtaaman rasiustason ja pölkyn kestäjän kuormituskertamäärän välistä yhteyttä kuvaava väsymismalli.

Pölkkyille, jotka eivät murtuneet väsytytkuormitussykliä aikana, tehtiin staattiset kuormituskokeet. Halkeilemattomien pölkkyjen taipuma oli 150 kN kuormitustasolla noin 0,3 mm ja väsytytkuormituskokeissa haljenneiden pölkkyjen taipuma vaihteli samalla kuormitustasolla välillä 0,4-0,5 mm. Pölkkyjen taipuma murren yhteydessä oli noin 6-10 mm pölkystä riippuen.

Pölkyn pään väsytytkuormituskokeissa selvää väsymistä havaittiin suhteellisen korkeilla kuormitustasoilla. Kuormitustaso 195 kN on noin 57 % staattisesta murtokuormasta. Alhaisemmillä kuormitustasoilla väsytytkuormitetuille pölkkyille väsytytkokeen jälkeen tehdyissä staattisissa kuormituskokeissa havaittiin hieman alentuneita murtokuormia verrattuna väsytytkuormittamattomaan pölkkyyn. Alentuneiden murtokuormien perusteella väsymistä on saattanut tapahtua jo 150 kN kuormitustasoilla, joskin alentuneet murtokuormat saattavat osittain selittyä pölkkyissä esiintyvillä vaihteluilla. Huomionarvoista on kuitenkin se, että väsytytkuormituskokeissa pölkkyihin kohdistunut taivutusmomenttirasitus on suuri verrattuna radassa pölkkyyn kohdistuvaan taivutusrasitukseen.

Väsytytkuormituskokeiden tulosten perusteella luotiin nykyisin valmistettaville ratapölkkyille pölkyn kohtaaman rasiustason ja pölkyn kestäjän kuormituskertamäärän välistä yhteyttä kuvaava väsymismalli. Väsymismallin (4 koetulosta) perusteella voitiin arvioida, että uusi ratapölkky kestää murtumatta suurusluokaltaan 50 vuoden toistokuormitusta vastaavat 25 miljoonaa kuormituskertaa taivutusmomenttia, joka on ratapölkyn kiskon kohdalla noin kymmenkertainen ja keskellä noin viisikertainen radalla mitattuihin taivutusmomenttien keskiarvoihin verrattuna. Kenttäkokeissa mitatut taivutusmomenttien huippuarvotkin, noin 10 kNm, jäivät molemmilla esitetyillä väsymismalleilla kiskon kohdalla määritettyjä väsymisen raja-arvoja pienemmiksi.

Pölkyn keskiosan kuormituskäyttäytyminen

Pölkyn keskiosan väsytyskuormituskokeissa kuormitettavana oli BP99-pölkkyjä. Selkeää väsymistä tapahtui 70 kN kuormitustasolla. Tuolloin hieman alle 200000 syklin kohdalla meni yksittäisiä punoksen lankoja poikki. Väsyminen voitiin havaita 200000 syklin jälkeen tehdyssä staattisessa kuormituskokeessa murtokuorman alentumisena. Murtokuorma oli alentunut noin 20 kN. Sen sijaan 37 kN ja 55 kN kuormitustasoilla tehdyt väsytyskuormituskokeet eivät vaikuttaneet staattisten murtokuormien suuruuteen. Myös staattisissa kokeissa mitattujen taipumien perusteella voidaan havaita väsyminen 70 kN kuormitustasolla tehdyssä väsytyskuormituskokeessa. Kuormitustason ollessa 50 kN olivat 37 kN ja 55 kN väsytyskuormitustasoilla kuormitettujen pölkkyjen taipumat 1-1,2 mm. Hieman suurempi taipuma 55 kN väsytyskuormitustasolla kuormitetussa pölkkyssä selittyy suurelta osin väsytyskuormituskokeiden aikana syntyneillä halkeamilla. Sen sijaan 70 kN väsytyskuormitustasolla kuormitetun pölkyn taipumat olivat staattisessa kuormituskokeessa 50 kN kuormitustasolla yli 2 mm eli noin kaksinkertaiset verrattuna pienemmillä väsytyskuormitustasoilla kuormitettuihin pölkkyihin. Murron yhteydessä pölkkyjen taipumat olivat noin 15-20 mm. Väsyminen voidaan havaita myös taipumien kasvamisena väsytyskuormitussykliä aikana. Väsytyskuormitustason ollessa 37 kN taipumat pysyivät lähes samana koko kokeen ajan ja 55 kN kuormitustasolla kuorman aiheuttama taipuma kasvoi noin 0,2 mm kuormituskokeen aikana. Sen sijaan 70 kN kuormitustasolla kuormitetun pölkyn taipumat kasvoivat kokeen aikana noin 1,7 mm, mikä viittaa selkeään väsymiseen.

Myös pölkyn keskiosan kuormituskokeissa oli havaittavissa se, että selkeää väsymistä aikaansaava rasitus on kohtalaisen suuri verrattuna radassa pääsääntöisesti pölkkyyn kohdistuviin rasituksiin. Näin ollen voidaan arvioida, että pölkkyjen väsyminen ei pääsääntöisesti käytännössä aiheuta ongelmia.

Koekuormitusrasituksen vertailu kentällä havaittuun taivutusrasitukseen

Kenttäkokeiden keskimääräinen taivutusmomentti raiteessa kiskon kohdalla oli 2,6 kNm ja keskihajonta 1,9 kNm [2]. Uusien ratapölkkyjen laskennallinen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti on 24 kNm. Väsytyskuormituskoe tulosten nojalla kohdassa esitetyn väsymismallin perusteella ratapölkky kestää 26 kNm toistuvaa taivutusrasitusta noin 25 miljoonaa kertaa. Varsin vilkasliikenteistä rataosaa vastaavalla oletuksella 0,5 miljoonasta vuotuisesta akselinylityksestä tämä vastaisi 50 vuoden käyttöikä.

Kenttäkokeiden keskimääräinen taivutusmomentti raiteen keskellä oli 2,5 kNm ja keskihajonta 2,3 kNm. Uusien ratapölkkyjen laskennallinen halkeilurajatilaa vastaava taivutusmomentti on 15 kNm. Väsytyskuormituskoe tulosten perusteella arvioitu väsytyskuormitetun ratapölkyn keskiosan 25 miljoonaa kuormitussykliä vastaava taivutuskestävyys on 13 kNm.

Kuormituskokeista johdettu väsymisraja ja laskennallinen halkeilukestävyys ovat selvästi suurempia kuin kenttäkokeissa mitatut rasitukset. Raiteessa sijaitsevien ratapölkkyjen murtuminen liikennekuormituksessa väsymisen vaikutukset huomioiden on siis hyvin epätodennäköistä. Hyvästä väsytykskestävyydestä huolimatta ratapölkkyjen punosmäärää ei voida vähentää, sillä punosmäärä perustuu suunnitteluohjeissa määrättyjen staattisten momenttikuormien huomioimiseen [1].

Viitteet

- [1] T. Rantala, O. Kerokoski, A. Nurmikolu. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Kirjallisuusselvitys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36·2013. 2013. Internet 24.4.2015
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-36_betoniratapolkyn_rakenteellinen_web.pdf
- [2] O. Kerokoski, T. Rantala, A. Köliö, A. Nurmikolu. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Ratapölkyn mekaanisen toiminnan ja rapautumisen kokeellinen ja laskennallinen arviointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37·2013. 2013. Internet 24.4.2015
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-37_betoniratapolkyn_rakenteellinen_web.pdf
- [3] O. Kerokoski, A. Köliö, A. Leppälä, J. Tulonen, J. Wuorenjuuri: Tutkimusohjelma elinkaaritehokas rata (TERA) osa 5 – Sillat loppuraportti. Liikennevirasto. Helsinki 2014. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 53·2014. 181 sivua. ISBN 978-952-317-032-2. 2014. Internet 11.5.2015
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-53_tutkimusohjelma_elinkaaritehokas_web.pdf
- [4] R. Gustavson. Structural behaviour of concrete railway sleepers, Doctoral Dissertation, Chalmers Concrete Structures, Gothenburg. Chalmers University of Technology, Sweden. 2002.

Tommi Rantala, Olli Kerokoski, Antti Nurmikolu
Tampereen teknillinen yliopisto,
PL 600, 33101 Tampere
tommi.rantala@tut.fi, olli.kerokoski@tut.fi, antti.nurmikolu@tut.fi