

Ratapenkereen värähtelyriski nopeuden noustessa

Pekka Salmenperä¹, Robert Hildebrand ja Riku Varis

Tiivistelmä. Tässä artikkelissa käsitellään värähtelyn kasvamisen riskiä radan nopeusrajoituksen noston yhteydessä Ylivieska-Liminka rataosalla mittaamalla kriittisimmäksi arvioidussa kohteessa ratapenkereen käyttäytymistä. Työssä selvitettiin ratarakenteessa etenevien oleellisten ja suurienergisten Rayleigh -aaltojen nopeuksia ratapenkereessä. SASW – analyysin mukaan ratapenkereen värähtely alkaa kasvaa merkittävästi nopeuksista 240 km/h ylöspäin.

Avainsanat: SASW, pengervärähtely, rautatie

Vastaanotettu 15.6.2017. Hyväksytty 10.8.2017. Julkaistu verkossa 21.10.2017.

Johdanto

Junakaluston nopeuden noston on todettu 1990-luvulta lähtien monessa kansainvälisessä tutkimuksessa aiheuttavan ratarakenteen värähtelyn kasvua [1, 2, 3, 4]. Tämä värähtely ilmenee voimakkaimmin palautuvan pystysuuntaisen siirtymän voimakkaana kasvuna. Tämä kasvu selittyy alhaisella aallonnopeudella pehmeikköjen pohjamaassa, joka kaluston nopeuden kasvaessa aiheuttaa kumuloituvaa siirtymää. Kriittiseksi junanopeudeksi kutsutaan arvoa, jossa pystysuuntainen värähtely voimistuu merkittävästi. Liiallinen värähtely tai palautuva painuma ratarakenteessa voi tuhota radan komponentteja tai lähialueen infrastruktuuria.

Mittauspisteeksi valittiin esiselvityksen perusteella pehmeikkö, jossa kartoitettiin olevan suurin värähtelyriski sillä rataosalla, jolla suuret nopeudet toteutuvat. Tässä kohteessa suoritettiin maassa etenevän värähtelyn aallonnopeuden mittauksia. SASW – menetelmällä pyrittiin määrittämään pinta-aallonnopeuksia ratarakenteen eri kerroksissa. Suurin osa värähtelyenergiasta sitoutuu pinta-aaltoihin, joten ne olivat erityisen tarkastelun kohteena. Lisäksi ne ovat hitaampia kuin puristus- tai leikkausaallot, ja epämieluisassa tilanteessa kaluston nopeus voi lähestyä hitaimpien aaltojen nopeutta. Tämä tiedetään ulkomaisista tutkimuksista, joissa on havaittu ratapenkereen värähtelyn

¹Vastuullinen kirjoittaja. pekka.salmenpera@tut.fi

ja palautuvan painuman kasvavan, kun junan nopeus saavuttaa 60 % tai enemmän pinta-aaltojen nopeudesta [5]. Tämän jälkeen painuma kasvaa eksponentiaalisesti kriittiseen nopeuteen eli pinta-aallon nopeuteen asti.

Ilmiön taustaa

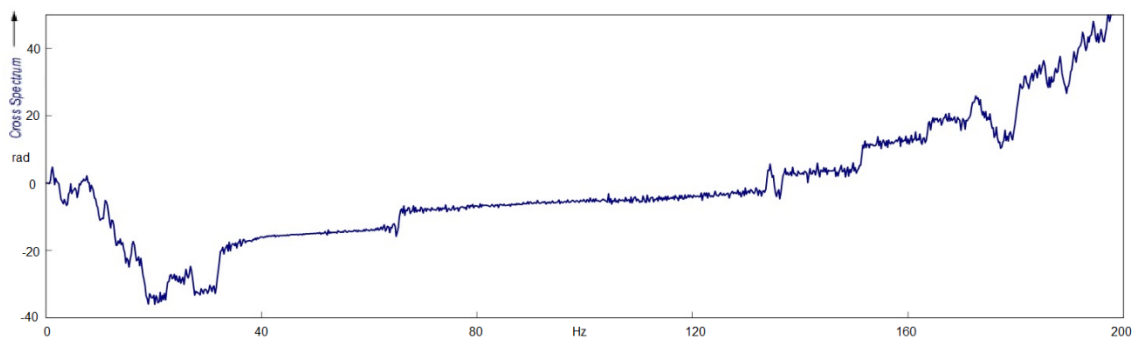
Tiedetään, että raideliikenteessä on olemassa kaksi kriittistä nopeutta, jolloin värähtely voimistuu: Kiskojen taivutusjäykkyyden ja raiteen sekä penkereen massan ja maaperän ominaisuuksien määrittämä kriittinen nopeus sekä usein matalampi, maassa etenevien Rayleigh-aaltojen (R-aallot) nopeus [1, 4]. Maan värähtelyssä tapahtuu merkittävä voimistuminen, jos junan nopeus ylittää maassa etenevien R-aaltojen nopeuden. Tähän viitataan usein termillä ”ground vibration boom” [6]. Ilmiö voidaan rinnastaa tilanteeseen, jossa lentokone ylittää äänivallin, jolloin ääniaallot muodostavat auramaisen Mach-aallon äänilähteen liikkeessä nopeammin kuin ääniaallot ilmassa [7].

Ensimmäisen kerran värähtelyn voimistuminen kriittisen nopeuden ylittämisen seurauksena havaittiin lokakuussa 1997 Ruotsissa, Göteborg-Malmö-rataosuudella Ledsgårdin lähellä [8]. Kuitenkin jo vuonna 1993 tehdyt mittaukset Britanniassa osoittivat junan nopeuden kasvattamisen lisäävän värähtelyä [3]. Myös Suomessa on havaittu, että ratapenkereen yläpinta alkaa värähdellä pystysuunnassa voimistuvasti junan nopeuden lähestyessä kriittistä nopeutta [9].

SASW on mittaus- ja analysointimenetelmä, jossa mitataan R-aaltojen nopeutta. Menetelmällä on mahdollista mitata R-aallon nopeutta noin yhden aallonpituuden syvyydelle, käytännössä noin 20–30 metriin asti. Mittaus tapahtuu sijoittamalla värähtelylähde sekä vähintään 2 geofonia maanpinnalle ja mittaamalla pinta-aallon etenemisnopeuksia vastaten eri taajuuksia tai taajuuksien vaihdellessa, jolloin saadaan tieto etenemisnopeuden vaihtelusta syvyyden mukaan. [10]

Mittaukset

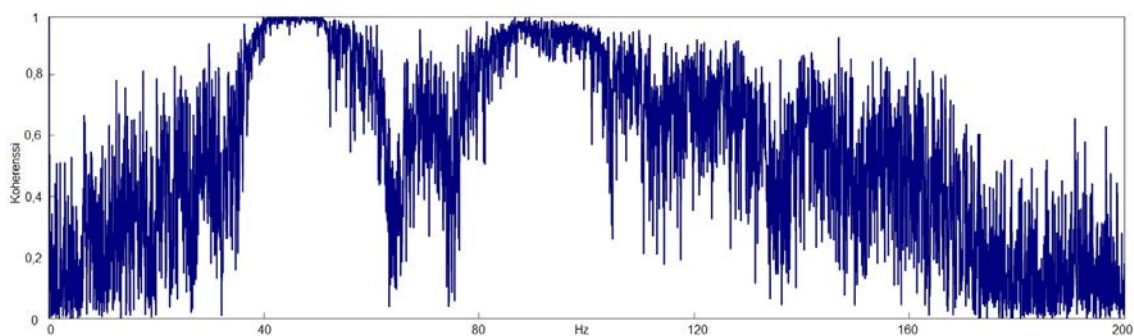
SASW –menetelmä perustuu herätteen antamiseen maan pinnalle pystysuuntaan ja vasteen mittaamiseen maanpinnasta pystysuunnassa. Maaperässä etenevään liikkeeseen syntyy tällöin monia aallonnopeuksia, eri maalajeihin ja kerroksiin. Koska jokaisella aallonnopeudella on oma taajuutensa, niitä voidaan tutkia spektrianalyysillä. Ristispektrissä kahden anturin signaalien välillä näkyvä eri taajuuksien vaihe-ero osoittaa, kuinka paljon kyseisen taajuuden värähtely on muuttanut vaihettaan kahden eri mittapisteen välillä, kuva 1. Tästä voidaan laskea kyseisen taajuuden aallonpituus kun tiedetään muutosnopeus tietyllä välimatkalla. Kun lisäksi tiedetään, että aallonnopeus on taajuus kerrottuna aallonpituudella, voidaan kaikille eri taajuuksille laskea aallonnopeudet. SASW:n tuloksena saadaan siis kaikkien eri maakerrosten aallonnopeudet erikseen eri taajuuksien vaihe-erosta laskemalla.



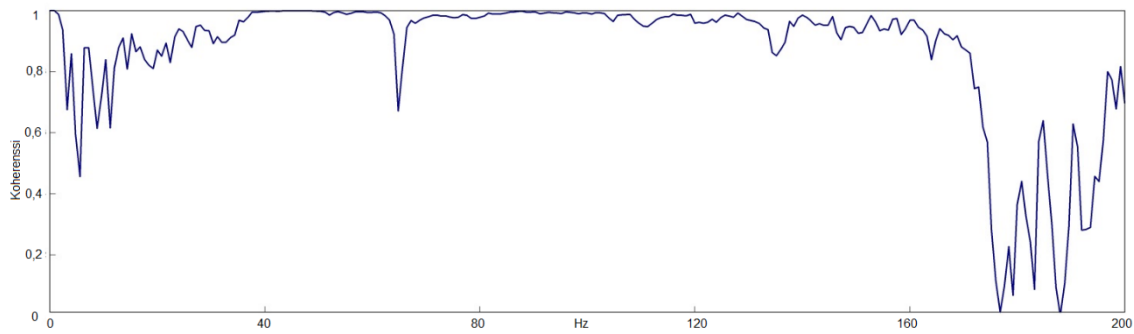
Kuva 1. Ristispektri SASW anturien signaalien välillä, josta nähdään eri taajuuksien väliset vaihe-erot.

SASW menetelmään kuuluu varmistaa mittaustulosten mittasignaalien laatu, jota voidaan arvioida koherenssifunktiolla mittasignaalien välillä [11]. Koherenssifunktio ei ollut riittävän hyvä alkuperäisissä signaaleissa. Koherenssifunktio osoittaa koherenssin arvon taajuuksien vaihteluvälillä 0-1. SASW:ssa vaadittu koherenssi on 0,95 tässä analyysissä, ja samaa raja-arvoa on käytetty myös muissa tutkimuksissa. Koherenssia ei saatu näin korkealle ilman keskiarvostusta, jonka vaikutus näkyy kuvien 2 ja 3 erona. Kuvassa 2 nähdään, miten koherenssi ei saavuta tätä arvoa kuin kapeilla taajuuskaistoilla. Keskiarvostuksella koherenssi saatiin kuitenkin nostetuksi riittävän korkealle taajuusalueilla 35-63 Hz sekä 67-110 Hz, kuva 3. Nämä taajuusalueet ovat myös hyviä perusoletuksia maaperän värähtelyjen taajuussisällölle. SASW menetelmässä taajuuskaistojen, joilla koherenssi ei ole riittävä, suodattamista tuloksista kutsutaan 'masking' operaatioksi.

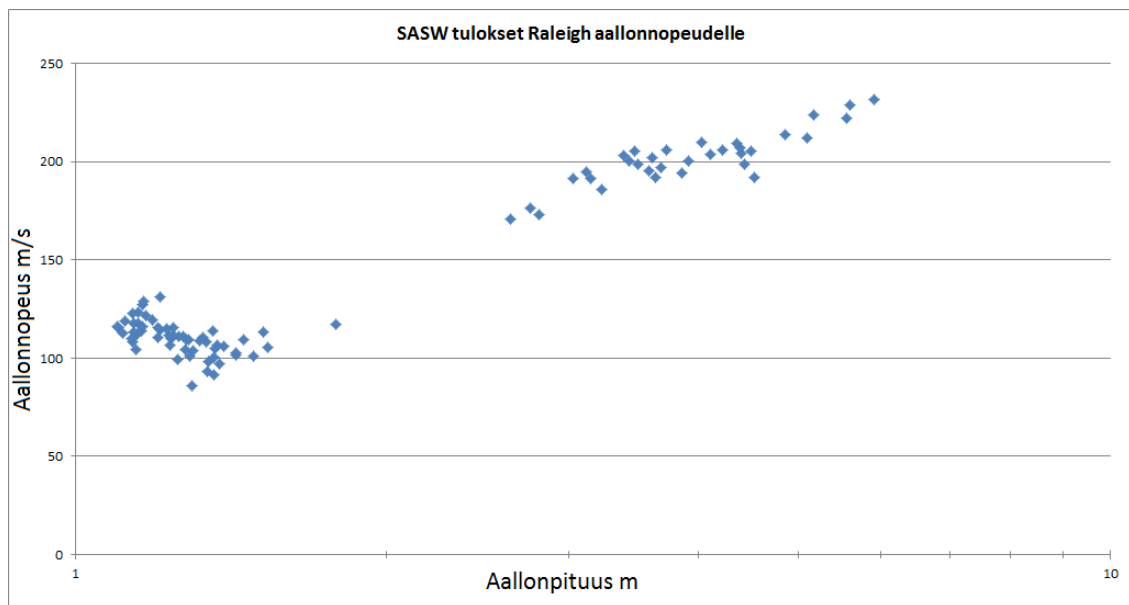
Kuvassa 4 esitetään SASW mittauksen tulokset. Alhaisin aallonnopeusalue on 90-130 m/s, jonka keskiarvoksi saatiin 111 m/s. Ylemmät aallonnopeusalueet kuvaavat muiden radan kerrosten aallonnopeuksia. Alhaisimman aallonnopeuden alue vastaa kaluston nopeusalueetta 195-281 km/h, jolla palautuva painuman kasvu alkaa voimistua, keskiarvon ollessa 240 km/h.



Kuva 2. SASW analyysin koherenssifunktio taajuusalueella 0-200 Hz ennen keskiarvostusta.



Kuva 3. SASW analyysin koherenssifunktio taajuusalueella 0-200 Hz 10 mittauksen keskiarvostuksen jälkeen.



Kuva 4. SASW mittauksen tulokset ratarakenteen aallonnopeusjakaumalle.

Pehmeikön värähtelyn ja palautuvan painuman voidaan siis arvioida kasvavan merkittävästi pistejoukon keskiarvon mukaisesti nopeuden ollessa 240 km/h, taikka erittäin varovaisella arviolla alimman pisteen mukaisesti 195 km/h nopeudesta ylöspäin. Koeajomittauksilla varmistettiin lisäksi, ettei värähtely eikä painuma kasva kriittiseksi liikennöintinopeuksissa.

Viitteet

- [1] Krylov, V. V. (1995). Generation of ground vibrations by superfast trains. Applied Acoustics 44. pp.149-164. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)91370-I](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)91370-I)
- [2] Banverket, Evaluation and analyses of measurements from the west coast line at Ledsgård, 1999.

- [3] Woldringh, R.F., New, B.M. (1999). Embankment design for high speed trains on soft soils. *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Barends et al. (eds).
- [4] Madshus, C., Kaynia, A. M. (2000). High-speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed. *Journal of Sound and Vibration* 231(3). pp. 689-701. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2647>
- [5] Törnqvist, J., Hakulinen, M., Koskinen, M. Nuutilainen, O. Ratapenkereen värähtelyn arviointi Seinäjoki – Oulu –rataosuudella. Tutkimusraportti, VTT. 2015.
- [6] Krylov, V.V. (1994) On the theory of railway-induced ground vibrations, *Journal de Physique IV*. 4 (C5). pp. 769-772. <https://doi.org/10.1051/jp4:19945167>
- [7] Massarsch, K. R., Bodare, A., Smekal, A. (2002). Effects of vibrations from railway traffic, PrognosVib Report 1, Delrapport 1, Contract B01-1027/17. Banverket. 111p. URL: www.georisk.se/getfile.ashx?cid=67228&cc=3&refid=47.
- [8] Krylov, V.V. (2011) Comments on chapter 12 of “railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control”, by D. Thompson (with contributions from C. Jones and P.-E. Gautier), Elsevier, 2009. *Applied Acoustics* 72 (2011). pp. 785-786. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.03.004>
- [9] Törnqvist, J. (2011). Lielähti-Seinäjoki rataosan pengervärähtely, VTT-R-00390-10. VTT. 42s.
- [10] Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P.-E., Moritz, L. (2000). Geodynamik i praktiken, Information 17. Statens Geotekniska Institut. 51 s. URL: <http://www.swedgeo.se/upload/Publikationer/Info/pdf/SGI-I17.pdf>
- [11] Hildebrand R., Miettinen J., Montonen J., Raunisto Y. “Soil and building response to a compaction hammer and sheet piler,” *Soc Experimental Mechanics IMAC XXII*, 2004, Dearborn, Michigan

Pekka Salmenperä
 VR Track Oy
 Rautatienkatu 25A, 33100 Tampere
 pekka.salmenpera@vr.fi

Robert Hildebrand
 Lake Superior State University
 650 W. Easterday Ave., Sault Ste. Marie, MI 49783
 rhildebrand@lssu.edu

Riku Varis
 Tampereen teknillinen yliopisto
 Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere
 riku.varis@tut.fi