

Tutkimuskeskus

TERRA Geo
Road
Rail

Terran vaihdetutkimuksia

Kaluston suistumisriski vaihteen kielisovitusalueella

Case Tampere

Riku Varis

14.1.2025

Ratarakenteiden tutkimusryhmä

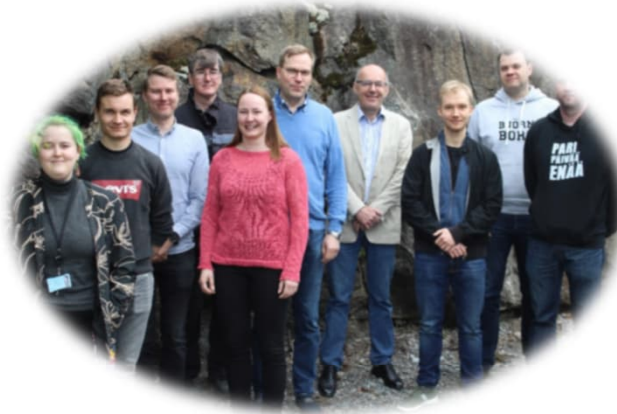
- Noin kymmenen hengen ryhmä, johon kuuluu sekä tutkijoita että tutkimusapulaisia
- Tutkimusalueena radan komponentit
 - Kalusto-raide-vuorovaikutus
 - Kiskot, ratapölkyt ja vaihteet
 - Pengerrakenne
 - Pohjarakenne
- Toiminnan pääpaino kokeellisessa tutkimuksessa
- Lisäksi rakenteiden toiminnan laskennalliset tarkastelut

<http://research.tuni.fi/ratarakenteet>

Vaihdetutkimus

- Tutkijana Riku Varis
- Pääasiallisena tutkimussuuntana vuosien varrella ollut vaihteen jäykkyyden mittaaminen ja kehitys uusien komponenttien avulla sekä kunnossapitoa parantamalla.
- Tämän lisäksi tutkimukseen kuuluu myös vaihteiden toimilaitteiden käyttövarmuuteen, kunnossapidettävyyteen ja turvallisuuteen liittyvät asiat

riku.varis@tuni.fi



Esityksen agenda



- Suomessa on tapahtunut viime vuosina useita suistumisia vaihteen kielisovitusalueella.
- Viimeisin suistuminen tapahtui Tampereen ratapihalla joulukuussa 2023, jossa Dr18-veturin ensimmäinen pyöräkerta nousi vaihteen kielisovitusalueella kielen yli ja suisti lopulta koko veturin sekä sitä seuranneen vaunun ensimmäisen pyöräkerran kiskoilta.
- Onnettomuustutkintakeskus teki tästä onnettomuudesta laajan tutkinnan, jonka loppuraportti julkaistiin 22.11.2024. **Onko joku jo tutustunut siihen?**
- Tutkimuskeskus Terra oli vahvasti mukana tässä suistumisen tutkinnassa ja tässä esityksessä käydään läpi onnettomuuteen johtaneita tekijöitä.
- Suuri osa asioista on samoja kuin mitä Onnettomuustutkintakeskuksen raportissa mainitaan, mutta lisäksi tuodaan ilmi myös muita näkökantoja ja tutkimustuloksia.

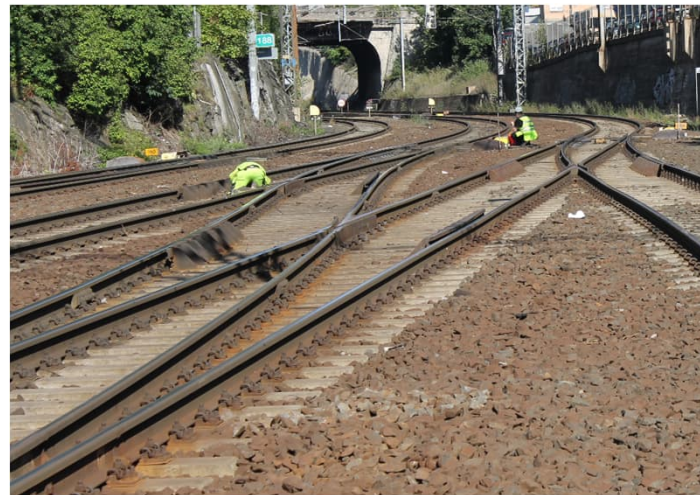
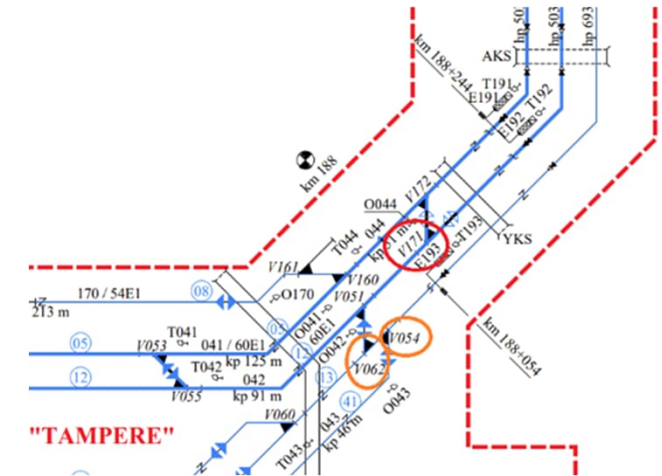
Suistumispaikan ominaisuudet

- Onnettomuusvaihde V171 on toinen raiteiden 191 ja 192 välisen raiteenvaihtokujan vaihteista.
- Vaihde sijaitsee etelästä tullessa välittömästi tiukan $R=350$ m kaarten jatkona



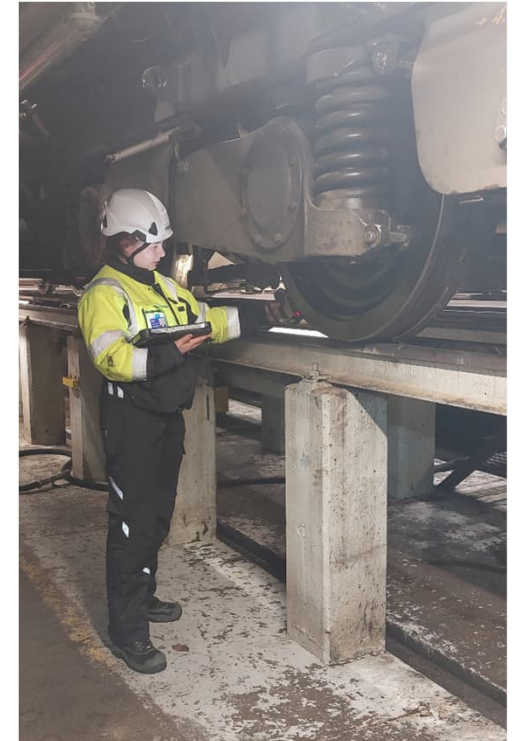
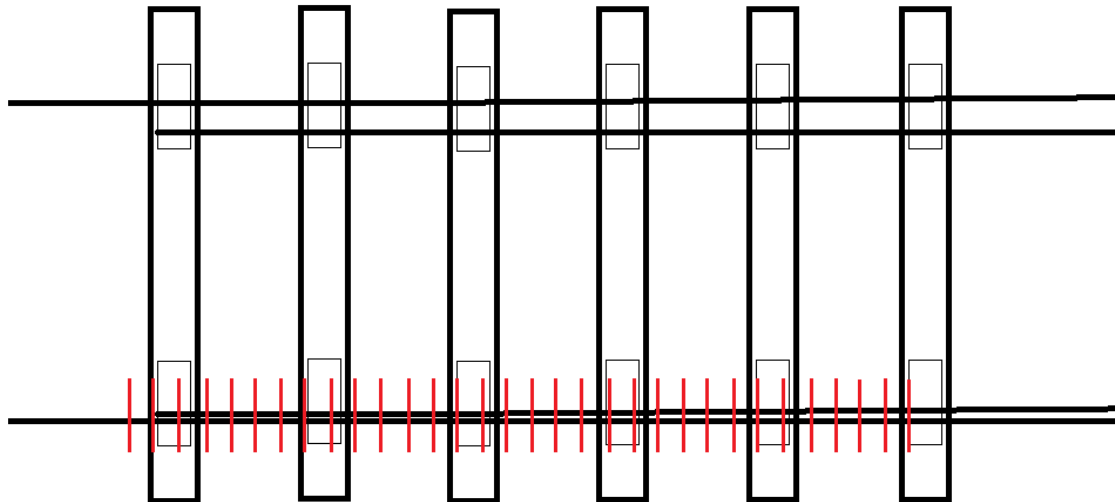
Vaihteen poikkeavalle reitille ajettaessa kielen kärkialue on keskellä pitkää jatkuvaa kaarretta ja kalusto tulee kielen kärkialueella todella usein jo valmiiksi laippakontaktissa.

- Tämän lisäksi vertailumittauksia tehtiin myös Tampereen vaihteissa V054 ja V062, jotka sijaitsevat myös vaihteen etupuolella olevan kaaren jatkona. Uuden vaihteen referenssiprofiilit mitattiin Siuron vaihteesta V001.



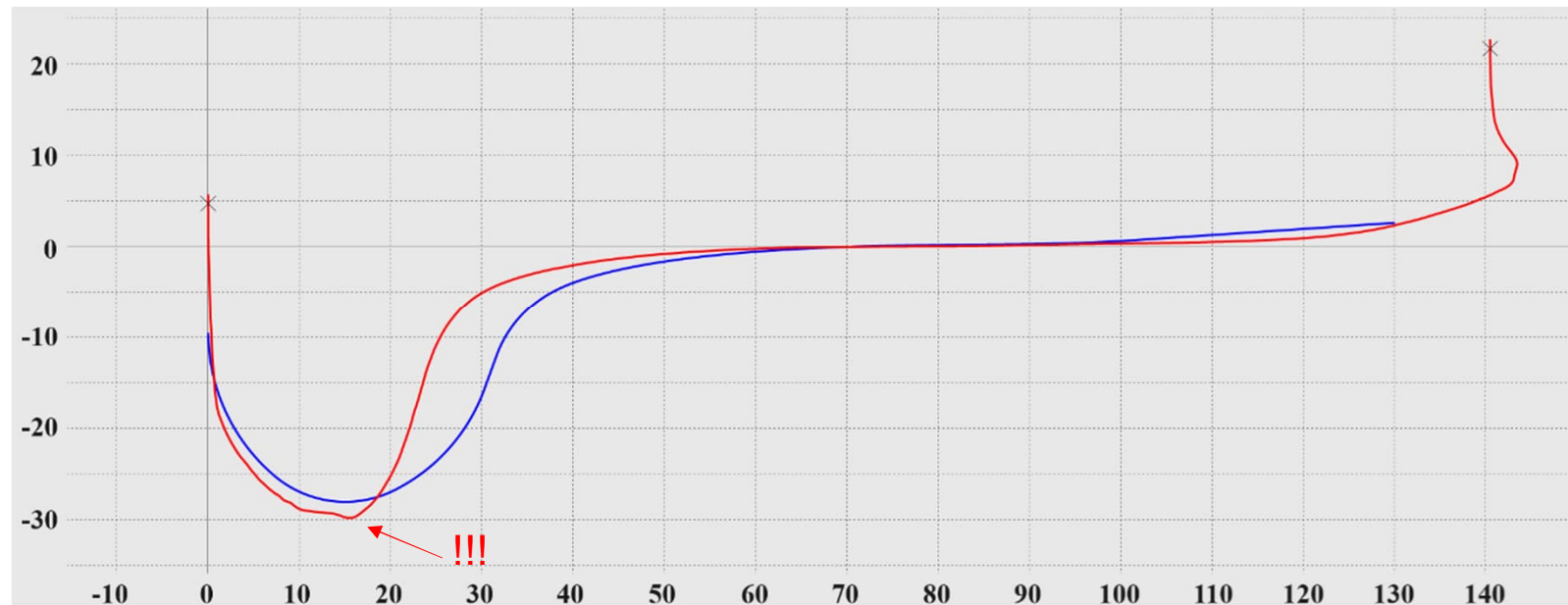
Kielen ja pyörien poikkileikkausprofiilien mittaus

- Kaikista projektissa mukana olleista vaihteista mitattiin kuluneemmasta kielestä yhteensä 31 poikkileikkausprofiilia 10 cm välein. Ensimmäinen mittaus tehtiin 10 cm kielen kärjen etupuolelta ja viimeinen 300 cm päässä kielen kärjestä.
- Onnettomuudessa suistuneesta Dr18-veturista mitattiin kaikkien 12 pyörän poikkileikkausprofiilit.



Pyörän poikkileikkausprofiilin analysointi

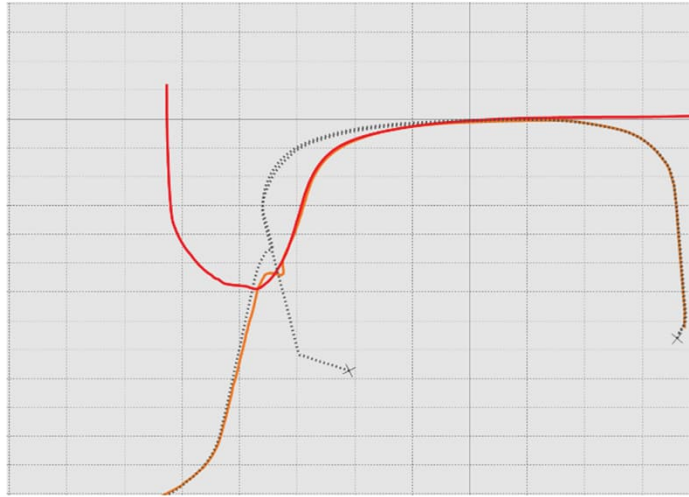
- Onnettomuuspaikalla tehtyjen havaintojen perusteella oli todennäköistä, että vaihteessa veturin suistuminen tapahtui ensimmäisen pyöräkerran toimesta, jolloin kaikista mitatuista pyöräprofiileista otettiin analysoitavaksi tämän pyöräkerran poikkeavan kielen puoleinen pyörä, eli kulkusuuntaan oikea pyörä.
- Kyseinen Dr18-veturin pyörä on silmin nähden huomattavasti kulunut suhteessa uuteen S1002-profiiliin. Siitä huolimatta se on silti kaikilta mitoiltaan standardissa EN13715 asetettujen raja-arvojen sisällä.
- Pyörään on kuitenkin muodostunut laipan korkeimpaan kohtaan kulumisen ja purseen muodostumisen myötä kohtalaisen terävä pykälä, joka saattaa olla yhdessä jyrkän laipan kulman kanssa ongelmallinen muoto pyörän mahdollisen suistumisen kannalta nimen omaan vaihteessa.



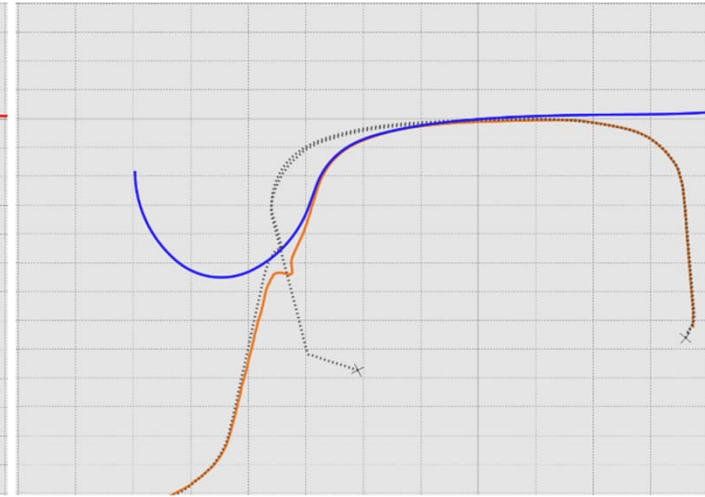
Eri tarkastelutilanteet

- Suistumistilanteen syntymisen mekanismeja tarkasteltiin neljässä eri tilanteessa:

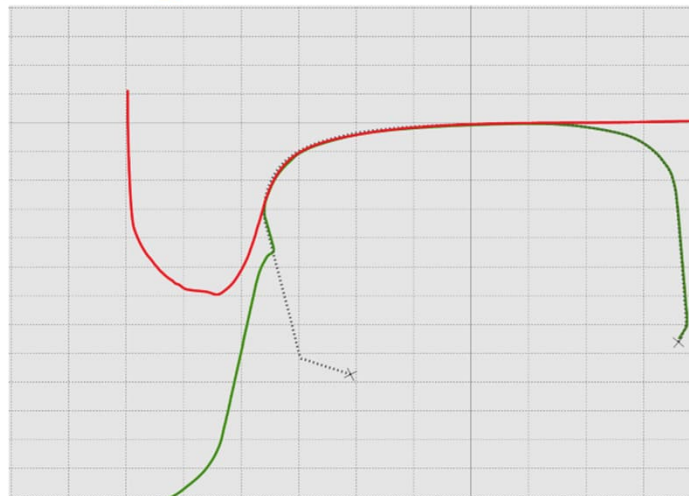
Onnettomuuspyörä – onnettomuusvaihde



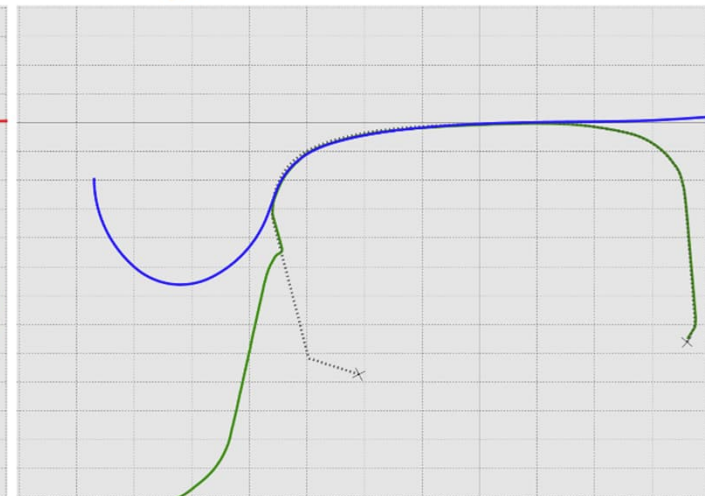
Uusi pyörä – onnettomuusvaihde



Onnettomuuspyörä – uusi vaihde

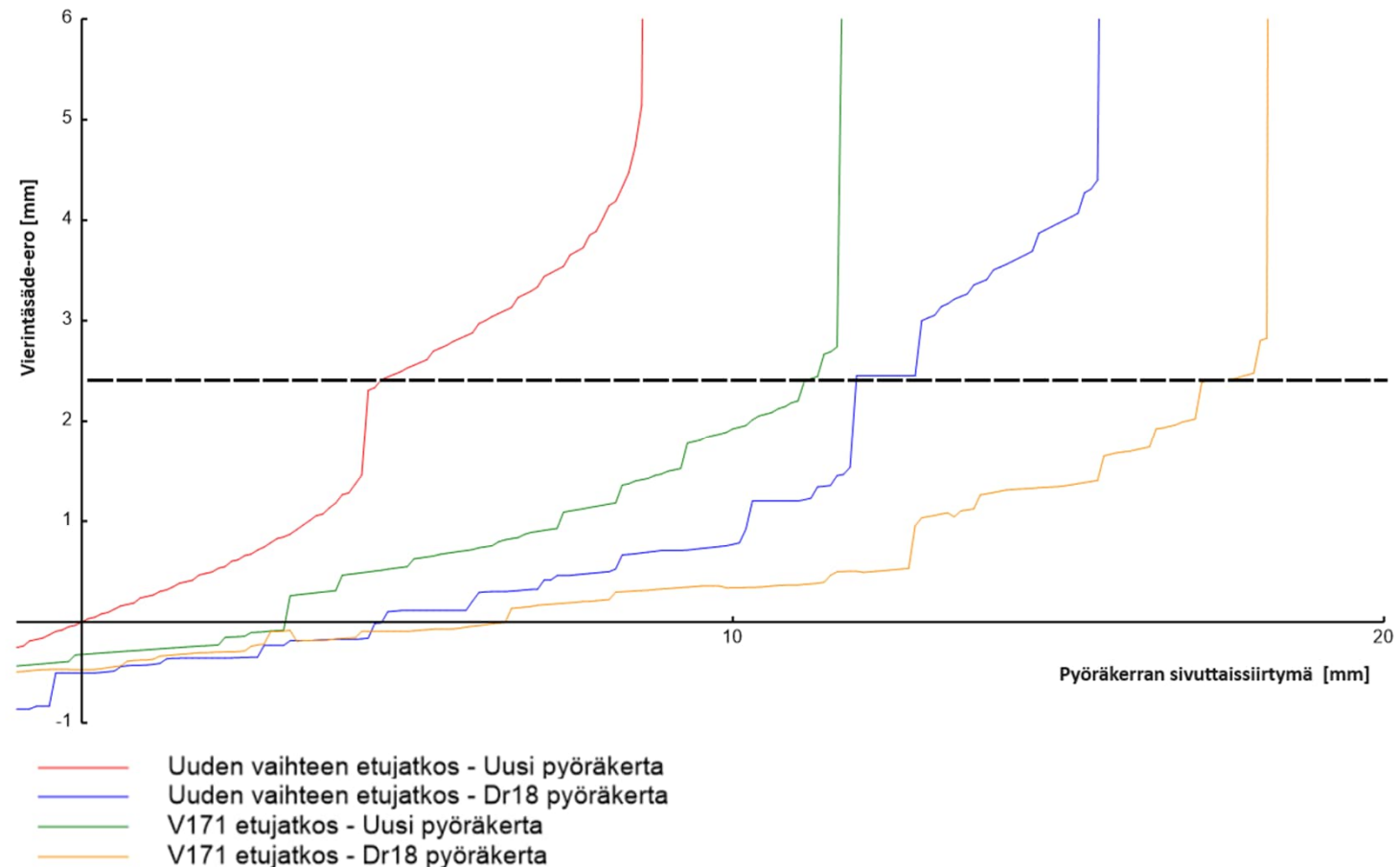


Uusi pyörä – uusi vaihde



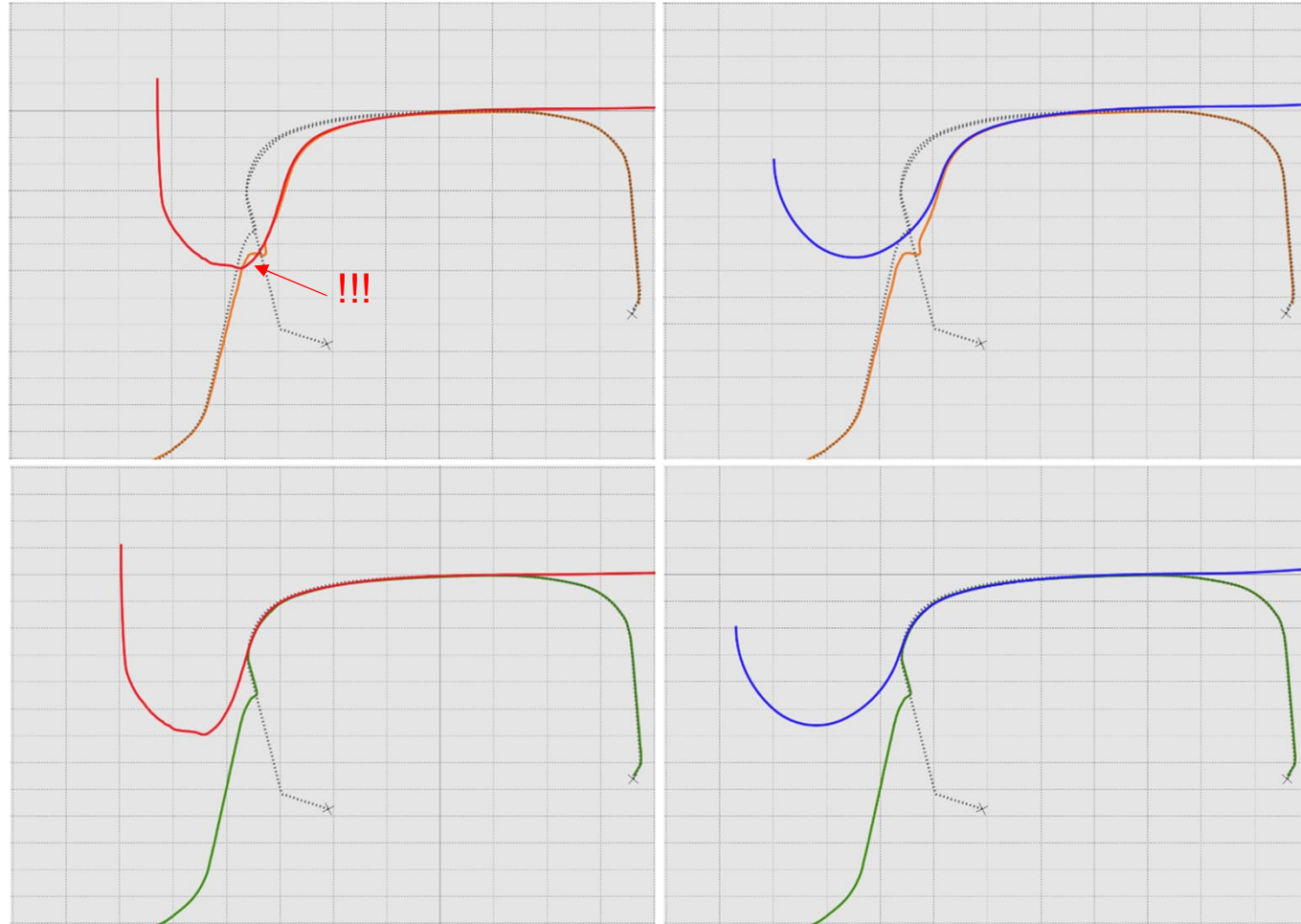
Pyöräkerran vierintäsäde-ero vaihteen etujatkoksessa

- Kuvassa oikealla on esitetty jokaisen 4 tutkitun tapauksen kohdalla, miten pyöräkisko-kontaktiin syntyy vierintäsäde-eroa liikuttaessa raiteen keskiasemasta kohti laippakontaktia.
- Puhtaasti laskennallisella tasolla voidaan määrittää, että kaarresäteen $R = 350$ m kaaressa (vaihteen edessä oleva kaari) kuljettaessa halkaisijaltaan $D = 1050$ mm olevilla Dr18-veturin pyörillä vierintäsäde-eron tulee olla 2,4 mm riittävän ohjautumisen saavuttamiseksi.
- Uuden vaihteen etujatkoksessa tällainen vierintäsäde saavutetaan sekä uudella pyörällä (punainen) että Dr18-pyörällä (sininen) jo huomattavasti ennen laippakontaktia, eli pyöräkerta ei ajaudu näissä tilanteissa automaattisesti laippakontaktiin.
- Kuluneen V171 etujatkoksen tapauksissa kumpikaan pyöräkerta (vihreä ja keltainen) ei kykene muodostamaan riittävää vierintäsäde-eroa ennen laippakontaktia.
- Kuluneen vaihteen tapauksessa pyörä on siis vaihteeseen saavuttaessa täysin laippakontaktissa.



Pyörten kulku eri vaihdeprofiileissa

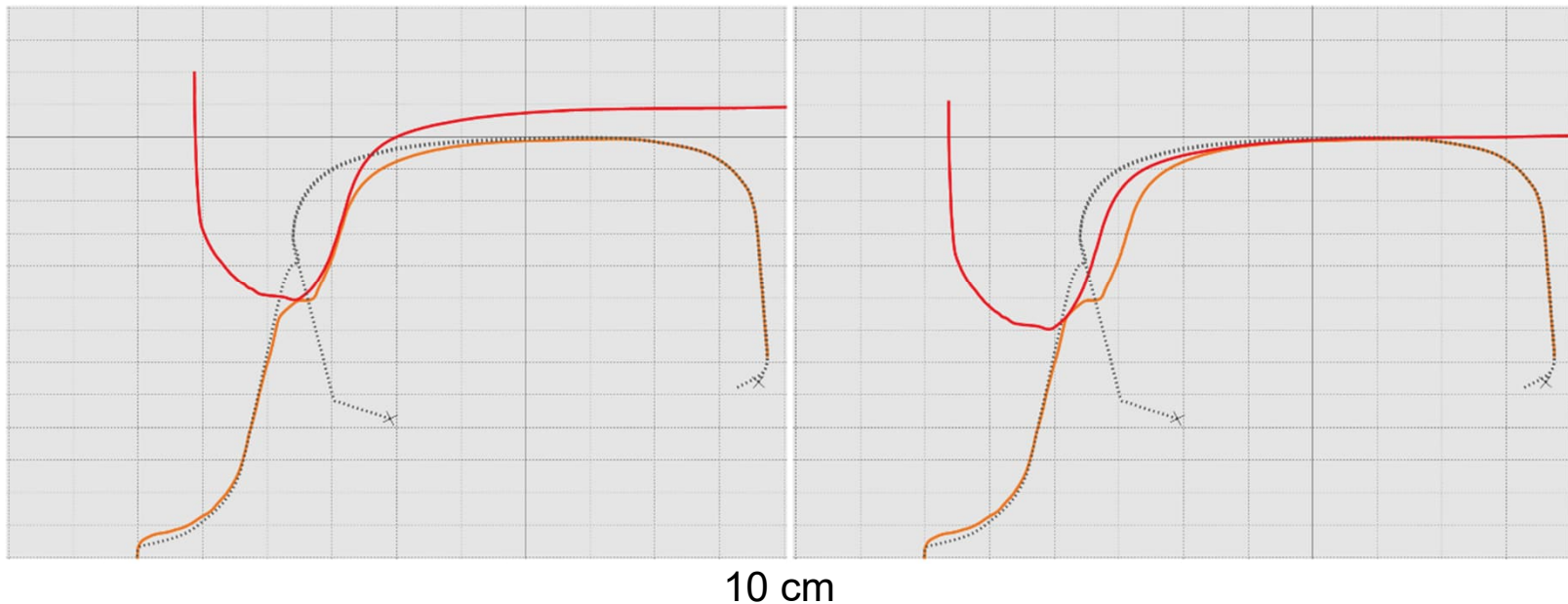
- Vaihteen kärjestä (0 cm kielen kärjestä) mitattujen tulosten perusteella onnettomuusvaihteessa on havaittavissa todella paljon sivukulumista sekä kielessä että varsinkin tukikiskossa. Sivukulumisen määrä 14 mm kulkupinnan alapuolella on 7 mm, jonka takia b-mitta on kasvanut 1525 mm -> **1532 mm (akuuttiraja)**.
- Tulokset osoittavat myös sen, että onnettomuuspyörä voi laippakontaktissa vaihteeseen saapuessaan törmätä onnettomuusvaihteen kielen kärkeen. Uudella pyöräprofiililla tai uuden vaihteen tapauksessa tätä törmäystä ei tapahdu.
- Tällä törmäämisellä katsotaan olevan todella suuri merkitys mahdollisen suistumisen syntymisessä.



0 cm

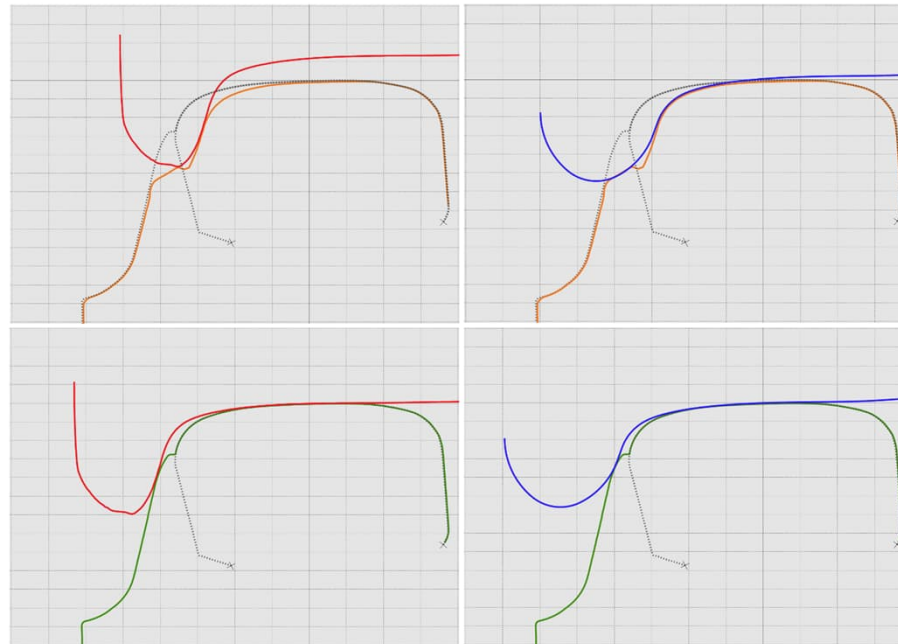
Onnettomuuspyörän kieleen törmäämisen seuraus

- Kun onnettomuuspyörä osuu onnettomuusvaihteen kielen kärkeen, sillä on mahdollisuus kiivetä välittömästi sen seurauksena kielen päälle. Tällöin pyörän kontakti varsinaiselta tukikiskon kontaktipinnalta menetetään. Tämä skenaario on hyvin kriittinen pyöräkerran suistumisen kannalta.
- Pyörä voi myös törmäyksen takia liikkua täysin sivulle, jolloin normaali kontakti tukikiskon kulkupinnalla säilyy. Jos näin käy, todennäköisyys suistumiselle pienenee huomattavasti.
- Jokin näiden kahden eri ääriskenaarion välimuoto on myös mahdollinen, eli pyörä nousee törmäyksen seurauksena osittain kielen päälle.
- Pyörän käyttäytyminen kielen ensimmäisen 10 cm matkalla määrittää jo siis heti hyvin paljon mahdollisen suistumisen mahdollisuutta



Pyörän käyttäytyminen myöhemmin vaihteessa

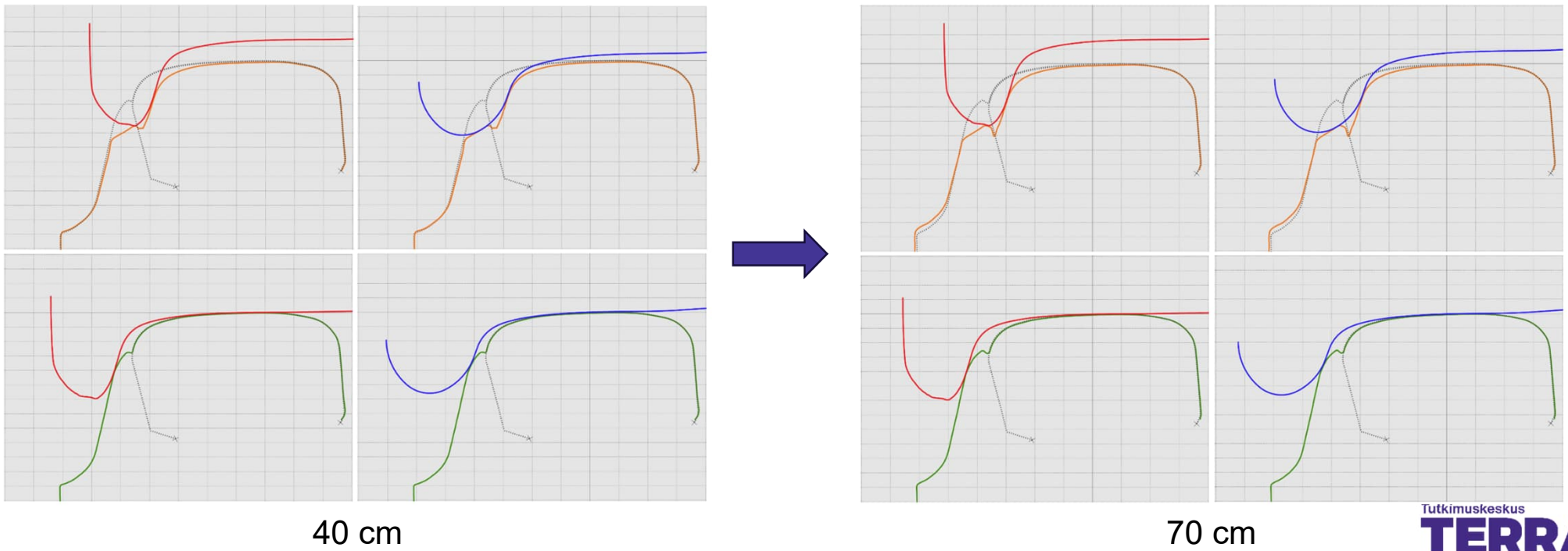
- Onnettomuusvaihteen vahva sivukuluminen johtaa myöhemmin vaihteen kielellä (30 cm kielen kärjestä) siihen, että myös uusi pyörä ottaa kontaktin laipan alaosallaan kieleen. Tämän kontaktin kontaktikulma on niin pieni, että uusikin pyörä lähtee todennäköisesti kiipeämään vaihteen kielen päälle.
- Pyörän nousemisen mahdollisuutta voidaan arvioida kriittisen kohtauskulman kaavalla: $\delta_{krit} < \tan^{-1} \frac{Y}{Q}$, jossa Y on pyörä-kisko-kontaktissa vaikuttava poikittaisvoima ja Q on pyörä-kisko-kontaktissa vaikuttava pystyvoima.
- Kaavan mukaisesti kontaktikulmalla 30° pyörän nousemiseen riittäisi Y/Q-suhde 0,57 ja kontaktikulmalla 40° vastaava suhde olisi 0,84.
- Aiemmin Kouvolassa suoritettujen kaarremittausten perusteella tiedetään, että kolmiakselisella telillä Y/Q-suhteen on mahdollista kasvaa vaihteessa käytetyllä 20 km/h nopeudella tällaisiin arvoihin.



30 cm

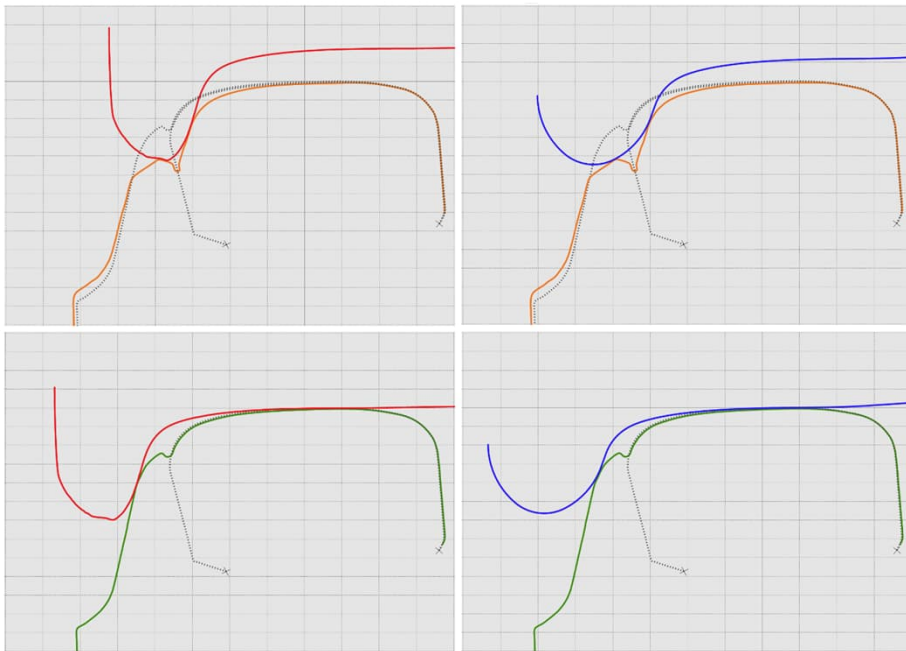
Pyörän käyttäytyminen myöhemmin vaihteessa

- 70 cm etäisyydellä onnettomuuspyörä pystyy pääsemään asemaan, jossa pyörän terävä pykälä asettuu kielen korkeimman kohdan väärälle puolelle. Pykälän takia pyörä ei välttämättä enää pääse laskeutumaan takaisin kohti normaalia kontaktia.
- Uuden pyörän kohdalla pyörä pääsee nousemaan myös kielen päälle, mutta uuden pyörän laippa on leveämpi eikä se sisällä minkäänlaista pykälää, joka pitäisi pyörää kielen päällä. Sen on siis mahdollista palata vielä takaisin normaaliin kontaktiin, jos kiskon poikkileikkausprofiili muuttuu paremmaksi tai jos pyörä-kisko-kontaktissa vaikuttava poikittaisvoima Y vähenee.
- Uuden vaihteen kohdalla tulokset osoittavat, että kummallakin tutkitulla pyörällä kontaktikulmat pyörän ja kielen välisessä kontaktissa ovat niin suuret, että mahdollisuudet pyörän kiipeämiselle on käytännössä olemattomat.



Lohkeama onnettomuusvaihteen kielessä

- Kieleen on syntynyt noin 90 cm etäisyydellä kielen kärjestä lohkeama kielen päälle. Lohkeaman takia pyörä pääsee kielen päällä ollessaan viimeistään tässä kohdassa vahvasti kielen väärälle puolelle.
- Tässä kohdassa kontakti kielen väärälle puolelle on jo niin merkittävä, että akselipainon aiheuttamat pystysuuntaiset voimat pyrkivät painamaan pyörää entistä enemmän kielen ja tukikiskon väliin ja avaamaan kieltä. Lähellä vaihteenkääntölaitetta kieli saattaa vielä pystyä kääntötankojen pitovoiman ansiosta vastustamaan kielen avautumista, mutta pyörän liikkua koko ajan kauemmaksi vaihteenkääntölaitteesta kielen avautuminen tällaisten voimien vaikutuksesta on hyvin todennäköistä.
- Vaakavoimien vaikuttaessa uusi pyörä on tässäkin kohtaa todennäköisesti yhä kiivenneenä kielen päälle, mutta loivemman muotonsa takia se ei ole päässyt silti kiipeämään kielen yli.

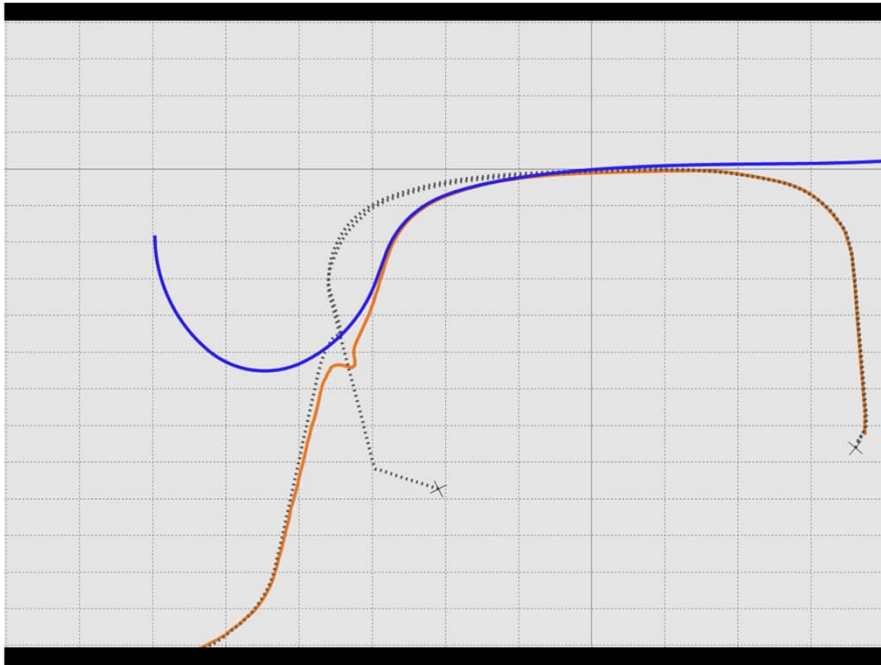


90 cm

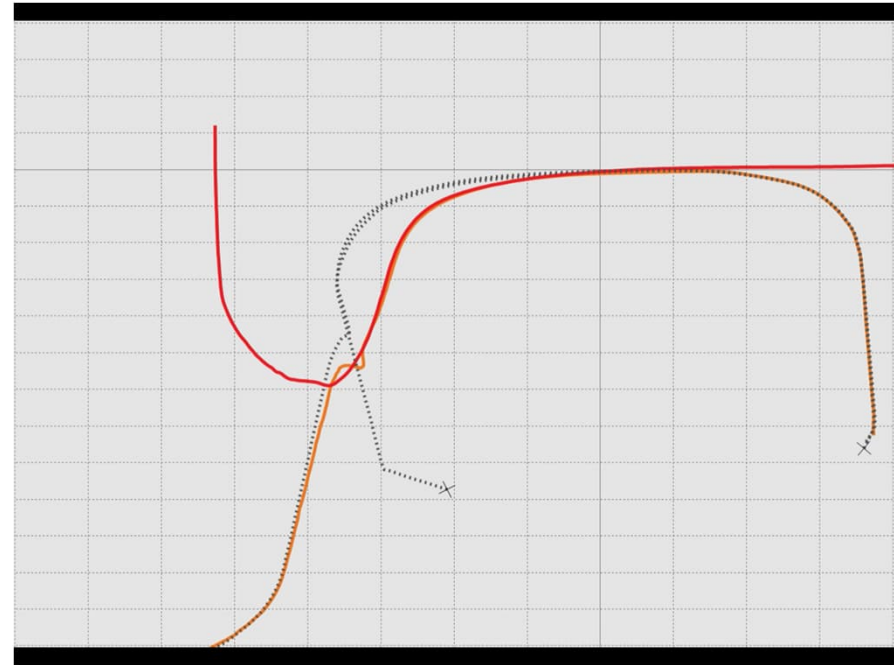


Uuden ja kuluneen pyörän käyttäytyminen onnettomuusvaihteessa

uusi pyörä – onnettomuusvaihde

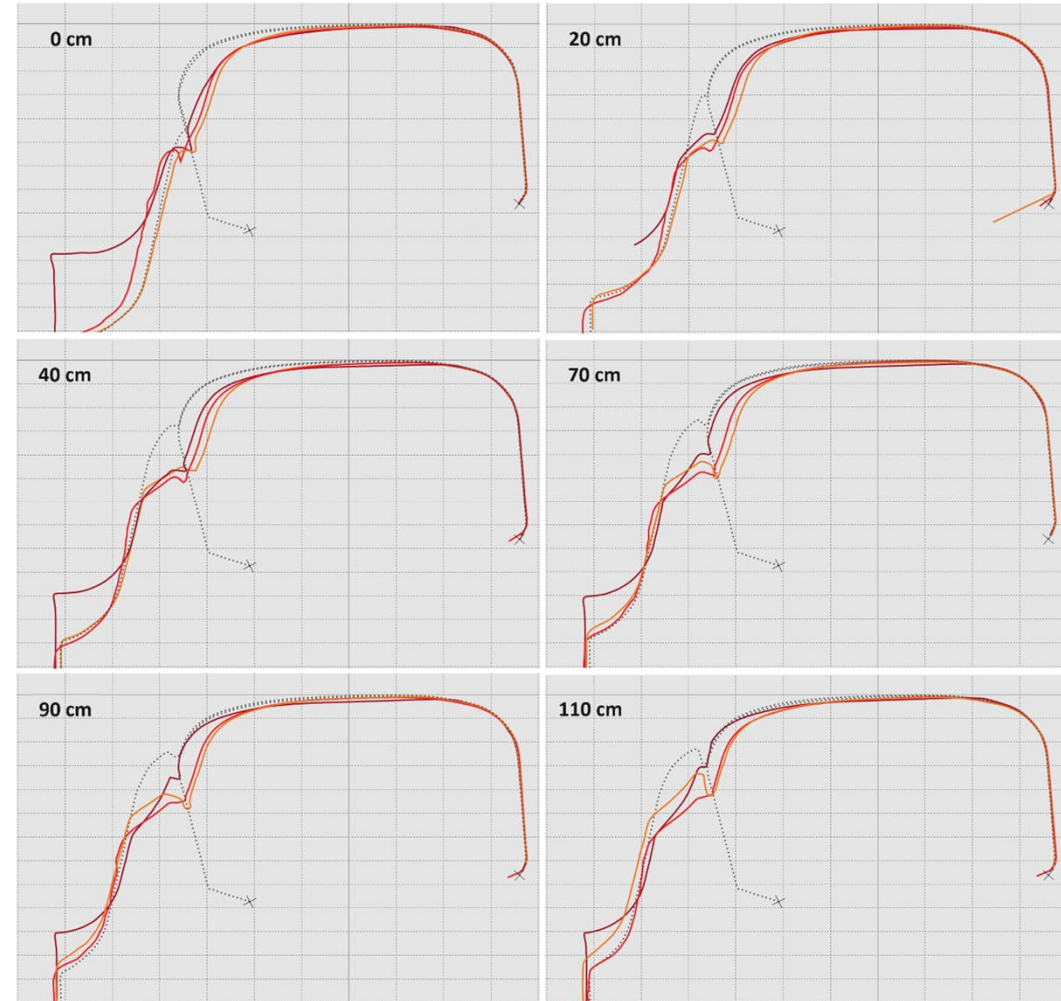


kulunut pyörä - onnettomuusvaihde



Ympäröivien vaihteiden kunto

- Onnettomuusvaihteen vieressä olevissa vaihteissa V054 (ruskea käyrä) ja V062 (punainen käyrä) on havaittavissa myös kielen kärjen alueella merkittävää sivukulumista.
- Tämä vaikuttaa vaihteessa V062 välittömästi siihen, että kieli on suhteessa normaalia enemmän esillä ja pyörä on vaarassa törmätä siihen kenties jopa vielä enemmän kuin vaihteessa V171.
- Vaihteessa V054 tilanne on hieman erilainen, sillä tukikisko ja kieli ovat kuluneet ikään kuin samaa vauhtia eikä kieli ole esillä. Tämä johtuu siitä, että vaikka vaihde on suoraan tiukkasäteisen kaaren jatkona, sen kätisyys suhteessa edeltävään kaareen on eri.
- Vertailtaessa vaihteita V171 ja V062 merkittävimmäksi eroksi muodostuu se, että kaikilla kuvassa esitetyillä etäisyyksillä vaihteen V171 tukikiskon sivukuluminen on hieman suurempaa, mutta samaan aikaan kielen kuluminen on vuorostaan selkeästi vähäisempää. Juuri tämä vaihteen V171 kulumisero kielen ja tukikiskon välillä luo suistumisen kannalta kriittistä pykälää kielen ja tukikiskon väliin. Tämä pykälä on vaihteessa V062 pienempi.
- Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että tilanne vaihteen V062 suhteen olisi täysin ongelmaton. Tämän vaihteen kunnossapitoon ja seurantaan kannattaa siis kiinnittää erityistä huomiota.

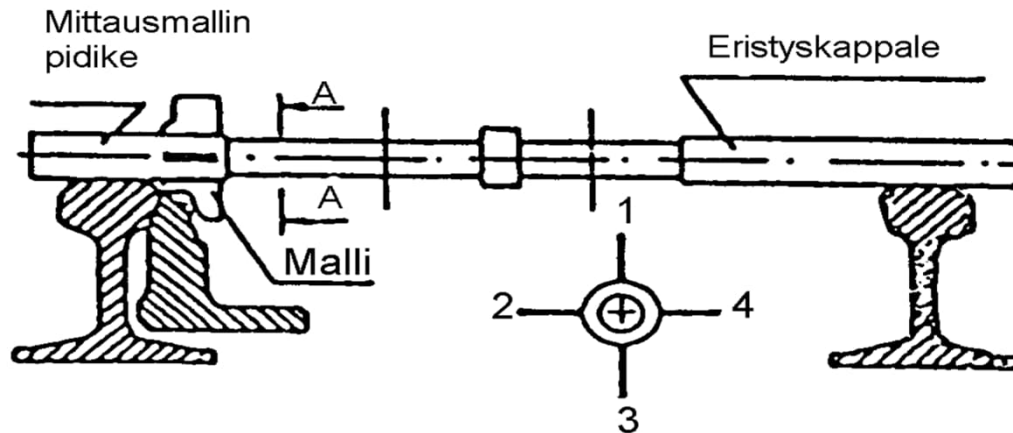


Johtopäätökset

- Sekä pyörä että vaihde olivat silmin nähden kuluneita. Pyörä oli kuitenkin mittausten perusteella normaalien käyttörajojen sisällä. Vaihde oli sen sijaan raidelevyden perusteella akuuttirajalla tai jopa 1 mm kuluneempi. Pyörän laipan korkeus oli kasvanut hieman kulkukehän kulumisen seurauksena, ja laipan päälle oli muodostunut terävä purse.
- Kulunut pyörä tai vaihde eivät yksinään johda kriittiseen tilanteeseen suistumisen kannalta. Yhdessä ne saavat aikaan tilanteen, jossa pyörä törmää kielen kärkeen. Törmäyksen jälkeen pyörä voi siirtyä sivusuunnassa tai nousta kielen päälle.
- Vaihteen V171 etupuolella oleva tiukka $R = 350$ m kaarre johtaa siihen, että vaihteeseen sekä suoralle että poikkeavalle raiteelle ajava kalusto kulkee hyvin todennäköisesti laippakontaktissa, jonka seurauksena vaihde kuluu vastavaihteeseen ajettaessa molemmilla reiteillä.
- Suistumisriskiä lisää huomattavasti se, että vaihteen V171 tukikisko on kulunut merkittävästi pelkästään suoralle kulkevan liikenteen takia, jolloin kieli ja tukikisko ovat kuluneet eriaikaisesti. Tämä on johtanut siihen, että kielen ja tukikiskon väliin on muodostunut pykälä. Tämä pykälä yhdessä pyörässä esiintyvän purseen kanssa muodostavat tilanteen, jossa pyörän on mahdollista nousta pysyvästi kielen päälle. On äärimmäisen tärkeää ymmärtää, että vaihdealueella suistuminen ei vaadi pyörän kiipeämistä varsinaisen tukikiskon yli vaan jo kielen päälle kiipeäminen ja siellä pysyminen riittää, sillä se johtaa lopulta pyörän putoamiseen kielen ja tukikiskon väliin.
- Havaintojen mukaan kulunut kieli voi muodostaa pyörän alle loivan pinnan, jolloin pyörän ja kielen välinen kontaktikulma on pieni. Tällöin pyörän on mahdollista nousta kielen päälle kielen matkalla. Esityksessä kuvatut skenaariot kuluneessa vaihteessa tapahtuvalle pyörän nousulle kuvaavat kuitenkin ääritilanteita, jotta ymmärretään suistumisen mahdolliset mekanismit. Y/Q-arvojen pitää olla riittävän suuria, jotta pyörän nousu voi ylipäättään tapahtua. Suurimmalla osasta kalustoa tarpeeksi suuria Y/Q-arvoja ei tiukasta kaarteestakaan huolimatta synny. Onnettomuusveturin 3-akselisen telin tapauksessa Y/Q-arvo voi kasvaa riittävän suureksi ja johtaa pyörän nousuun kielen päälle myös kuluneen kielen matkalla.

Johtopäätökset

- Onnettomuusvaihteen V171 vertailu muihin ympäröiviin vaihteisiin osoitti sen, että muista vaihteista ei löydy vastaavaa kielen ja tukikiskon välistä kulumiseroa, jolloin suistumisriski niissä ei ole yhtä suuri. Tästä huolimatta vaihteen V062 kulumismuotoihin tulisi kiinnittää erityistä huomiota.
- Onnettomuusvaihteen kulumista voitaisiin vähentää merkittävästi lisäämällä runsaan metrin pituinen suora ennen vaihdetta, jotta vaihde ei alkaisi välittömästi kaaren perään. Tämä metrin suora osuus riittäisi tukikiskon sivukulumisen määrän selkeään vähenemiseen kuljettaessa vaihteessa suoralle. (onko realismia?)
- Pyörän laipalle muodostunut purse pitäisi poistaa mahdollisimman pian, sillä se lisää pyörän suistumistodennäköisyyttä ja mahdollisuutta pysyä kielen päällä.
- Vaihteen kunnossapidossa pitäisi keskittyä jatkossa hyvin tarkasti vaihteen kielisovituksen kulumismuodon arviointiin nykyisen sivukulumismäärän ohella. Yksi tehokas keino tätä tavoitetta kohti on RATO 12 – ohjeessa esiteltävän mittatulkinn aktiivinen käyttö osana normaalia vaihteen kunnossapitotarkastusta. Tukikiskon kulumisen vaihteessa vaikuttaa merkittävästi pyörä-kisko-kontaktiin, joten tukikiskon ja kielen yhteismuotoon ja mahdollisen kielen ja tukikiskon välissä esiintyvän pykälän poistoon on syytä kiinnittää huomiota.





www.research.tuni.fi/terrarail

riku.varis@tuni.fi