

Metsähallitus

Asiantuntijaselvitys

Lapinsalmen riippusilta, Kouvola



METSÄHALLITUS

TIIVISTELMÄ

Lapinsalmen riippusilta sijaitsee Repoveden kansallispuistossa, Kouvola. Silta ylittää Lapinsalmen. Silta on tyypiltään teräksinen riippusilta, puukantinen. Sillan teräsbetoniset vastapainot on ankkuroitu betoniteräksillä kallioon. Sillan suunnittelukuormana on käytetty 10 kN suuruista pistekuormaa, mikä on sijoitettu sillan keskelle. Lisäksi Metsähallitus on ohjeistanut sillan käyttäjiä kulkemaan sillan yli 10 m välein tai yksi kerrallaan. Silta on otettu käyttöön vuonna 1987.

Riippusillan riippuköyden pyöröteräksinen ankkuritanko kallioon ankkuroituun teräsbetoniseen vastapainoon petti 1.7.2018, mikä aiheutti sillan osittaisen sortumisen ja sen asettamisen käyttökieltoon. Ankkuritangon pettämisen hetkellä sillalla oli saatujen tietojen mukaan 6 aikuista ja 2 lasta.

Sillassa havaittiin ankkuritangon murtumisen lisäksi muutamia muitakin vaurioita kuten lahoamista, ruostumista ja rapautumista sen eri rakenneosissa. Voidaan kuitenkin todeta, että nämä vauriot eivät ole edesauttaneet ankkuritangon murtumista.

Lapinsalmen sillan osittainen sortuma on ollut usean tekijän summa. On selvää, että ankkuritangon murtumistapa on ollut väsymismurtuma. Tätä ajatusta tukee murtuneen ankkuritangon murtopinta sekä äkillinen sortuminen kuten väsymismurtumassa yleensä. Murtuneen ankkuritangon, mihin sillan riippuköysi sekä kaidevaijeri kiinnittyvät, asento on suunnitelmapiirustuksista poikkeava. Ankkuritangon virheellinen asento on aiheuttanut sille kuormituksen, mitä ei ole todennäköisesti otettu siltaa suunniteltaessa huomioon. Virheasento on todennäköisesti johtunut työaikaisesta suunnitelmamuutoksesta, inhimillisestä ajatusvirheestä tai sekaannuksesta.

Silta on todennäköisesti altistunut ylikuormitukselle sen käytön aikana niin käyttäjien kuin lumikuormankin vuoksi. Ylikuorma nopeuttaa rakenteen väsymistä ja on todennäköisesti aiheuttanut särön etenemisen ankkuritangossa. Ankkuritangon murtokohta sijaitsee vastapainon betonin sisällä. Ankkuritankoon syntynyttä säröä on ollut hankala havaita paljain silmin ennen sillan osittaista sortumista. Myös erikolislaiteistolla ankkuritankoon syntynyttä säröä on vaikeaa, jollei mahdoton, havaita. Betonin aikaisemmin tapahtunut lohkeaminen alueelta olisi tosin jälkikäteen ajatellen ollut syytä tutkia tarkemmin, mutta on hankala sanoa olisiko vikaa havaittu.

Silta on periaatteessa mahdollista korjata, mutta kokonaisarviona päädyimme keskusteluissa tilaajan kanssa siihen, että silta puretaan. Myös teräsbetoniset vastapainot purettiin, jotta vastapainon raidoitusmäärä ja ankkurien asento sekä vastapainon ankkurointi kallioon voitiin tarkastaa. Lisäksi tehtiin murtuneen ankkuritangon vetokokeet sen lujuusluokan selvittämiseksi.

Suosittelimme, että kaikkiin Metsähallituksen omistuksessa oleviin siltoihin tehdään yleistarkastus (silmämääräinen tarkastus asiantuntijan toimesta) ensi tilassa. Yleistarkastuksen yhteydessä varmistetaan, että sillan rakenteet on toteutettu suunnitelmapiirustusten mukaisesti. Huonokuntoiset sillat ja suunnitelmapiirustusten vastaiset sillat asetetaan erityistarkkailuun. Lisäksi epäilyttävien rakenteiden toimivuutta voidaan tarkastella kantavuuslaskelmin sekä erikolislaiteistolla. Hyväkuntoisten ja suunnitelmapiirustusten mukaisten siltojen tarkastusväliksi ehdotamme 5 vuotta. Erityistarkkailussa olevien siltojen tarkastusvälin tihentämistä tulee harkita siltakohtaisesti. Metsähallituksen sillat voisi viedä Liikenneviraston taitorakennerekisteriin ja organisoida niiden ylläpito muiden siltojen tapaan.

Sisällysluettelo

1	Tutkimuksen kohde ja lähtötiedot.....	3
1.1	Tutkimuskohde ja rakenne	3
1.2	Tilaaaja	5
1.3	Lähtötiedot.....	5
2	Tutkimuksen tavoite ja konsultin yhteystiedot.....	6
3	Rakenteiden yleisarviointi.....	6
3.1	Raportin tulkintaohjeet	6
3.2	Riippusillan rakenneosat	7
3.3	Sillan silmä määräinen tarkastus.....	11
3.4	Sillan ankkureiden purun aikaiset havainnot	16
3.5	Ankkuritangon vetokoetulokset	20
4	Sortumiseen vaikuttaneet tekijät.....	23
5	Laskennalliset tarkastelut	26
6	Yhteenveto	30
7	Toimenpide-ehdotukset.....	31
8	Tarkastusten ohjelmointi	31

1 TUTKIMUKSEN KOHDE JA LÄHTÖTIEDOT

1.1 Tutkimuskohde ja rakenne

Lapinsalmen riippusilta sijaitsee Repoveden kansallispuistossa, Kouvola. Silta ylittää Lapinsalmen.

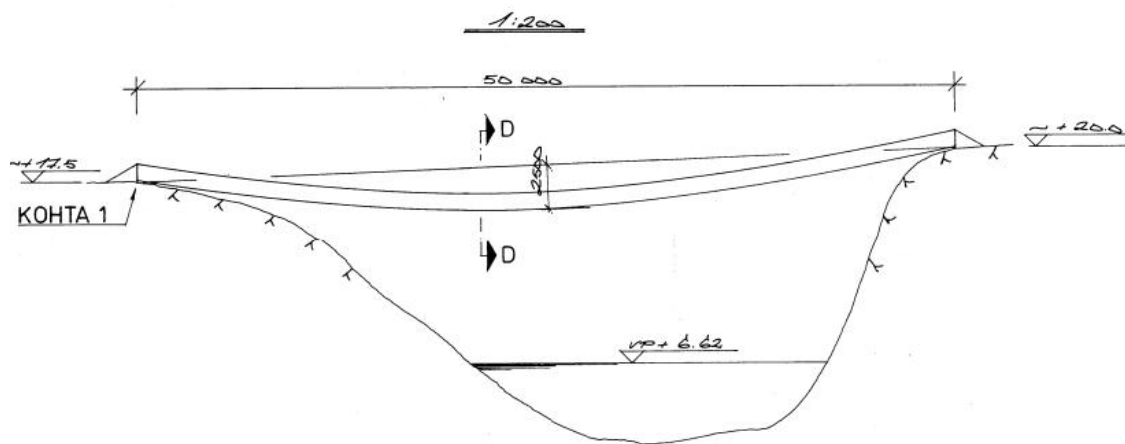
Silta on tyypiltään teräksinen riippusilta, puukantinen. Sillan teräsbetoniset vastapainot on ankkuroitu betoniteräksillä kallioon. Sillan suunnittelukuormana on käytetty 10 kN suuruista pistekuormaa, mikä on sijoitettu sillan keskelle. Lisäksi Metsähallitus on ohjeistanut sillan käyttäjiä kulkemaan sillan yli 10 m välein tai yksi kerrallaan. Silta on avattu kevyen liikenteen käyttöön vuonna 1987.

Repoveden kansallispuiston käyntimäärä oli vuonna 2017 noin 172 000, joista suuri osa käyttää riippusiltaa Lapinsalmen ylitykseen. Sillan alittava väylä, Lapinsalmi, on pienalusväylä, joka on kesäisin liikennöity.

Sillan ominaistiedot ovat seuraavat:

Jännemitat [m]	50,16
Kokonaispituus [m]	50,96
Hyödyllinen leveys [m]	0,625 – 0,70
Kokonaisleveys [m]	1,80

Sillan päämitat on mitattu siltapaikalla.



Kuva 1 Sillan pituusleikkaus alkuperäisissä suunnitelmapiirustuksissa.



Kuva 2 Yleiskuva sillasta sen eteläpuolelta.



Kuva 3 Yleiskuva sillasta kohti itää.

1.2 Tilaaja

Metsähallitus
Luontopalvelut
PL 1058, Asemakatu 7
70101 Kuopio

Tilaajan yhteyshenkilö:

Jouni Aarnio
puh. +358 40 735 2804
Sähköpostiosoite: jouni.aarnio@metsa.fi

1.3 Lähtötiedot

Lähtötietoina selvitystyölle olivat tilaajan toimittamat tiedot, asiakirjat sekä sillan alkuperäiset suunnitelmapiirustukset (suunnitelmat vuodelta 1987). Edellinen silmämääräinen tarkastus sillalle on tehty vuonna 2004 Valkealan kunnan toimesta ja tarkastuksessa ei tuolloin havaittu merkittäviä vaurioita.

Riippusillan rakennuttajana toimi Valkealan kunta. Kohteen rakennussuunnitelma hyväksyttiin kunnassa 4.5.1987 ja sillan vastaanottotarkastus pidettiin 2.7.1987.



Kuva 4 Yleiskuva sillasta kohti länttä.

Vuonna 2004 pidetyssä tarkastuksessa ja sen pohjalta Valkealan kunnan rakennustarkastuksen laatimassa tarkastuslausunnossa riippusillan kunto todettiin kaikilta osin hyväksi, eikä välittömiä korjauksia/vahvistuksia tarvita. Vuonna 2007 pidetyssä silta-tarkastuksessa, jossa Valkealan kunnan edustus oli mukana, todettiin teräsbetonisessa vastapainossa halkeama / lohkeama, joka korjattiin. Sittemmin Metsähallitus on silmämääräisesti arvioinut sillan kuntoa vuosittain.

Riippusillan riippuköyden pyöröteräksinen ankkuritanko kallioon ankkuroituun teräsbetoniseen vastapainoon petti 1.7.2018, mikä aiheutti sillan osittaisen sortumisen ja sen asettamisen käyttökieltoon. Ankkuritangon pettämisen hetkellä sillalla oli saatujen tietojen mukaan 6 aikuista ja 2 lasta.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITE JA KONSULTIN YHTEYSTIEDOT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää Lapinsalmen sillan osittaiseen sortumiseen johtaneet syyt sekä esittää jatkotoimenpiteet ja vastaavanlaisten siltojen tulevien tarkastusten ohjelmointi.

Ramboll Finland Oy teki sillalle silmämääräisen vauriotarkastuksen 12.7.2018.

Tutkimuksen projektipäällikkönä ja pääasiantuntijana toimi DI Mikko Hyyrynen.

Projektipäällikön yhteystiedot:

Mikko Hyyrynen
Ramboll Finland Oy
Pakkahuoneenaukio 2
33101 Tampere
p. +358 407 590 278

Sillantarkastajana ja raportin laatijana toimi DI Tuomo Siitonen.

Laadunvarmistajana ja teknisenä johtavana asiantuntijana toimi TkL Ilkka Vilonen.

3 RAKENTEIDEN YLEISARVIOINTI

3.1 Raportin tulkintaohjeet

Sillan vaurioiden vakavuus on esitetty käyttäen Sillantarkastuskäsikirjan (LO 26/2013) vaurioluokkia (VL). Vaurioluokkia kuvataan numeroin 1-4.

Vaurioluokat ovat:

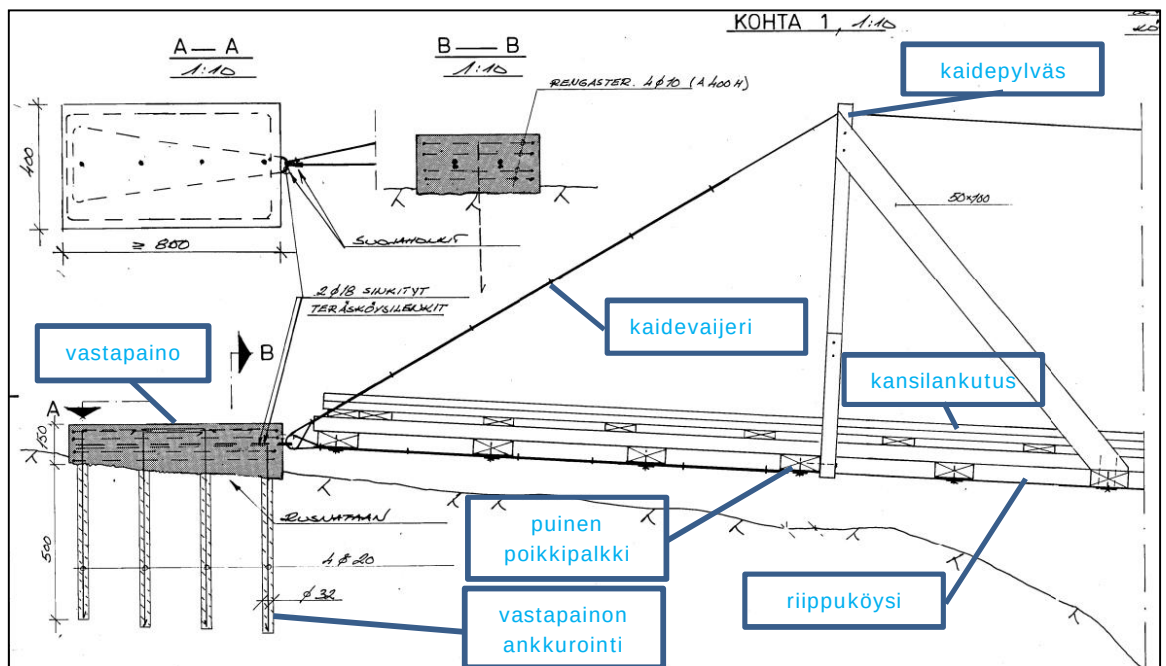
- 1 = lievä
- 2 = merkittävä
- 3 = vakava
- 4 = erittäin vakava

Vaurioiden paikannus on esitetty Liikenneviraston Sillantarkastuskäsikirjan ohjeen mukaan.

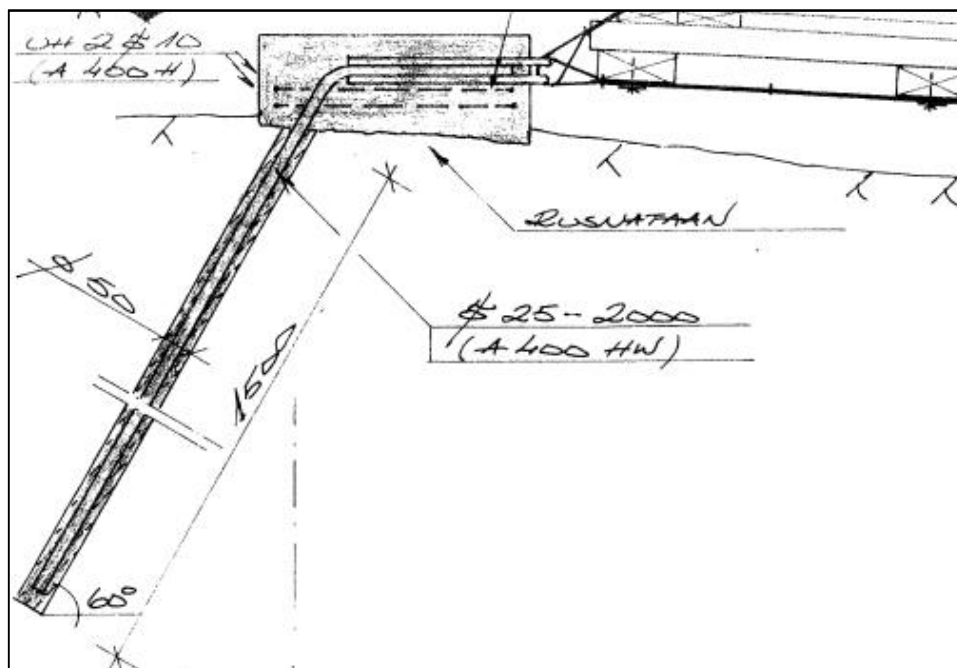
Tueksi 1 on merkitty läntinen maatuki.

3.2 Riippusillan rakenneosat

Sillan alusrakenne koostuu teräsbetonisista vastapainoista (ankkureista), joita on sijoitettu 2 kpl/tuki. Sillan alkuperäisten suunnitelmapiiirustusten perusteella kukin vastapaino on ankkuroitu kallioon neljällä Ø20 mm betoniterästangolla. Vastaavasti sillan muutossuunnitelmiin on kirjattu vastapainon ankkuroinniksi kaksi Ø25 mm betoniterästankoa. (Huomio: ei ole tarkalleen tiedossa kumpi suunnitelma on ollut alkuperäinen ja kumpi muutos / ehdotus, sillä toisissa piirustuksissa ei ole päivämäärää. On otaksuttu mainittu järjestys.) Alkuperäisten suunnitelmapiiirustusten mukainen ankkurointi on esitetty kuvassa 5 ja muutossuunnitelmien mukainen ankkurointi on esitetty kuvassa 6.



Kuva 5 Alkuperäisten suunnitelmapiiirustusten mukainen rakenne.



Kuva 6 Muutossuunnitelmapiiirustusten mukainen rakenne.

Suunnitelmapiiirustuksiin vastapainojen betonin lujuusluokaksi on määritelty K25-2, säänkestävä. Betoniterästen ankkurointiin käytetyn juotosbetonin lujuusluokaksi on suunnitelmiin määritelty K40-2. Suunnitelmapiiirustusten perusteella betoniterästen lujuusluokka on A400H.

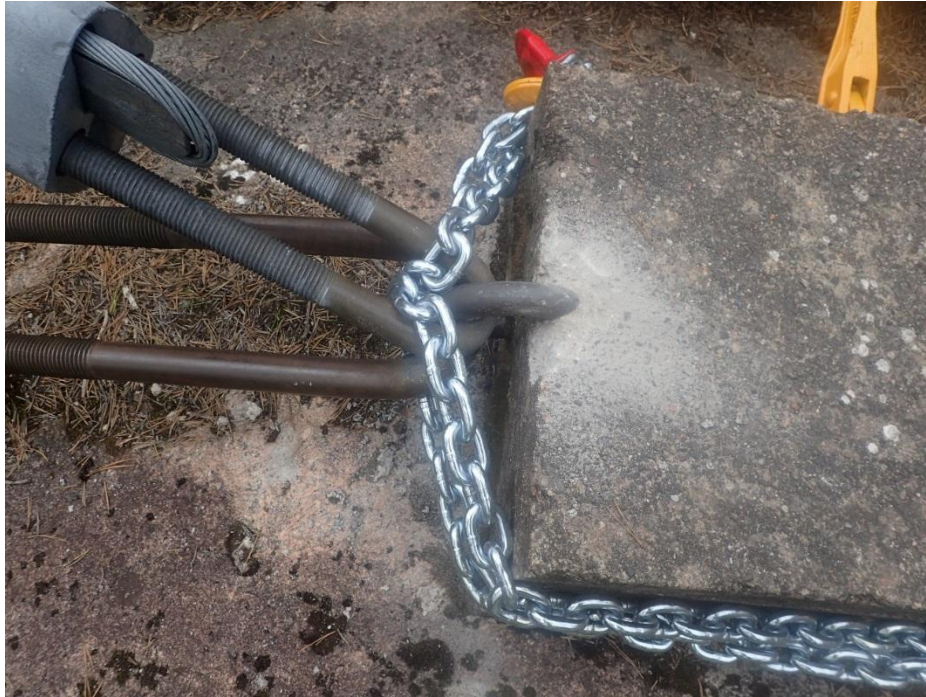


Kuva 7 Sillan länsipään eteläinen vastapaino.

Sillan kantavana rakenteena toimivat riippuköydet (vaijerit), jotka on ankkuroitu vastapainon ankkuritankoon vaijerisakkililenkkien ja kierretankolenkkien, välityksellä. Ankkuritanko on edelleen ankkuroitu teräsbetoniseen vastapainoon.

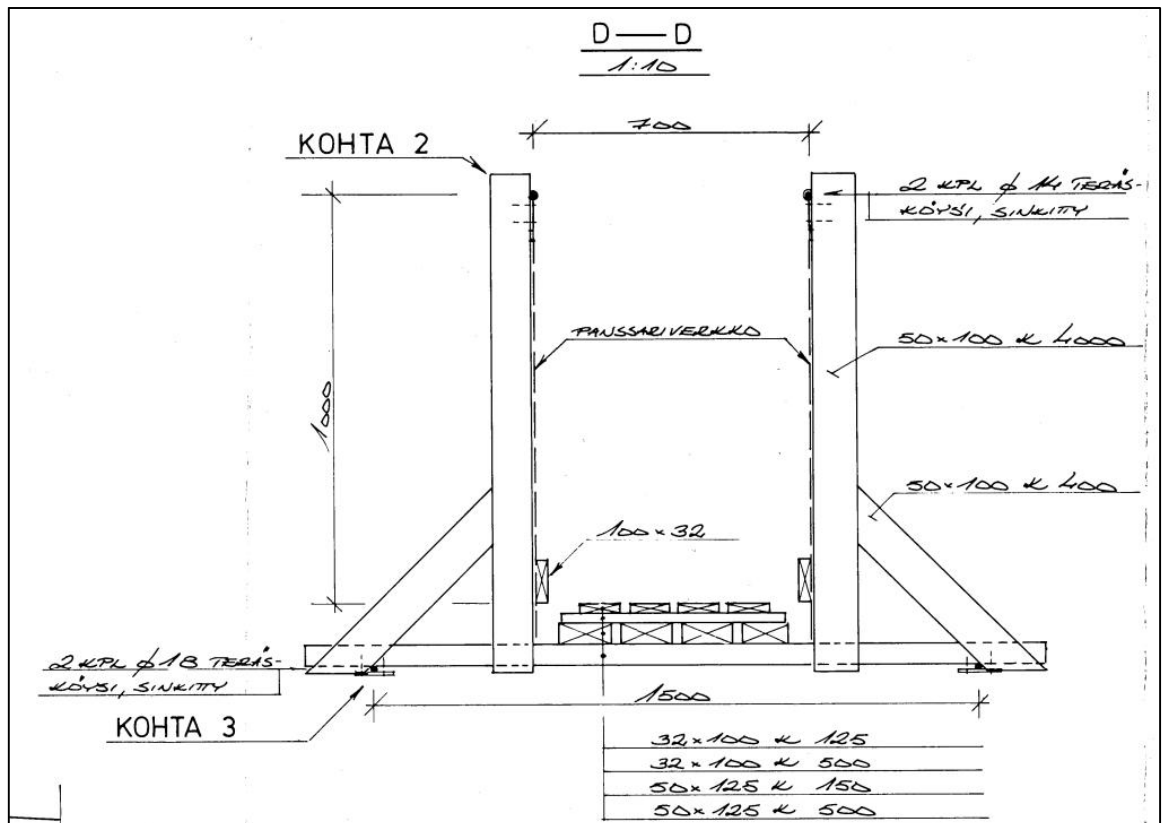
Riippuköydet (2 kpl) sijaitsevat symmetrisesti poikkileikkauksen reunoilla. Riippuköysien lisäksi myös kaiteiden vaijerit kiinnittyvät sillan molemmin puolin samaan vastapainon ankkuritankoon kuin riippuköydet. Silmämääräisen tarkastuksen perusteella toteutettu rakenneratkaisu vastaa sillan alkuperäisiä suunnitelmapiiirustuksia (kuva 5), kun taas sillan muutossuunnitelmapiiirustuksissa esitetystä rakenteesta riippuköydet ja kaiteiden vaijerit kiinnittyvät erillisiin ankkuritankoihin (kuva 6).

Vaijereiden teräksen lujuusluokka on alkuperäisten suunnitelmapiiirustusten perusteella St 1570 (tämän paikkaansa pitävyyttä on syytä epäillä, sillä vaijereiden lujuus on yleensä pienempi). Pyöröteräksisten ankkuritankojen lujuusluokka on alkuperäisten suunnitelmapiiirustusten perusteella Fe37B.



Kuva 8 Vaijereiden kiinnittyminen vastapainon ankkuritankoon.

Puiset poikkikannattajat on sijoitettu 500 mm välein sillan riippuköysiin kuusioruuvi-kiinnityksellä (kuva 10). Poikkikannattajien päälle on tehty sillan kansilankutus, mikä koostuu kolminkertaisesta lankutuksesta: kaksinkertaisesta pituussuuntaisesta ja poikkisuuntaisesta lankutuksesta. Lisäksi sillan puisiin poikkikannattajiin liittyy puiset kaidepylväät, mihin kaiteiden vaijerit kiinnittyvät. Kaidepylväiden väliin on asennettu teräsverkot.



Kuva 9 Sillan poikkileikkaus alkuperäisissä suunnitelmapiirustuksissa.

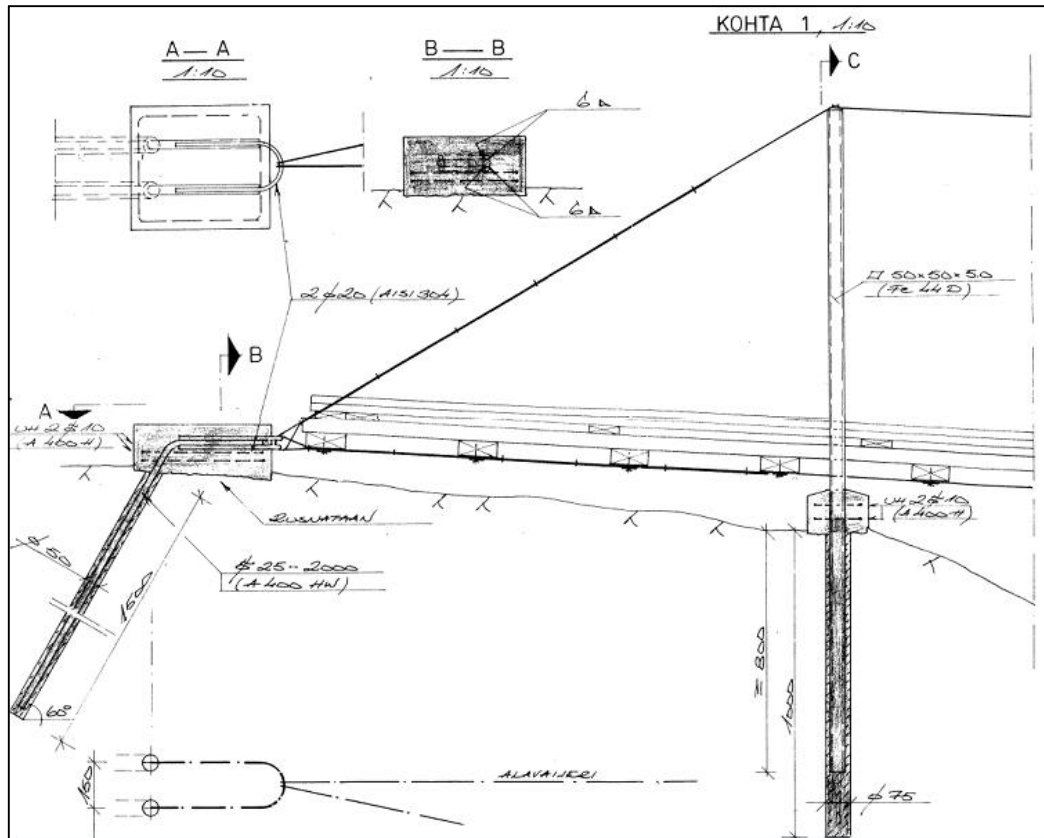


Kuva 10 Riippuköysien kiinnitysdetalji puisiin poikkikannattajiin.



Kuva 11 Yleiskuva sillan päällysrakenteesta ja kaiteista.

Sillan muutossuunnitelmien mukaan, sillassa tulisi olla teräspylonit nykyisten, tulosillan päissä, sijaitsevien puurakenteiden sijaan. Lisäksi muutossuunnitelmissa on esitetty betoniperustus ja kallioankkuroinnit teräspyloneille. Muutossuunnitelmien mukainen rakenne on esitetty kuvassa 12.

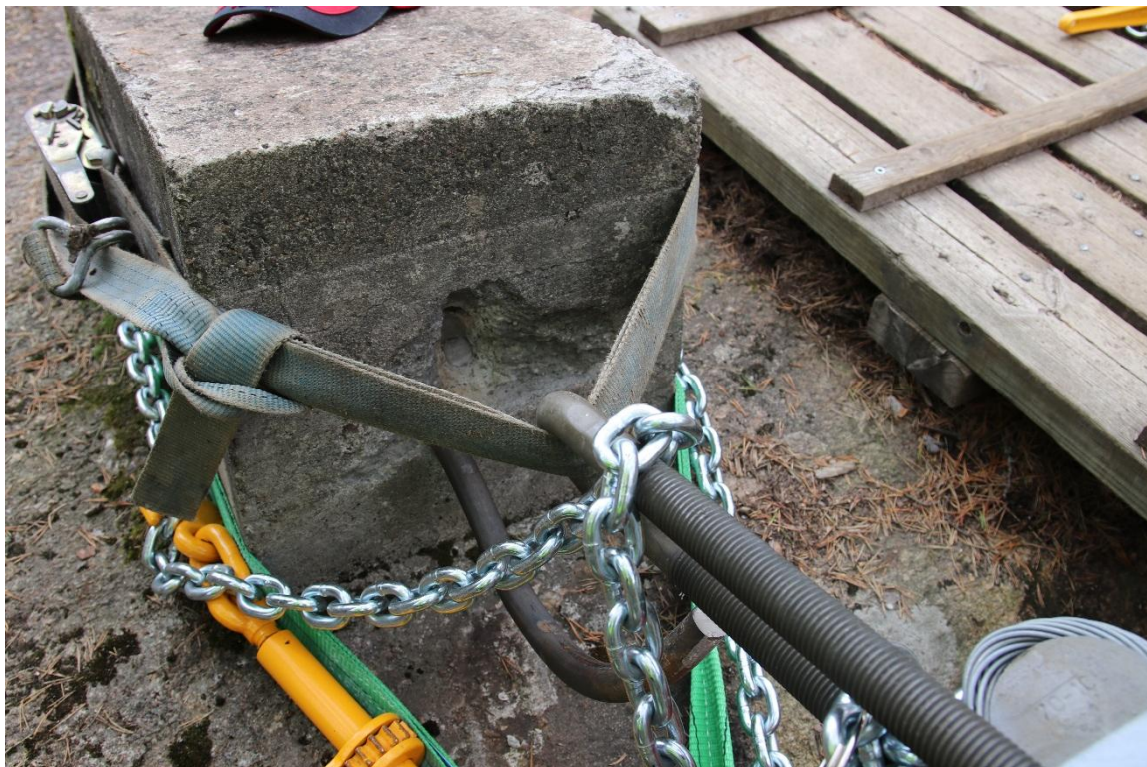


Kuva 12 Sillan muutossuunnitelmien mukainen rakenne.

Tarkastuksen ja tutkimusten perusteella sillan rakennus on tehty noudattaen enemmän sillan alkuperäisiä suunnitelmapiirustuksia. Vastapainon ankkuroinnin ja betoniterästen rakenteet voitiin todentaa vastapainon purun yhteydessä.

3.3 Sillan silmäääräinen tarkastus

Silmäääräisen tarkastuksen perusteella havaittiin sillan osittaisen sortuman johtuneen vastapainon ankkuritangon murtumisesta. Murtuma oli syntynyt ankkuritangon, mihin sillan riippuköysi sekä kaidevaijeri kiinnittyivät. Ankkuritangon murtuminen oli tapahtunut sillan itäisen tuen pohjoisessa vastapainossa (vaurioluokka 4 = erittäin vakava) (kuva 10).



Kuva 13 Vastapainon ankkurilenkin murtuma.

Ankkuritangon murtopintaa tarkasteltaessa voidaan todeta, että murtuminen on syntynyt väsymisen seurauksena. Ankkuritangon murtopinnat on esitetty kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14 Ankkuritangon murtopinta.



Kuva 15 Ankkuritangon murtopinta vastapainossa.

Ankkuroinnin pettämisen seurauksena sillan päälysrakenne on kallistunut noin 45 ° kulmaan (kuva 16). Sillan osittainen sortuminen ei ollut aiheuttanut havaittavia vaurioita sillan muihin rakenneseisiin.



Kuva 16 Silta on osittaisen sortuman vuoksi kallistunut.

Sillan länsipään teräsbetonisten vastapainojen vaakapinnoilla havaittiin merkittävää rapautumaa (vaurioluokka 2). Vastaavasti sillan itäpään vastapainojen vaakapinnoilla havaittiin yleisesti merkittävää ja paikoin vakavaa rapautumaa (vaurioluokat 2 ja 3). Vastapainojen rapautuma on esitetty kuvissa 17 ja 18.



Kuva 17 Länsipään vastapainon merkittävää rapautumaa.



Kuva 18 Itäpään vastapainon merkittävää ja vakavaa rapautumaa.

Sillan päällysrakenteen ja kaiteiden puuosissa on yleisesti lievää lahoa (vaurioluokka 1). Lisäksi sillan kaideverkoissa on kauttaaltaan merkittävää ruostetta (vaurioluokka 2). Lievää ruostumista (vaurioluokka 1) havaittiin myös riippuköysien teräslenkeissä sekä vastapainon ankkuritangossa.



Kuva 19 Sillan puuosissa on yleisesti lievää lahoa.



Kuva 20 Kaideverkon merkittävää ruostumista.



Kuva 21 Riippuköysien teräslenkkinen lievää ruostumista.

Sillassa havaittiin ankkuritangon murtumisen lisäksi muutamia muitakin vaurioita kuten lahoamista, ruostumista ja rapautumista sillan eri rakenneosissa. Voidaan kuitenkin todeta, että nämä vauriot eivät ole edesauttaneet ankkuritangon murtumista.

3.4 Sillan ankkureiden purun aikaiset havainnot

Silta ja sen kallioankkurit päädyttiin purkamaan. Betonirakenteen purkamisen yhteydessä voitiin todentaa ankkurin virheasento sekä murtuneella tuella että sen viereisessä. Betonin lohkeama on johtanut kyseisellä tuella ankkuritangon isompaan rasiin ja toisaalta ankkuritangon virheasento on aiheuttanut sekä betonin että itse terästangon murtuman.

Hiljalleen piikatusta betonirakenteesta pystyttiin todentamaan ankkuritangon virheasento. Alla esitetyissä kuvissa näkyy murtuneen tangon sijoittelu.



Kuva 22 piikkauksen edetessä paljastunut ankkuritangon sijoittelu.



Kuva 23 piikkauksen edetessä paljastunut ankkuritangon sijoittelu.

Ankkuritangoa oli ilmeisesti ylimääräistä taivutusta tehdessä työstetty voimakkaasti. Tangon pinnalla on hiontajälkiä. Ne näkyvät alla olevassa kuvassa.



Kuva 24 ankkuritangon työstettyä pintaa.

Ankkuritangot ovat suhteellisen lyhyet ja niihin on hitsattu lisätartuntalenkki pienemmästä pyöräteräksestä.



Kuva 25 katkennut ankkuritanko kahdessa osassa.

Vastapainon kallioankkuroinnin voitiin todeta olleen alkuperäisten suunnitelmien mukainen. Ankkurit on esitetty alla olevassa kuvassa.



Kuva 26 vastapainon harjateräksiset kallioankkurit.

Pettäneen ankkurin viereisen vastapainon rakenteen todettiin olevan samanlainen. Tosin sillä erotuksella, että pettäneessä tangossa ylöstaivutus on ollut sisemässä sakarassa ja viereisessä ulomassa. Järjestely on nähtävissä alla olevassa kuvassa.



Kuva 27 pettänyttä viereisen vastapainon ankkuritangot.

3.5 Ankkuritangon vetokoetulokset

Sillan ankkuritangot lähetettiin Dekra Oy:lle teräksen lujuusluokan varmistamista varten. Alla olevassa kuvassa näkyy tutkimuksiin lähetetyt tangonpätkät (2 kpl), jotka on katkaistu murtokohdan molemmista haaroista.



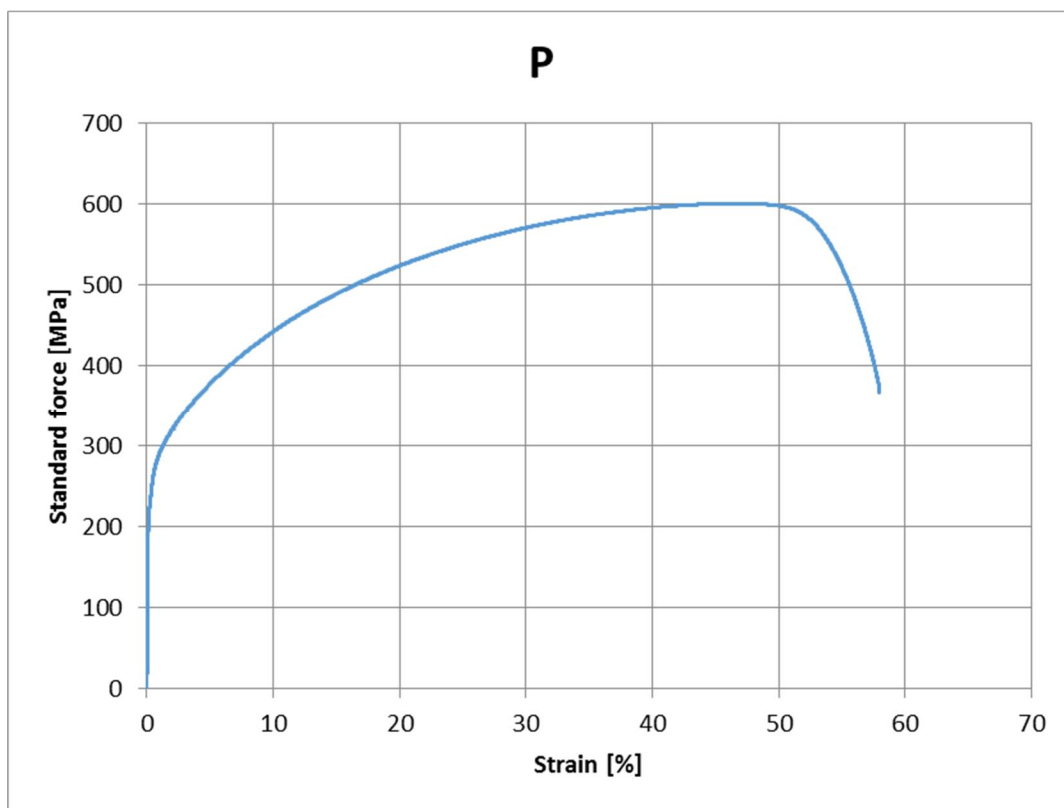
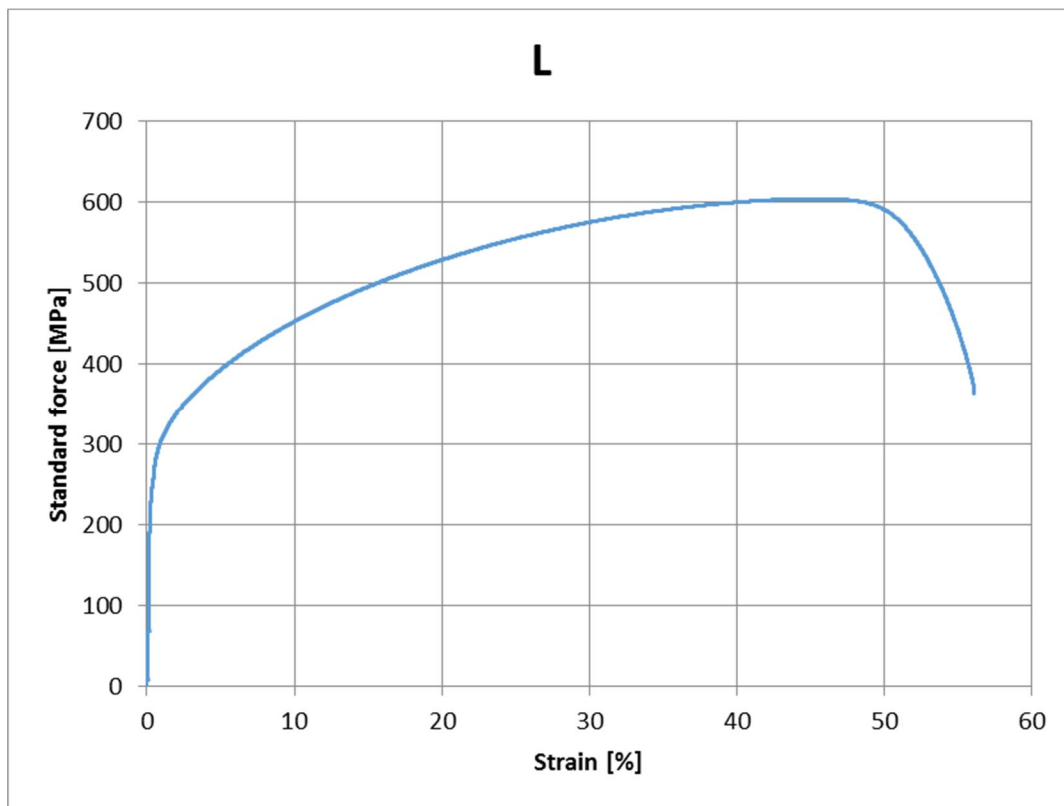
Kuva 28 vetokokeisiin lähetetyt tangot (2 kpl) kuvassa keskellä selätysten

Vetokokeeseen tanko sorvattiin ohuemmaksi alla olevan kuvan näköiseksi koekappaleeksi.



Kuva 29 vetokokeen koekappale

Vetokoetuloksien mukaan käytetty teräs on ollut lujuusluokaltaan suunnitelmien mukaista. Teräs on myös suhteellisen sitkeä, mutta selvä myötöraja puuttuu. Tankojen jännitys-venymä-käyrät ja niiden testausseoste on esitetty alla.



[illegible]

4 SORTUMISEEN VAIKUTTANEET TEKIJÄT

Ankkuritangon murtopinnan perusteella murtuminen on tapahtunut ns. väsymismurtona tai tarkalleen ottaen väsymis- ja taivutusmurron yhdistelmänä. Rakenteen väsymiseksi kutsutaan ilmiötä, jossa rakenne murtuu, vaikka jännitys tila (makro-)rakenteessa pysyykin koko ajan myötö- ja murtolujuuden alapuolella. Poikkileikkauksen kurotumista, mikä normaalisti tapahtuisi veto-/myötömurrossa, ei havaittu.

Väsymismurtuman syntyminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisenä tapahtuu särön ydintyminen, missä paikallisten jännityshuippujen kohdalle syntyy mikroskooppinen särö. Paikallisia jännityshuippuja ja alkusärö voi syntyä mm. pinta- ja materiaaliveioista sekä esimerkiksi hitsaamisen seurauksena.

Tämän jälkeen särö kasvaa kuormitustoisto kerrallaan makroskooppiseksi säröksi. Tätä vaihetta kutsutaan säröjen kasvuksi ja yhdentymiseksi.

Lopulta tapahtuu äkillinen murtuminen, kun särön pituus on kasvanut riittävän suureksi. Murtumistapa on vastaavanlainen kuin haurasmurtumassa, jossa murtuma tapahtuu äkillisesti. Murtopinta on väsymisalueella sileä ja äkillisen murtuman alueella kiteinen. Nämä kolme vaihetta voidaan havaita myös ankkuritangon murtopinnalta alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 30 Ankkuritangon murtopinta.

Mahdollinen alkusärö on pinta- tai materiaaliveiojen lisäksi voinut syntyä ankkuritangon asennuksen yhteydessä syntyneestä osumasta, ankkuritangon mahdollisesta hitsisaumasta, tangon työstöstä tai ankkuritangon liiallisesta taivutuksesta (kaarreteestä) sen asennuksen aikana.

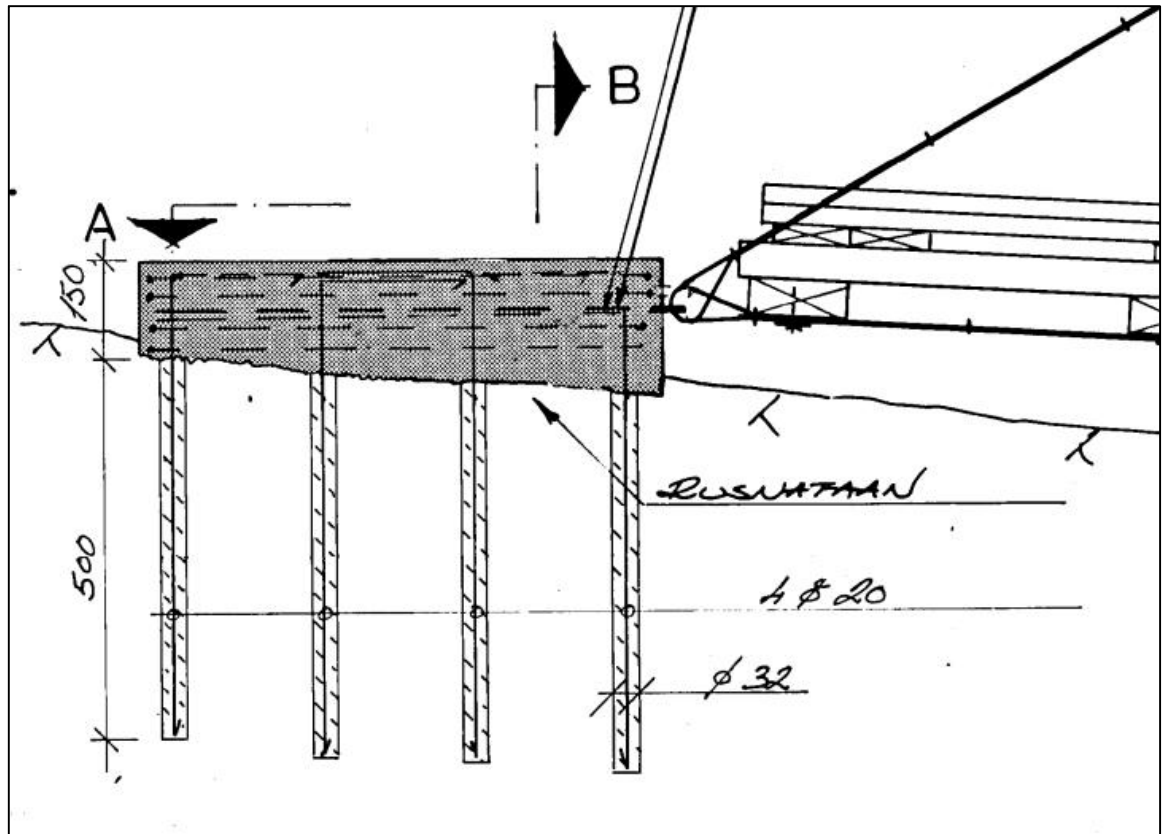
Silmämääräisen tarkastuksen perusteella ankkuritangon asento on suunnitelmapiirustuksista poikkeava, sillä ankkuritangon murtokohdan sijainnista alaspäin ankkuritanko laskee kohti kalliota alla olevan kuvan mukaisesti. Asiaan saatiin vahvistus purkutöiden yhteydessä.

Itse ankkuritangon materiaali on ollut vetokokeiden mukaan riittävän lujaa ja sitkeää.



Kuva 31 Ankkurointitangon asento vastapainossa on suunnitelmapiirustuksista poikkeava.

Ankkuritangon ollessa pystyasennossa vastapainon betonissa syntyy ankkuritankoon kuormitus, mitä ei todennäköisesti ole otettu sillan suunnittelussa huomioon. Betonin lohkeaminen tangon ympäriltä on vielä kohdistanut suurimman taivutusrasituksen lohkeaman rajapintaan, josta tanko on katkennut. Vastapainon purkutyössä voitiin varmistua tangon asentovirheestä ja erikoisesta pystyyn taivutuksesta. Alkuperäisten suunnitelmapiirustusten ja sillan muutospirustusten perusteella ankkuritankojen, joihin riippuköydet ja kaidevaijerit kiinnittyvät, tulisi olla ns. vaakatasossa alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 32 Vastapainon ankkuritangot suunnitelmapiirustusten perusteella.

On mahdollista, että työn aikana on tehty virhepäätelmä tangon optimaalisesta asennosta ja jo valmiiksi taivutettuja tankoja on jälkikäteen lähdetty muokkaamaan. Lenkki on käännetty pystysuoraan ikään kuin ajatellen, että suuri osa vetovoimasta kohdistuisi kaidevaijerille alavaijerin sijaan. Näin ei kuitenkaan ilman pylonia tapahdu. On myös mahdollista, että kiinnityslenkit ovat näin tehden saatu asennettua juoheampaan asentoon, mutta pidämme ensimmäistä vaihtoehtoa todennäköisempänä. Syy voi olla toki joki muukin.

Ankkuritangon, johon riippuköydet sekä kaidevaijerit kiinnittyvät, halkaisija on alkuperäisten suunnitelmapiirustusten perusteella 2 kpl Ø12 mm, muutossuunnitelmapiirustusten perusteella 2 kpl Ø12 mm ja tarkastuksessa tehdyn mittauksen perusteella 1 kpl Ø 25,5 mm. Vastapainon rakenne täten poikkeaa niin alkuperäisestä suunnitelmapiirustuksesta kuin muutossuunnitelmapiirustuksestakin. Lisäksi huomiona voidaan mainita, että liittyvät rakenneosat ovat vahvempaa tekoa kuin ankkurilenkki.

Lapinsalmen silta on etenkin kesäisin retkeilijöiden vilkkaassa käytössä. Vuonna 2017 kansallispuiston vierailumäärä oli noin 172 000 käyntiä. Suuri osa kävijöistä on kulkenut vuosien aikana sillan yli. Onkin mahdollista, että siltaa on kuormitettu ylikuormalla vuosien saatossa. Mahdollinen ylikuorma on mahdollisesti aiheuttanut alkusärön syntymisen ankkuritankoon. Ylikuorma myös nopeuttaa teräsrakenteen väsymistä.

Talvisin sillalla on parhaimmillaan ollut noin 30 cm tampattua lunta, mikä laskennallisesti jo itsessään voi ylittää sillan mitoituskuorman suuruusluokkaan.

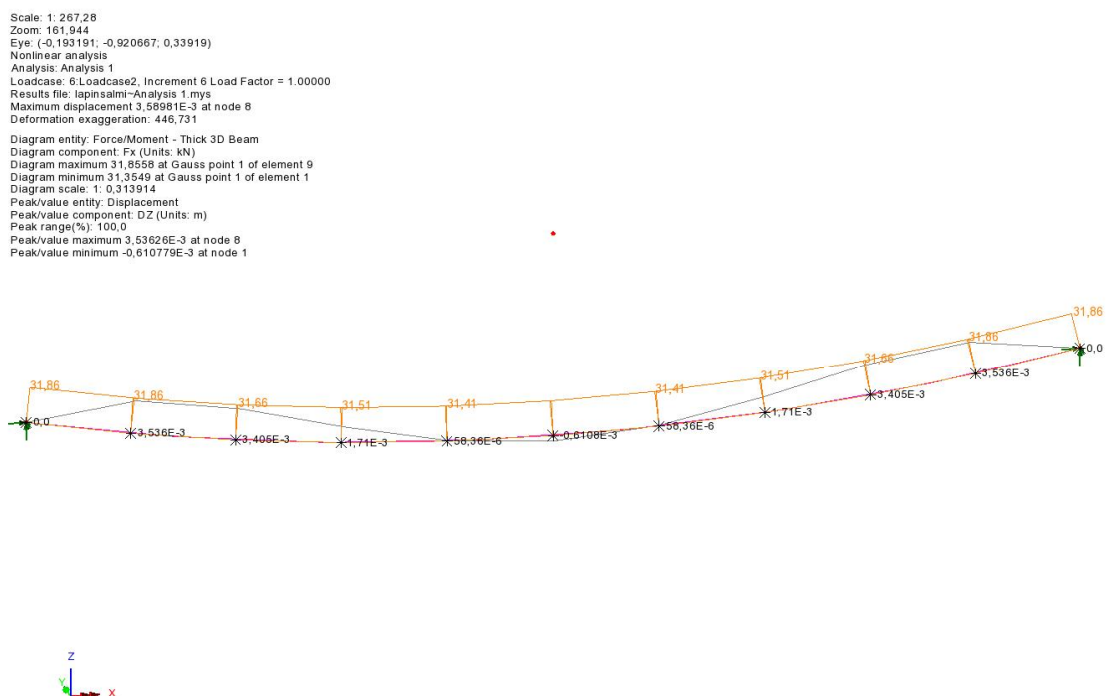
Kuten edellä mainittiin sillan muiden rakenneosien ruostumis-, rapautumis- ja laho- vaurioilla ei ole ollut vaikutusta sillan osittaiseen sortumiseen.

Päällysrakenteen kantava vaijeri sekä kaiteen vaijeri kiinnittyvät samaan ankkuritankoon. Turvallisempi tapa olisi kiinnittää kantava vaijeri sekä kaiteen vaijeri omiin ankkuritankoihinsa. Tällaisella kiinnityksellä ei tosin ole varmaa, olisiko silta välttynyt osittaiselta sortumalta eli olisiko pelkkä kaidevaijerin ankkuritanko kestänyt kantavan vaijerin ankkuritangon murtumisen. Pylonillinen rakenne, jossa kantokestävyys jakautuu useammalle vaijerille, on tässä suhteessa turvallisempi.

5 LASKENNALLISET TARKASTELUT

Rakenteen rasiustilan suuruusluokka tarkastettiin laskennallisesti. Analyysissä käytettiin LUSAS-ohjelman epälineaarista FEM-laskentaa, sekä käsinlaskentaa.

Lähdettiin tarkastelemaan köysisillan alavaijerin, joka sillan rakenteessa käytännössä pelkästään kantava on, toimintaa yhdellä sillan puolikkaalla. Laskentaohjelmaan luotiin sillan geometria annetulla jännevälillä ja riippumalla. Epälineaarisen tarkastelun alkutilanne luotiin antamalla vaijerille sillan omapaino (0,25 kN/m), sekä tämän ha-luttuun riippumamuotoon tasapainottava esijännitys (32 kN), saatiin alla olevan kuvan mukainen lähtötilanne, eli keskellä 2,5m riippuma ja vaijeriin 32 kN vetovoima.



Kuva 33 riippusillan rakennemallin lähtötila

Tämän jälkeen siltaa voitiin kuormittaa hyötykuormilla.

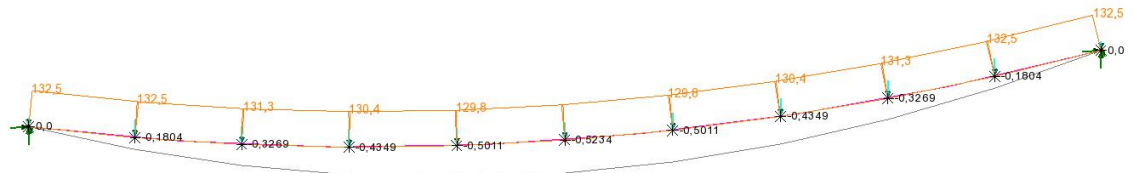
- lumikuorma 1kN/m
- pistekuorma 10 kN keskellä, viivakuormaksi 2m matkalle, yhdelle köydelle (2,5kN/m)

Alla on esitetty niiden mukaiset siirtymä ja rasituskuvat.

10.09.2018

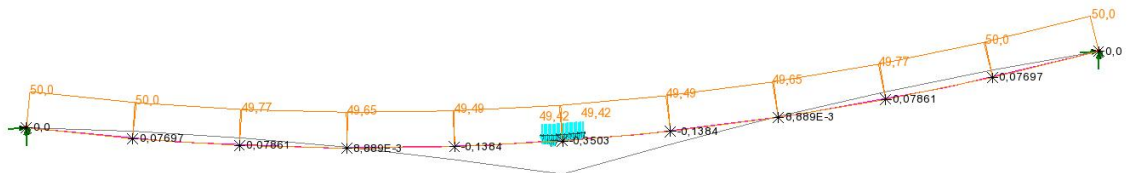
Asiantuntijaselvitys, Lapinsalmen riippusilta, Kouvola

Scale: 1: 267,28
 Zoom: 161,944
 Eye: (-0,193191; -0,920667; 0,33919)
 Nonlinear analysis
 Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 12 Loadcase3, Increment 12 Load Factor = 1.00000
 Results file: lapinsalmi-Analysis 1.mys
 Maximum displacement 0,523387 at node 1
 Deformation exaggeration: 3,06404
 Diagram entity: Force/Moment - Thick 3D Beam
 Diagram component: Fx (Units: kN)
 Diagram maximum 132,513 at Gauss point 1 of element 9
 Diagram minimum 129,491 at Gauss point 1 of element 1
 Diagram scale: 1: 0,0754643
 Peak/value entity: Displacement
 Peak/value component: DZ (Units: m)
 Peak range(%): 100,0
 Peak/value maximum 0,0 at node 10
 Peak/value minimum -0,523387 at node 1



Kuva 34 Lumikuorman vaikutus

Scale: 1: 267,28
 Zoom: 161,944
 Eye: (-0,193191; -0,920667; 0,33919)
 Nonlinear analysis
 Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 18 Mitoituskuorma, Increment 18 Load Factor = 1.00000
 Results file: lapinsalmi-Analysis 1.mys
 Maximum displacement 0,350286 at node 1
 Deformation exaggeration: 4,5782
 Diagram entity: Force/Moment - Thick 3D Beam
 Diagram component: Fx (Units: kN)
 Diagram maximum 49,9992 at Gauss point 1 of element 10
 Diagram minimum 49,3708 at Gauss point 1 of element 2
 Diagram scale: 1: 0,200003
 Peak/value entity: Displacement
 Peak/value component: DZ (Units: m)
 Peak range(%): 100,0
 Peak/value maximum 0,0786061 at node 7
 Peak/value minimum -0,350286 at node 1



Kuva 35 mitoituskuorman vaikutus

Lisäksi käytännössä liikennekuormalla voi olla mukana myös dynaamista vaikutusta, jonka suuruutta ei ole tässä yhteydessä arvioitu.

Käytännössä tilanne on usein ollut sillalla sellainen, että kävelijöitä on ollut noin 2 m välein, eli noin 0,5kN/m ja 0,25kN/vaijeri. Tällöin tilanne on seuraava.

10.09.2018

Asiantuntijaselvitys, Lapinsalmen riippusilta, Kouvola

Scale: 1: 267,28
 Zoom: 161,944
 Eye: (-0,193191; -0,920667; 0,33919)
 Nonlinear analysis
 Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 34:Kävelijävirta, Increment 34 Load Factor = 1.00000
 Results file: lapinsalmi-Analysis 1.mys
 Maximum displacement 0,157645 at node 1
 Deformation exaggeration: 10,1727

Diagram entity: Force/Moment - Thick 3D Beam
 Diagram component: Fx (Units: kN)
 Diagram maximum 60,046 at Gauss point 1 of element 9
 Diagram minimum 58,9819 at Gauss point 1 of element 1
 Diagram scale: 1: 0,166539
 Peak/value entity: Displacement
 Peak/value component: DZ (Units: m)
 Peak range(%): 100,0
 Peak/value maximum 0,0 at node 10
 Peak/value minimum -0,157645 at node 1



Kuva 36 kävelijävirran rasiutilanne

Jo se ylittää mitoituskuorman vaikutuksen, puhumattakaan tilanteesta, jolloin sillalla on lunta.

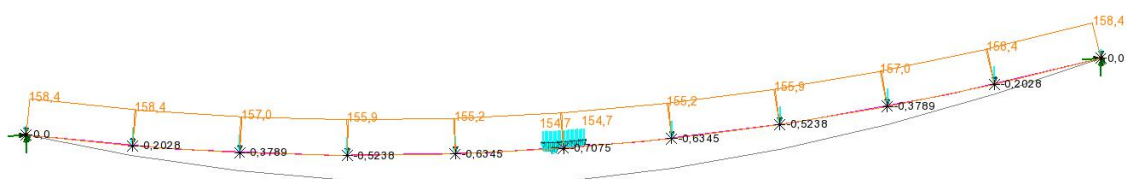
Arvioidaan realistiseksi murtorajan ääritilanteeksi seuraava:

- omapaino kertoimella 1,0 (huomioidaan murtotila isona lumikuormana)
- lumikuorma 0,8 kN/m x 1,5
- pistekuorma keskellä 5 kN/m x 1,35

Tällöin saadaan seuraava rasiutila:

Scale: 1: 267,28
 Zoom: 161,944
 Eye: (-0,193191; -0,920667; 0,33919)
 Nonlinear analysis
 Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 40:Murtorajatilanne, Increment 40 Load Factor = 1.00000
 Results file: lapinsalmi-Analysis 1.mys
 Maximum displacement 0,707493 at node 1
 Deformation exaggeration: 2,2667

Diagram entity: Force/Moment - Thick 3D Beam
 Diagram component: Fx (Units: kN)
 Diagram maximum 158,436 at Gauss point 1 of element 10
 Diagram minimum 154,683 at Gauss point 1 of element 2
 Diagram scale: 1: 0,0631168
 Peak/value entity: Displacement
 Peak/value component: DZ (Units: m)
 Peak range(%): 100,0
 Peak/value maximum 0,0 at node 10
 Peak/value minimum -0,707493 at node 1



Kuva 37: Murtotilan rasitus

Vaijerin vetovoima on tällöin MRT noin 160 kN.

Toisena murtotilan kuormana voidaan käyttää suunnittelukuorman mukaista $1,25 \cdot 32 \text{ kN} + 1,35 \cdot 18 \text{ kN} = 64 \text{ kN}$.

Vaijerin murtokestävyys on arviolta 178 kN. Suuruusluokka on oikea.

Lapinsalmi vaijeri

$$n := 19 \quad d := 3.3 \text{ mm}$$

$$A_v := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 162.507 \text{ mm}^2$$

$$d_v := \sqrt{\frac{4A_v}{\pi}} = 14.384 \text{ mm}$$

Vaijerin murtokestävyys

$$f_u := 1370 \text{ MPa} \quad \gamma_m := 1.25$$

$$N_{ud} := A_v \cdot \frac{f_u}{\gamma_m} \quad N_{ud} = 178.107 \text{ kN}$$

Vaijeri kiinnittyy kierretankoankkureiden välityksellä ankkurilenkkiin. Ankkurilenkin puhdas vetokapasiteetti on arviolta 105 kN/sakara, eli 210 kN.

Ankkurilenkki - Fe37B

$$f_y := 235 \text{ MPa} \quad \gamma_y := 1.1 \quad d_a := 25 \text{ mm}$$

$$A_a := \pi \cdot \left(\frac{d_a}{2}\right)^2 = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$N_{yd} := A_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_y} \quad N_{yd} = 104.869 \text{ kN}$$

Varmuus myötöön nähden on ollut riittävä, mikä vahvistaa oletusta väsymismurrosta. Toisaalta mitoituskuorma on ollut suhteellisen pieni ja paikallisten jännitysten vaikutus helposti suurta, mikä pienentää kokonaisvarmuutta.

Väsyttävä kuorma vaijerissa on helposti ollut jopa noin 30 kN luokkaa vaijeria kohden (kävelijävirta).

Lisäksi kuorma on aiheuttanut vinoon asennettuun ankkuritankoon taivutusrasituksen. Momenttivarsi on helposti ollut noin 65 mm (puolet lenkin koosta $155 \cdot 25 / 2$). Käytännössä ylälenkki on ollut noin 45 asteen kulmassa vetovoiman nähden. Seuraavan käsinlaskennan mukaan lenkin kapasiteetti on ylittynyt helposti:

Momentti

$$F_{Ed} := 90 \text{ kN} \quad e_a := 65 \text{ mm} \quad M_{Ed} := F_{Ed} \cdot e_a = 5.85 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Ankkurintangon momenttikapasiteetti

$$I_a := \frac{5}{4} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_a}{2}\right)^4$$

$$M_{yd} := \frac{I_a}{\left(\frac{d_a}{2}\right)} \cdot \frac{f_y}{\gamma_y} = 1.639 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

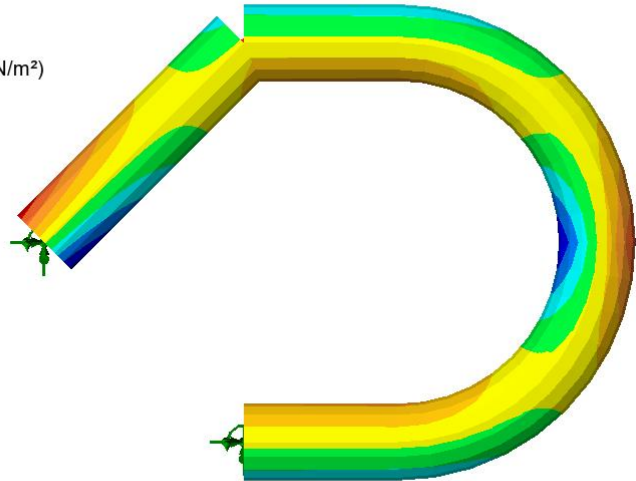
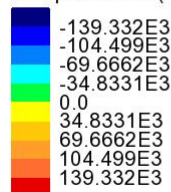
Väsyttävä momentti

$$F_{Ef} := 30 \text{ kN} \quad M_{Ef} := F_{Ef} \cdot e_a = 1.95 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Samanlainen tulos saadaan hyvin yksinkertaisella lineaarisen kimmoteorian FEM mallilla, kuva alla:

Scale: 1: 1.20424E3
 Zoom: 69.4284E3
 Eye: (0.0, 0.0, 1.0)
 Linear/dynamic analysis
 Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 4: test
 Results file: lapinsalmi2~Analysis 1.mys
 Contour entity: Stress - Thick 3D Beam
 Contour component: Sx(Fx, My, Mz) (Units: kN/m²)
 Number of contours: 9
 Contour interval: 34.8331E3

Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 4: 10kN
 Results file: lapinsalmi2~Analysis 1.mys
 Entity: Stress - Thick 3D Beam
 Component: Sx(Fx, My, Mz) (Units: kN/m²)



Kuva 38: vinon ankkurilenkin jännitys 10 kN vetokuormasta (suoraan oikealle)

Todellisuudessa ankkuri on toiminut todennäköisesti hieman tätä edullisemmin, mutta on selvää, että ankkurin vika-asennosta johtuen on siihen kohdistunut selvästi suunniteltua suurempi rasitus.

Väsyttävä rasitus / paikallinen jännitys on todennäköisesti ollut melko suuri, jolloin väsymismurtuma on syntynyt jo suhteellisen pienellä väsytyssyklien määrällä. Rakenteiden väsymislukka määritellään normaalisti (esim. EN 1993-1-9) 2 miljoonan syklin perusteella. Jos oletetaan, että vuodessa sillalla on ollut 250 000 ylitystä, ja näistä esim. joka-25 kohdalla on ollut väsymisen kannalta merkittävä jännitys rakenteessa (pienimmät jännitysvaihtelusykliä ovat väsymisilmiössä usein merkityksettömiä), saadaan sillan käyttöajan aikana $10\,000 \times 32 = 320\,000$ väsyttävää sykliä, mutta todellisuudessa tuo voi olla paljon pienempi, jolloin syklien lukumäärän alittaessa 100 000 puhutaan niin sanotusta low-cycle-fatigue ilmiöstä. Verratessa tuohon 10 kN ankkurivetovoiman jännityskuvaan, on todennäköisesti kyse tästä ilmiöstä.

6 YHTEENVETO

Lapinsalmen sillan osittainen sortuma on ollut usean tekijän summa. On selvää, että murtumistapa on ollut väsymismurtuma tai tarkalleen ottaen väsymis- ja taivutus-murron yhdistelmä. Tätä ajatus tukee murtuneen ankkuritangon murtopinta sekä äkillinen sortuminen kuten väsymismurtumassa yleensä. Väsymismurtuman murtumistapa on vastaavanlainen kuin haurasmurtumassakin. Lisäksi sillalla ei murtumahetkellä ollut ylikuormaa.

Murtuneen ankkuritangon, johon sillan riippuköysi sekä kaidevaijeri kiinnittyvät, asento on suunnitelmapiirustuksista poikkeava. Ankkuritangon virheellinen asento on

aiheuttanut sille kuormituksen, mitä ei ole todennäköisesti otettu suunnittelussa huomioon. Lisäksi toteutetussa rakenteessa on muitakin poikkeamia sillan alkuperäisiin suunnitelmapiirustuksiin verrattuna kuten ankkuritankojen halkaisija ja määrä. Toteutettu rakenne vastaa enemmän sillan alkuperäisiä suunnitelmia kuin sillan muutossuunnitelmia.

Silta on todennäköisesti altistunut lievälle ylikuormitukselle sen käytön aikana niin käyttäjien kuin lumikuormankin vuoksi. Ylikuorma nopeuttaa rakenteen väsymistä ja on mahdollisesti aiheuttanut alkusärön ankkuritankoon.

Ankkuritangon murtokohta sijaitsee vastapainon betonin sisällä / lohkeaman rajapinnassa. Tosin vastapaino oli varoitellut ongelmasta betonin lohkeamalla vuonna 2007. Tuossa yhteydessä vauriota ei kuitenkaan havaittu ja lohkeama paikattiin. Käytännössä ankkuritankoon syntynyttä säröä on ollut liki mahdoton havaita ennen sillan osittaista sortumista. Betonirakenteen halkeaman syyt voivat yleisesti olla moninaiset, eikä tällainen vika-asento halkeaman syynä ole useinkaan ensimmäisenä mielessä. Voidaankin todeta yleisesti, että betonin halkeamiin ja lohkeamiin on syytä aina suuria voimia kantavissa rakenteissa ja erityisesti rakenteiden avainasemassa olevissa rakennenosissa suhtautua vakavasti.

7 TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Ehdotimme silmämääräisen tarkastuksen ja ensimmäisen vaiheen selvityksen perusteella seuraavia toimenpiteitä sillan päällysrakenteen purkamisen jälkeen / yhteydessä:

- teräsbetonisten vastapainojen purkaminen
 - o vastapainon kallioon ankkuroitujen betoniterästen kartoitus
 - o vastapainon betoniterästankojen ja niiden asennon kartoitus
- vetokoenäytteet murtuneesta betoniterästangosta

Nämä päädyttiin myös toteuttamaan ja raporttia täydennettiin niiden osalta.

Laskennalliset tarkastelut tukevat havaintoja murtotavasta. Tarvittaessa voidaan suorittaa kattavampia laskennallisia analyyssejä.

8 TARKASTUSTEN OHJELMOINTI

Suosittelimme, että kaikkiin Metsähallituksen omistuksessa oleviin siltoihin tehdään yleistarkastus (silmämääräinen tarkastus asiantuntijan toimesta) ensi tilassa. Yleistarkastuksen yhteydessä varmistetaan, että sillan rakenteet on toteutettu suunnitelmapiirustusten mukaisesti. Huonokuntoiset sillat ja suunnitelmapiirustusten vastaiset sillat asetetaan erityistarkkailuun. Lisäksi epäilyttävien rakenteiden toimivuutta voidaan tarkastella kantavuuslaskelmin sekä erikoislaitteistolla. Hyväkuntoisten ja suunnitelmapiirustusten mukaisten siltojen tarkastusväliksi ehdotamme 5 vuotta. Erityistarkkailussa olevien siltojen tarkastusvälin tihentämistä tulee harkita siltakohtaisesti. Metsähallituksen sillat voisi viedä Liikenneviraston taitorakennerekisteriin ja organisoida niiden ylläpito muiden siltojen tapaan.