

Loppuraportti puusiltojen  
kantavuus- ja kuntotutkimuksista  
Puinen jatkuva palkkisilta (Pjp)





# Loppuraportti puusiltojen kantavuus- ja kuntotutkimuksista

Puinen jatkuva palkkisilta (Pjp)

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 40/2016

Liikennevirasto

Helsinki 2016

*Kannen kuva: Niskakosken silta, Kuusamo; kuvaaja Joni Penttilä*

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

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-301-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Loppuraportti puusiltojen kantavuus- ja kuntotutkimuksista – Puinen jatkuva palkkisilta (Pjp).** Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 40/2016. 31 sivua ja 5 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-301-9.

**Avainsanat:** sillat, puusillat, koekuormitus, kantavuus

## Tiivistelmä

Uusi raskaiden ajoneuvojen ajoneuvoasetus (AA13) astui voimaan 1.10.2013. Asetuksessa määritettyjen ajoneuvojen akseli- ja telipainot nousivat aiempaan (AA92) verrattuna. Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää pienten jatkuvien puupalkkisiltojen kuntoa ja kapasiteettia kestää uuden ajoneuvoasetuksen sallimia raskaampia ajoneuvoja. Liikenneviraston mukaan noin 400 siltaa tulee asetuksen johdosta painorajoituksen alaiseksi ja näistä reilu 100 siltaa on puusilloja. Tutkimus jakautui laajennetun yleistarkastuksen yhteydessä tehtyihin mittauksiin ja lahotutkimuksiin, sekä koekuormitukseen ja niiden analysointiin ja lisäksi siltojen vahvistamisrakenteiden innovointiin.

Tarkastelun sillat on rakennettu aikajaksolla 1965...1973 jolloin suunnittelukuormina on ollut AI ja vuodesta 1969 alkaen AKI, EKII. Sillat ovat nyt noin 50 vuoden ikäisiä ja puurakenteisina elinkaarensa loppuvaiheissa. Sillat sijaitsevat pääosin vähäliikenteisillä paikallisteillä, mutta ovat merkittävässä roolissa mm. puutavarakuiljetuksille.

Tutkittavissa silloissa toimii pääkannattimina pääsääntöisesti kahdesta päällekkäisestä pyöreästä puusta koostuva pulteilla yhdistetty rakenne. Puiden vaakapinnat on sahattu siten, että puun sahauskorkeus on noin 250 mm. Pääkannattimet ovat noin 0,5 metrin jaolla, ja välituen kohdalla on vielä kolmantena alimpana puuna noin 2,5 metrin pituinen satulapuu. Sillan kansilaattana toimii syrjälankkukansi (50x125). Sillan tyypillisin jännemitta-alue on 5,0+6,0+5,0 metriä ja hyödyllinen leveys 4,5...6,0 metriä. Sillat on perustettu puupaalujen varaisesti. Puupaalut ovat pystypaaluja noin 1,0 metrin jaolla ja ulottuvat päällysrakenteen alapintaan saakka. Paalujen yläpäässä on niskapuu sahauskorkeudeltaan noin 230 millimetriä, johon pääkannattimet tukeutuvat.

Laajennetuissa yleistarkastuksissa lahonäytteitä otettiin pääosin kasvukairalla. Tutkimushankkeen aikana tehtiin myös vertailu lahotutkimusvälineistä, joista käyttökelpoisimmaksi puusiltojen tutkimiseen osoittautui mikropora nopean näytteenoton ansiosta. Mikropora toimii myös kosteissa olosuhteissa. Lahotutkimuksessa todettiin siltojen lahoamisen edenneen voimakkaasti. Etelä Suomen silloissa lahoaminen näyttäisi edenneen nopeammin pohjoiseen verrattuna. Lahoamisen etenemisen ääripäät olivat lähes lahoamattomista puista koostuvasta silta- lasta purkukuntoisiin. Tutkimushankkeen aikana pari silloista uusittiin. Paalujen lahoamista on erityisesti vesirajan tuntumassa ja päätytuella maanpaineseinärakenteissa. Lahoaa puuainesta löytyy pääkannatinpuista ja niskapuista. Siltojen kansilankutus on uusittu siltoihin ainakin kertaalleen ja joissakin silloissa syrjälankkukansi on korvattu liimapuuelementeillä.

Alustavassa kantavuustarkastelussa selvitettiin laskennallisesti puusiltojen kestävyyttä AA13 kuormille. Laskennan tuloksena selvisi, että lahoamattoman virheettömän sillan hyväksikäyttöasteet pääkannattimien ja niskapuun taivutusrasitukselle aukossa ja tuella ovat noin 75 % ta-solla. Samaa suuruusluokkaa on kestävyys leikkausvoimalle.

Siltojen koekuormituksia tehtiin viiteentoista siltaan, joista viidessä sillassa käytettiin enemmän mittaustantureita kuin ns. kevytkoekuormituksissa. Pystysiirtymiä mitattiin välituen paa-luista ja pääkannattimista aukkojen keskeltä DMM-tasolaser laitteistolla. Venymämittauksia (jännitystarkastelu) tehtiin venymäantureilla pääkannattimiin ja niskapalkkiin ja välituki-paaluun. Viidessä sillassa mitattiin siirtymäanturilla pääkannatinpuuparin keskinäistä liuku-mista vaakasaumassa liittorakennevaikutuksen selvittämiseksi.

Koekuormitusajoneuvoina käytettiin pääsääntöisesti täysperävaunullista sorarekkaa (AA92), jossa vetoautossa oli kolmiakselinen teli. Kuormitusajoja suoritettiin täyskokoonpanolla ja siltojen pienistä jännemitoista johtuen pelkällä vetoautolla. Kokeen edetessä vetoautoon lisät-tiin kuormaa takatelin kohdalle 3...6 tonnia, jolloin päästiin AA13 ajoneuvoa suurempiin teli-kuormiin. Muutamille silloille saatiin käyttöön myös uuden AA13 mukainen ajoneuvo. Lisäksi yhdessä kohteessa tutkittiin singelipyöräisen (kaksi pyörää akselilla) ajoneuvon aiheuttamaa pyöräkuorman jakautumista siltarakenteeseen.

Koekuormitustulosten analysointia varten silloista tehtiin FEM-laskentamalleja, jossa pääkan-nattimet kuvattiin jatkuvana palkkina. Tukialueella on mallissa omat elementtinsä, jotta voitiin muuntaa jäykkyyssuhteita tuki- ja aukkoalueen kesken ja verifioida mallin antamia tuloksia koetulosten kanssa. Syrjälankkukansi kuvattiin malliin joko palkkielementteinä tai laatta-elementteinä ja puupaalut otettiin malliin 5 metriä pitkinä 3d-palkkielementteinä. Jännitys-tarkasteluissa pääkannattimen aukkoileikkauksia tutkittiin kahden puun eriasteisilla liit-torakennevaikutuksilla. Koekuormituksissa mitattujen taipumien kanssa samansuuruiset tul-lokset saatiin laskentamallilla, jossa aukkoileikkauksen jäykkyys oli noin 1,5 kertainen tukileikkauksen suhteen. Puurakenteen kimmokertoimena käytettiin arvoa 9000 MPa. Koekuormituksen venymäantureista laskettujen jännitysten vastaavuus saatiin laskettua osit-tain liittorakenteisena ( $k=0,5$ ) toimivalle pääkannattimen aukkoileikkaukselle. Osittaista liittorakenteena toimimista tukee myös pääkannatinpuiden vaakasaumassa tapahtuvaa keski-näistä liukumista mittaavan anturin tulos. Koekuormituksessa kaksipuisen pääkannattimen maksimijännitykseksi mitattiin aukossa 5 MPa ja niskapuulle mitattiin 7 MPa jännitys, kun sal-littuna arvona koekuormituksissa oli 10 MPa.

Muutamissa silloissa tapahtui koekuormitusten aikana välituilla paalujen koekuormitusten ai-kana palautumatonta painumaa maksimissaan 5 mm. Painuma johtui mahdollisesti paalun työntymisestä syvemmälle maahan, tai mahdollisesta paalun lahoamisesta. Yleistarkastuksen perusteella huonokuntoiseksi luokiteltu silta otettiin mukaan koekuormitukseen tarkoituksena saada lahoamisen vaikutus näkyväksi mittaustuloksissa. Vaikka koeohjelmaa ei uskallettu ajaa täytenä läpi, näkyi tuloksissa suuremmat taipumat ja jännitykset selvästi ja ko. silta on nyt uu-sittu.

Pääsääntöisesti sillat kestivät koekuormitukset AA13 ajoneuvojen tasoilla kuormilla. Paalujen palautumattomat painumat ja muutamissa silloissa ei kaikkiin pääkannattimiin kehittynyt las-kentamallin mukainen jännitys viestivät sillan epätäydellisestä toiminnasta. Laskentamallilla suoritettujen analyttisen tarkastelun pohjalta siltatyyppin vaarallisin vaurio on välitukipaalun pet-täminen, jolloin niskapalkin jännemitta kasvaisi kaksinkertaiseksi ja pienikin lahovika niska-puussa tai pieni ylikuorma ajoneuvossa katkaisee niskapuun ja romahduttaa pääkannattimet siltä kohtaa.

Tarkastelussa olevan puusiltojen ryhmän elinkaari on viimeisillä vuosillaan ja siltojen uusimi-sen jaksottamiseksi on innovoitu mm. välitukien uusimista teräspaaluportaalityyppillä. Korjatta-viksi ja uusittaviksi silloiksi valittavat sillat tulevat pohjautumaan systemaattiseen kunto-tarkastukseen tutkimushankeen aikana laaditun 'Puusillan laajennetun yleistarkastusohjeen' mukaisesti.

**Slutrapport över undersökningarna gällande träbroars bärighet och skick – Kontinuerlig träbalkbro (Pjp).** Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2016. Trafikverkets undersökningar och utredningar 40/2016. 31 sidor och 5 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-301-9.

## Sammanfattning

Den nya fordonsförordningen (AA13) som gäller tunga fordon trädde i kraft 1.10.2013. I den nya förordningen steg axel- och boggilasterna jämfört med den tidigare förordningen (AA92). I den här undersökningen ville man ta reda på små, kontinuerliga träbalkbroars kondition och kapacitet för att de ska hålla för de tyngre fordonen som tillåts enligt den nya fordonsförordningen. Enligt Trafikverket införs lastbegränsning på cirka 400 broar på grund av förordningen, och av dessa broar är drygt 100 träbroar. Undersökningen uppdelades på mätningar och utredningar av rötskador som gjordes i samband med den mera omfattande allmänna granskningen, samt i provbelastningar och analys av dessa och i innovationer för att förstärka brokonstruktionerna.

De granskade broarna har byggts under perioden 1965 - 1973, då beräkningslasten var AI och från och med 1969 AkI, EKII. Broarna är nu cirka 50 år gamla och i slutskedet av sina livscyklar. Broarna finns huvudsakligen på lågtrafikerade lokala vägar, men de spelar en viktig roll för bl.a. trävarutransporterna.

Huvudbalkarna i de undersökta broarna består i regel av en konstruktion av två på varandra placerade runda träbalkar som förenats med bultar. Deras horisontala ytor har sågats så att träets sågningshöjd är cirka 250 mm. Huvudbalkarna är placerade på ett cirka 0,5 meters avstånd från varandra, och vid mellanstödet finns det ytterligare en tredje balk längst ner, en cirka 2,5 meter lång sadelbalk. Som broplatta fungerar ett plankdäck (50x125). Brons mest typiska spännvidd är 5,0+6,0+5,0 meter och nyttobreddens 4,5–6,0 meter. Broarna har grundlagts på träpålar. Träpålarna är vertikala pålar med cirka 1,0 meters avstånd och de sträcker sig ända till överbyggnadens nedre yta. I pålarnas övre del finns en nackbjälke med sågningshöjden 230 mm, som huvudbalkarna stöder sig på.

Vid den mera omfattande allmänna granskningen togs prover, huvudsakligen med en tillväxtborr, för att upptäcka eventuella rötskador. Under arbetets gång gjordes också jämförelser av verktygen för att upptäcka rötskador, och mikroborgen visade sig, tack vare sin snabbhet, vara den mest användbara för att undersöka träbroar. Mikroborgen fungerar också i fuktiga förhållanden. Undersökningen visade att mängden rötskador på broarna har fortsatt öka i snabb takt. Det verkar som om rötskadorna på broarna har ökat i snabbare takt i södra Finland än i norra Finland. Rötskadorna varierar starkt. Det finns broar som nästan inte uppvisar några rötskador alls, medan andra broar är i sådant skick att de borde rivas. Under den tid som undersökningen pågick förnyades några broar. Pålarna uppvisar rötskador i synnerhet vid vattennivån och vid ändstödet i jordtrycksväggarnas konstruktioner. Rötskador hittades både i huvudbalkarna och i nackbjälkarna. Däckplankorna på bron har förnyats åtminstone en gång, och på några broar har plankdäcket ersatts med limträelement.

I den preliminära bärighetsgranskningen undersökte man kalkylmässigt hur hållbara träbroarna är för laster enligt AA13. Resultatet av kalkylen visade att utnyttjandegraderna för en rötfri och felfri bro är cirka 75 procent i spannet och vid stödet i fråga om böjningspåkänningen vid huvudbalkarna och nackbjälken. Skjuvmotståndet är av samma storleksordning.

Provbelastningar gjordes på femton broar, och på fem av dem användes flera mätninggivare än vid s.k. lättprovbelastningar. De vertikala förskjutningarna mättes med DMM-nivålasrar från mellanstödet pålar och vid huvudbalkarna från spannens mitt. Töjningsmätningar (spänningsgranskning) gjordes med töjningsgivare i huvudbalkarna, nackbjälken och i mellanstödspålen. I fem broar mätte man med förskjutningsgivare förskjutningen mellan huvudbalksparet i den vågräta fogen för att undersöka samverkanskonstruktionens effekt.

Som provbelastningsfordon använde man huvudsakligen en långtradare med släpvagn lastad med grus (AA92), där dragbilen hade treaxlad boggi. Belastningskörningarna gjordes med dragbil och släpvagn, och på broar med låg spännvidd enbart med dragbil. Under provets gång ökades dragbilens last vid bakre boggin med 3 - 6 ton, så att man uppnådde större boggilaster än för AA13 fordon. På några broar kunde man också använda fordon enligt den nya förordningen AA13. Därtill undersökte man på en bro hur ett fordon med singelhjul (axel med två hjul) fördelar hjullasten på brokonstruktionen.

För att analysera resultaten av provbelastningarna gjorde man FEM-kalkylmodeller av broarna, där huvudbalkarna beskrevs som en kontinuerlig balk. I modellen finns egna element på området där stödet finns, för att man skulle kunna omvandla styvhetsförhållandena mellan området med spann och området med stöd och verifiera resultaten från modellen med provresultaten. Plankdäcket beskrevs i modellen antingen som balkelement eller som plattelement, och träpålarna togs med i modellen som 5 meter långa 3d-balkelement. I spänningsgranskningarna undersöktes huvudbalkens spanntvärsektioner genom att studera olika grader av verkningar för två balkars samverkanskonstruktioner. Vid provbelastningarna uppnåddes liknande resultat med kalkylmodellen för de uppmätta böjningarna och då var spanntvärsektionens styvhet cirka 1,5-faldig i förhållande till stödtvärsektionen. Som elasticitetskoefficient för träkonstruktionen användes värdet 9 000 MPa. Motsvarigheten för spänningarna som räknats från töjningsgivarna för provbelastningen kunde räknas delvis för huvudbalkens spanntvärsektion, som delvis fungerar som en samverkanskonstruktion ( $k=0,5$ ). Den partiella funktionen som samverkanskonstruktion bekräftas också av resultatet från givaren som mäter den inbördes förskjutningen i huvudbalkarnas vågräta fog. Vid provbelastningen uppmättes en maximal spänning på 5 MPa vid spannet för huvudbalken bestående av två träbalkar och på 7 MPa vid nackbjälken, då det tillåtna värdet vid provbelastning är 10 MPa.

Vid provbelastningen av pålarna uppstod på vissa broar en irreversibel sättning på maximalt 5 mm på mellanstöden. Sättningen berodde möjligen på att pålen tryckts djupare in i marken, eller på att pålen hade rötskador. I den allmänna granskningen inkluderade man i provbelastningarna en bro som enligt klassificeringen var i dåligt skick för att få en uppfattning om hur rötskadorna påverkar mätresultaten. Fastän man inte vågade köra provprogrammet fullt ut, så märktes de största böjningarna orsakade av belastningen samt spänningarna tydligt och bron i fråga har nu byggts om.

I regel tålde broarna provbelastningarna med fordonslast i klassen AA13. De irreversibla sättningarna och det faktum att det inte i vissa broars alla huvudbalkar uppstod spänningar i enlighet med kalkylmodellen är ett tecken på att broarna fungerar bristfälligt. Utgående från den analytiska granskningen med hjälp av kalkylmodellen är den farligaste skadan för brotypen att mellanstödspålen ger efter, varvid nackbjälkens spännvidd fördubblas och t.o.m. en liten rötskada i nackbjälken eller en liten överlast i fordonet kan få nackbjälken att brista, varvid huvudbalkarna på stället rasar.

Gruppen av träbroarna som granskades är i sista skedet av sina livscyklar och man har kommit med innovationer där man bl.a. skulle ersätta mellanstöden med stålspålsportaltypen för att periodisera ombyggnaden av broarna. Valet av broarna som ska repareras och förnyas grundar sig på en systematisk undersökning av broars skick i enlighet med de mera omfattande allmänna granskningsanvisningarna för träbroar som utarbetades under forskningsprojektets gång.



**Final report on the carrying capacity and condition assessment of timber bridges – Continuous timber beam bridge (Pjp).** Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2016. Research reports of the Finnish Transport Agency 40/2016. 31 pages and 5 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-301-9.

## Abstract

The new Decree on the Use of Heavy-Duty Vehicles on the Road (AA13) entered into force on 1 October 2013. The axle and bogie loads of vehicles defined in this Decree are higher than the ones defined in the previous Decree (AA92). The aim of this study was to examine the condition of small continuous timber girder bridges and their capacity to carry heavier vehicles as allowed under the new Decree. According to the Finnish Transport Agency, about 400 bridges will be affected by the new load limits. More than 100 of these are timber bridges. The study was divided into measurements and decay inspections performed in connection with the extended general inspection; load testing, test analyses, and innovative bridge strengthening structures.

The inspected bridges were built from 1965-1973, when the design load was AI. Since 1969, the design loads have been AKI and EKII. The timber bridges are now about 50 years old and have reached the last stages of their life cycles. The bridges are mostly situated on local roads carrying little traffic, but they play a significant role for certain transports, for example, timber.

These inspected bridges feature the main girder as being primarily a structure made up of two round lumber beams on top of each other, fastened to each other with bolts. The horizontal surfaces of the beams have been sawn to the approximate sawing height of about 250 mm. The main girders are situated about 0.5 metres apart. At the intermediate support, the third and lowest lumber beam is a saddle beam that is about 2.5 metres long. The bridge deck is a nail-laminated slab (50x125). The most typical span lengths of the bridge are 5.0+6.0+5.0 metres and the horizontal clearance ranges between 4.5...6.0 metres. The bridges are founded on wooden piles. The wooden piles are vertical piles placed about 1.0 metres apart, and they extend to the lower surface of the superstructure. In the upper end of the piles, there is a head beam with a sawing height of about 230 millimetres, which supports the main girders.

In the extended general inspections, most of the decay samples were taken using an increment borer. During the research project, the decay inspection tools were also compared. The tool best suited for inspecting timber bridges proved to be the micro drill, due to its fast sampling. The micro drill can also be used in moist conditions. The decay inspections showed that the decay of bridges has progressed rapidly. The decay of bridges seems to have progressed faster in Southern Finland than in Northern Finland. The extremes of the decay progress vary from timber bridges with almost no decay, to bridges ready for demolition. During the research project, a couple of bridges were renewed. Decay in piles has occurred especially at the water level and in the end support of retaining walls with earth pressure. Wood decay was found in the main girders and head beams. The deck slab of the bridges has been renewed at least once, and in some bridges the nail-laminated deck has been replaced with glued laminated timber.

In the preliminary load-bearing analysis, the calculated load-bearing capacity of timber bridges was calculated for loads according to Decree AA13. The calculation results show that the degree of utilisation of undecayed flawless bridges is about 75%, considering the bending stress of main girders and head beams in the span and at the support. The shear force resistance shows about the same figure.

Load tests were carried out on fifteen bridges. On five of these bridges, more measurement sensors were used than in the so-called light-load tests. Vertical displacement was measured in the intermediate support piles and in the main girders, in the middle of the bridge spans, by means of a digital multimeter DMM. Strain measurements (stress analyses) were carried out using strain sensors in the main girders, head beams and the intermediate support pile. In five bridges, displacement sensors were used to measure mutual slippage of the lumber beam pair of the main girder in order to determine the composite structure effect in the horizontal joint.

The vehicles used for the load tests were mainly full-trailer gravel trucks (AA92), with a three-axle bogie prime mover. The loading drives were carried out in full combinations and, on bridges with small span lengths, with just the prime mover. As the test progressed, more load, 3...6 tonnes, was added to the trailing bogie of the prime mover to achieve higher bogie loads than the vehicle referred to in Decree AA13. On some bridges, new vehicles in accordance with the new Decree AA13 were also used. On one bridge, the wheel load distribution of a vehicle with a single-drive axle (two wheel-axle) on the bridge structure was examined.

Finite Element Models (FEM) were created to analyse the bridge load testing results. In these models, the main girders were described as continuous girders. The support areas in the model have their own elements, in order to modify the proportions of stiffness in the support and bridge span areas and to compare the results in the model with the test results. In the model, the nail-laminated deck was modelled either as beam or slab elements, and the wooden piles were described as 5-metre long 3D-beam elements. In the stress analyses, the cross-sections of the main girder spans were examined with different degrees of composite structure effects of two beams. The bending measured in the test loads was equivalent to the results in the calculation model, when the stiffness of the bridge span cross-section was about 1.5 in proportion to the support cross-section. The elastic modulus for wooden structures was 9,000 MPa. The equivalence of stress calculated from the strain sensors was calculated for the span cross-section of the main girder serving as partly composite structure ( $k=0.5$ ). The partial function as a composite structure also supports the result of the sensor measuring mutual slippage in the horizontal joint of the main girder beams. In the load testing, the maximal stress for the main girder with two lumber beams was measured at 5 MPa in the span. The measurement result for the head beam was a stress level of 7 MPa, when the allowed value in the test loads was 10 MPa.

In some bridges an irreversible deformation of a maximum of 5 mm was found on the intermediate supports during the load testing of the piles. The deformation has either been caused by the thrusting of the pile deeper into the ground, or by the fact that the pile has decayed. On the basis of the general inspection, a bridge classified as being in poor condition was included in the loading test in order to show the effect of decay in the measurement results. Even though the test programme was too risky to be fully executed, the greatest bends and stresses were obvious in the results, and the bridge in question has now been renewed.

In general, the bridges were able to carry test loads equivalent to the vehicle loads referred to in Decree AA13. The irreversible deformation of piles and the fact that not all bridges showed stress according to the calculation model suggest imperfect bridge functionality. According to an analytical inspection carried out using the calculation model, the most dangerous damage to this bridge type is failure of the intermediate support pile, whereby the span length doubles, and even a minor unsoundness in the head beam or a slightly overloaded vehicle could break the head beam, which would cause the main girders to collapse at that point.

Since the life cycle of the inspected group of timber bridges is coming to an end, innovations have been introduced in order to gradually renew the bridges, e.g. by replacing intermediate supports with steel pile portal types. The selection of bridges to be repaired or renewed will be based on a systematic condition inspection according to the 'Manual for extended timber bridge inspections' drawn up during this research project.

# Esipuhe

Tämä tutkimus on tehty vuosina 1965...1973 rakennettujen pienten puusiltojen kunnon ja uuden vuonna 2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen mukaisten raskaampien ajoneuvojen johdosta mahdollisten painorajoitustarpeiden selvittämiseksi. Materiaalia tutkimukseen on kerätty laajennetuilla yleistarkastuksilla, lahotutkimuksilla, koekuormituksilla ja laskenta-analysoinneilla. Lisäksi on ideoitu siltojen vahvistamis- ja korjausvaihtoehtoja.

Työn ovat tilanneet Liikennevirasto ja ELY-keskukset. Tutkimusraportti ja koekuormitusten analysointi on laadittu Ponvia Oy:ssä. Koekuormitusten suorittamisesta ja lahotutkimusvälineiden vertailusta on vastannut Dimense Oy.

Liikennevirastosta hankkeen ohjauksessa ovat olleet Minna Torkkeli, Olli Pyykönen ja Sami Nojonen. ELY-keskuksia ovat edustaneet Olli-Pekka Aalto ja Terhi Honkarinta. Dimense Oy:ssä työtä ovat hoitaneet Veijo Lyöri ja Ari Kilpelä. Ponvian osallistujat hankkeeseen ovat Kari Kuusela ja Olavi Kummala.

Helsingissä kesäkuussa 2016

Liikennevirasto

Tekniikka ja ympäristö -osasto/Taitorakenneyksikkö

# Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ.....	11
2	ALUSTAVA KANTAVUUSTARKASTELU .....	13
3	KUNTO- JA LAHOVÄLINETUTKIMUKSET JA OHJEISTUS .....	14
3.1	Laajennettu yleistarkastus.....	14
	3.1.1 Lahotutkimusvälinevertailu .....	14
	3.1.2 Puusillan laajennetun yleistarkastuksen ohje.....	15
4	KOEKUORMITUKSET JA ANALYSOINTI .....	17
4.1	Koekuormitukset.....	17
	4.1.1 Koekuormitusten kohteet.....	17
	4.1.2 Koekuormitusten toteutus .....	18
4.2	Koekuormitusten analysointi .....	19
	4.2.1 Analyysin toteutus .....	19
	4.2.2 Pyöräkuorman jakautuma pääkannattimille .....	20
	4.2.3 Taipumat .....	20
	4.2.4 Jännitykset.....	21
	4.2.5 Pääkannattimien jatkuvuus ja liittorakennetoiminta .....	21
	4.2.6 Paalun rasitukset .....	21
	4.2.7 Analysoinnin raportointi .....	22
5	YHTEENVETO TUTKIMUKSISTA .....	23
5.1	Siltojen ikä ja suunnittelukuorma.....	23
5.2	Laajennettu yleistarkastus - lahotutkimus .....	23
5.3	Koekuormitusanalyysi ja kantavuus .....	25
	5.3.1 Kuntokartoituksen ääripää.....	25
	5.3.2 Pääkannattimen jäykkyys ja kuorman jakautuminen .....	25
	5.3.3 Paalut ja niskapuut.....	26
6	TOTEUTUNEITA JATKOTOIMIA .....	27
6.1	Koekuormitus murtoon saakka .....	27
6.2	Sillan korjaus ja vahvistamisideointi .....	27
7	SILTOJEN PAINORAJOITUS- JA UUSIMISTARVE .....	29
7.1	Painorajoituksen määrittelykriteerit.....	29
7.2	Siltojen uusimiskriteerit .....	29
LIITTEET		
Liite1	Yhteenvetotaulukko kuntotutkimuksista koekuormituksissa	
Liite2	Koekuormitusajoneuvojen akselipainot ja akselivälit	
Liite3	Mittausantureiden sijainti sillassa koekuormituksessa	
Liite4	Lyhyt yhteenvedo laajennetuista yleistarkastuksista	
Liite5	Alustava kantavuustarkastelu jatkuville puupalkkisilloille	

# 1 Yleistä

Liikennevirastossa on selvitetty vuoden 2013 ajoneuvoasetusmuutoksen vaikutukset nykyiseen siltakantaan. Akseli- ja kokonaiskuormien korotukset aiheuttivat painorajoitustarpeen noin 400 siltaan, joista puusiltoja oli yli 100.

Tämän raportin tarkasteluun sisältyvät jatkuvat puupalkkisillat koko Suomen alueelta. Liimapuupalkkisillat ja yksiaukkoiset puupalkkisillat sekä sillat, joissa on sekaisin puu- ja teräspalkkeja eivät sisälly aineistoon.

Tarkastelun sillat on rakennettu vuosien 1965–1973 aikana. Kaikkien siltojen ikä ylittää tämän tyyppisen puurakenteisen sillan suunnittelukäyttöiän (30...35 vuotta).

Sillat on suunniteltu pääsääntöisesti Tie- ja Vesirakennushallituksen (TVH) siltaosastolla. Suunnittelukuormana on käytetty aluksi kuormaluokkaa AI ja vuonna 1969 voimaan tullutta kuormaluokkaa AKI, Ek2. Siltoja on suunniteltu eri jännemitoille ja hyötyleveyksille. Valmiita suunnitelmia on myöhemmin sovellettu 'tyyppi- ja piirustuksena' Tie- ja Vesirakennuslaitoksen (TVL) eri piireissä. Kyseiset sillat sijaitsevat usein tärkeiden puutavarakuljetusten reiteillä.

Tarkastelussa oleva siltatyyppi on jatkuva kolmiaukkoinen puinen palkkisilta (pienet sillat 'pyöreistä' puista Kuva 1 ja 2). Tyypillisin jännemitta-alue on 5,0+6,0+5,0 metriä (Kuva1). Sillan kansilaattana on yleisesti syrjälantukansi. Sillan poikkileikkauksessa pääkannattimet ovat noin 0,5 metrin jaolla. Pääsääntöisesti pääpalkit muodostuvat päällekkäin asetetusta kahdesta pyöreästä puusta (latva  $\phi 280$  mm), joissa tasan vaakapinnan sahauskorkeus (parrun korkeus) on 240...260 mm. Välituilla on lisäksi kolmantena puuna noin 2,5 metrin pituinen satulapuu (Kuva3), jonka avulla ylemmät puut on jatkettu teräspulteilla yhteen.

Silta on perustettu puupaalujen (latva  $\phi 180$  ja tyvi  $\phi 250$ ) varaan. Tukilinjassa yhdessä rivissä olevat pystypaalut ovat noin 0,9...1,10 metrin jaolla pääty- ja välituilla. Välituilla ovat reunoilla lisäksi vinopaalut (4:1) sillan poikkisuunnassa (Kuva2). Päätytuen taustalla on lisäksi pystysuorat takapaalut, jotka tukeutuvat yläpäästään kansipalkkeihin. Takapaaluihin tukeutuvat vaakasuorat seinäpuut muodostavat seinän penkereen maanpainetta vastaan.

Tukipaalujen yläpään on asennettu niskapuu, jonka sahausväli on noin 220 mm ja sen päällä on muotoon sahattu aluspuu. Pääpalkit on asennettu aluspuun päälle ja kansilaattana on poikittainen syrjälantukansi (50x125...150, Kuva2 ja 3). Monessa sillassa kansilaatta on uusimisen yhteydessä muutettu liimapuiseksi.



## 2 Alustava kantavuustarkastelu

Yleisimmille jatkuvan palkkisillan tyypeille suoritettiin laskennallinen kantavuustarkastelu (Liite5) suunnitelmista poimittavien lähtöarvojen mukaisille lahovauriotomille rakenteille. Laskenta suoritettiin jänne mitoille  $J_m = 5 + 6 + 5$  m ja  $J_m = 4 + 5 + 4$  m. Hyötyleveys oli molemmissa malleissa  $H_l = 6,0$  m.

Ajoneuvokuormaksi valittiin tarkastelussa uuden ajoneuvoasetuksen mukaisiksi oletetut ajoneuvot.

uusi AA ajoneuvo (täysperävaunu)	76 t
4 akselinen vetoauto	35 t
5 akselinen vetoauto	42 t

Tarkastelussa pääpalkkien oletettiin toimivan jatkuvina ja päällekkäisten palkkien toimivan erillisinä sauvoina ilman liittovaikutusta myös välituilla, jossa kaikissa leikkauksissa on kaksi ehjää jatkamatonta palkkipoikkileikkausta. Sauvojen vääntöjäykkyyksiä ei käytetty hyväksi.

Tuloksena saatiin, että tutkituilla jänneväleillä terveiksi oletetuilla rakenneosilla (puutavaran lujuusluokalla C30) sillat kestäisivät uuden ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat. Hyväksikäyttöasteeksi laskennassa saatiin pääpalkin aukossa ja tuella 75 % taivutusmomentille. Niskapalkin hyväksikäyttöasteeksi saatiin samaa suuruusluokkaa. Mitoitus leikkausvoimalle antoi hyväksikäyttöasteeksi 75 %.

## 3 Kunto- ja lahovälinetutkimukset ja ohjeistus

### 3.1 Laajennettu yleistarkastus

Vuonna 2013 suoritettiin jatkuville puupalkkisilloille laajennettu yleistarkastus noin 40 kohteeseen eri ELY-keskusten alueilla. Tarkastuksia suorittivat Dimense Oy, Kiratek Oy, Huura Oy ja Siltanylund Oy. Tutkimuksista on erilliset raportit. Lyhyt yhteenvetoraportti tarkastuksista on koottu Ponvia Oy:ssä (Liite4).

Tutkittavat kohteet on valittu yhteistyössä ELY-keskusten siltainsinöörien ja Liikenneviraston taitorakenneyksikön kanssa. Valinnassa painoivat sillan merkittävyys liikenteellisesti, sillan mitat ja suunnittelukuorma. Tuloksia käytettiin hyväksi valittaessa koekuormituskohteet.

Projektissa tutkittiin puurakenteisten siltojen lahovauriota ottamalla näytteitä sillan pääkannattajista ja tukipaaluista. Lisäksi mitattiin sillan päämitat sekä valikoidusti pääkannattajien, tukipaalujen ja niskapuiden dimensioita. Näiden lisäksi selvitettiin kannatinpaalujen välisiä keskinäisiä etäisyyksiä ja tehtiin yleisiä havaintoja sillan kunnosta mm. niskapuiden kiertymisestä, kiinnityspulttien ruostumisesta sekä kaiteiden ongelmista.

Lahovaurioita tutkittiin kasvukairanäytteitä ottamalla. Näytteitä otettiin välituelta vesirajan tuntumasta ja päätytuella maanpinnan tasosta. Pääkannattimista kairausnäytteet otettiin pääosain kansilankutuksen läpi poratun esireiän kautta. Kairausnäytteet analysoitiin Kiratek Oy:n laboratorioissa.

#### 3.1.1 Lahotutkimusvälinevertailu

Tutkimusohjelman kuluessa havaittiin tarve löytää kasvukairaa nopeampia menetelmiä lahon tutkimiseksi puusiltarakenteista. Dimense Oy teki vertailun eri tutkimusvälineillä (Viite 1). Tutkimuksessa oli mukana mm seuraavia laitteita:

- kasvukaira
- PURL-ultraäänimittaus
- IML Power Drill – mikropora

Tutkimusta tehtiin L-823 Varejoki II sillan tukipaaluihin ja erilliseen puiseen lyhtypylvääseen.

Lyhyesti yhteenvetona tuloksista voi mainita, että PURL-menetelmä ei sovellu vesirajassa olevien puiden tutkimuksiin, koska menetelmä ei toimi kosteassa puussa.

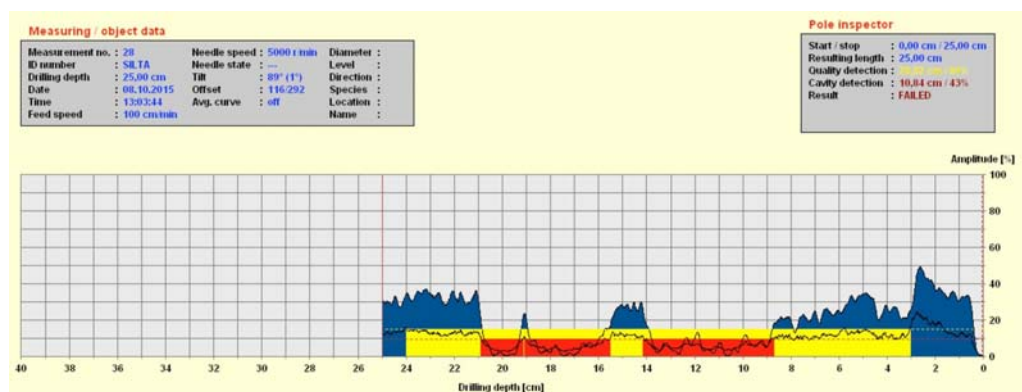
Mikroporalla porataan noin 3 mm terällä reikää puuhun ja laite mittaa terän antamaa vastusta ja poran etenemisnopeutta. Poraan on saatavissa ohjelmisto joka tulostaa arvot graafisesti ja asettamalla parametrit sopivasti saadaan tuloste näyttämään alueet, joissa on 'FAILED' Lahoaa tai 'WARNING' Mahdollisesti lahoa.



Mikroporan etuna on, että tutkimuksia saadaan tehtyä helposti huomattavasti enemmän kuin kilpailevilla laitteilla. Tutkimustulos on tarkka käyrä koko porausmatkalta, jolloin lahoamisen aste selviää luotettavimmin ja mahdolliset halkeamat myös paljastuvat.

Kasvukairanäytteessä on ongelmana näytteenoton hitaus ja näytteen saaminen ehyenä kasvukairasta näyteputkeen.

Suoritettussa kokeessa ei korrelaatio laitteiden kesken noussut kovin korkealle, mutta kokeiden suorittajan kommentoissa mikropora-asetusten saaminen kohdalleen silta-puiden tutkimiseen tulee parantamaan luotettavuutta. Seuraavissa kuvissa on esimerkit poran kuvaajasta (Kuva4) ja vastaavasta kasvukairanäytteestä (Kuva5) Niiprajoen sillan tuen T1 pystypaalusta.



Kuva 4. Punainen on 'Lahoa' 'FAILED\*' ja keltainen 'Mahdollisesti lahoa' 'WARNING'.



Kuva 5. Kasvukairanäyte mikroporausta vastaavasta kohdasta.

### 3.1.2 Puusillan laajennetun yleistarkastuksen ohje

Puusiltojen tutkimusohjelman aikana todettiin tarpeelliseksi laatia ohje laajennetun yleistarkastuksen suorittamisen systematisointiin. Lahotutkimuksen päävälineeksi ohjeeseen valittiin mikroporatutkimukset. Ohjeessa pidetään myös pienimuotoista (ks. 4.1.1) koekuormitusta suositeltavana kunnan kartoitusmuotona.

Ohjeen koekäyttönä laajennettu yleistarkastus, mikroporalahomittaus ja pienimuotoinen koekuormitus päätettiin suorittaa seuraaville silloille syksyllä 2015:

O-2502, Petäjäjoen silta, (AKI,Ek2), Sotkamo Jm = 3,5 + 4,5 + 3,5, Hl = 4,5

O-2213, Niprajoen silta, (AI) ,Sotkamo, Jm = 3,6 + 3,9 + 3,6, Hl = 4,5

Silloille oli aiemmin tehty (2013) laajennettu yleistarkastus ja lahotutkimus kasvukairakoepaloilla. Sillat tutkittiin uuden 'Puusiltojen laajennetun yleistarkastusohjeen' esiversion mukaisesti mikropora-menetelmällä, joita edelleen varmistettiin satunnaisilla kasvukairanäytteillä.

## 4 Koekuormitukset ja analysointi

### 4.1 Koekuormitukset

#### 4.1.1 Koekuormitusten kohteet

Maantieteellisen sijainnin, liikenteellisen merkityksen, jänne- ja hyötyleveysmittojen, suunnittelukuorman sekä suoritettujen yleistarkastusten perusteella on valittu koekuormitettavat sillat. Koekuormitukset jaettiin kahteen ryhmään, joista ns. raskaisiin koekuormitukseen valittiin viisi siltaa ja ns. keveysiin koekuormitukseen kymmenen siltaa. Raskaissa koekuormituksissa käytettiin enemmän mittausantureita ja mittausvaiheita kuin kevyessä. Lisäksi on tehty ns. pienimuotoisia koekuormituksia, joissa on vähemmän venymämittausantureita kuin kevytkoekuormituksessa, ja lisäksi koeajoneuvona on pelkästään vetoauto.

Raskaissa koekuormituksissa tutkittiin sillan pystysuuntaisia siirtymiä 9 anturilla (tasolaser) ja palkin tai paalun venymämittauksia kahdellatoista venymäanturilla sekä pääkannatin puiden keskinäistä liukumaa kahdella siirtymäanturilla. Kevytkoekuormituksissa käytettiin viittä tasolaseranturia ja viittä venymämittausanturia. Pienimuotoisessa koekuormituksessa käytettiin kahdeksaa tasolaseranturia ja kahta venymämittausanturia.

Raskaiden koekuormitusten sillat olivat:

L-1304 Mairijoen silta, Pelkosenniemi, (AKI,Ek2)	Jm = 5,0 + 6,0 + 5,0 m,	Hl = 4,6 m
SK-609 Sopen silta, Siilinjärvi, (AKI,Ek2),	Jm = 5,1 + 5,9 + 5,1 m,	Hl = 6,6 m
U-1050 Koiransuolenojan silta, Nurmijärvi, (AI)	Jm = 5,0 + 6,0 + 5,0 m,	Hl = 5,1 m
H-3416 Raivaluoman silta, Parkano, (AKI,Ek2)	Jm = 4,0 + 5,0 + 4,0 m,	Hl = 6,0 m
T-1516 Koittankosken silta, Merikarvia, (AI),	Jm = 3,6 + 5,7 + 3,6 m,	Hl = 6,0 m

Kevytkoekuormitukset silloille:

Ryhmä1

SK-646, Joenniemen silta, (AKI,Ek2), Kuopio,	Jm = 4,0 + 5,0 + 4,0 m,	Hl = 7,3 m
KES-247, Saunasalmen silta, (AI), Hankasalmi	Jm = 4,0 + 5,2 + 4,0 m,	Hl = 4,5 m

Ryhmä2

KES-915, Suvannonjoen silta, (AI), Viitasaari	Jm = 3,5 + 4,5 + 3,5 m,	Hl = 6,5 m
V-3598, Hanhisen silta (AI), Kannus,	Jm = 3,5 + 4,5 + 3,5 m,	Hl = 6,0 m
O-2779, Petäjäjoen silta, (AKI,Ek2), Kuhmo,	Jm = 3,0 + 4,0 + 3,0 m,	Hl = 4,6 m
O-2783, Sulatusjoen silta, (AI), Kuhmo,	Jm = 3,0 + 4,0 + 3,0 m,	Hl = 4,6 m

Ryhmä3

O-2665, Nimisenjoen silta (AKI,Ek2), Sotkamo,	Jm = 4,5 + 5,5 + 4,5 m,	Hl = 4,5 m
O-2519, Vihtamonjoen silta, (AI), Sotkamo,	Jm = 5,0 + 6,0 + 5,0 m,	Hl = 4,6 m
L-823, Varejoen silta II, (AI), Tervola,	Jm = 5,0 + 6,0 + 5,0 m,	Hl = 6,0 m

Ryhmä4

SK-813, Pajusalmen silta, (AI), Tuusniemi	Jm = 6,0 + 8,0 + 6,0 m,	Hl = 6,2 m
-------------------------------------------	-------------------------	------------

Kevytkoekuormitusten jako ryhmiin jännemittojen mukaan noudattaa koekuormitusten analysoinnin raportoinnissa käytettyä ryhmittelyä. Kevytkoekuormituskohteiden valinnassa pyrittiin löytämään myös vertailukohde raskaiden koekuormitusten ryhmän silloille.

'Puusiltojen laajennetun yleistarkastusohjeen' käyttöttestauksessa tehtiin myös pienimuotoinen koekuormitusohjelma seuraavilla silloilla:

O-2502, Petäjäjoen silta, (AKI,Ek2), Sotkamo	Jm = 3,5 + 4,5 + 3,5 m,	Hl = 4,5 m
O-2213, Niprajoen silta, (AI), Sotkamo	Jm = 3,6 + 3,9 + 3,6 m,	Hl = 4,5 m

#### 4.1.2 Koekuormitusten toteutus

Siltojen koekuormitusten anturointisuunnitelmat, koekuormitusajoneuvot ja koekuormitusvaiheet suunniteltiin yhteistyössä Liikenneviraston, Ponvia Oy:n ja Dimense Oy:n kesken. Silloille laadittiin ennakkoon antureiden sijoituskaaviot ja koekuormitusvaiheet ajokaistoinen. Vaiheet muodostuivat läpiajoista kävelyvauhdilla ja pysäytys-vaiheista määräävissä kohdissa ajoneuvon eri kombinaatiolla ja kuormalla. Ennakkoon oli laskettu myös arviot taipumasta ja venymästä ja määritelty raja-arvot ylikuormatilanteen välttämiseksi. Koekuormituksen aikana oli muun liikenteen pääsy siltapaikalle estetty liikennemerkein.

Siltojen koekuormitukset toteutti Dimense Oy. Jokaisen sillan osalta on laadittu erillinen tutkimusraportti mittaustuloksineen (Viitteet 2...18). Silloista mitattiin venymiä, taipumia ja siirtymiä käyttäen koekuormana täysperävaunuyhdistelmää täydellä kokoonpanolla ja pelkällä vetoautolla eri kuormituksilla.

**Taipumamittauksessa** (pystysiirtymä) käytettiin Dimense Oy:n kehittämää DMM-menetelmää (Deflection Multi Meter), joka perustuu pyörivän tasolaserin muodostamaan referenssitason ja optisiin anturiyksiköihin. Jokainen DMM-anturiyksikkö mittaa pystysuuntaista liikettä 0–160 millimetrin alueella. Kuormitustestissä DMM-taipuma-antureita kiinnitettiin 7 kpl (5 kpl kevytkoe) sillan pääkannattajiin ja 2 kpl paaluihin. Maapenkereisiin asennettiin kaksi referenssi-tasolaseria.

**Venymämittauksessa** (jännitykset) käytettiin Micron Optics:in valmistamia lämpötilakompensoituja os3610-valokuituantureita ja sm130-700 mittalaitetta. Anturin pituus on 25,4 cm ja sen mitta-alue on  $\pm 2500 \mu\epsilon$ , kun anturi on esivenytetty alueen puoliväliin. Venymäantureita asennettiin raskaassa koekuormituksessa 10 kpl pääkannattimiin ja yksi paaluun ja yksi niskapalkkiin (Kevytkoekuormituksessa mittaukset 5 kpl vain pääkannattimissa).

**Liukumamittauksissa** pyrittiin selvittämään pääkannattimien liittotoimintaa mittaamalla parrujen välistä siirtymäeroa niiden vaakasaumassa. Siirtymäantureina käytettiin Positek:in tuotetta P103.25, jonka mitta-alue on  $\pm 12,5\text{mm}$ , kun jousitettu kara on viritetty asteikon puoliväliin. Liukumaa mitattiin vain raskaassa koekuormituksissa.

**Koekuormitusajoneuvona** käytettiin pääosin sorarekkaa täydessä (64 tonnia) lastissa. Ajoneuvo oli kahdeksan akselinen, jossa vetoauto 4-akselinen (teli 3-akselinen) ja perävaunu oli varustettu kahdella kaksiakselisella telillä. Ajoneuvoa muokattiin koeken aikana siten, että aloitettiin täysyhdistelmällä 64 tonnin kokonaispainolla. Sitteen ajettiin kuormitusvaiheet ilman perävaunua. Lopuksi pantiin lisäpainot 3..6 t vetoauton taka-akselistolle ja ajettiin loppuvaiheet. Lisäpainolla vetoauto antaa silloille suuremmat rasitukset kuin uusi AA13-ajoneuvo normiakselipainoilla.

Joidenkin siltojen koekuormituksessa käytettiin yhdeksänakselista sorarekkaa (uusi AA13), jossa vetoauto 5-akselinen ja perävaunu oli varustettu kahdella kaksiakselisella telillä. Ajoneuvoa muokattiin kokeen aikana siten, että aloitettiin täysyhdistelmällä 76 tonnin kokonaispainolla. Sitten ajettiin kuormitusvaiheet ilman perävaunua. Lopuksi pantiin lisäpainot (3 tn) vetoauton taka-akselistolle ja ajettiin loppuvaiheet.

Mairijoen sillan koekuormituksessa oli lisäksi singelipyöräinen (vain kaksi pyörää akselilla) puoliperävaunuajoneuvo 5-akselisena, jolloin vetoautossa oli etuakseli ja 2-akselinen teli sekä puoliperävaunussa 2-akselinen teli. Pyrittiin tutkimaan pyöräkuorman mahdollisesti erilaista jakautumista pääkannattimille.

Yleistarkastusohjeen testauskohteissa koekuormitusajoneuvoksi valittiin sorarekan neliakselinen vetoauto. Sillat koekuormitettiin kahdella venymäanturilla ja kahdeksalla siirtymäanturilla (pystysiirtymä). Koekuormitusajoneuvojen yhteydessä seurattiin sillan toimintaa aistihavaintojen perusteella.

Kaikista koekuormituksista on erilliset raportit (Viitteet 19...28), joissa koejärjestelylaitteineen on esitelty. Tuloksina on taulukkomuodossa jokaisen anturin ääriarvotulokset ja lisäksi vastaavat arvot muissa antureissa. Graafisena tulosteena on vaiheittain kaikkien antureiden tulokset sidottuna kuormitusvaiheen aikajanalla.

Koekuormitukset voitiin toteuttaa pääosin laaditun suunnitelman mukaisesti, mutta U-1050 Koiransuolenojan ja T-1516 Koittankosken silloilla jouduttiin vaiheita järjestelmään uudelleen johtuen siltojen heikosta kunnosta.

## 4.2 Koekuormitusten analysointi

### 4.2.1 Analyysin toteutus

Analysointi on suoritettu koekuormitusten tulosten pohjalta. Lähtöarvoina on myös käytetty laajennetussa yleistarkastuksessa mitattuja tuloksia ja Siltarekisteristä poimittuja tietoja ja piirustuksia.

Analysoinnissa on tehty seuraavanlaisia perusolettamuksia. Kahdesta parrusta muodostetun pääpalkin ei oleteta toimivan liittorakenteisena voimasuureita ratkaistaessa. Syrjälankkukansi ei ole mukana pääpalkkien jäykkyydessä, vaan toimii ainoastaan kuormaa jakavana elementtinä poikkisuunnassa. Perusmalleissa palkit menevät jatkuvana ja tasajäykkänä välitukien läpi. Palkkien vääntöjäykkyyttä ei käytetä hyväksi. Pääkannattimien kimmokerroin puumateriaalilla on laskennassa ollut 9000 MPa. Malliin otetaan puupaalut mukaan 5 metrin pituisina. Paalujen alapäässä on jäykkä kiinnitys ja paalun yläpäässä on nivelellinen liitos päällysrakenteeseen. Paalujen poikkileikkaus on  $\phi 250$ .

Voimasuureet, siirtymät ja vaikutusviivat on ratkaistu FEM-ohjelmalla (Robot Structural Analysis). Mallina on ollut 3D palkkimalli, jossa pääpalkit, niskat ja paalut on kuvattu palkkielementteinä (A, Ix, Iy, Iz). Mallissa on kansilaattakin kuvattu palkkielementeillä, jossa kansi on jaettu 0,5 metrin välein vastaavat jäykkyysominaisuudet sisältäväksi palkkielementiksi pääpalkkien painopisteen tasossa.

Välituen alueella, jossa pääpalkkien parruissa on jatkokset ja lisäksi satulapuu, voidaan taivutusjäykkyyttä muuttamalla hakea laskentamallia, joka korreloi parhaiten koekuormitusmittausten kanssa, koska oletettavasti pulttiliitoksiin on syntynyt välystä ajan myötä. Perusmallissa pääpalkit ovat tasajäykät sillan päästä päähän.

Erillismalleilla on tutkittu mm. välitukialueen jäykkyyden vaikutusta, pääkannattimien liittorakennetoimintaa, mahdollista paalun toiminnan vajautta, yksittäisen pääpalkin kantokyvyn heikkenemistä jne.

Poikkileikkausten jännitystarkasteluissa on jännitykset voimasuureista pääkannattajille laskettu liittorakennevaikutuksen eri asteilla (liukumaa parrujen välissä) ja niitä on verrattu koekuormituksen venymämittauksista laskettuihin jännityksiin.

Kuormitusajoneuvojen aiheuttamat rasitukset selvitetään FEM-mallissa laskemalla vaikutusviivat ajokaistoittain määrääviin kohtiin. Palkkimallissa yksikkökuorma ( $F=100$ ) on jaettu kahdeksi pyöräkuormaksi  $(12,5+25+12,5) \times 2$ , joita sijoitetaan poikkipalkeille. Sillan poikkileikkaukseen sijoitetaan koekuormituksessa kolmen metrin levyisiä kaistoja hyötylevyyden mukaan. Kaistajako on normaalisti yksi keskeinen ja molempiin reunoihin mahdollisimman epäkeskeinen kaista. Yksikkökuormaa juoksetetaan valittuja kaistoja pitkin 0,5 m etenemällä. Ohjelman influenssiominaisuutta hyväksikäyttäen tulostetaan vaikutusviivat tutkittaville pisteille.

Koekuormituksissa käytettyjen ajoneuvojen akselipainot ja akselivälit tallennetaan ajoneuvotietokantaan ja erillisellä ohjelmalla saadaan vaikutusviivaa hyväksikäyttäen ajettua halutut voimasuureet ja siirtymät kustakin ajoneuvosta. Laskentatuloksia verrataan koekuormitusten mittaustuloksiin.

Sillan kantavuustilanteen selvittämiseksi voidaan laskea myös sallittuja akselipainoarvoja erikoiskuljetuskaavioille.

#### **4.2.2 Pyöräkuorman jakautuma pääkannattimille**

Normaali pääkannattimien jakoväli on 0,5m. Pyöräkuorman kohdalla oleva palkki saa noin 38 % ja viereiset palkit noin 31 % kuormasta. Akselikuorman jakaantumisen voidaan ajatella menevän kuudelle palkille sillan poikkileikkauksessa. Singelipyöräisen akselin jakautuminen ei poikennut tästä. Koekuormitustuloksiin tuli hajontaa, koska rakenteen käyttäytyminen oli hyvin herkkä ajolinjalle ja useassa sillassa jäykkyseroista johtuen kuormankanto oli epätasaista palkkien kesken.

#### **4.2.3 Taipumat**

Taipumamittausten perusteella puusiltojen jäykkyys on pääsääntöisesti hieman suurempi kuin pääkannattimien kahden erillisen parrun yhteinen jäykkyys jatkuvana rakenteena. Usean sillan kohdalla saadaan koekuormituksessa mitatut taipumat vastaamaan laskentamallin tuloksia, kun mallissa aukoissa olevien sauvojen jäykkyys kasvatetaan vastaamaan osittain liittorakenteena toimivaa poikkileikkausta (tuen jäykkyys on puolet aukon jäykkyydestä). Kuormituksen lisääntyessä taipuma sillassa kasvaa epälinearisesti nopeammin kuorman lisäykseen nähden sillan liittorakennetoiminnan heikentyessä.

#### 4.2.4 Jännitykset

Pääsääntöisesti pääkannattimien jännitykset koekuormituksista jäivät kohtalaisen pieniksi. Yleisesti kahden parrun kannattimen jännitys aukossa jäi alle 5MPa (sallittu 10 MPa). Laskentamallin voimasuureista laskettu jännitys on samaa suuruusluokkaa koekuormituksen kanssa osittain liittorakenteisena toimivalla poikkileikkauksella.

Pääkannattimen jännitystarkastelun pohjalta sillat näyttäisivät toimivan osittain liittorakenteisena aukon poikkileikkauksessa. Kun tukialueen jäykkyys on puolet aukon jäykkyydestä, niin jännitystarkastelussa liittorakennekerrointa on käytettävä koekuormitusta vastaavan jännityksen saamiseksi.

Sillan lahoamisen vaikutus näkyi U-1050 Koiransuolenojan sillan tuloksissa, jossa mitatut pääkannattimen jännitykset olivat suuremmat kuin kahden erillisen parrun poikkileikkausarvoilla saadaan.

Kuormituksen lisääntyessä jännitykset pääkannattimissa kasvavat epälineaaraisesti nopeammin kuorman lisäykseen nähden sillan liittorakennetoiminnan heikentyessä.

Silloissa, joissa pääkannatin muodostuu yhdestä parrusta, venymistä lasketut jännitykset olivat maksimissaan 8,1 MPa (SK-813 Pajusalmen silta, jännemitat 6+8+6 m., keskiaukossa kaksi parrua päällekkäin, joista alemmat ulottuvat noin metrin verran reuna-aukkoon ja loppuosa reuna-aukoista yksiparruinen). Reuna-aukon jännitys vaatii laskentamallissa jatkuvuutta välituella, jotta päästään vastaavaan jännitykseen.

Niskapalkeista mitatut jännitykset olivat usein suurimmat siltakohtaiset arvot (esim. H-3416 Raivaluoman silta 7,3 MPa). Niskapalkki on kriittinen rakenneosana esim. paalujen vauriotilanteessa.

#### 4.2.5 Pääkannattimien jatkuvuus ja liittorakennetoiminta

Sillan pääkannattimet koostuvat pääsääntöisesti kahdesta päällekkäisestä parrusta, jotka on jatkettu välituen kohdalla jatkoskohtia limittäen ja lisäksi tuen alueella on lisätty alapintaan ns. satulapuu. Satulapuu on noin 2,5 metriä pitkä parru, joka on teräspulteilla jatkettavien parrujen läpi niputettu yhteen.

Taipuma ja jännitystarkasteluiden pohjalta näyttää, että tukialueen jäykkyys on noin puolet aukon jäykkyydestä. Tarkan jäykkyyden arvioiminen ongelmallista, koska muuttuvia kohtia on paljon mm. parrujen keskinäinen liittotoiminta, mahdollinen kansilaatan liittotoiminta pääkannattimen kanssa ja välitukialueen jatkuvuusaste.

Raskaiden koekuormitusten yhteydessä suoritettujen pääkannattajapuiden vaakasauman liukumamittaukset ja keskiaukon alimman parrun keskelle sijoitetun venymämittauksen tulokset tukevat aukon jännitystarkastelun tulosta siitä, että parrujen välillä on liittorakennetoimintaa. Liittorakenne näyttäisi heikkenevän kuormitusten kasvaessa.

#### 4.2.6 Paalun rasitukset

Välitukien paalujen pystysiirtymää mitattiin yhdestä paalusta kummallakin välituella. Yllättävän monessa sillassa paaluun alkoi kehittyä koekuormitustilanteen aikana palautumatonta painumaa. Painumaa syntyi sellaisillakin silloilla, joissa paaluista ei ollut löytynyt yhtään lahonäytettä (mm. SK-609 Sopen silta). Yksittäisen paalun pai-

numinen on ongelmallinen niskapalkin kestävyden kannalta. Koekuormituksen aiheuttama paalukuorma esim. jännemitaltaan 5+6+5 metrin sillassa on noin 83 kN. Suunnitelmissa käytetty sallittu paalukuorma piirustusten mukaan on  $P_{\text{tavallinen}} = 105$  kN. Laskennallinen siirtymä koekuormituksen rasituksella on 1...1,5 mm. Paaluista mitattu siirtymä on usein hiukan suurempi ja joissakin paaluissa oli siirtymää myös ylöspäin, joka voi tarkoittaa paalun olevan poikki.

Paaluun sijoitetusta venymäanturista ei yleensä saatu laskentamallin tulosta vastaavaa jännitystä (venymä jäi pieneksi). Jännitys normaalivoimasta on pieni ja mahdollisesti paalun yläpäähän momenttirasitus vaikutti mitattuun tulokseen.

#### **4.2.7 Analysoinnin raportointi**

Koekuormitustulosten analysointi on tehty Ponvia Oy:ssä (Viitteet 19...28). Kevytkoekuormitukset on raportoitu kohdan 3.2.1 mukaisesti ryhmiteltynä.



## 5 Yhteenveto tutkimuksista

### 5.1 Siltojen ikä ja suunnittelukuorma

Tarkastelun sillat on rakennettu vuosien 1965 – 1973 aikana jolloin kaikkien siltojen ikä ylittää puurakenteisen sillan suunnittelukäyttöiän (30...35 vuotta).

Sillat on suunniteltu pääsääntöisesti Tie- ja Vesirakennushallituksen siltaosastolla. Suunnittelukuormana on käytetty aluksi kuormaluokkaa AI ja vuonna 1969 on voimaan tullutta kuormaluokkaa AKI, Ek2. Siltoja on suunniteltu eri jännemitoille ja hyötyleveyksille. Valmiita suunnitelmia on myöhemmin sovellettu 'tyyppiinirustuksena' Tie- ja Vesirakennuslaitoksen eri piireissä.

Suunnitelmissa suunnittelukuorma näkyy osassa siltoja siten, että AI luokassa osa saman jännemitan silloista on suunniteltu 10 mm ohuemmilla pääkannatinparruilla verrattuna AKI/Ek2 luokkaan. AI luokan sillat ovat ehkä hiukan vanhempia, tosin piireissä on sovellettu AI-luokan piirustuksia vuoden 1969 jälkeenkin.

Koekuormitusten perusteella kummankin suunnittelukuorman silloilla on suunnilleen sama kantavuus ja toisaalta siltapaikalla mitatut parrupaksuudet tasoittavat ryhmiä edelleen.

### 5.2 Laajennettu yleistarkastus - lahotutkimus

Otettujen kairausnäytteiden perusteella siltojen lahoaminen on vahvasti käynnissä. Vain kolmessa sillassa tutkituista (3/40) ei osunut lahoa kohtaa kairaus-näytteeseen. Lahoaminen näyttäisi edenneen voimakkaimmin Etelä-Suomessa. Uudenmaan ja Turun ELY-keskusten alueella lähes kaikista näytteistä löytyi joko lievää tai voimakasta lahoa. Pahimmissa lahotapauksissa on osasta pää-kannattimia irronnut paloja pois. Yleistarkastusraporteista on kooste liitteessä (Liite 4)

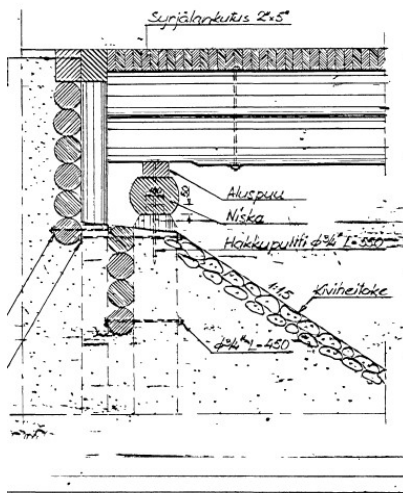
Lahon kehittyminen lähtee puun sisältä ja jää sen johdosta silmämääräisessä tarkastelussa havaitsematta. Löytyy tapauksia, joissa paalun ulkopinta on ehyttä 20...50 mm, mutta koko sisusta on jo täysin laho.

Muutamassa sillassa oli katkenneita paaluja. Paalujen yläpäässä oleva niskapuu oli kallistunut useassa sillassa, mikä monesti johtuu siitä, että maatuilla oleva maanpainetta vastaanottava taustapaalu/vaakaparrurakennelma lahoaa ja maanpaine alkaa kuormittaa varsinaisia maatuen paaluja (Kuva 6).



Kuva 6. Visuaalinen havainto siltapaikalta

Kuvassa 8 näkyy seinäpuiden lahoamisen edistymisen. Sama ilmiö on varmaankin tapahtunut myös taaemmille seinäpuille ja taustan takapaaluille. Maanpaine on alkanut kuormittamaan tukipaaluja, joka näkyy paalujen siirtymisenä aukkoon päin ja niskapuun kiertymisenä. Niskapuun ja paalun väliä on tuettu kiilaamalla.



Kuva 7. Suunnitelman mukaan

Kuva 8 Päätytuen muodonmuutosta

Mikroporalla tehdyissä lahotutkimuksissa (2015) Petäjäjoen ja Niprajoen silloissa lahoaksi 'FAILED' tulkittua ainesta löytyi 54 näytteestä (54/123) ja täysin terveeksi tulkittiin vain 20/123. Pääkannattimien ja niskapuun osalle osuvista näytteistä terveiksi tulkittiin 2/24. Lahoaminen on näissäkin silloissa saanut jo hyvän alun. Vuoden 2013 yleistarkastuksessa kasvukairanäytteiden mukaan oli lahoa seuraavasti; paaluissa lahoa kolmessa (3/6) ja kansipalkeissa yhdessä (1/4) kummassakin sillassa.

Pääkannattimien päällekkäisten parrujen sitomiseen käytetyt teräspultit ovat vahvasti ruostuneet ja löystyneetkin.

Kansilankutus on luultavasti uusittu kertaalleen kaikissa silloissa, mutta korjaustyön kirjaus Siltarekisteriin puuttuu muutamissa tapauksissa. Usein syrjälankkukansi on korjaustyössä korvattu liimapuisella kansilaatalla. Kansilaatan korjauksen yhteydessä on usein myös puurakenteinen kaide korvattu teräksisellä H2-kaiteella.

## 5.3 Koekuormitusanalyysi ja kantavuus

### 5.3.1 Kuntokartoituksen ääripäät

Koekuormitettujen siltojen kunto vaihteli suuresti. U-1050 Koiransuolenojan silta tiedettiin heikkokuntoiseksi jo yleistarkastuksen perusteella ja koekuormituksessa saatiin lahon vaikutus näkymään tuloksissa suurempina taipumina ja jännityksinä (Silta on jo uusittu).

T-1516 Koittankosken silta, jossa pääkannatin on yksiparruinen, osoittautui kanta- vuodeltaan moniongelmaiseksi pääkannattimien eriateisen kuormankannon ja paa- lujen toiminnan osalta.

Koekuormituksen perusteella yksi parhaimmassa kunnossa olevista silloista on L- 1304 Mairijoen silta, jossa tulokset vastaavat lähes uudenveroisen sillan käyttäyty- mistä. Ainoastaan mitattuihin paaluihin jäänyt 1mm koekuormituksissa palautumaton painuma jää huolenaiheeksi tässä kohteessa. Nimisenjoen silta voidaan laskea sa- maan kategoriaan. Yhteenvetotaulukossa on esittely siltojen kunnosta lyhyesti (Liite 1).

### 5.3.2 Pääkannattimen jäykkyys ja kuorman jakautuminen

Kahdesta puusta koostuvien pääkannattimien voidaan katsoa toimivan jatkuvina palkkeina välituen yli. Välituen jäykkyyden arvioidaan olevan noin puolet aukkosau- van jäykkyydestä. Koekuormitustulosten perusteella pääkannattimissa on osittaista liittorakennetoimintaa, joka vähenee kuormituksen kasvaessa. Käytössä olevilla kan- sirakenteilla (syrjälankkukansi/ pääkannatin 0,5 m jaolla) voidaan akselikuorman olettaa jakaantuvan terveellä sillalla kuudelle kannattimelle.

Koekuormituksen aikana havaittiin useassa sillassa, että osaan pääkannattimista ei kuorma kehittynyt normaalisti (Liite 1). Syynä pääkannattimen toimimattomuuteen voi olla rakennusvirhe jo rakennusvaiheessa, jolloin palkki on jäänyt irti lankkukan- nesta huolimattoman kiilauksen johdosta. Mahdollisesti kiilaus on hoidettu ohuilla puulistoilla, jotka lahoavat tai irtoavat rakenteesta. Myös pääkannattimen yläpinnan lahoaminen syrjälankkukannen alta voi viedä palkin antaman tuennan. Lisäksi pää- kannattimen tuenta niskapalkkiin voi pettää, jos aluspuu on tehty pätkestä joiden poistippuminen on mahdollista.

Koekuormituksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että terveiden pääkannattimen (2 parruinen) silloissa, joissa kaikki pääkannattimet osallistuvat kuorman kanton, kansirakenne kestää uuden AA13-asetuksen mukaisen rekkakuorman. Jos pääkannat- timista yksi ei pysty osallistumaan kuormatalkoisiin, niin kansilaatan ja viereisen pääkannattimen kuormalle on sysäys- ja varmuuskertoimia pienennettävä, jotta ra- kenteen kantavuus riittäisi AA13 kuormalle.

### 5.3.3 Paalut ja niskapuut

Välitukipaalut ovat tämän siltatyyppin heikoin lenkki ja riskialtein rakenneosia. Lahon kehittyminen paaluissa lähtee puun sisältäpäin ja jää sen johdosta silmämääräisessä tarkastelussa havaitsematta. Yleistarkastuksessa löytyy tapauksia, jossa paalun ulkopinta 20...50 mm on kovempaa, mutta koko sisusta on jo täysin laho. Muutamassa sillassa yleistarkastuksessa havaittiin myös katkenneita paaluja.

Paalujen yläpäässä oleva niskapuu oli kallistunut useassa sillassa, mikä monesti johtuu siitä, että maatuilla oleva maanpainetta vastaanottava taustapaalu/vaakaparrurakennelma lahoaa ja maanpaine alkaa kuormittaa varsinaisia maatuen paaluja. Monessa sillassa paaluun alkoi kehittyä koekuormitustilanteen aikana palautumatonta painumaa (1...4 mm) (Liite 1). Painumaa syntyi sellaisillakin silloilla, joissa paaluista ei ollut löytynyt yhtään lahonäytettä. Koekuormitustilanne oli normaalia rekan sillan ylitystä rasittavampi, koska ajoneuvoa pysäytettiin useita kertoja sillan päällä eri kohdissa maksimirasituksia etsittäessä. Koekuormituksen aiheuttama paalukuorma esim. jännemitaltaan 5+6+5 metrin sillassa on noin 83 kN. Suunnitelmissa käytetty sallittu paalukuorma piirustuksista katsottuna on  $P_{\text{tavallinen}} = 105 \text{ kN}$ .

Terveet paalut ja niskapuu pystyvät kantamaan uuden AA13-asetuksen mukaisen kuorman.

Pääosassa jatkuvia puusiltoja on pääkannatinjako 0,5 m. Silloin välituella paalut ovat noin 0,9...1,0 metrin jaolla. Yksittäisen paalun menettäminen on ongelmallinen niskapalkin kestävyuden kannalta, koska silloin niskapalkin jännemitta kaksinkertaistuu. Laskennallisesti niskapuu kestää paalun poistuman, mutta kuorman sysäys- ja varmuuskerroin tulee asettaa arvoon 1,0 (ei ylikuormaa eikä sysäystä). Niskapalkin pettäminen johtaa pääkannattimien painumiseen sillä kohtaa ja kansilaatan katkeamiseen ja sillan totaalisen kantomuutoksen menettämiseen sillä kaistalla.

Koekuormituksen yhteydessä niskapalkkeille mitattiin laskentamallin mukaisia jännityksiä myös silloilla, joille mitattiin normaalia suurempaa paalujen painumaa. Tulos selittyy sillä, että kuormituksessa myös mittauskohdan viereiset paalut painuvat ja painumaerojen pysyessä pieninä niskapalkille ei pääse kehittymään suurta normaali-jännitystä.

## 6 Toteutuneita jatkotoimia

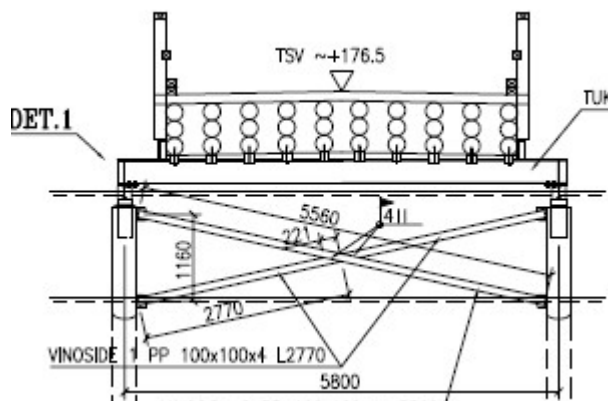
### 6.1 Koekuormitus murtoon saakka

V-3598 Hanhisen silta Kannuksesta koekuormitettiin murtoon saakka syksyllä 2014. Koekuormituksen toteutti VTT Liikenneviraston tilauksesta. Koekuormituksen tutkimusraportti ei ole ollut vielä luettavissa, mutta ennakkotiedon mukaan silta on ollut hyväkuntoinen ja kantanut reilusti suurempia kuormia kuin mitä uuden ajoneuvoasetuksen mukaiset ajoneuvot aiheuttavat. Koekuormituksesta tehdään oma raportti.

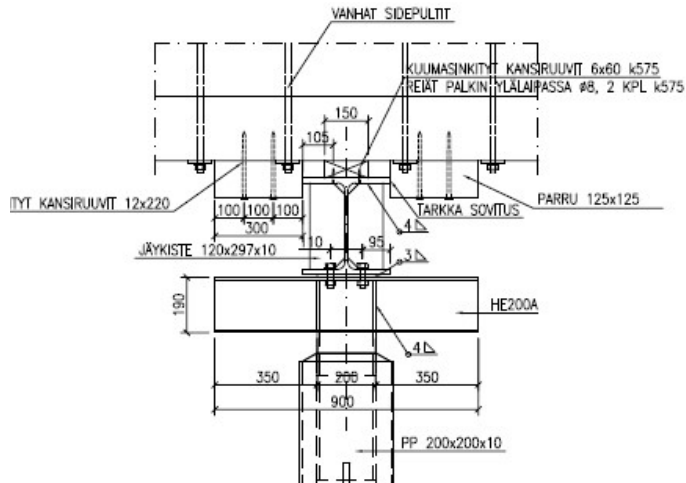
### 6.2 Sillan korjaus ja vahvistamiseksi

O-2783 Sulatusjoen siltaan ja O-2779 Petäjäjoen siltaan (Kuhmo) on laadittu korjaussuunnitelma välitukien uusimiseksi, jotka on urakoitu syksyllä 2015.

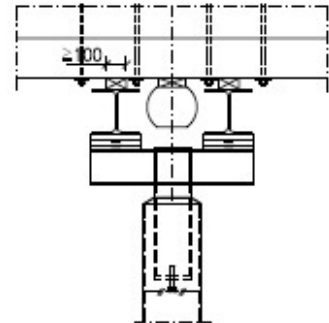
Suunnitelmassa korvataan välituen puupaalut paaluryhmän ulkopuolelle sijoitetuilla teräksisillä porapaaluilla, jotka betonoidaan. Paalujen varaan sillan alitse asennetaan teräksiset apupalkit, joiden varaan sillan päällysrakenne otetaan tunkkien avulla. Sitten korvataan puinen niskapalkki ja korokepuu teräspalkilla ja päällysrakenne laskeetaan uuden rakenteen varaan. Lopuksi poistetaan apupalkit ja katkaistaan puupaalut uoman pohjan tasolta (Kuvat 9–11).



Kuva 9. Poikkileikkaus uuden välituen kohdalta



Kuva 10. Uusi niskapalkki asennettu rassa



Kuva 11. Silta apupalkkien va-

O-2777 Salmelansalmen silta, Kuhmo Sillan päällysrakenne on hyväkuntoinen. Alusrakenteen vahvistamiseksi on laadittu vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä.

Siltojen O-2783 ja O-2779 urakoinnista saadun palautteen jälkeen suunnitelmia voi mahdollisesti soveltaa useampaan kohteeseen Suomen puusiltakannassa.

Maatukien lahoamisen seurauksena tulevaa tukipaalujen kallistumaa uoman suuntaan voitaisiin mahdollisesti tilapäisesti tukea rakentamalla vaakapalkki tukipaaluihin ja tukemalla se päällysrakenteeseen.

## 7 Siltojen painorajoitus- ja uusimistarve

### 7.1 Painorajoituksen määrittelykriteerit

Puusiltojen systemaattisen kuntotarkastuskierroksen tulosten perusteella voidaan tarkemmin arvioida painorajoitustarve. Laajennetun yleistarkastuksen sisältäessä kattavan lahotutkimusohjelman ja mahdollisen koekuormitustutkimuksen on perusteet tarkentaa siltakohtaisia painorajoituksia. Vaikeus tulee puusiltojen ikäkysymyksestä ja lahon leviämisenopeudesta, kun nyt tiedetään, että kaikissa silloissa lahoaminen on käynnissä.

### 7.2 Siltojen uusimiskriteerit

Jos sillan päällysrakenne osoittautuu hyväkuntoiseksi siten, että odotettavissa oleva käyttöikä on jopa 10...15 vuotta, niin voidaan harkita alusrakenteiden uusimista edullisiksi havaituilla korjausmenetelmillä.

Tutkittavat puusillat ovat pieniä siltoja, ja helposti käy siten, että myös päätytuet ovat uusimiskunnossa, tällöin kokonaiskustannus voi lähestyä koko sillan uusimisen kustannusta. Lisäksi on vielä otettava huomioon, että päällysrakennekin on uusittava viimeistään seuraavan 20 vuoden aikana.

## Viitteet

### Viitteet: (julkaisemattomia)

Viite 1 Lahotutkimusmenetelmien vertailu / Dimense Oy, 10.7.2014

### Koekuormitusten raportit ja mittaustulokset / Dimense Oy

Raskaiden koekuormitusten sillat olivat:

Viite 2 L-1304 Mairijoen silta, Pelkosenniemi, 27.11.2013  
 Viite 3 SK-609 Sopen silta, Siilinjärvi, 27.11.2013  
 Viite 4 U-1050 Koiransuolenojan silta, Nurmijärvi, 26.11.2013  
 Viite 5 H-3416 Raivaluoman silta, Parkano, 28.11.2013  
 Viite 6 T-1516 Koittankosken silta, Merikarvia, 27.11.2013

Kevytkekuormitukset silloille:

#### Ryhmä 1

Viite 7 SK-646, Joenniemen silta, (AKI,Ek2), Kuopio, 26.11.2013  
 Viite 8 KES-247, Saunasalmen silta, (AI), Hankasalmi, 26.11.2013

#### Ryhmä 2

Viite 9 KES-915, Suvannonjoen silta, (AI), Viitasaari, 26.11.2013  
 Viite 10 V-3598, Hanhisen silta, (AI), Kannus, 25.11.2013  
 Viite 11 O-2779, Petäjäjoen silta, (AKI,Ek2), Kuhmo, 25.11.2013  
 Viite 12 O-2783, Sulatusjoen silta, (AI), Kuhmo, 25.11.2013

#### Ryhmä 3

Viite 13 O-2665, Nimisenjoen silta (AKI,Ek2), Sotkamo, 25.11.2013  
 Viite 14 O-2519, Vihtamonjoen silta, (AI), Sotkamo, 26.11.2013  
 Viite 15 L-823, Varejoen silta II, (AI), Tervola, 26.11.2013

#### Ryhmä 4

Viite 16 SK-813, Pajusalmen silta, (AI), Tuusniemi, 26.11.2013

Pienimuotoinen koekuormitus silloilla;

Viite 17 O-2502, Petäjäjoen silta, (AKI,Ek2), Sotkamo, 19.10.2015  
 Viite 18 O-2213, Niprajoen silta, (AI), Sotkamo, 19.10.2015

### Koekuormitusten analysointiraportit / Ponvia Oy

Raskaiden koekuormitusten sillat olivat:

Viite 19 L-1304 Mairijoen silta, Pelkosenniemi, 10.12.2013  
 Viite 20 SK-609 Sopen silta, Siilinjärvi, 20.1.2014  
 Viite 21 U-1050 Koiransuolenojan silta, Nurmijärvi, 31.1.2014  
 Viite 22 H-3416 Raivaluoman silta, Parkano, 31.12.2013  
 Viite 23 T-1516 Koittankosken silta, Merikarvia, 7.2.2014

Kevytkekuormitukset silloille:

#### Ryhmä 1

Viite 24 SK-646, Joenniemen silta, (AKI,Ek2), Kuopio, 7.4.2014  
 Viite 24 KES-247, Saunasalmen silta, (AI), Hankasalmi, 7.4.2014



**Ryhmä 2**

- Viite 25 KES-915, Suvannonjoen silta, (AI), Viitasaari, 25.3.2014  
Viite 25 V-3598, Hanhisen silta, (AI), Kannus, 25.3.2014  
Viite 25 O-2779, Petäjäjoen silta, (AKI, Ek2), Kuhmo, 25.3.2014  
Viite 25 O-2783, Sulatusjoen silta, (AI), Kuhmo, 25.3.2014

**Ryhmä 3**

- Viite 26 O-2665, Nimisenjoen silta (AKI, Ek2), Sotkamo, 7.3.2014  
Viite 26 O-2519, Vihtamonjoen silta, (AI), Sotkamo, 7.3.2014  
Viite 26 L-823, Varejoen silta II, (AI), Tervola, 7.3.2014

**Ryhmä 4**

- Viite 27 SK-813, Pajusalmen silta, (AI), Tuusniemi, 9.5.2014

Pienimuotoinen koekuormitus silloilla;

- Viite 28 O-2502, Petäjäjoen silta, (AKI, Ek2), Sotkamo, 5.12.2015  
Viite 28 O-2213, Niprajoen silta, (AI), Sotkamo, 5.12.2015

- Viite 29 Puusillan laajennetun yleistarkastuksen ohje (Esiversio)

**Puusiltojen laajennetut yleistarkastusraportit/**

Dimense, Kiratek, Siltanylund, Huura  
Tulokset on tiivistettynä liitteessä; Liite 4



# Jatkuvat puupalkkisillat

## Yhteenvedo kuntotutkimuksista koekuormituksissa

Jatkuvat puupalkkisillat

### Yhteenvedo kuntotutkimuksista

Snro	Sillan nimi	SuunKuor	Lahotutkimus		Koekuormitus(paalu)		Koekuormitus(palkki) ei kannaa
			Paalut	Palkit	painuma	nousu	
	Kevytkoekuormitus						
O-2779	Petäjäjoen silta	(AKI,Ek2)	5/6	2/4	X	X	X
O-2783	Sulatusjoen silta	(AI)	2/7	1/4	X	X	
KES-915	Suvannonjoen silta	(AI)	3/6	0/4	X		X
V-3598	Hanhisen silta	(AI)	0/6	0/4			
SK-646	Joenniemen silta	(AKI,Ek2)	3/6	0/4		X	
KES-247	Saunasalmen silta	(AI)	2/6	0/4		X	
O-2665	Nimisenjoen silta	(AKI,Ek2)	3/8	ei tutk		X	
O-2519	Vihtamonjoen silta	(AI)	4/7	3/4	X		X
L-823	Varejoen silta II	(AI)	2/6	2/4	X	X	
SK-813	Pajusalmen silta	(AI)	5/6	0/4		X	
	Raskaskoekuormitus						
L-1304	Mairijoen silta	(AKI,Ek2)	2/6	2/4	X	X	
H-3416	Raivaluoman silta	(AKI,Ek2)	2/6	4/4	X	X	X
SK-609	Sopen silta	(AKI,Ek2)	0/6	1/4	X		X
U-1050	Koiransuolenojan silta	( AI)	4/4	6/6	X	X	X
T-1516	Koittankosken silta	( AI)	2/6	0/4		X	X
	Mikroporalahotutus + pienkoekuormitus						
O-2502	Petäjäjoen silta	(AKI,Ek2)	28/39	9/10	X		
O-2213	Niprajoen silta	(AI)	33/38	10/10			

Lahotutkimus (5/6) = viidessä näytteessä kuudesta on lahoa

(mikroporatuloksessa; (laho+mahdoll. Laho)/tutkitut)

Paalun painuma = koekuormituksen jälkeen jäänyt pysyvää painumaa tai painuma on ollut suurta vertailulaskentaan verrattuna

Paalun nousu = paalussa mitattu poikkeavaa ylösnousia tai epätavallista kuormakehitystä (ei seuraa kuorman muutosta)

Palkki ei kannaa = yksi tai useampi palkki ei kannaa kuormaa tai se poikkeaa merkittävästi laskennasta

## Koekuormitusajoneuvojen akselipainot ja akselivälit

Tunnus, akselit (kpl), akselipainot (suhteelliset; 1=100kN)

Aj1(64),8,.90,.6,.90,.90,.80,.80,.80,.80,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj2(32),4,.90,.6,.90,.90,.0,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj3(38),4,.90,.70,1.15,1.15,.0,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj4(76),9,.65,.65,1.0,1.0,.8,.9,.9,.9,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj5(40),5,.65,.65,1.0,1.0,.8,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj6(43),5,.65,.65,1.1,1.1,.9,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

akselivälit:

Tunnus, akselivälit (m)

Aj1(64),3.23,1.37,1.37,4.25,1.36,4.0,1.36,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj2(32),3.23,1.37,1.37,.0,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj3(38),3.23,1.37,1.37,.0,.0,.0,.0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj4(76),2.00,2.9,1.45,1.45,4.6,1.35,4.45,1.35,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj5(40),2.00,2.9,1.45,1.45,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

Aj6(43),2.00,2.9,1.45,1.45,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0



Kuva Aj1 (Aj2...3)

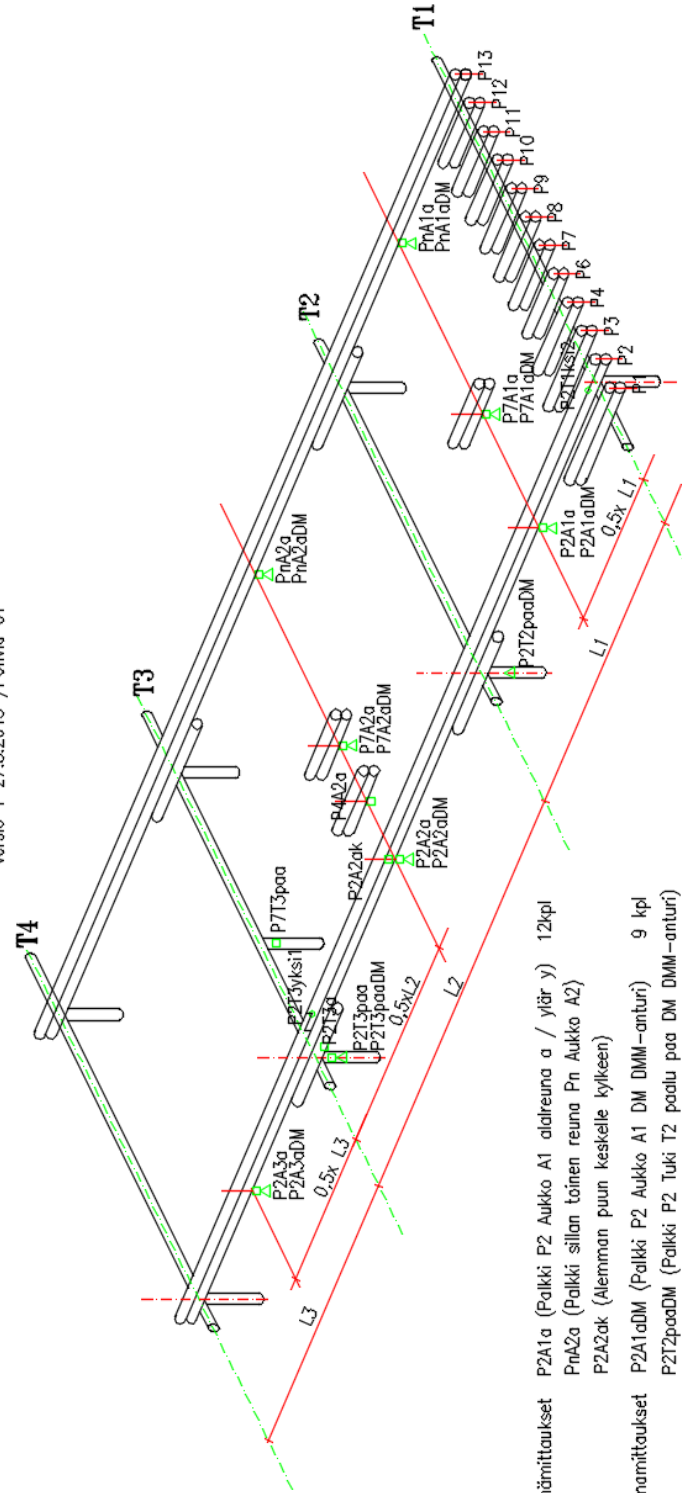


Kuva Aj4 (Aj5...6) (Uusi AA-rekka) osassa koekuormituksia

# Mittausantureiden sijainti sillassa koekuormituksessa

## Puusiltojen koekuormitukset:

- mittausantureiden sijoittelun periaate täyskoekuormituksessa (HL=6)
- versio 1 27.8.2013 /Ponvia Oy



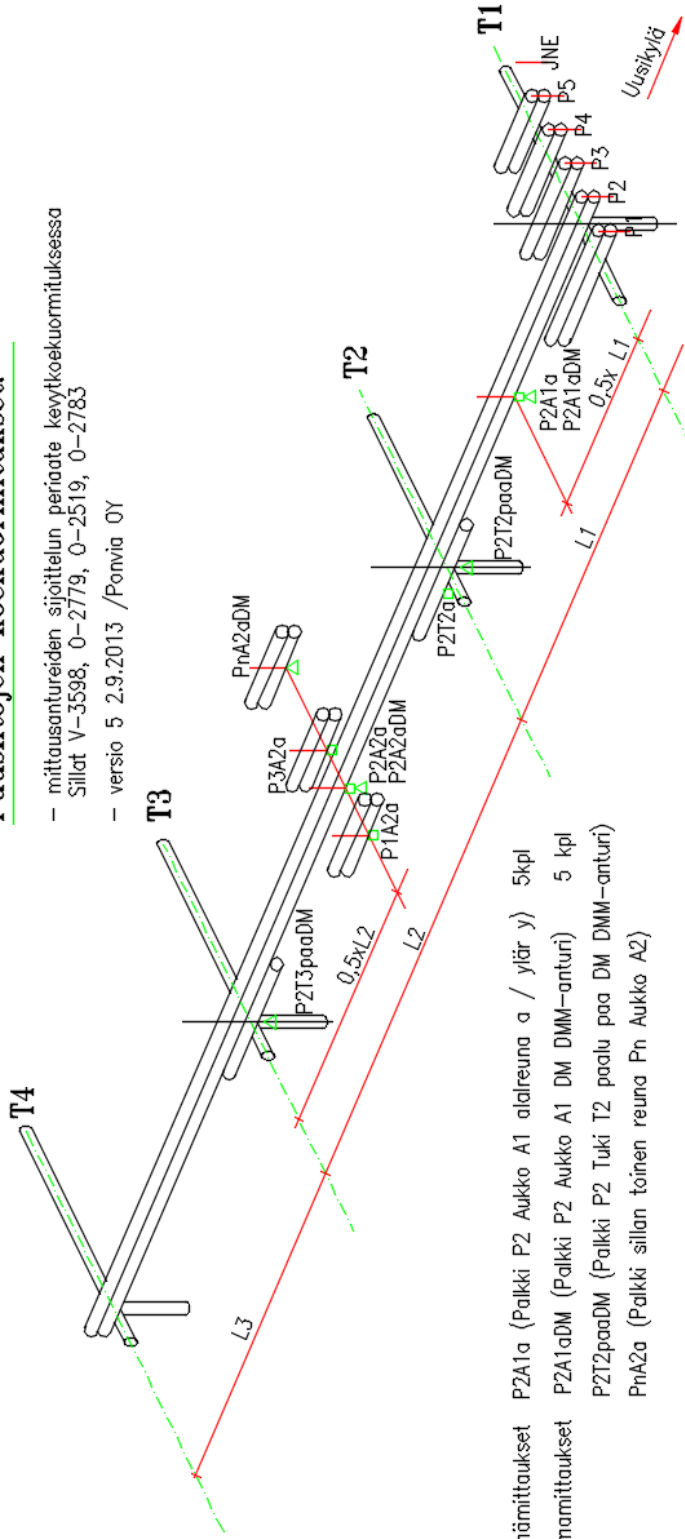
- Venymämittaukset P2A1a (Palkki P2 Aukko A1 alatreuna a / y(är y) 12kpl  
PnA2a (Palkki sillan toinen reuna Pn Aukko A2)  
P2A2ak (Alempaan puun keskelle kylkeen)
- △ Taipumamittaukset P2A1aDM (Palkki P2 Aukko A1 DM DMM-anturi) 9 kpl  
P2T2paadDM (Palkki P2 Tuki T2 paalu paa DM DMM-anturi)
- Siirtymämittaukset P2T3yksi1 (Palkki P2 Tuki T3 ylemp. kesk. yk. jatkos) 2 kpl

# Kevytkeokuormitusanturit

Liite 3

## Puusiltojen keokuormitukset:

- mittausantureiden sijoittelun periaate kevytkeokuormituksessa  
Sillat V-3598, 0-2779, 0-2519, 0-2783
- versio 5 2.9.2013 /Ponvia OY



- Venymämittaukset P2A1a (Palkki P2 Aukko A1 alareuna a / yläreuna y) 5kpl
- △ Taipumamittaukset P2A1aDM (Palkki P2 Aukko A1 DM DMM-anturi) 5 kpl
- P2T2paadM (Palkki P2 Tuki T2 paalu paa DM DMM-anturi)
- PnA2a (Palkki sillan toinen reuna Pn Aukko A2)

# Lyhyt yhteenveto laajennetuista yleistarkastuksista

## LAAJENNETTU YLEISTARKASTUS, PUISET JATKUVAT PALKKISILLAT (Pjp), Tarkastusraporteista kuntokommentoitu lista

- Täydennetty tutkimusraporteista (Turku, Savo-K ja Keski-Suomi (28.8.2013/O.K)
- Täydennetty tutkimusraporteista (Uusimaa(Kiratek) ja Häme) (29.8.2013/O.K)
- Täydennetty tutkimusraporteista (Kaakkois-Suomi) (30.8.2013/O.K)
- Lisätty Siltanylundin tutkimuksia POP-ELY (Oulu) (5.9.2013/O.K)
- päivitys koekuormituksista (punaisella) (2.10.2013/ O.K)
- Lisätty Huuran tutkimuksia (Turku) (26.9.2013)
- Lisätty Minikoekuormitus ja mikroporalahotutkimus (puna) (11.12.2015)

## UUSIMAA

- siirretty tieto aiemmista Kiratekin tutkimuksista

**U-1050 Koiransuolenojan silta Nurmijärvi** Jm =5,00 + 6,00 + 5,00 m; Hl=5,10 m  
Täyskoekuormitus (silta uusittu)

- paalujen kunto tyydyttävä
- niskapuut ok
- paaluista löytyi voimakasta lahoa n70..100 pinnasta syvemmälle, pinnassa alkavaa lahoa
- pääkannattimista ylemmästä puusta yläpinnasta löytyi voimakasta lahoa kaikista näytteistä
- mahdollinen koekuormitussilta (AI) (lahon vaikutus)

**U-1053 Mustajoen silta Mäntsälä** Jm = 4,00 + 5,00 + 4,00 m; Hl = 6,00

- paalujen kunto hyvä
- t1 tuella niskapuussa epäkeskeisyyttä ja päätytuilla myös kiertymää (todella paha-valokuvasta)
- Kaikista pääkannatinnäytteistä löytyi lahoa ja yhdestä paalunäytteestä (AI)

**U-1091 Keihäsjoen silta Hyvinkää** Jm =5,00 + 6,00 + 5,00 m; Hl=6,00 m (**Silta Purettu**)

- paalujen kunto melko heikko
- niskapuut kiertyneet päätytuilla
- kaikissa näytteissä lahoa
- ei suositella koekuormitukseen (AKI, EK2)

**U-2462 Kaloisten silta Hämeenlinna** Jm =4,1 + 4,6 + 6,0+4,9+4,5 m; Hl=6,50 m

- paalujen kunto hyvä (1/6 näytteessä kohtalaista lahoa)
- lievää kiertymää niskapuissa
- kaikissa pääkannatinpuunäytteissä lahoa osassa jopa voimakasta
- ei suositella koekuormitukseen (AI+teli)

## TURKU

**T-300 Valpperin silta Nousiainen** Jm = 4,00 + 5,00 + 4,00 m; HI = 7,50 m; vain alusrak kair.

- Huuran tutkimuksia alusrakenteista
- valmistunut 1970
- kaikissa 5 näytteessä lahoa (yksi lähes läpilaho)

**T-1375 Pajulanjoen silta Somero** Jm = 4,10 + 7,60 + 3,80 m; HI = 5,85 m; vain alusrak kair.

- Huuran tutkimuksia alusrakenteista
- valmistunut 1970
- pitkäjänteinen ja vain yksi puu palkissa aukkojen kohdalla (tuella orsipuu lisänä)
- kaikissa 4 näytteessä alkavaa lahoa

**T-1380 Alhon silta Laitila** Jm = 4,00 + 5,00 + 4,00 m; HI = 6,30 m; vain alusrak kair.

- Huuran tutkimuksia alusrakenteista
- valmistunut 1970
- kaikissa 5 näytteessä lahoa (kaksi lähes läpilaho)

**T-1516 Koittaankosken silta Merikarvia** Jm = 3,60 + 5,70 + 3,6 m; HI = 6,00 m: Lähes Täyskoekuor

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- valmistunut 1965 (vanha!)
- T2 ja T3 vinopaalut vasemmalla ovat ruhjeilla
- niskapuu tuella T1 hieman kiertynyt
- jännevälit pienemmät kuin otsikossa (3,6+5,8+3,6), kuitenkin siltarekisterin mukaiset
- kansilankutus ei syrjälankkukansi (kuvasta o.k)
- lahovauriota kahdessa (paalu) näytteessä
- vain yksi puu aukkopalkkeissa!
- mahdollinen koekuormitussilta (kansilankutus?)

**T-1557 Niinijoen silta Loimaa** Jm = 4,50 + 5,40 + 4,50 m; HI = 4,90 m; vain alusrak kairaus

- sillalla painorajoitus (teli 16t ja kokonais 50t)
- valmistunut 1966 (vanhimmasta päästä)
- kansipalkit 1-puisia aukossa, tuella orsipuu (valokuvasta)
- paaluista 5 porausnäytettä; kaikissa lahoa ja yksi läpilaho.

## KAAKKOIS-SUOMI (lisätty 11.7.2013)

**KaS-531 Telkjärven silta silta Lappeenranta** Jm = 5,00 + 19x6,00 + 5,00m; HI = 4,55 m

- pääosin päällisin puolin näyttää hyväkuntoiselta
- maatuen T1 niskapuu kiertynyt
- pultit ruosteessa
- kannessa kuoppa ja rantu
- paalujen näytteissä ei lahovaurioita
- pääkannattimissa lahovaurioita kolmessa (3/4) näytteessä
- mahdollinen koekuormitussilta (AKI, Ek2)

**KaS-788 Kiiskijärven silta Virolahti** Jm = 3,70 + 22x6,00 + 3,20m; HI = 4,15 m

- silta näyttää huonokuntoiselta
- Maatuilla paalut halkeilleet ja yksi painunut kasaan
- tuki 24 vinossa ja enemmän paaluja kuin muissa, lisäksi paljon korokepuita
- useiden tukien vinopaalut ovat erittäin huonokuntoiset
- niskapuut korvattu kahdella rinnakkaisella parrulla



- pultit ruosteessa ja löystyneet
- kannessa ajourissa kuoppia
- paalujen näytteissä neljässä (4/6) on lahovaurio
- pääkannattimessa yhdessä (1/4) näytteessä lahovaurio
- sillalla on painorajoitus (13t linja-auto)
- ei suositella koekuormitusta

## HÄME

### H-921 Köpinsalmen silta Vesilahti Jm = 4,90 + 6,00 + 5,00 m; HI = 6,06 m

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- maatuet ovat maan alla (ei näyteporausta)
- välitukipaaluissa lahovauriota kahdessa (2/6) näytteessä
- pääkannattimissa lahovauriota kolmessa (3/4) näytteessä
- mahdollinen koekuormitussilta (Akl, Ek2)

### H-3416 Raivaluoman silta Parkano Jm = 4,00 + 5,00 + 4,00 m; HI = 6,00 m Lähes Täyskoekuorm

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- puiset kaiteet huonokuntoiset
- pultit ruosteessa, muutama irti
- kannessa pituussunnan terälevyvähvikkeet kulumaurakaistoilla
- paaluissa lahovauriota kahdessa (2/6) näytteessä
- pääkannattimissa lahovauriota kaikissa (4/4) näytteessä
- mahdollinen koekuormitussilta (Akl, Ek2)

## SAVO-KARJALA

SK-170 Jänissalmen silta Kuopio Jm = 6,00 + 7,60 + 6,00 m; HI = 4,75 m

SK-323 Pärekosken silta Vieremä Jm = 4,39 + 5,53 + 4,55 m; HI = 6,04 m

SK-609 Sopen silta Siilinjärvi Jm = 5,16 + 5,87 + 5,10 m; HI = 6,60 m;

### Täyskoekuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- maatuella penkereet syöpyneet
- pultit erittäin huonossa kunnossa ja löystyneet
- lahovauriota yhdessä näytteessä (kansi)
- mahdollinen (täys)koekuormitussilta (Akl, Ek2)

### SK-761 Narvanjoen silta Lapinlahti Jm = 5,85 + 7,90 + 5,99 m; HI = 6,08 m;

- silta on kunnoltaan kohtuullisen näköinen
- niskapuut kiertyneet reilusti (valokuvasta) tuilla T2, T3, T4 (T4 tuella 2 korokepuuta!!)
- kansilankutus on kulunut (uusittu 1991 perusraportti)
- alkavaa lahovauriota paalunäytteissä (3/6) ja kannessa (2/4)
- koekuormitus??? (pitkä jänne houkuttaa - niskapuut varottaa)) AI

### SK-813 Pajusalmen silta Tuusniemi Jm = 6,00 + 8,00 + 6,00 m; HI = 6,20 m;

#### Kevytkoekuormitus

- kannessa kulumista ajourissa (kansi liimapuinen, joka on asennettu poikkilankujen päälle)
- kannella liimapuun kiinnityspulttien suojaus irronnut
- pääkannattajat näyttävät lahovaurioisilta
- pultit löystyneet
- lahovauriota viidessä (5/6)näytteessä (paalut)
- mahdollinen kevytkoekuormitussilta (AI)

**SK-1384 Ilajanjoen silta Ilomantsi**  $J_m = 4,98 + 6,02 + 4,80$  m;  $H_I = 6,14$  m;

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- lahovauriota paalut (1/6), kansi (1/4) näytteessä
- mahdollinen (täys)koekuormitussilta (Akl, Ek2)

**SK-1472 Kuikanpuron silta Nurmes**  $J_m = 4,10 + 4,75 + 4,00$  m;  $H_I = 6,40$  m;

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- niskapuu kiertynyt pois paikoiltaan tuella T4 ja tuella T1 epäkeskeinen
- pääkannattajien pultteja uusittu
- lahovauriota (paha) kahdessa näytteessä (kansi)
- Ei suositella koekuormitukseen (Akl, Ek2)

**SK-2384 Uitonsalmen silta Pieksämäki**  $J_m = 4,90 + 2 \times 5,50 + 4,90$  m;  $H_I = 6,00$  m;

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- vinous 22gon?
- maatuella T5 niskapuu hieman kiertynyt
- lahovauriota kuudessa näytteessä (paaluissa 3/6 ja palkeissa 3/4)
- Ei suositella koekuormitukseen (AI)

**SK- 2351 Ankeleenjoen silta Pieksämäki**  $J_m = 4 + 5 + 4$  m;  $H_I = 7,1$  m;

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit ruosteessa ja aluslevyt monin paikoin vääntyneet
- lahovauriota neljässä (paalut) ja yhdessä (kansi) näytteessä
- mahdollinen kevytkoekuormitussilta (Akl, Ek2)

**SK- 2344 Luhansalmen silta Puumala**  $J_m = 5 + 6 + 5$  m;  $H_I = m$ ;

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit ruosteessa, osa on löystynyt
- $H_I = 6,95$
- satulapuu haljennut tuella T3
- näytteissä ei havaittu lahovaurioita
- mahdollinen (täys) koekuormitussilta (Akl, Ek2)

**SK-646 Joenniemen silta, Kuopio**  $J_m = 3,8 + 5 + 3,9$  m;  $H_I = 7,3$  m;

Kevytkoekuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- maatuilla ovat useat pultit paaluista seinäpuihin pettäneet
- kannen (liimapuu? 2003 peruskorjaus) pulttien suojaus irronnut
- lahovauriota kolmessa näytteessä (paalut 3/6)
- jännemitta  $4+5+4$  (siltarekisteri  $3,8+5+3,9$ )  $H_I = 7,3$
- mahdollinen (täys)koekuormitussilta (Akl, Ek2)

SK-666 Itäpuron silta  $J_m = m$ ;  $H_I = m$ :

SK-281 Hukkapuron silta  $J_m = m$ ;  $H_I = m$ ;

SK-601 Nilakan silta  $J_m = m$ ;  $H_I = m$ ;

## KESKI-SUOMI

**KES-247 Saunasalmen silta Hankasalmi**  $J_m = 4,00 + 5,20 + 4,00$  m;  $H_I = 4,52$

Kevytkoekuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- maatuilla niskapuut kiertyneet
- matala kaide
- alkavaa lahovauriota kahdessa paalunäytteessä (2/6)
- liimapuukansi (h140) v2001 (perusraportista ok)
- mahdollinen koekuormitussilta (AI)

**KES-915 Suvannonjoen silta Viitasaari**  $J_m = 3,50 + 4,50 + 3,50$  m;  $H_I = 6,50$ m

Kevytkeukuormitus

- puiset kaiteet huonokuntoiset
- T2 tuella reunimmaisen pääkannattajan puut eivät ole keskeisesti toisiinsa nähden
- kansilankutus huonossa kunnossa (teräslevypakkausta)
- lahovauriota kolmessa (3/6) näytteessä (paalut)
- mahdollinen keukuormitussilta (Luokittelematon)

**KES1050 Joenniskan silta, Kannonkoski**  $J_m = 3 \times 4,00 + 6,00 + 3 \times 4,00$  m;  $H_I = 5,00$ m

- kansilankutus huonokuntoinen (todella: valokuvasta)
- kannella asfaltti kupruilee
- pultit ruosteessa
- pääpalkit eivät ole jatkuvia (limitys tuella poikkisuunnassa)
- pääkannattajavälit n 650 (normaalisti 500) (kansilankutus vaarassa? ok-kommentti)
- lahovauriota kolmessa näytteessä
- keukuormitussilta? onko vastaavia? 1-aukkoinen 6m keskiaukko (AI)

**KES-871 Lahnasilta Jämsä**  $J_m = m$ ;  $H_I = m$ 

- lisätty liimapuukannattimia (2004?) pääpalkkien väliin
- Tuki T2 kallistunut
- tuella T2 ainakin neljä paalua poikki
- pultit löystyneet ja ruosteessa
- $j_m = 2,8 + 4 + 3$ m (siltarekisterissä 3+4+3)
- $H_I = 7,85$  (sr;  $H_I = 7,5$ )
- voimakasta lahovauriota neljässä näytteessä (kansi 4/4)
- Ei suositella keukuormitukseen (paalut poikki) (AI)

**VAASA****V-3598 Hanhisen silta Kannus**  $J_m = 3,50 + 4,50 + 3,50$  m;  $H_I = 6,00$  Kuormitettu murtoon (VTT) ja silta uusittu

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- matala kaide
- kansilankutus kulunut
- pultit ruosteessa
- lahovauriota ei näytepaloissa
- kelpaisi varmaan täyskeukuormitukseenkin (AI)

**OULU****O-1058 Mulkuanjoen silta Siikalatva**  $J_m = 6,00 + 6,00 + 6,00$  m;  $H_I = 4,60$  m

- paaluja poikki, tukia vahvistettu teräsrakenteilla ja puusiteillä
- niskapuut epäkeskeisesti T1 ja T2
- pultit ruostuneet, osa irronnut
- lahovauriota kannessa (2/4)
- Ei suositella keukuormitukseen (paalut poikki)

**O-1062 Kaakatinon silta Pudasjärvi**  $J_m = 3,50 + 4,50 + 3,50$  m;  $H_I = 4,59$  m

- tutkimukset Siltanylund
- silta näyttää hyväkuntoiselta
- Niskapuut kiertyneen maatuilla
- paalujen kairausnäytteissä lahoa yhdeksässä (3/12) ja alkavaa lahoa 6/12)
- laholla ei vielä merkittävää kantavuutta heikentävää vaikutusta

**O-1089 Niskakosken silta Kuusamo Jm = 5,00 + 6,00 + 5,00 m; HI = 4,62m**

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit ruosteessa
- alkavaa lahovauriota havaittu paaluista (1/6) ja kannesta (1/4)
- kelpaisi varmaan täyskoekuormitukseen

**O-2497 Petäjäpuron silta Vaala Jm = 3,00 + 4,00 + 3,00 m; HI = 6,40 m**

- kaikki paalut eivät ole kontaktissa niskapuuhun ja osa tyystin hajonnut
- puukannessa lievää vauriota
- niskapuut osittain kiertyneet
- lahovauriota ei löytynyt kairatuista näytteistä
- ei suositella koekuormitussillaksi

**O-2502 Petäjäjoen silta Sotkamo Jm = 3,50 + 4,50 + 3,50 m; HI = 4,58 m**

Minikoekuormitus + mikroporalahotutkimus

- silta vasemmalle kallellaan ja kansi notkolla
- pultit ruosteessa ja löystyneet
- tuki T3 kallistunut etuviistoon
- maatukien niskapuut kiertyneet
- lahovaurioita paaluissa kolmessa (3/6) ja kannessa yksi (1/4) koko näytepituudella
- ei suositella koekuormitusta
- mikroporatutkimus paaluista lahoja (14/39)+ mahdollisesti lahoja (14/39); terveitä (11/39)
- mikroporatutkimus palkeista lahoja (2/10)+ mahdollisesti lahoja (7/10); terveitä (1/10)

**O-2513 Niprajoen silta Sotkamo Jm = 3,65 + 3,90 + 3,65 m; HI = 4,50 m;**

Minikoekuormitus + mikroporalahotutkimus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- niskapuu halki T2 tuella
- lievää ja voimakasta lahovaurioita löytyi paalunäytteistä (3/6) ja alkava lahovaurio kansi(1/4)
- mahdollinen koekuormitusilta
- mikroporatutkimus paaluista lahoja (21/38)+ mahdollisesti lahoja (12/38); terveitä (5/38)
- mikroporatutkimus palkeista lahoja (8/10)+ mahdollisesti lahoja (2/10); terveitä (0/10)

**O-2519 Vihtamonjoen silta Sotkamo Jm = 5,00 + 6,00 + 5,00 m; HI = 4,6 m;**

Kevytkeukuormitus

- tutkimukset Siltanylund
- kansilankutus kulunut
- maatukien taustaseinät ja takapaalut merkittävästi lahot päistään
- T3 vasen reuna näyttää hieman painuneen
- T1 niskapalkki hieman kiertynyt
- vinositeet alapäästä lahot T2, T3
- näytteistä löytynyt alkava laho ei heikentäne merkittävästi kantavuutta
- mahdollinen koekuormitusilta

**O-2599 Kupsusenjoen silta Kuhmo Jm = 3,20 + 4,50 + 3,50 m; HI = 4,55 m;**

silta uusittu

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- sidepuu T2 tuella näyttää laholta
- lahovauriota paaluissa (4/6) ja kannessa (3/4)
- mahdollinen koekuormitusilta

**O-2779 Petäjäjoen silta Kuhmo Jm = 3,00 + 4,00 + 3,00 m; HI = 4,60 m**

Kevytkeuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit painuneet puupaaluun tuella T1
- lahovauriota paaluissa (5/6) osa voimakasta ja kannessa (2/4)
- mahdollinen keuormitussilta (AKI, Ek2)

**O-2781 Syväpuron silta Vaala Jm = 3,00 + 4,00 + 3,00 m; HI = 4,58;**

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- kaikki paalut eivät ole kontaktissa niskapuuhun
- pultit ruosteessa ja löystyneet
- lahovauriota kahdessa kansinäytteessä (2/4)
- ei suositella keuormitukseen

**O-2783 Sulatusjoen silta Kuhmo Jm = 3,00 + 4,00 + 3,00 m; HI = 4,56 m**

Kevytkeuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- tutkimukset Siltanylund
- kansilankutus uusittu 2010
- kaiteet uusittu H2
- lievää laho kahdessa (2/6) näytteessä
- kantavuuden kannalta oletettavasti ei merkittävää
- vinositeiden alapäät lahonneet
- mahdollinen keuormitussilta (AI)

**O-2665 Nimisenjoen silta Sotkamo Jm = 4,50 + 5,50 + 4,50 m; HI = 4,50;**

Kevytkeuormitus

- AKI, Ek2
- tutkimukset Siltanylund
- silta näyttää hyväkuntoiselta
- kansilankutus ja kaiteet uusittu 2005
- paalujen kairausnäytteissä kolmessa (3/8) lievää alkavaa lahoa
- kantavuuden kannalta oletettavasti ei merkittävää
- mahdollinen keuormitussilta

**LAPPI****L-778 Impiösalmen silta Ranua Jm = 4,50 + 5,50 + 4,50 m; HI = 6,85 m**

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit ruosteessa ja löystyneet
- lahovauriota neljässä näytteessä (paalut 2/6, kansi 2/4)
- mahdollinen keuormitussilta (AI)

**L-823 Varejoen silta II Tervola Jm = 5,00 + 6,00 + 5,00 m; HI = 6,05 m;**

Kevytkeuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- kansilankutukseen jyrsiytynyt sillan pituussuuntainen 'railo'
- kansilakutus pultattu pääkannattajiin jälkikäteen (kannessa lattateräket pituussuunnassa) (OK valokuvasta ja sillantarkastuslomake1 2005)
- lievää lahovauriota neljässä näytteessä (paalut 2/6 ja kansi 2/4)
- mahdollinen keuormitussilta (AI)

**L-1304 MairiJoen silta Pelkosenniemi Jm = 5,00 + 6,00 + 5,00 m; Hl = 4,62 m;**

Täyskoekuormitus

- päällisin puolin näyttää hyvältä
- pultit ruosteessa
- T1 tuella yksi paalu vain puolittain niskapuun alla
- alkavaa lahovauriota kahdessa (2/6) paalunäytteessä ja lahovauriota kannessa (2/4)
- kelpaisi varmaan täyskoekuormitukseen (Akl, Ek2)
- Alustava kantavuustarkastelu jatkuville puupalkkisilloille

## JATKUVAT PUISET PALKKISILLAT

### ALUSTAVIA KANTAVUUSTARKASTELUJA

#### Vaihe 1

##### Sisällysluettelo:

##### Sivu:

• Suunnitteluperusteet	2
• Poikkileikkaus ja –arvot	5
• AA-kuormakaaviot	7
• Rakennemallit	8
• Jatkuva puinen palkkisilta $J_m = 5 + 6 + 5 = 16$ m , $H_l = 6,0$ m	11
○ voimasuureet	11
○ mitoitustarkastelut	12
○ manuaaliset voimasuureet, vanha/uusi AA-vertailu	13
○ Zellerer-vaikutusviivat	14
• Jatkuva puinen palkkisilta $J_m = 4 + 5 + 4 = 13$ m , $H_l = 6,0$ m	15
• Varmuustarkastelu (Siltojen kantavuuden laskentaohje s.12)	19
• Nurjahdus (RIL 205-1 Puurakenteiden suunnitteluohje s.213)	20
• Uudet AA-kaavioluonnokset	21

Laati: 2013-06-14 rkal

## SUUNNITTELUPERUSTEET

### ALUSTAVAT KANTAVUUSTARKASTELUT

#### TARKASTELTU SILTATYYPPI:

- **Puinen jatkuva palkkisilta (Pjp)**
- Jännemitat:  $J_m=5+6+5$  m (4+5+4)
- Hyötyleveys:  $H_l=6,0$  m
- Rakenne: kaikissa jatkuissa puupalkkisilloissa käytännössä sama rakenne
  - syrjälankkukansi  $h=150$
  - Pääpalkit  $2\varnothing 270$  päällekkäin (välituilla  $3 \varnothing 270$ )  $k 500$ , heff= $230...250$  (latva min 11")
  - Tuilla poikittaiset niskapalkit  $\varnothing 270$ , heff= $200...220$ , eräissä lisäparru  $100 \times 150$  (min 11")
  - Paalut  $\varnothing 175...300$  (latva min 7")  $k \sim 1000$

#### RAKENNEMALLINA ARINARAKENNE

- **Verkko  $dx \cdot dy = 500 \times 500$**
- **Jatkuvat pääpalkit** 13 kpl  $2\varnothing 270$   $k500$  (myös välituet 2-parruisina)
- **Poikkipalkit** 33 kpl  $500 \times 150$   $k500$  (0,5 m kaista syrjälankkukantta), tuilla lisäksi niskapalkit
- **Laakerituki** jokaisen pääpalkin alla kaikilla tuilla
- **Rakenteen oletettu toiminta:**
  - Pääpalkkien on oletettu toimivan jatkuvina ja päällekkäisten palkkien erillisinä sauvoina ilman liittovaikutusta myös välituilla, jossa kaikissa leikkauksissa kaksi ehjää/jatkamatonta palkkipoikkileikkausta; pulttausten liittovaikutusta ja limihalkaistujen palkkiosuuksien kapasiteetteja ei ole käytetty hyväksi)
  - Arinasauvojen vääntöjäykkyyttä ei ole huomioitu.

#### KUORMITUS

- **Sillan omapaino:**  $g = 17,7$  kN/m aukot ,  $g=22,9$  kN/m välituet ,  $G \sim 310$  kN ( $J_m=5+6+5$ )
- **Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormitus:**
  - pintakuorma  $p=3$  kPa
  - Uusi AA-ajoneuvokuormakaavio 76 t
  - 4-akselinen uusi kuormakaavio 35 t
  - 5-akselinen uusi kuormakaavio 42 t
- **Kuormitustapaukset:**
  - G + yksi AA-kaavio
  - G + yksi AA-kaavio + p
  - G + kaksi AA-kaaviota (rinnakkaiskaistoilla)
  - G + kaksi 4-akselista kuormakaaviota rinnakkain
  - G + kaksi 5-akselista kuormakaaviota rinnakkain



## VOIMASUUREANALYYSI

- Puun kimmomoduuli laskennassa ERIL120-C = 9100 MPa (EC5:ssa Eme-an=12000MPa)
- Voimasuureet ratkaistu Tassu-ohjelmiston Rs10-arinaohjelmalla
- Manuaalisin laskelmin (Zellerer) on tarkistettu voimasuureiden suuruusluokka, vertailtu uuden ja vanhan AA-kaavion voimasuureita sekä määritetty leikkausvoimien ja paalukuormien varmalla puolella olevat ääriarvot välituella.
- Yhden AA-ajoneuvo oletettu sijaitsevan reunalla (kiinni kaiteessa)
- Kaksi ajoneuvoa voi olla yhtä aikaa kannella rinnakkain
- AA-ajoneuvoa tarkasteltu Tassu-generoinnissa 4-akselisella (4x90 kN) osamallilla
- Mitoittavat voimasuureet ratkaistu sijoittamalla määräävät akselit ja niiden akselipainot kuormitustapauskohtaisesti arinamallin poikittaisille solmulinjoille jakautuneena. Määräävät sijainnit on varmistettu Zellerer-  
taulukkokirjan vaikutusviivoilla.
- Tarkasteltu taivutusmomentteja aukoissa ja välituella sekä leikkausvoimia ja tukireaktioita välituella.
- Varmalla puolella olevia valintoja:
  - Solmupisteiden väliin osuvat akselit sijoitettu määräävämpään solmupisteeseen
  - Akselin pyöräväliä varioitu 4- ja 5-akselisilla kaavioilla 1,8 ... 2,0 m niin, että molemmat pyörät osuvat pääpalkkilinjalle ja pyöräkuorman alkujakautuminen viereisille palkeille sen mukaisesti 1/6:2/3:1/6 (vrt. AA-kaavioilla 0,16:0,48:0,36).
  - AA:n 4-akselinen osamalli joskus varmalla puolella (lisäakselien vaikutus huomiotta)
  - Leikkausvoimien määrittämisessä määräävä akseli sijaitsee tuella (ei d-vähennystä)
  - Käsineläskennassa määritettäessä leikkausvoimien tukireaktioiden äärimmäisiä arvoja on akselikuorman oletettu kohdistuvan vain kahdelle pääpalkille.

## MITOITUSPERUSTEET

- Sysäyskertoimena käytetty Suomessa puusilloille vakiintunutta arvoa  $\phi = 1,2$
- Tarkastelut tehty IEC-yhytaikaiselle kuormitukselle  $\rightarrow k_{mod}=0,9$  (arvo 1,1 optiona)
- Tarkastelut tehty EC5-käyttöluokassa 2  $\rightarrow k_{def} = 0,8$
- Puun materiaaliosavarmuuskerroin EC5 mukaisesti  $g_m = 1.4$
- Kuormaosavarmuuskerroimet 'Siltojen kantavuuden laskentaohje' mukaisesti:
  - Yksi AA-ajoneuvo:  $g_m = 1.45$  (optiona 1,3)
  - Yksi AA-ajoneuvo + p=3 kPa:  $g_m = 1.30$  (optiona 1,1)
  - Kaksi AA-ajoneuvoa:  $g_m = 1.30$  (optiona 1,1)
- Puurakenteet oletettu terveiksi huonokuntoisuutta huomioimatta
- Mitoittavien poikkileikkausten dimensiot arvioitu lähtötietomateriaalin pohjalta:
  - pääpalkit: 2kpl  $\phi 270$ , sahattuna korkeuteen 250 mm
  - niskapalkit:  $\phi 270$ , sahattuna korkeuteen 200 mm
  - paalut: pohjan  $\phi 270$ , rakennemitoituksen  $\phi 200$

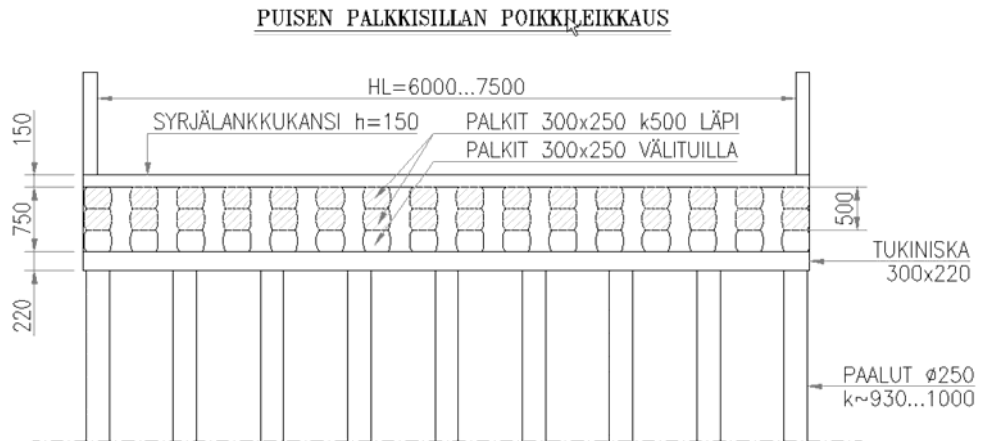
#### ALUSTAVIA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

- **Jatkuvan puupalkkisillan  $J_m \leq 5+6+5$  m ja  $H_l < 6.0$  m kaikki tarkastellut, terveysiksi oletetut osarakenteet (pää- ja niskapalkit sekä paalut) näyttäisivät kestävän uuden AA-kaavion ja sen 4- ja 5-akselisten osakaavioiden aiheuttamat rasitukset.**
- **Taivutuksen hyväksikäyttöasteen (n. 75 %) suhteen aukot ja välituki ovat käytännössä samanarvoisia. Leikkauksen hyväksikäyttöaste on samaa suuruusluokkaa. Paalujen hyväksikäyttöaste on geokantavuuden ja stabiilin ainelujuuden suhteen 50 % suuruusluokkaa, mutta nurjahdus tulee käytännössä määräämään mitoitusta (sallittu nurjahduspituus arvioitus alustavissa laskelmissa olevan 4-5m luokkaa).**
- **Myös niskapalkin hyväksikäyttö ilman lisäparua 75 % luokkaa.**
- **Syrjälankkukantta ei ole mitoitettu alustavissa tarkasteluissa; tyyppipuupalkkisilloissa ei odotettavissa ongelmia tiheän pääpalkkijaon (k 500) perusteella.**

#### ALUSTAVIEN TARKASTELUJEN KATTAVUUS JATKOTARKASTELUJEN SUHTEEN

- **Alustavien tarkastelujen jatkuva puupalkkisilta  $J_m = 5+6+5 = 16$  m /  $H_l = 6.0$  m kuvaa kattavasti suurta osaa vastaavista tyyppisiltasovelluksista:**
  - silloissa  $H_l > 6$ m lisäkuormana olevan pintakuorman  $p = 3$ kPa vaikutus määräävän palkin voimasuureisiin on lähes merkityksetön; tämä todettiin  $H_l = 6$ m sillassa vertailtaessa AA-kuormituksia 'yksi AA-ajoneuvo' ja 'yksi AA-ajoneuvo +  $p = 3$ kPa'
  - hyötyleveydet  $H_l < 6$ m varmalla puolella (vrt. edellä AA ja AA+p-viittaus)
  - tarkasteltua siltaa pienemmillä jatkuvilla jännemitoilla varustetut sillat eivät määrää
- **Puukantisissa teräspalkkisilloissa syrjälankkukannen mitoitustarkastelut tarpeen**
- **Lisätarkastelut 1-aukkoisella rakennemallilla**
- **Pääpalkkien toiminnan jatkoselvittely välitukialueella**
- **1-aukkoiset puupalkkisillat  $J_m > 3$  m tarkistettava erikseen**
- **Syrjälankkukannen ja pulттаusten/vaarnoitusten mahdolliset liittovaikutukset**
- **Siltakohtaisten dimensioerojen huomioiminen**
- **Sillan kunnan huomioiminen**
- **Suunnitteluperusteiden tarkistus**

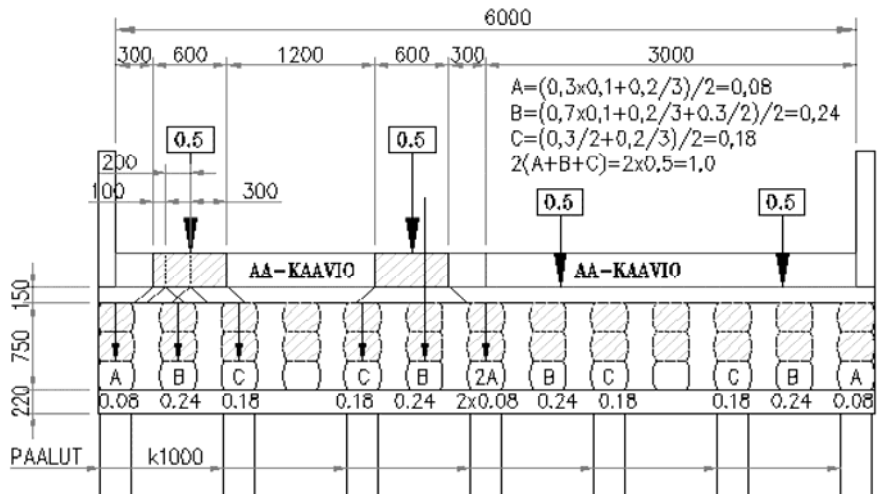
## POIKKILEIKKAUS JA -ARVOT



## TASSU Rs10a ARINA-AJON MATERIAALI- JA POIKKILEIKKAUSARVOT VOIMASUURELASKENTAAI

X - SUUNTA sillan pituussuunta	Puutavara C30(T30)	$E_{o,mean}$ (MPa)	B (mm)	H (mm)	$\phi$ (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	$I_t$ (mm <sup>4</sup> )	$I_v$ (mm <sup>4</sup> )
Pääpalkit 2k500	C30(T30)	9100	230	250		118050	581155990	1078125000
Syrjälankkukansi	C30(T30)	9100	500	150		75000	140625000	506250000
Niskapalkit tuilla	C30(T30)	9100	242	220		59485	214521600	773044800
Puupaalu	C30(T30)	9100			250	49087	191747598	383495197

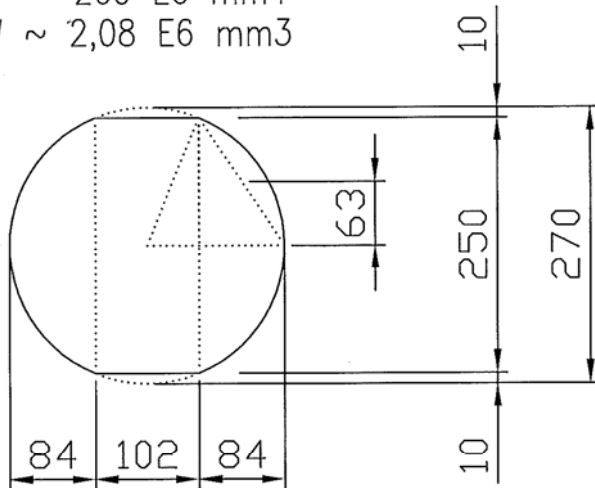
## YKSIKÖKAISTAKUORMAN JAKAUMA



**MITOITUSPOIKKILEIKKAUKSET**

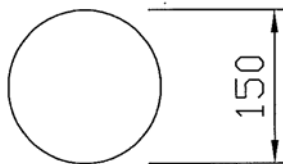
PÄÄPALKKI:  $\phi 270$  , SAHATTUNA H=250

A ~ 55880 mm<sup>2</sup>  
I ~ 260 E6 mm<sup>4</sup>  
W ~ 2,08 E6 mm<sup>3</sup>



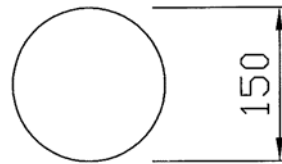
PUUPAALU:  $\phi 150$

A ~ 17670 mm<sup>2</sup>  
I ~ 24,85 E6 mm<sup>4</sup>  
W ~ 0,331 E6 mm<sup>3</sup>  
i ~ 37,5 mm



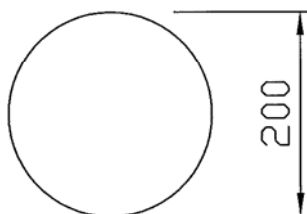
PUUPAALU: 7" ~  $\phi 175$

A ~ 24050 mm<sup>2</sup>  
I ~ 46,04 E6 mm<sup>4</sup>  
W ~ 0,526 E6 mm<sup>3</sup>  
i ~ 43,75 mm



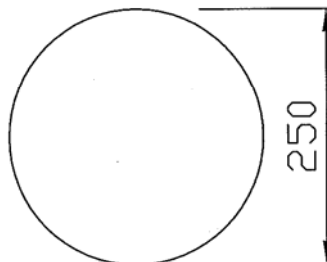
PUUPAALU:  $\phi 200$

A ~ 31415 mm<sup>2</sup>  
I ~ 78,54 E6 mm<sup>4</sup>  
W ~ 0,785 E6 mm<sup>3</sup>  
i ~ 50 mm

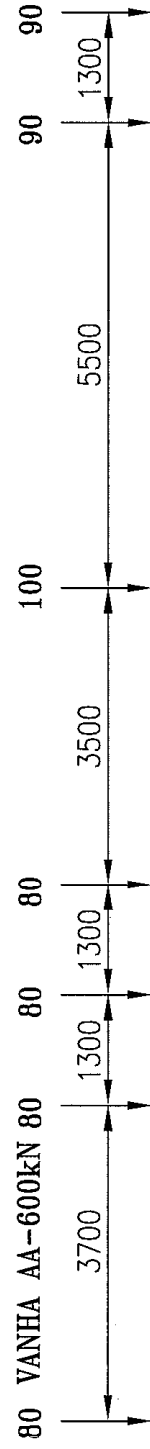
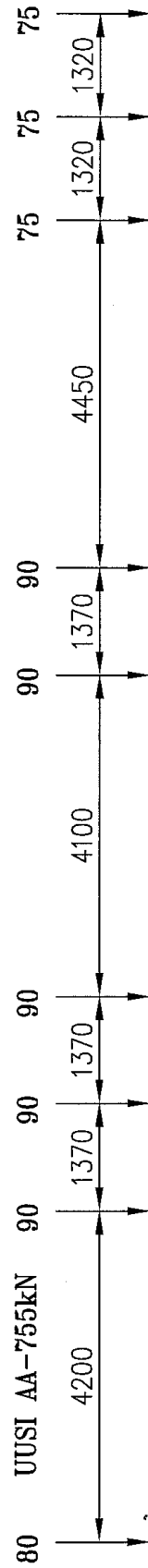
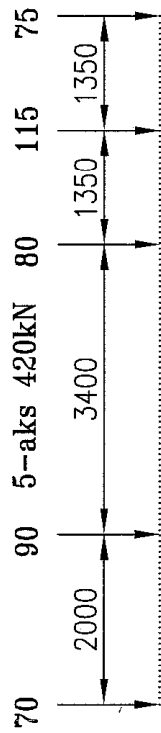
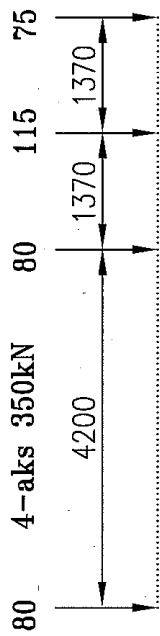


PUUPAALU:  $\phi 250$

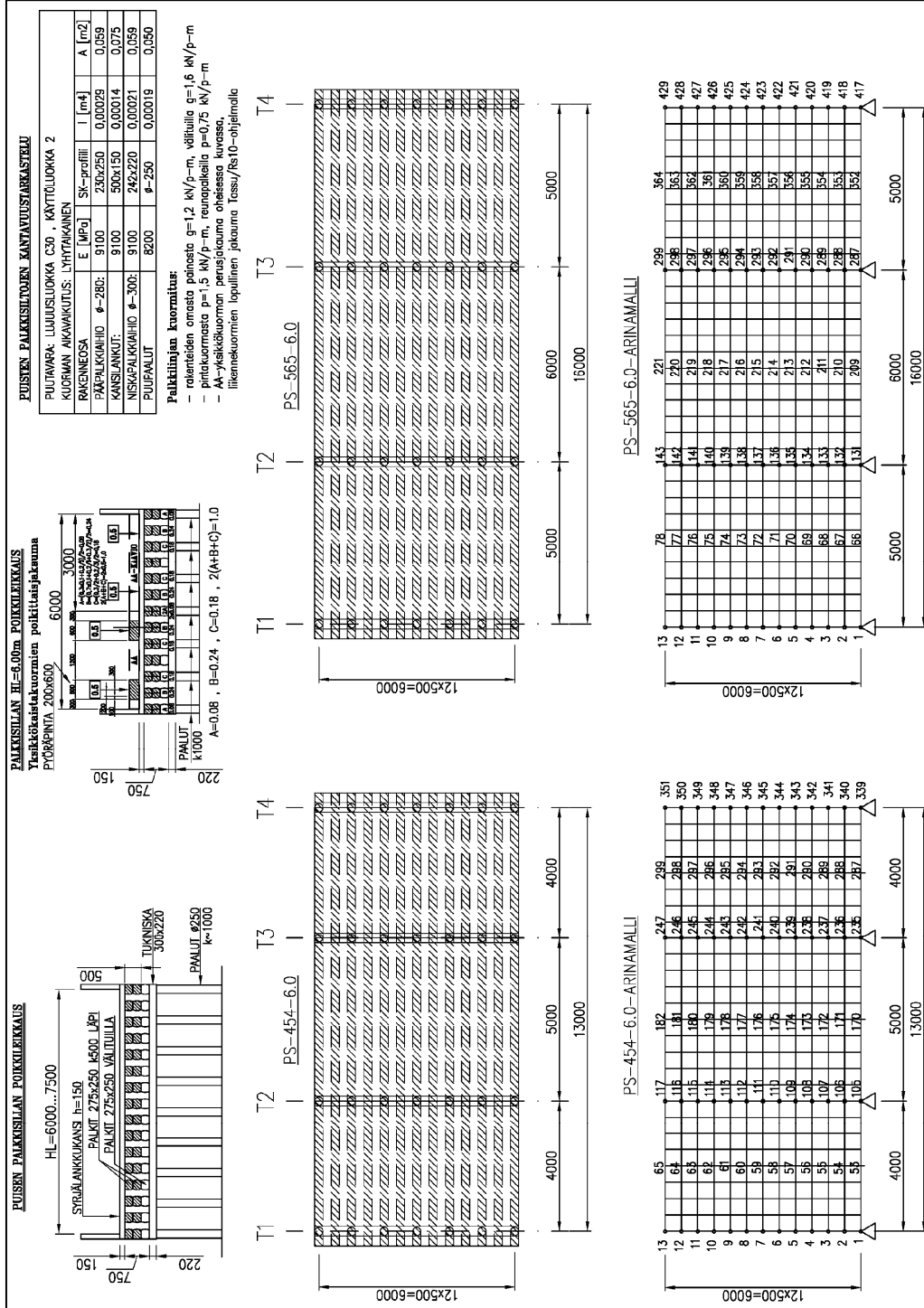
A ~ 49085 mm<sup>2</sup>  
I ~ 191,75 E6 mm<sup>4</sup>  
W ~ 1,534 E6 mm<sup>3</sup>  
i ~ 67,5 mm



AA-KUORMAKAAVIOT



**RAKENNEMALLIT**



TASSU/Rs10 - ohjelman tulostama PS-5656 3D-rakennemalli

13	26	39	52	65	78	91	104	117	130	143	156	169	182	195	208	221	234	247	260	273	286	299	312	325	338	351	364	377	390	403	416	429
12	25	38	51	64	77	90	103	116	129	142	155	168	181	194	207	220	233	246	259	272	285	298	311	324	337	350	363	376	389	402	415	428
11	24	37	50	63	76	89	102	115	128	141	154	167	180	193	206	219	232	245	258	271	284	297	310	323	336	349	362	375	388	401	414	427
10	23	36	49	62	75	88	101	114	127	140	153	166	179	192	205	218	231	244	257	270	283	296	309	322	335	348	361	374	387	400	413	426
9	22	35	48	61	74	87	100	113	126	139	152	165	178	191	204	217	230	243	256	269	282	295	308	321	334	347	360	373	386	399	412	425
8	21	34	47	60	73	86	99	112	125	138	151	164	177	190	203	216	229	242	255	268	281	294	307	320	333	346	359	372	385	398	411	424
7	20	33	46	59	72	85	98	111	124	137	150	163	176	189	202	215	228	241	254	267	280	293	306	319	332	345	358	371	384	397	410	423
6	19	32	45	58	71	84	97	110	123	136	149	162	175	188	201	214	227	240	253	266	279	292	305	318	331	344	357	370	383	396	409	422
5	18	31	44	57	70	83	96	109	122	135	148	161	174	187	200	213	226	239	252	265	278	291	304	317	330	343	356	369	382	395	408	421
4	17	30	43	56	69	82	95	108	121	134	147	160	173	186	199	212	225	238	251	264	277	290	303	316	329	342	355	368	381	394	407	420
3	16	29	42	55	68	81	94	107	120	133	146	159	172	185	198	211	224	237	250	263	276	289	302	315	328	341	354	367	380	393	406	419
2	15	28	41	54	67	80	93	106	119	132	145	158	171	184	197	210	223	236	249	262	275	288	301	314	327	340	353	366	379	392	405	418
1	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183	196	209	222	235	248	261	274	287	300	313	326	339	352	365	378	391	404	417

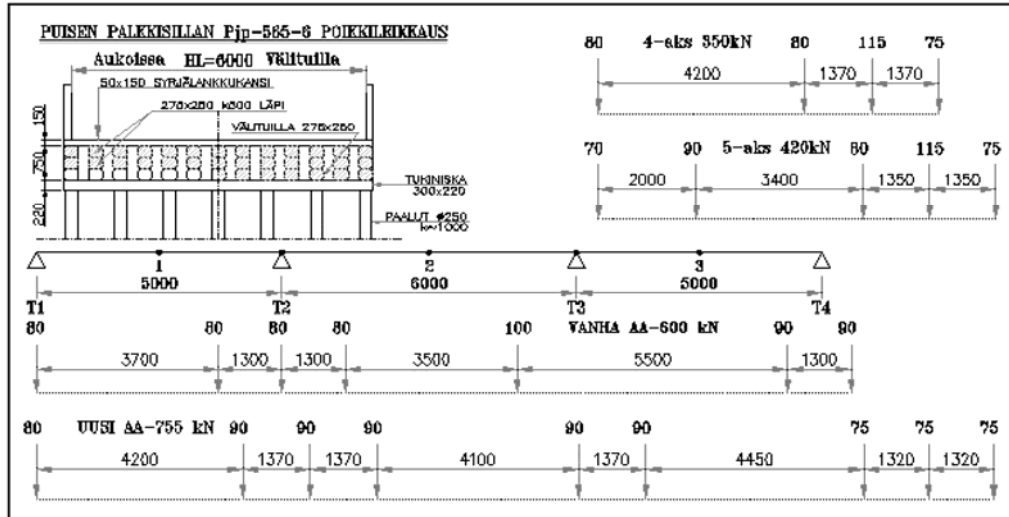






## JATKUVA PUINEN PALKKISILTA Jm=5 + 6 + 5 = 16 m, Hl=6,0 m

## PÄÄPALKKIEN VOIMASUUREET



AA/4aks/5aks-76/35/42t		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Aukko 1	Pysyvä	1,00	1,20	2333			2800	0	0
	AA	1,20	1,45	23583			41034	0	0
	AA+p	1,20	1,30	23632			36866	0	0
	2 x AA	1,20	1,30	27716			43237	0	0
	2 x 4-aks	1,20	1,30	33684			52547	0	0
	2 x 5-aks	1,20	1,30	33684			52547	0	0
							55347	0	0

AA/4aks/5aks-76/35/42t		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Välituki	Pysyvä	1,00	1,20	-4184	4131	8980	-5021	4957	10776
	AA	1,20	1,45	-24162			-42042	0	0
	AA+p	1,20	1,30	-24255			-37838	0	0
	2 x AA	1,20	1,30	-29726	37834	51341	-46373	59021	80092
	2 x 4-aks	1,20	1,30	-27110	54032	58851	-42292	84290	91808
	2 x 5-aks	1,20	1,30	-32234	56519	59380	-50285	88170	92633
				R <sub>max</sub> = $\phi$ R =	80236		-55306	93127	103409

AA/4aks/5aks-76/35/42t		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Aukko 2	Pysyvä	1,00	1,20	2733			3280	0	0
	AA	1,20	1,45	25336			44085	0	0
	AA+p	1,20	1,30	25408			39636	0	0
	2 x AA	1,20	1,30	27333			42639	0	0
	2 x 4-aks	1,20	1,30	33682			52544	0	0
	2 x 5-aks	1,20	1,30	32419			50574	0	0
				R <sub>max</sub> = $\phi$ R =	0		55824	0	0

**MITOITUSTARKASTELUT**

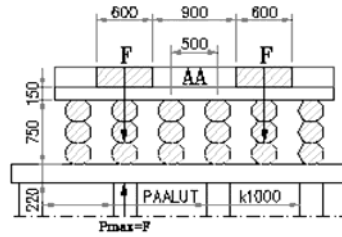
**PÄÄPALKKIEN MANUAALISET VARMALLA PUOLELLA 4 OLEVAT V- ja P-VOIMASUUREET VÄLITUELLA** olettaen, että

AA:n 3x90kN-telin kuormittaa vain kahta pääpalkkilinjaa:

$V_{d,man} = 1 \times 1.2 \times 4.1 + 1.2 \times 1.45 \times 3 \times 90 / 2 \times (1 - 1.37/6) = 186 \text{ kN}$

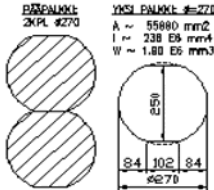
$P_{man} = 9.0 + 1.2 \times 3 \times 90 / 2 \times (1 - 1.0/6) = 135 \text{ kN}$

$P_{d,man} = 1 \times 1.2 \times 9.0 + 1.2 \times 1.45 \times 3 \times 90 / 2 \times (1 - 1.0/6) = 207 \text{ kN}$




**MITOITUSTARKASTELUT**

PUUTAVARA C30-2	Ominaislujuudet			Mitoituskertoimet		Laskentalujuudet		
	$f_{m,k}$	$f_{co,k}$	$f_{v,k}$	$k_{mod}$	$\gamma_m$	$f_{m,d}$	$f_{co,d}$	$f_{v,d}$
Materiaali- ominaisuudet	30,0	23,0	4,0	0,9	1,40	<b>19,29</b>	<b>14,79</b>	<b>2,57</b>

PÄÄPALKIT 2x270x250	$f_{m,d}$	W	A	MRd	$f_{v,d}$	VRd	Kapasiteetit
	(MPa)	(mm <sup>3</sup> )x E6	(mm <sup>2</sup> )x E3	(kNm)	(MPa)	(kN)	MRd = $f_{m,d} \cdot W$ VRd = $3/4 f_{v,d} \cdot A$
	19,29	3,8	111,76	73,3	2,57	216	

Mitoitusehdot:	Mitoitusarvo:	Kapasiteetti:	HA-aste	Status
Taivutus	$M_d = 55,8$	$< MR_d = 73,3$	76 %	ok
Leikkaus	$V_{d,atk} = 93,1$	$< VR_d = 216$	43 %	ok
	$V_{d,man} = 186,0$	$< VR_d = 216$	86 %	ok

⇒ Pääpalkin hyväksikäyttöaste ~ 75 % sekä taivutuksen että leikkauksen suhteen

PAALUT $\phi$ 175...250	Geotekninen kantavuus $\phi$ 250			Stabiili rakennekestävyys $\phi$ 200		
	$\sigma_{sall}$	Apohja, $\phi$ 250	$P_{sall}$	$f_{co,d}$	Arak, $\phi$ 200	PRd
	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )x E3	(kN)	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )x E3	(kN)
<b>5,00</b>	<b>49,1</b>	<b>246</b>	<b>14,79</b>	<b>31,4</b>	<b>464</b>	

Geo-PUUPAALU  $\phi$ 250  
 $A \sim 49085 \text{ mm}^2$   
 $I \sim 191,75 \text{ E6 mm}^4$   
 $W \sim 1,534 \text{ E6 mm}^3$   
 $i \sim 67,5 \text{ mm}$

RAK-PUUPAALU  $\phi$ 200  
 $A \sim 31415 \text{ mm}^2$   
 $I \sim 78,54 \text{ E6 mm}^4$   
 $W \sim 0,785 \text{ E6 mm}^3$   
 $i \sim 50 \text{ mm}$

$P_{max,atk} \sim 1,55 R_{palkki} = 1,55 \times 80,3 = 125 \text{ kN}$

$P_{d,atk} \sim 1,55 R_d = 1,55 \times 103,4 = 160 \text{ kN}$  (kjako  $\sim (0,24 + (0,08 + 0,18)/2) / 0,24 = 1,55$ )

**Voimasuuremerkinnät**  
M = taivutusmomentti  
V = leikkausvoima  
R = palkkitukireaktio  
P = paalukuorma

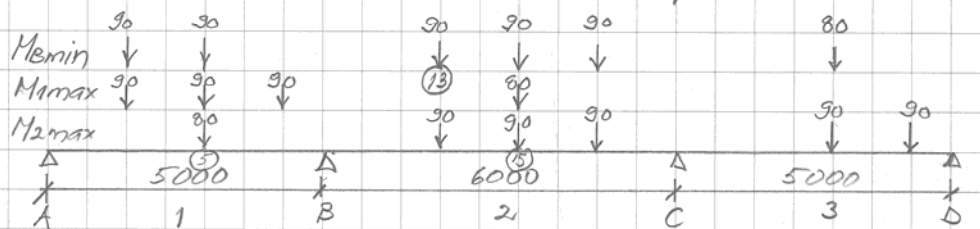
Mitoitusehdot:	Mitoitusarvo (kN):	Kapasiteetti (kN):	HA-aste	Status
Geo-kantavuus $\phi$ 250	$P_{atk} = 125$	$< P_{sall} = 246$	51 %	ok
	$P_{man} = 135$	$< P_{sall} = 246$	55 %	ok
Avaad, geo = $135 \text{ E3} / 5 = 27000 \text{ mm}^2 \Rightarrow \phi_{vaad} = 185 \text{ mm}$				
Rak-kantavuus $\phi$ 200	$P_{d,atk} = 160$	$< VR_d = 464$	34 %	ok
	$P_{d,man} = 207$	$< VR_d = 464$	45 %	ok
Nurjahdus $\phi$ 200	$P = 135 \text{ kN}$ $\sigma_d = P_d / A_{rak} = 207 / 31,4 = 6,6 \text{ MPa} \sim 0,45 f_{co,d}$ Nurjahduspituus: $\lambda < 80 \Rightarrow L_c < \lambda \cdot i = 80 \times 0,05 = 4,0 \text{ m}$			

NISKAPALKKI 270x200	$f_{m,d}$	W	A	MRd	$f_{v,d}$	VRd	Kapasiteetit
	(MPa)	(mm <sup>3</sup> )x E6	(mm <sup>2</sup> )x E3	(kNm)	(MPa)	(kN)	MRd = $f_{m,d} \cdot W$ VRd = $3/4 f_{v,d} \cdot A$
	19,29	1,45	48,58	28,0	2,57	94	
<b>Voimasuureet:</b>	$M_{d,max,atk} = (0,2031 - 0,0481) \times 103,5 \times 1,0 = 16,0 \text{ kNm}$ $M_{d,min,atk} = -2 \times 0,0938 \times 103,5 \times 1,0 = -19,4 \text{ kNm}$ $V_{d,atk} = 0,5 \times 103,5 = 51,8 \text{ kNm}$						
Mitoitusehdot:	Mitoitusarvo:	Kapasiteetti:	HA-aste	Status			
Taivutus	$M_d = 19,4$	$< MR_d = 28,0$	69 %	ok			
Leikkaus	$V_{d,atk} = 51,8$	$< VR_d = 94$	55 %	ok			

## MANUAALISET VOIMASUURET, VANHA / UUSI AA-VERTAILU

## TAVUJENMOMENTIT AA-KUORMISTA MANUAALISESTI

Zellerer § 137: Jännösuhteet 1: 1,2: 1

AA-kaistan  $b = 3\text{m}$ ; palkkiväli  $9,5\text{m} \rightarrow$  palkkikuorma  $F = \frac{1}{6} A$ 

$$M_{\max} = \left( \frac{90}{6}(739 + 2081 + 894) - \frac{80}{6} \cdot 431 \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = +24,98 \text{ kNm}$$

$$M_{\max} = \left( \frac{90}{6}(875 + 2036 + 875 - 345 - 221) - \frac{80}{6} \cdot 330 \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 21,95 \text{ kNm}$$

$$M_{\min} = \left( \frac{90}{6}(-602 - 933 - 476 - 923 - 999) + \frac{80}{6} \cdot 238 \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = -28,06 \text{ kNm}$$

Vanha AA-kaavio:

$$M_{\max} = \frac{80}{6}(805 + 2081 + 947 - 445) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = +22,58 \text{ kNm}$$

$$M_{2\max} = \left( \frac{80}{6}(922 + 2036 + 922 - 343) - \frac{100}{6} \cdot 333 \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = +20,80 \text{ kNm}$$

$$M_{\min} = \left( \frac{80}{6}(-833 - 1022 - 755 + 239) - \frac{100}{6} \cdot 933 \right) \cdot 5 \cdot 10^{-4} = -23,58 \text{ kNm}$$

$\Rightarrow$  AA-uuden momentit 5...19% suurempia!

Leikkausvoimien ja palkkikuormien manuaalitet varmalla puolella olevat maksimiarvot on esitetty mitoitustarkastuksen yhteydessä!

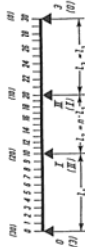
ZELLERER-VAIKUTUSVIIVAT

Einführungslinien der Momente  
Momentenlinien

1:1,20:1

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
-0,0119	-0,0243	-0,0421	-0,0618	-0,0819	-0,0997	-0,1088	-0,1097	-0,1027	-0,0884	-0,0686	-0,0456	1
-0,0204	-0,0471	-0,0811	-0,0991	-0,0921	-0,0711	-0,0411	-0,0111	0,0091	0,0091	0,0091	0,0129	2
-0,0303	-0,0750	-0,1250	-0,1414	-0,1239	-0,0844	-0,0419	-0,0073	0,0012	0,0012	0,0012	0,0183	3
-0,0433	-0,1075	-0,1675	-0,1645	-0,1300	-0,0800	-0,0415	-0,0090	0,0015	0,0015	0,0015	0,0225	4
4,336	-0,0864	-0,0794	-0,0434	-0,0134	-0,0084	-0,0094	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0236	4,336
-0,0309	-0,0921	-0,1684	-0,2066	-0,1959	-0,1452	-0,0852	-0,0400	0,0017	0,0017	0,0017	0,0251	5
-0,0273	-0,0982	-0,1853	-0,2195	-0,1994	-0,1444	-0,0833	-0,0403	0,0017	0,0017	0,0017	0,0258	5,774
-0,0445	-0,0943	-0,1823	-0,2153	-0,1863	-0,1313	-0,0723	-0,0403	0,0017	0,0017	0,0017	0,0257	6
-0,0609	-0,0877	-0,1765	-0,2083	-0,1706	-0,1156	-0,0607	-0,0296	0,0016	0,0016	0,0016	0,0239	7
0,0164	-0,0707	-0,1527	-0,1847	-0,1487	-0,0937	-0,0567	-0,0277	0,0013	0,0013	0,0013	0,0193	8
0,0322	-0,0530	-0,1366	-0,1683	-0,1326	-0,0776	-0,0406	-0,0153	-0,0099	-0,0088	0,0081	0,0115	9
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	10
-0,0258	-0,0395	-0,0603	-0,0768	-0,0936	-0,1053	-0,1088	-0,1028	-0,0980	-0,0940	-0,0900	-0,0860	11
-0,0736	-0,0833	-0,0780	-0,0676	-0,0568	-0,0456	-0,0336	-0,0216	-0,0100	-0,0080	-0,0060	-0,0040	12
-0,0999	-0,0999	-0,0921	-0,0794	-0,0644	-0,0480	-0,0316	-0,0152	-0,0088	-0,0068	-0,0048	-0,0028	13,796
-0,0922	-0,1036	-0,0966	-0,0794	-0,0644	-0,0480	-0,0316	-0,0152	-0,0088	-0,0068	-0,0048	-0,0028	14
-0,0730	-0,1004	-0,0932	-0,0766	-0,0616	-0,0452	-0,0288	-0,0124	-0,0060	-0,0040	-0,0020	-0,0014	15
-0,0888	-0,0964	-0,0844	-0,0680	-0,0528	-0,0364	-0,0200	-0,0036	-0,0016	-0,0016	-0,0016	-0,0016	16,204
-0,0736	-0,0818	-0,0659	-0,0507	-0,0354	-0,0200	-0,0046	-0,0026	-0,0016	-0,0016	-0,0016	-0,0016	17
-0,0763	-0,0781	-0,0621	-0,0468	-0,0316	-0,0164	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	18
-0,0709	-0,0721	-0,0561	-0,0408	-0,0256	-0,0104	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	19
-0,061	-0,061	-0,0504	-0,0400	-0,0296	-0,0192	-0,0088	-0,0088	-0,0088	-0,0088	-0,0088	-0,0088	20
-0,0587	-0,0585	-0,0483	-0,0380	-0,0276	-0,0172	-0,0068	-0,0068	-0,0068	-0,0068	-0,0068	-0,0068	21
0,0103	0,0115	0,0061	0,0008	-0,0045	-0,0093	-0,0141	-0,0189	-0,0236	-0,0284	-0,0332	-0,0380	22
0,0174	0,0193	0,0103	0,0013	-0,0077	-0,0167	-0,0257	-0,0347	-0,0437	-0,0527	-0,0617	-0,0707	23
0,0213	0,0229	0,0127	0,0016	-0,0096	-0,0201	-0,0319	-0,0436	-0,0552	-0,0669	-0,0785	-0,0871	24
0,0231	0,0237	0,0127	0,0017	-0,0103	-0,0223	-0,0343	-0,0463	-0,0583	-0,0703	-0,0823	-0,0943	25
0,0226	0,0231	0,0124	0,0017	-0,0100	-0,0231	-0,0353	-0,0474	-0,0594	-0,0714	-0,0834	-0,0954	26
0,0203	0,0203	0,0126	0,0015	-0,0090	-0,0219	-0,0340	-0,0460	-0,0580	-0,0700	-0,0820	-0,0940	27
0,0185	0,0183	0,0097	0,0012	-0,0073	-0,0193	-0,0314	-0,0434	-0,0554	-0,0674	-0,0794	-0,0914	28
0,0116	0,0129	0,0069	0,0009	-0,0031	-0,0111	-0,0231	-0,0351	-0,0471	-0,0591	-0,0711	-0,0831	29
0,0060	0,0066	0,0035	0,0004	-0,0027	-0,0097	-0,0217	-0,0337	-0,0457	-0,0577	-0,0697	-0,0817	30

Dreifeldträger



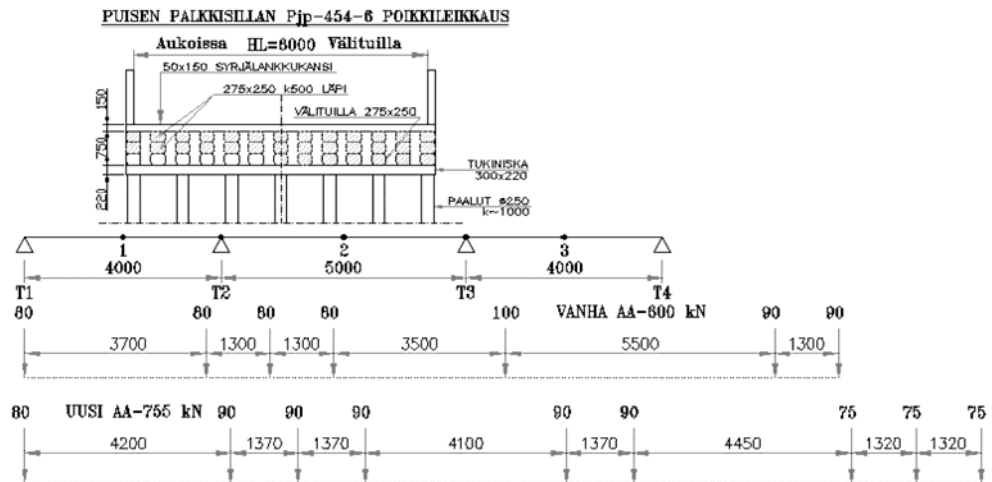
ergibt in den Punkten die Momente  $M = TW \cdot P \cdot l_i$  (TW = Tabellenwert)

0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0000	0,0000	3,702	4,436	4,554	4,000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0076	0,0791	0,2520	0,5963	0,661	0,434	0,078	0,054	0,030
0,0733	0,1564	0,1259	0,105	0,1011	0,0958	0,0875	0,0764	0,0619
0,0633	0,1266	0,1899	0,1612	0,1532	0,1469	0,1329	0,1165	0,098
0,0517	0,1053	0,1597	0,2070	0,1968	0,1800	0,1605	0,1405	0,1200
4,336	0,0480	0,0960	0,1440	0,1815	0,1920	0,1800	0,1560	0,1260
5	0,0668	0,0816	0,1024	0,1284	0,1632	0,1956	0,2264	0,2564
5,774	0,0203	0,0696	0,0984	0,1281	0,1423	0,1494	0,1541	0,1571
6	0,0306	0,0611	0,0917	0,1196	0,1423	0,1592	0,1694	0,1741
7	0,0212	0,0425	0,0637	0,0803	0,0921	0,0997	0,1024	0,1016
8	0,0129	0,0259	0,0388	0,0489	0,0517	0,0501	0,0466	0,0416
9	0,0058	0,0115	0,0174	0,0219	0,0232	0,0224	0,0200	0,0166
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	-0,0091	-0,0182	-0,0273	-0,0364	-0,0454	-0,0542	-0,0629	-0,0714
12	-0,0183	-0,0367	-0,0550	-0,0735	-0,0921	-0,1107	-0,1294	-0,1480
13	-0,0100	-0,0200	-0,0300	-0,0400	-0,0500	-0,0600	-0,0700	-0,0800
13,796	-0,0164	-0,0327	-0,0491	-0,0654	-0,0817	-0,0980	-0,1143	-0,1306
14	-0,0103	-0,0207	-0,0310	-0,0413	-0,0516	-0,0619	-0,0722	-0,0825
15	-0,0096	-0,0193	-0,0289	-0,0385	-0,0480	-0,0576	-0,0672	-0,0768
16	-0,0082	-0,0164	-0,0245	-0,0326	-0,0407	-0,0488	-0,0569	-0,0650
16,204	-0,0078	-0,0156	-0,0234	-0,0312	-0,0390	-0,0468	-0,0546	-0,0624
17	-0,0062	-0,0124	-0,0186	-0,0248	-0,0310	-0,0372	-0,0434	-0,0496
18	-0,0046	-0,0092	-0,0138	-0,0184	-0,0230	-0,0276	-0,0322	-0,0368
19	-0,0019	-0,0037	-0,0056	-0,0074	-0,0092	-0,0110	-0,0128	-0,0146
20	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,0011	0,0023	0,0034	0,0046	0,0058	0,0070	0,0082	0,0094
22	0,0019	0,0039	0,0058	0,0077	0,0096	0,0116	0,0135	0,0154
23	0,0024	0,0048	0,0072	0,0096	0,0120	0,0144	0,0168	0,0192
24	0,0026	0,0051	0,0077	0,0103	0,0129	0,0155	0,0181	0,0206
24,226	0,0026	0,0052	0,0079	0,0105	0,0131	0,0157	0,0183	0,0209
25	0,0025	0,0050	0,0075	0,0100	0,0125	0,0150	0,0175	0,0200
26	0,0023	0,0045	0,0068	0,0090	0,0112	0,0134	0,0156	0,0178
27	0,0018	0,0037	0,0055	0,0073	0,0091	0,0109	0,0127	0,0145
28	0,0013	0,0026	0,0039	0,0051	0,0064	0,0077	0,0090	0,0103
29	0,0007	0,0013	0,0020	0,0027	0,0034	0,0041	0,0048	0,0055
30	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

ergibt in den Punkten die Momente  $M = TW \cdot q \cdot l_i^2$  (TW = Tabellenwert)

g	0,0208	0,0556	0,0891	0,0715	0,0713	0,0700	0,0685	0,0661	0,0649	0,0630	0,0614
F <sub>1</sub>	0,0389	0,0777	0,0865	0,0944	0,0994	0,0982	0,0961	0,0943	0,0926	0,0910	0,0893
F <sub>2</sub>	-0,0077	-0,0154	-0,0231	-0,0308	-0,0384	-0,0459	-0,0534	-0,0608	-0,0682	-0,0756	-0,0829
F <sub>3</sub>	0,0017	0,0033	0,0050	0,0063	0,0067	0,0073	0,0076	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080
F <sub>1</sub> +F <sub>2</sub>	0,0605	0,0711	0,0916	0,1007	0,1021	0,1034	0,1037	0,1027	0,1013	0,1000	0,0983

## JATKUVA PUINEN PALKKISILTA Jm= 4 + 5 + 4 = 13 m, Hl= 6,0 m



AA - 76 tn		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Aukko 1	Pysyvä	1,00	1,20	1471	1622	1943	1765	1946	2332
	AA	1,20	1,45	16484			28682	0	0
	AA+p	1,20	1,30	16536			25796	0	0
	2 AA	1,20	1,30	20115	25194	33082	31379	39303	51608
							<b>33145</b>	<b>41249</b>	<b>53940</b>

AA - 76 tn		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Välituki	Pysyvä	1,00	1,20	-2900	3353	7570	-3480	4024	9084
	AA	1,20	1,45	-17489			-30431	0	0
	AA+p	1,20	1,30	-17509			-27314	0	0
	2 AA	1,20	1,30	-20778	33631	48634	-32414	52464	75869
							<b>-35894</b>	<b>56488</b>	<b>84953</b>

AA - 76 tn		Kertoimet		Ominaisvoimasuureet			Mitoitusvoimasuureet		
Tarkastelu- kohta:	Yhdistelmä	$\phi$ (sys)	$\gamma_f$ (ovk)	M (Nm)	V (N)	R (N)	M <sub>d</sub> (Nm)	V <sub>d</sub> (N)	R <sub>d</sub> (N)
Aukko 2	Pysyvä	1,00	1,20	1529			1835	0	0
	AA	1,20	1,45	19314			33606	0	0
	AA+p	1,20	1,30	19370			30217	0	0
	2 AA	1,20	1,30	23722			37006	0	0
							<b>38841</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

M = taivutusmomentti

V = leikkauvoima

R = palkkitukireaktio

## TAIVUTUSMOMENTIT AA-KUORMASTA MANUAALISESTI

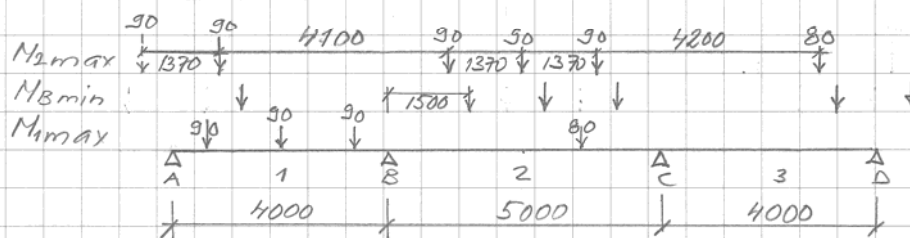
Zellerer: "Einflusslinien der Momente, Momentenlinien"  
Dreitragträger 1:1,25:1

$$l_m = 4 + 5 + 4 = 13 \text{ m}, \quad l_n = 6,0 \text{ m}$$

Kaistaleveys  $b = 3 \text{ m} \rightarrow 3/45 = 6 \text{ km}$  palkkeja/kaista

Keskikuormasta (A) yhdelle palkille pistekuorma  $F = \frac{A}{6}$

Uusi AA-kaavio:



$$M_{1max} = \left( \frac{90}{6} (90604 + 92048 + 90500) - \frac{80}{6} \cdot 90311 \right) \cdot 4 = +17,25 \text{ kNm}$$

$$M_{3min} = \left( - \left( \frac{90}{6} (90733 + 91058 + 90904 + 90312) \right) + \frac{80}{6} \cdot 90031 \right) \cdot 4 = -17,56 \text{ kNm}$$

$$M_{2max} = \left( \frac{90}{6} (90707 + 92106 + 90708 - 90205) - \frac{80}{6} \cdot 90187 \right) \cdot 4 = +18,90 \text{ kNm}$$

Vanha AA-kaavio:

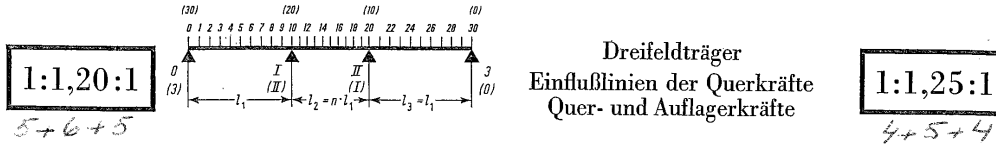
$$M_{1max} = \frac{80}{6} (90672 + 92018 + 90563 - 90431) \cdot 4 = +15,21 \text{ kNm}$$

$$M_{3min} = \left( - \frac{80}{6} (90862 + 91058 + 90925 + 90376) + \frac{100}{6} \cdot 90204 \right) \cdot 4 = -15,82 \text{ kNm}$$

$$M_{2max} = \left( \frac{80}{6} (90766 + 92106 + 90767 - 90278) - \frac{100}{6} \cdot 90303 \right) \cdot 4 = +15,90 \text{ kNm}$$

⇒ AA-uusi antaa 11-19 % suurempia momenteja kuin AA-vanha!





ergibt die Quer- und Auflagerkräfte  $Q(A) = TW \cdot P$  (TW = Tabellenwert)

	$Q_0=A_0$	$Q_{II}$	$Q_{I_r}$	$Q_{III}$	$Q_{II_r}$	$A_I$	$A_{II}$		$Q_0=A_0$	$Q_{II}$	$Q_{I_r}$	$Q_{III}$	$Q_{II_r}$	$A_I$	$A_{II}$
0	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,8757	-0,1243	0,0258	0,0258	-0,0066	0,1501	-0,0324	1	0,8762	-0,1238	0,0244	0,0244	-0,0066	0,1482	-0,0310
2	0,7529	-0,2471	0,0500	0,0500	-0,0129	0,2971	-0,0629	2	0,7538	-0,2462	0,0473	0,0473	-0,0128	0,2935	-0,0601
3	0,6330	-0,3670	0,0711	0,0711	-0,0183	0,4381	-0,0894	3	0,6343	-0,3657	0,0672	0,0672	-0,0183	0,4329	-0,0855
4	0,5175	-0,4825	0,0875	0,0875	-0,0225	0,5700	-0,1100	4	0,5191	-0,4809	0,0827	0,0827	-0,0225	0,5636	-0,1052
4,336	0,4800	-0,5200	0,0917	0,0917	-0,0236	0,6117	-0,1153	4,349	0,4802	-0,5198	0,0868	0,0868	-0,0236	0,6066	-0,1104
5	0,4079	-0,5921	0,0977	0,0977	-0,0251	0,6897	-0,1228	5	0,4097	-0,5903	0,0923	0,0923	-0,0251	0,6826	-0,1174
5,774	0,3281	-0,6719	0,1002	0,1002	-0,0258	0,7721	-0,1260	5,774	0,3300	-0,6700	0,0947	0,0947	-0,0257	0,7648	-0,1205
6	0,3057	-0,6943	0,1000	0,1000	-0,0257	0,7943	-0,1257	6	0,3075	-0,6925	0,0945	0,0945	-0,0257	0,7870	-0,1202
7	0,2123	-0,7877	0,0930	0,0930	-0,0239	0,8806	-0,1169	7	0,2140	-0,7860	0,0879	0,0879	-0,0239	0,8738	-0,1118
8	0,1293	-0,8707	0,0750	0,0750	-0,0193	0,9457	-0,0943	8	0,1306	-0,8694	0,0709	0,0709	-0,0193	0,9402	-0,0902
9	0,0580	-0,9420	0,0445	0,0445	-0,0115	0,9865	-0,0560	9	0,0588	-0,9412	0,0421	0,0421	-0,0114	0,9833	-0,0535
10	0,0000	-1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	10	0,0000	-1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
11	-0,0509	-0,0509	0,9270	-0,0730	0,0185	0,9779	0,0915	11	-0,0540	-0,0540	0,9277	-0,0723	0,0194	0,9817	0,0917
12	-0,0833	-0,0833	0,8360	-0,1640	0,0401	0,9193	0,2041	12	-0,0883	-0,0883	0,8369	-0,1631	0,0421	0,9252	0,2052
13	-0,0999	-0,0999	0,7315	-0,2685	0,0621	0,8314	0,3306	13	-0,1058	-0,1058	0,7323	-0,2677	0,0654	0,8381	0,3331
13,796	-0,1036	-0,1036	0,6417	-0,3583	0,0781	0,7453	0,4364	13,786	-0,1096	-0,1096	0,6433	-0,3567	0,0822	0,7530	0,4388
14	-0,1034	-0,1034	0,6180	-0,3820	0,0818	0,7214	0,4638	14	-0,1094	-0,1094	0,6185	-0,3815	0,0863	0,7278	0,4678
15	-0,0964	-0,0964	0,5000	-0,5000	0,0964	0,5964	0,5964	15	-0,1019	-0,1019	0,5000	-0,5000	0,1019	0,6019	0,6019
16	-0,0818	-0,0818	0,3820	-0,6180	0,1034	0,4638	0,7214	16	-0,0863	-0,0863	0,3815	-0,6185	0,1094	0,4678	0,7278
16,204	-0,0781	-0,0781	0,3583	-0,6417	0,1036	0,4364	0,7453	16,214	-0,0822	-0,0822	0,3567	-0,6433	0,1096	0,4388	0,7530
17	-0,0621	-0,0621	0,2685	-0,7315	0,0999	0,3306	0,8314	17	-0,0654	-0,0654	0,2677	-0,7323	0,1058	0,3331	0,8381
18	-0,0401	-0,0401	0,1640	-0,8360	0,0833	0,2041	0,9193	18	-0,0421	-0,0421	0,1631	-0,8369	0,0883	0,2052	0,9252
19	-0,0185	-0,0185	0,0730	-0,9270	0,0509	0,0915	0,9779	19	-0,0194	-0,0194	0,0723	-0,9277	0,0540	0,0917	0,9817
20	0,0000	0,0000	0,0000	-1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	20	0,0000	0,0000	0,0000	-1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
21	0,0115	0,0115	-0,0445	-0,0445	0,9420	-0,0560	0,9865	21	0,0114	0,0114	-0,0421	-0,0421	0,9412	-0,0535	0,9833
22	0,0193	0,0193	-0,0750	-0,0750	0,8707	-0,0943	0,9457	22	0,0193	0,0193	-0,0709	-0,0709	0,8694	-0,0902	0,9402
23	0,0239	0,0239	-0,0930	-0,0930	0,7877	-0,1169	0,8806	23	0,0239	0,0239	-0,0879	-0,0879	0,7860	-0,1118	0,8738
24	0,0257	0,0257	-0,1000	-0,1000	0,6943	-0,1257	0,7943	24	0,0257	0,0257	-0,0945	-0,0945	0,6925	-0,1202	0,7870
24,226	0,0258	0,0258	-0,1002	-0,1002	0,6719	-0,1260	0,7721	24,226	0,0257	0,0257	-0,0947	-0,0947	0,6700	-0,1205	0,7648
25	0,0251	0,0251	-0,0977	-0,0977	0,5921	-0,1228	0,6897	25	0,0251	0,0251	-0,0923	-0,0923	0,5903	-0,1174	0,6826
26	0,0225	0,0225	-0,0875	-0,0875	0,4825	-0,1100	0,5700	26	0,0225	0,0225	-0,0827	-0,0827	0,4809	-0,1052	0,5636
27	0,0183	0,0183	-0,0711	-0,0711	0,3670	-0,0894	0,4381	27	0,0183	0,0183	-0,0672	-0,0672	0,3657	-0,0855	0,4329
28	0,0129	0,0129	-0,0500	-0,0500	0,2471	-0,0629	0,2971	28	0,0128	0,0128	-0,0473	-0,0473	0,2462	-0,0601	0,2935
29	0,0066	0,0066	-0,0258	-0,0258	0,1243	-0,0324	0,1501	29	0,0066	0,0066	-0,0244	-0,0244	0,1238	-0,0310	0,1482
30	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	30	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

ergibt die Quer- und Auflagerkräfte  $Q(A) = TW \cdot g(p) \cdot l_i$  (TW = Tabellenwert)

	$g(q)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1+P_2+P_3$		$g(q)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1+P_2+P_3$			
	0,3782	-0,6218	0,6000	-0,6000	0,6218	1,2218	1,2218	0,3716	-0,6284	0,6250	-0,6250	0,6284	1,2534	1,2534
	0,4386	-0,5614	0,0651	0,0651	-0,0167	0,6265	-0,0818	0,4398	-0,5602	0,0615	0,0615	-0,0167	0,6217	-0,0783
	-0,0771	-0,0771	0,6000	-0,6000	0,0771	0,6771	0,6771	-0,0849	-0,0849	0,6250	-0,6250	0,0849	0,7099	0,7099
	0,0167	0,0167	-0,0651	-0,0651	0,5614	-0,0818	0,6265	0,0167	0,0167	-0,0615	-0,0615	0,5602	-0,0783	0,6217
	0,4574	-0,5446	0,0000	0,0000	0,5446	0,5446	0,5446	0,4565	-0,5435	0,0000	0,0000	0,5435	0,5435	0,5435



## 4 VARMUUSTARKASTELU

### 4.1 Yleistä

Rakenteelle suoritetaan murtorajatilatarkastelu, jolloin rajatilana on esimerkiksi myötääminen, murtuminen, stabiiliuden menetys tai mekanismin syntyminen. Lisäksi suoritetaan käyttörajatilatarkastelu, jolloin määräävä suure on yleensä taipuman suuruus tai betonirakenteilla halkeamaleveys.

### 4.2 Murtorajatilatarkastelu

Murtorajatiloiissa materiaalien osavarmuuskertoimet ovat suunnitteluohjeiden mukaiset. Kuormien osavarmuuskertoimet määritetään erikseen arvioitaessa sillan kestävyyttä asetuksen mukaisille liikennekuormille tai raskaille erikoiskuljetuksille. Osavarmuuskertoimet ovat kaikille siltatyypeille seuraavat (suluissa erikoistapauksissa käytettävät alennetut varmuuskertoimet):

- **pysyvät kuormat**  $\gamma_g = 1,2 (1,1)$  tai 0,9

#### - liikennekuormat, painorajoitustarkastelu

- yksi AA-kaavio  $\gamma_p = 1,45 (1,3)$   
 - kaksi AA-kaaviota  $\gamma_p = 1,30 (1,1)$   
 - yksi AA-kaavio + pintakuorma  $\gamma_p = 1,30 (1,1)$

#### - liikennekuormat, sillan kantavuus erikoiskuljetuksille

a) valvottu kuljetus: EK:  $\gamma_p = 1,20 (1,10)$

#### b) yleiskuljetus:

- yksi EK-kaavio: EK:  $\gamma_p = 1,30 (1,15)$   
 - AA + EK-kaavio: EK:  $\gamma_p = 1,20 (1,0)$   
 AA:  $\gamma_p = 1,30 (1,15)$   
 - EK + pintakuorma: EK:  $\gamma_p = 1,20 (1,0)$   
 p:  $\gamma_p = 1,30 (1,15)$

Edellämainittuja kuormien osavarmuuskertoimia käytetään pääsääntöisesti arvioitaessa sillan kestävyyttä päärakenteen suhteen. Sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista, voidaan varmuustasoa alentaa. Mikäli sekundäärirakenteiden osalta rajatila ei johda päärakenteen vaurioitumiseen, voidaan sekundäärirakenteiden kestävyyttä arvioitaessa käyttää edellälueteltuja alennettuja kuormien osavarmuuskertoimia (suluissa olevat arvot).

Alennettujen osavarmuuskertoimien käyttäminen päärakenteiden kestävyyslaskennassa edellyttää, että kyseessä on uusittava silta, jolla on lyhennetty käyttöikä. Rakenteen murtumistavan pitää myös olla sellainen, että oikeita tapahtuvasta murtumisesta voidaan havaita jo hyvissä ajoin ennen murtumaa. Jotta murtumisoireet voitaisiin havaita, on silta otettava alennettuja kertoimia käytettäessä tehostettuun tarkkailuun. Kysymykseen tulevat siltatyypit ovat esim. betoniset laatta- ja palkkisillat sekä valssatut teräspalkkisillat.

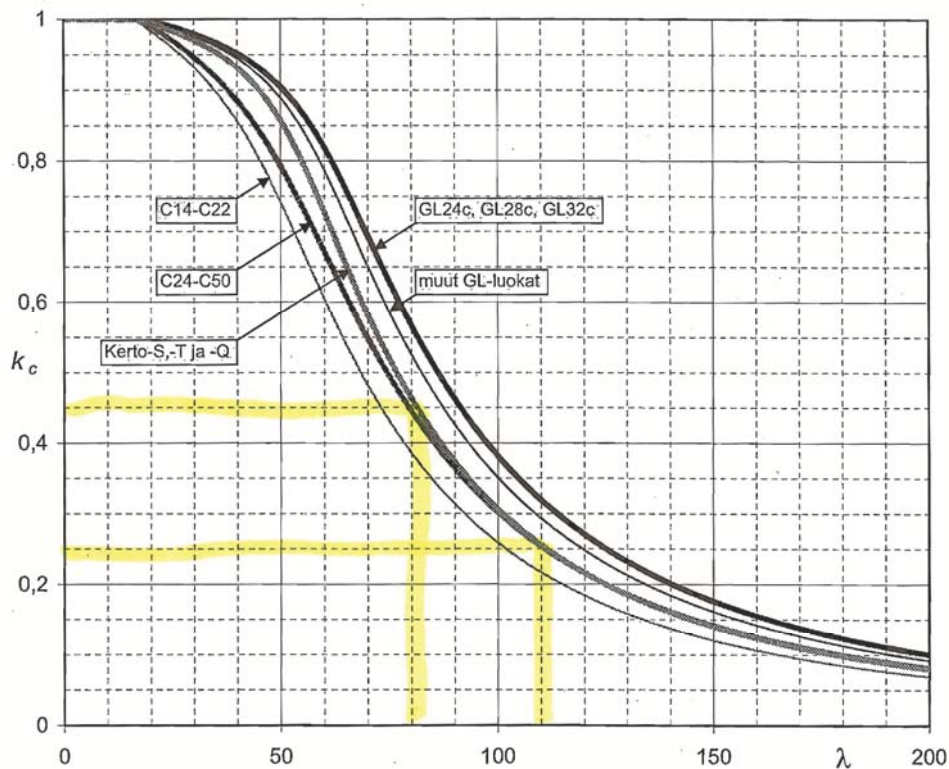
## NURJAHDUS

### B.5.5 NURJAHDUS

Puristetun sauvan nurjahdus otetaan huomioon pienentämällä puristuslujuutta nurjahduskertoimella  $k_{c,y}$  tai  $k_{c,z}$  kaavojen (B.5.6–8) mukaisesti. Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$  vastaa nurjahdusta poikkileikkauksen vahvempaan suuntaan  $z$  ja  $k_{c,z}$  heikompaan suuntaan  $y$ . Nurjahduskerroin voidaan määrittää kuvasta B.5.6 hoikkuusluvun  $\lambda$  perusteella. Puristetun rakenteen hoikkuusluku  $\lambda$  saa olla pysyvissä rakenteissa enintään 200.

**Taulukko B.5.1.** Puristussauvan nurjahduspituuksia  $L_c$ , kun sauvan pituus on  $L$ .

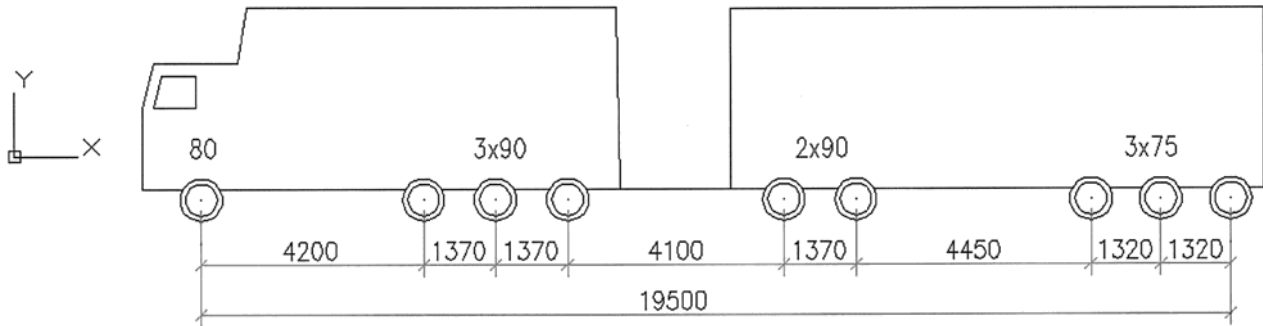
Tuentatapa	Nurjahduspituus $L_c$
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta ja nivelellisesti toisesta päästään (esim. jäykkäkantainen hallin päädyn "tuulipilari")	0,85 $L$
Sauva on nivelöity molemmista päistään (normaali tapaus)	1,0 $L$
Sauva on poikittaistuettu nurjahduksen suunnassa välein $a$	1,0 $a$
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta päästään ja on vapaa toisesta päästään ("mastopilari")	2,5 $L$



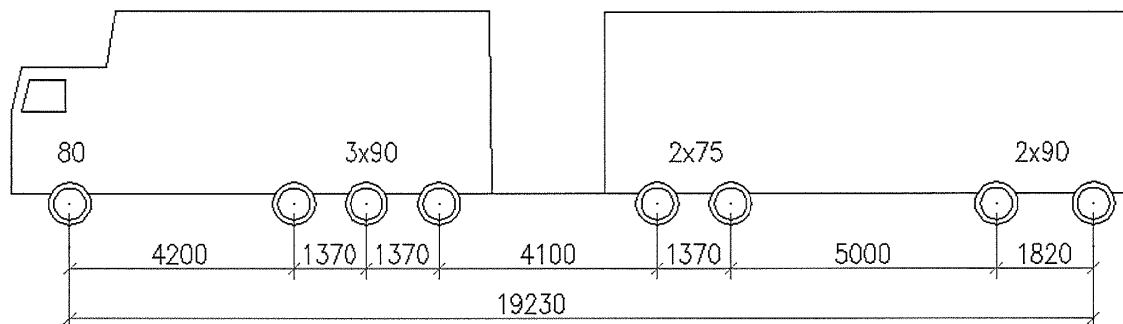
**Kuva B.5.6.** Nurjahduskertoimen  $k_c$  riippuvuus hoikkuudesta  $\lambda$ . Nurjahduskertoimessa on otettu huomioon sauvan alkukäyryys ja laskennallisen lisätaipuma. Kuorman epäkeskisyydestä ja poikittaiskuormista aiheutuvat taivutusjännitykset  $\sigma_m$  otetaan huomioon mitoitusehtoina käytettävissä kaavoissa (B.5.7) ja (B.5.8).

**UUDET AA- KAAVIOLUONNOKSET**

UUSI AA-REKKA TT76A\_45\_3541D: KOKONAISPAINO 76t ~ 746kN



UUSI AA-REKKA TT68A\_44\_3533D: KOKONAISPAINO 68t ~ 667kN







ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-301-9  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

