

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KALIXIN SILTAHANKE: KOTELOPALKKISILLAN KUNNON TUTKI- MINEN SEKÄ RAKENNEMALLIN MUO- DOSTAMINEN

TEKIJÄ Maria Roslöf

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Maria Roslöf	
Työn nimi Kalixin siltahanke: Kotelopalkkisillan kunnan tutkiminen sekä rakennemallin muodostaminen	
Päiväys	26.4.2023
Sivumäärä/Liitteet	71/6
Toimeksiantaja Destia Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö on osa suurempaa yhteispohjoismaista NordFou Supercluster-kehityshanketta, jossa on mukana eri tahoja Suomesta ja Ruotsista. (LTU Luleå University of Technology -projekti). Kyseessä on Luulajan Yliopiston tutkimusryhmän vetämä hanke, missä tutkitaan Ruotsin Kalixissa sijaitsevan jännitetyn kotelopalkkisillan käyttäytymistä uuden ja käytössä olevan teknologian avulla koekuormitustilanteessa. Vanhalle sillalle suoritettiin koekuormitus monitorointineen sekä tehtiin materiaalinäytemittauksia betonista. Tavoite oli selvittää ikääntyneiden siltojen kantavuutta ja estimoida tulevaa elinikää sekä kartoittaa kunnostamisen mahdollisuuksia verrattuna uuden rakentamiseen. Tavoitteena oli tehdä tutkimusohjelma kantavuuden tutkimiselle koekuormituksen avulla ja arvioida uuden teknologian luotettavuutta mittauksissa.</p> <p>Pohjoismaissa on paljon ikääntyviä siltoja ja korjausvelka silloille kasvaa. Myös liikennekuormat ovat vuosien aikana kasvaneet ja siltojen kantavuuden tarkastelu on ajankohtaista. Tavoitteena opinnäytetyössä oli päästä tutkimaan sillan kunnontarkastusprosessia ja sen kehittämistä sekä kantavuudenarviointikeinoja. Toisen tavoite oli päästä opettelemaan Lusas Bridge Plus -ohjelman käyttöä, mikä on sillapuolella käytetty elementtianalyysohjelmisto, joka on myös käytössä Destian siltasuunnitteluyksikössä, jolle opinnäytetyö tehtiin. Opinnäytetyössä on käyty Kalixin tutkimusprosessin kuvauksen ohessa läpi siltojen kunnontutkimuskeinoja sekä koekuormittamista, mutta myös perehdytty rakennemallin tekemiseen Lusas:lla eniten tutkitusta jännevälistä. Teoriaosuudessa on myös kartoitettu siltojen kunnonkehitystä Suomessa sekä kuntoon vaikuttavia tekijöitä.</p> <p>Koska projekti jatkuu vielä, eivät kaikki lopputulokset ole olleet käytettävissä opinnäytetyön tekovaiheessa. Voidaan kuitenkin todeta, että lisävarmuutta siltojen kapasiteetin arvioinnista sekä uusista tutkimusmenetelmistä saatiin. Opinnäytetyön osalta lopputuloksena oli suomen kielelle yhteen kerättyä tietoa siltojen kantavuuden tutkimisesta sekä kuormituskokeiden järjestämisestä. Lisäksi Destia Oy sai tämän työn kautta osaamista hyödynnettäväksi jatkossa Lusas -tarkasteluissa. Jatkotutkimuksena voisi olla Lusas -osaamisen kehittäminen edelleen, jotta tarkasteltavista malleista saatava hyöty kasvaisi.</p>	
Avainsanat silta, koekuormitus, monitorointi, instrumentointi, kantavuus, FEM-laskenta	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Master's Degree Programme In Civil Engineering	
Author Maria Roslöf	
Title of Thesis Kalix Bridge Project: Examining the condition of the box girder bridge and forming a structural model	
Date 26.4.2023	Pages/Appendices 71/6
Client Organisation Destia Oy	
<p>Abstract</p> <p>The thesis is part of a larger Nordic NordFou Supercluster development project conducted by the University of Luleå, involving different parties from Finland and Sweden. (LTU Luleå University of Technology project). It is a project drawn by the University of Luleå research group, which examines the behaviour of the tensioned box girder bridge in Kalix, Sweden, using new and available technology in a test load situation. The old bridge was subjected to a test loading with monitoring and material sample measurements of concrete. The goal was to find out the load-bearing capacity of the aged bridges and estimate the future life span, as well as map out the possibilities of renovation compared to building a new one. The aim was to carry out a research program for studying the bearing capacity by means of test loads and to evaluate the reliability of the new technology in measurements.</p> <p>There are many aging bridges in the Nordic countries and the repair debt for bridges is increasing. Traffic loads have also increased over the years and examining the load-bearing capacity of bridges is timely. The aim of the thesis was to study the bridge's condition survey process and its development, as well as the means of load-bearing assessment. The second objective was to learn how to use the Lusas Bridge Plus program, which is a finite element analysis software used in Destia's bridge design unit, for which the thesis was made. In addition to the description of Kalix's research process, the thesis examined the methods of testing the condition of bridges as well as test loading but also how to make a structural model with Lusas of the most studied span of the Kalix bridge.</p> <p>As the project is still ongoing, all the results have not been available at the thesis stage. However, it can be concluded that additional certainty was gained regarding the assessment of the capacity of bridges and new methods of research. As for the thesis, the result was information collected in Finnish about researching the load-bearing capacity of bridges and organizing load tests. In addition, Destia Oy gained expertise through this work in the future Lusas reviews. Further research could be Lusas competence development to increase the usefulness of the models under consideration.</p>	
<p>Keywords bridge, proof load test, monitoring, capacity, instrumentation, FE-analysis</p>	

ESIPUHE

Haluan kiittää Arto Puurulaa ja Matti Mikkosta, jotka mahdollistivat osallistumiseni tähän hakkeeseen sekä Luulajan yliopistoa yhteistyöstä ja hienosta vastaanotosta sekä perehdytyksestä mitauspäivänä Kalixissa.

Kuopiossa 26.4.2023

Maria Roslöf

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	LÄHTÖTIEDOT	10
2.1	Kalixin siltahankkeen tausta ja tavoite	10
2.2	Kantavuus	11
2.3	Siltakannan kunnan muutokset	12
2.3.1	Liikennemäärät ja kuormien kasvu	13
2.3.2	Ikääntyminen ja korjausvelka	14
2.3.3	Ilmastonmuutos	15
2.1	Siltakannan rakenne.....	16
3	JÄNNITETTY KOTELOPALKKISILTA	17
3.1	Jännitetty rakenne	17
3.2	Kotelopalkkisilta	18
3.3	Kalixin silta	19
3.3.1	Materiaalit ja geometria	19
3.3.2	Tuet ja laakerointi.....	21
4	SILLAN KUNNON ARVIOINTI	23
4.1	Kunnon määrittäminen ja seuranta Suomessa	23
4.2	Kunnonarvioinnin tavoitteet ja keinot Kalixissa	24
4.2.1	Virtuaalinen tarkastus	24
4.2.2	Ainetta rikkomatonta testaus ja arviointi	25
4.2.3	Ainetta rikkovat menetelmät.....	31
5	KUORMITUSKOKEET	32
5.1	Yleistä siltojen kuormittamisesta	32
5.2	Kalixin koekuormitukset.....	33
5.2.1	Laskennallisesti kriittiset paikat.....	34
5.2.2	Koekuormitus	36
6	INSTRUMENTOINTI JA SEN TULOKSET KALIXIN TUTKIMUKSISSA.....	38
6.1	Tavoitteet.....	38
6.2	Laitteiden asemointi	38
6.3	Mitattavat suureet.....	40
6.3.1	Siirtymä, taipuma	40

6.3.2	Venymät	41
6.3.3	Kiihtyvyydsmittaus.....	45
6.3.4	Kaltevuusmittaus	46
6.3.5	Lämpötilaseuranta	47
6.4	Jäänösesijännitysvoiman mittaaminen	47
7	RAKENNEMALLIN MUODOSTAMINEN	50
7.1	Tavoitteet.....	50
7.2	Lusas Bridge Plus.....	50
7.3	Lähtökohdat Lusas-mallin luomiselle	50
7.3.1	Ominaisuuksien antaminen.....	51
7.3.2	Laskentatulosten valinta.....	54
7.4	Rakennemallin muodostaminen Kalixin sillasta	55
7.4.1	AutoCAD	57
7.4.2	Kotelopalkkityökalu	58
7.4.3	Kuormat.....	61
7.4.4	Tulokset, vertailu ja luotettavuus	62
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	65
	LÄHTEET	67
	LIITE 1. KÄSINLASKENNAN PERUSTEET JÄNNEVÄLIN VIISI TARKAKASTELUSSA	72

KUVALUETTELO

KUVA 1.	Tiesiltojen kunnon kehitys (Äijälä 2022)	12
KUVA 2.	Autotiheyden kehitys Suomessa vuosina 1940–2021 (autoa/ 1000 asukasta). Ahvenanmaa ei ole mukana. (Autoalan tiedotuskeskus 2022.)	13
KUVA 3.	Painorajoitettujen siltojen määrä yleisillä teillä 1.1.1980–31.12.2021.....	14
KUVA 4.	Siltojen lukumäärien jakauma siltatyypeittäin (Väylävirasto 53/2022, 34).....	16
KUVA 5.	Kalixin sillan jännekaapeleiden radat (Kalix Bridge Project 2022)	17
KUVA 6.	Näkymä Kalixin sillan jännevälistä viisi. Silta muodostui yhdestä kotelopalkista. (Roslöf 2022).....	18
KUVA 7.	Uusi Kalix-joen ylittävä silta vasemmalla ja tutkittu silta oikealla (Roslöf 2022).....	19
KUVA 8.	Sillan yleinen poikkileikkaus (Roslöf 2023)	20
KUVA 9.	Alkuperäisten suunnitelmien mukainen kuva Kalixin sillan pituusleikkauksesta. (Kalix Bridge Project 2022.).....	20
KUVA 10.	Sillan tukilinjat (Kalix Bridge Project)	21

KUVA 11. Sillan tuet. (Roslöf 2022)	21
KUVA 12. Kuvassa esitetty tuennat sillan puolikkaalle (Kalix Bridge Project 2022, 164)	22
KUVA 13. Kimmovasara (Kalix Bridge Project 2022, 92)	25
KUVA 14. Halkeaman kiertoajan mittaaminen ultraäänen avulla (Kalix Bridge Project 2022, 93)	26
KUVA 15. Vasemmalla mittaustilanne peitemittarilla. Oikealla on esitetty peitemittarin mittaustarkkuutta sekä syvyyttä peitesyvyyden ja raudoituksen koon muuttuessa. (Kalix Bridge Project 2022, 96.)...	27
KUVA 16. Maatutkamittauksella muodostettu kuva yhdistettynä mittaustaikan valokuvaan (Kalix Bridge Project 2022, 98.)	28
KUVA 17. Ultraäänitomografiatulosten vertailu poranäytteisiin (Kalix Bridge Project 2022, 104–107)	29
KUVA 18. Elop Insight (Elop.no).....	30
KUVA 19. Poralierönäytteiden ottokohdat (Kalix Bridge Project 2022, 119)	31
KUVA 20. Kuvassa vasemmalla on kuvattuna näytteenotto betonista. Oikealla on esitetty otettuja näytekappaleita (Kalix Bridge Project 2022, 119–120).	31
KUVA 21. Kuva Tanskassa 2021 suoritetusta kuormitustestistä (DTU)	32
KUVA 22. Kiirunan sillan murtokuormituskoe (Bagge 2017).....	33
KUVA 23. Kuormitustapaus I, maksimi leikkausvoima (Kalix Bridge Project)	34
KUVA 24. Kuormitustapaus II, maksimi leikkausvoiman paikka ylhäällä ja maksimi taivutuksen alhaalla esitettynä (Kalix Bridge Project)	35
KUVA 25. Kuormitustapaus III, maksimi leikkausvoiman paikka ylhäällä ja maksimi taivutuksen alhaalla esitettynä (Kalix Bridge Project)	35
KUVA 26. Kuormituskoe Kalixissa (Gonzalex-Libreros ym. 2022, 8).....	36
Kuva 27. Kuormitustapaus III: Rekat perävaunuineen odottamassa lähtölupaa. (Puurula 2022.).....	37
Kuva 28. Sillan mittalaitteiden asemointi. Lyhenteet ovat suomennettu ja avattu Taulukossa 4. (Kalix Bridge Project 2022, 21.)	38
KUVA 29. Eri suureiden mittaustaikkoja Kalixin sillalla (Kalix Bridge Project)	40
KUVA 30. Taipumamittari D2 keskellä jänneväliä 5 sekä asemointi poikkileikkauksessa. (Kalix Bridge Project 2022, 21 & 24.)	40
KUVA 31. Siirtymämittari D1 (Lähetin ja vastaanotin) sekä laitteiden sijainti sillalla. (Kalix Bridge Project 2022, 26–27).....	41
KUVA 32. Hitsatut anturit, jotka kiinnitetty paljastettuihin jänteisiin, KCW-5-120-G10-11G3M3S. (Kalix Bridge Project 2022, 28.)	41
KUVA 33. Seinään sijoitetut venymäanturit. KC-60-120-A1-11L1M3R. (Kalix Bridge Project 2022, 28.).....	42
KUVA 34. Kuorma venymän funktiona kuormitustapauksessa III (Kalix Bridge Project 2022, 52).....	42
KUVA 35. Ylhäällä on esitetty leikkausjännityksiä havainnoiva FOS ja alemmassa kuvassa vastaavasti aksiaalisia jännityksiä havainnoivan FOS kaapelin sijoittelu. (Kalix Bridge Project 2022, 22.)	43
KUVA 36. Seinälle asennettu FOS (Roslöf 2022)	43
KUVA 37. a) Kotelopalkin puolikkaan poikkileikkaus. b) Seinälle asetettu FOS. c) Venymä/ puristusjakauma: Korkeus venymän funktiona paikassa 2, kuormitustapauksessa II 50 %:n kuormalla ja 100 %:n kuormalla kohdassa d) (Kalix Bridge Project 2022, 65)	44

KUVA 38. Venymämittarin SG4 ja vastaavassa paikassa olleen FOS kaapelin venymät ajan funktiona (Kalix Bridge Project 2022, 65).....	44
KUVA 39. Leikkausjännityksen monitorointia: FOS ja DIC (yksittäinen ja kaksoiskamera) (Kalix Bridge Project 2022, 33).....	45
KUVA 40. Kiihtyvyydsmittari mittaustaikalla sillan sisällä sekä mittareiden A1 ja A4 asemointi poikkileikkauksessa esitettyinä (Kalix Bridge Project 2022, 23 & 33).....	46
KUVA 41. Seinäkaltevuusmittari tuessa 5 (vasemmalla), tuessa 6 (keskellä) ja mittari oikealla esitettyinä. (Kalix Bridge Project 2022, 35)	46
KUVA 42. Sahausmenetelmän (a) ja säikeen leikkausmenetelmän (b) periaatteet (Kalix Bridge Project 2022, 56 & 78)	47
KUVA 43. Taipumakäyrä kuormitustapaus III 100 % kuormalla. (Kalix Bridge Project 2022, 76).....	48
KUVA 44. Jäännösjännitysvoima jaoteltuna menetelmän mukaan (Kalix Bridge Project 2022, 82.).....	49
KUVA 45. Lusas Bridge Plus (Roslöf 2023)	50
KUVA 46. Perusnäkyvä Lusas:ssa (Roslöf 2023)	51
KUVA 47. Lusas:een tehty elementti (Roslöf 2023).....	51
KUVA 48. Palkit 3D -muodossa (Roslöf 2023).....	52
Kuva 49. Palkin malli, jossa on tuennat ja rekkojen kuorma esitettyinä (Roslöf 2023).....	53
KUVA 50. Kuormien lisääminen Lusas:ssa	53
KUVA 51. Analyses-valikko (Roslöf 2023).....	54
KUVA 52. Laskennan tulosten arvot löytyvät Values -valinnan takaa (Roslöf 2023)	55
KUVA 53. Sillan poikkileikkaukset tukien 5 ja 6 kohdalla (Roslöf 2023).....	55
KUVA 54. Eri tavoin mallinnetut palkit (Roslöf 2023).....	56
KUVA 55. Taivutusmomentit. Kuvassa on ylhäältä katsottuna muuttuva poikkileikkaus, tasainen kotelopalkki, ontto palkki eri seinämäpaksuuksilla ja alimmaisena ontto palkki vakioseinämällä. (Roslöf 2023.).....	57
Kuva 56. AutoCad -kuva: Kotelopalkin jäyhyysmomentti (Roslöf 2023)	58
KUVA 57. Kotelopalkkityökalun sijainti (Roslöf 2023)	58
KUVA 58. Kotelopalkkityökalun kaksi eri tyyppiä (Roslöf 2023)	59
KUVA 59. Lusas Bridge Plus: Yksinkertainen muuttuva poikkileikkaus (Roslöf 2023)	60
KUVA 60. Multiple Varyin Section -työkalulla voi liukuvasti muuttaa poikkileikkausta (Roslöf 2023)	60
KUVA 61. Reunapalkin massakeskipisteen etäisyys sillan keskilinjasta (Roslöf 2023).....	61
KUVA 62. Kuormitustapaus III: Rekat asemassa 2 (Kalix Bridge Project 2022)	62
Kuva 63. Viivamalli jännevälistä viisi (Roslöf 2023)	62
KUVA 64. Ei-jatkuvan ja jatkuvan rakennemallin eroja (Liimatta 2020, 12).....	63
KUVA 65. Koko sillan rakennemalli (Roslöf 2023)	64

1 JOHDANTO

Sillat voidaan jakaa tiesiltoihin, rautatiesiltoihin sekä ja putkisiltoihin. Suomessa käsitteellä silta kutsutaan rakennetta, joka johtaa liikenteen esteen yli ja jonka vapaa-aukon koko on vähintään kaksi metriä. (Liikennevirasto 2013, 10.) Väyläviraston omistuksessa vuoden 2021 lopussa oli 15117 tiesiltaa. Yhteensä Suomessa tie- ja ratasiltoja oli noin 17600 kappaletta ja yleisillä teillä (myös katu- ja kaavatiet) olevien siltojen määrä oli noin 20500 (Väyläviraston sillat 31.12.2021, 9; RIL 179-2018. Sillat -suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 369).

Ruotsin Liikennevirasto puolestaan hallinnoi noin 21000 siltaa (Trafikverket 2023). Sillat alkavat ikääntyä ja saavuttaa suunnitellun käyttöikänsä päätä. Samalla niihin kohdistuu yhä lisääntyvää ja raskaampaa liikennettä ja niiden on kestettävä ilmastonmuutoksen mukana tuomia uusia sääolosuhteita ja niistä aiheutuvia kuormituksia. Rappeutumisprosessit ja poikkeukselliset kuormat sekä kuormitukset vaikuttavat myös sillan elinikään. Nämä ilmiöt yhdistettynä riittämättömään kunnostamis- ja ylläpitorahoitukseen ovat aiheuttaneet korjausvelkaa siltoihin, joka tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Uuden sillan rakentaminen on kallista ja siihen liittyy myös huomattavia hiilidioksidipäästöjä. Tämän vuoksi onkin hyvin tärkeää tutkia ja kehittää keinoja siltojen kantavuuden ja käyttöiän tutkimiseen.

Opinnäytetyö perustuu Ruotsin Kalixissa tehtyyn Luulajan Yliopiston vetämään tutkimusprojektiin, missä Kalixin vanhalle, purettavalle sillalle luotiin testausohjelma, missä tutkittiin eri menetelmiä sillan kunnan ja kantavuuden määrittämiseksi. Kaikilla mailla ei ole ohjeita siltojen kuormitustestien suorittamiseen, vaikka niiden hyödyt tiedetäänkin. (Kalix Bridge Project 2022, 122). Opinnäytetyössä tullaan käymään läpi Kalixin sillantutkimusprosessi perustuen Luulajan Yliopiston raporttiin sekä tarkastelemaan yhtä tutkitun sillan jänneväliä Destiassa käytössä olevalla FE-analyysiohjelmalla Lusas:lla. Tavoitteena oli muodostaa rakennemalli yhdestä jännevälistä, jolle lisätään kuormia. Tutkitun jännevälin Lusas-mallista saatavia tuloksia kuten tukireaktioita, momenttia ja jännitystä verrataan käsin laskettuihin arvoihin. Opinnäytetyössä ei tulla tarkastelemaan Lusas-mallin osalta siltarakenteen raudoituksia ja jännittämistä eikä oteta kantaa sillan kantavuuteen.

Kalixin siltahankkeen mittauksissa oli mukana uutta teknologiaa, jonka tuottamia tuloksia on verrattu käytössä olevien mittausmenetelmien tuottamiin tuloksiin, jotta voitiin arvioida uusien menetelmien luotettavuutta ja soveltuvuutta mahdollisesti jatkokäytössä. Kuormituskokeiden tavoitteena oli lisätä ymmärrystä sillan käyttäytymisestä kuormituksen alaisena ja päästä tätä kautta arvioimaan todellista kapasiteettia. Tavoitteena Luulajan yliopistolla oli saada kuva jänneterästen jäljellä olevasta kapasiteetista.

Opinnäytetyön tavoitteena oli johdattaa työn tekijä sillan tutkimusprosessiin ja päästä tätä kautta syventämään omaa osaamista siltojen parissa sekä päästä tutkimaan luotettavaa mallin luontia Lusas -ohjelmalla ja tätä kautta jatkossa antaa omaa osaamista myös työyksikköön Destiassa sekä luoda pohjaa omalle jatkolle siltojen kantavuuslaskennan parissa. Opinnäytetyön tilaajana toimi Destia Oy, Kaupunkikehitys- ja asiantuntijapalvelut, Siltasuunnittelu.

2 LÄHTÖTIEDOT

2.1 Kalixin siltahankkeen tausta ja tavoite

Kalixin siltaprojektissa vetävänä ryhmänä toimi Luulajan teknillinen yliopisto. Hanke on yhteispohjomainen ja siinä on mukana Ruotsista useita yrityksiä ja laitteenvalmistajia. Siltoja on rakennettu paljon Euroopassa 1900 -luvun puolivälin jälkeen. Nämä sillat alkavat olla nyt peruskorjauksissa. Ruotsissa liikennevirasto hallinnoimia siltoja on yli 20000, joten on tarpeellista taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti kartoittaa niiden kuntoa ja kantavuutta. Projektin taustalla on tarve kartoittaa ikääntyvien siltojen kapasiteettia ja parantaa kapasiteetin arviointikeinoja. Uuden sillan rakentaminen maksaa 2–3 kertaa niin paljon kuin vanhan korjaaminen. Lisäksi rakentamisesta aiheutuu hiilidioksidipäästöjä. (LTU 2022, Kalix Bridge Project 2022, 7) Ympäristövastuullisuus on nostettu myös Suomessa Väyläviraston tavoitteiksi. Kustannustehokkuus infran hoidossa muodostuu kunnon seurannan ja sen kehityksen ennakoinnin kautta sekä oikea-aikaisten hoitotoimenpiteiden kautta. (Anttila 2022, 4–6.)

Tutkittu silta on Pohjois-Ruotsissa sijaitseva Kalix -joen ylittävä silta. Alun perin paikalla on ollut käytössä lautta, jonka jälkeen rakennettu teräsristikkosilta 1930–1958, romahti kesken purkutöiden. Toinen, nyt tutkittu silta Kalix-joen yli rakennettiin vuonna 1957. Se oli betoninen, jännitetty kotelopalkkisilta. Tarve raskaammille kuljetuksille johti tarpeeseen arvioida Kalix-sillan rakenteen kapasiteettia vuonna 2014. Tarkasteluissa kävi ilmi, että sillan kapasiteetti ei riitä raskaan liikenteen pitkille kuljetuksille eikä silta täytä nykyisiä suunnittelumääräysten kriteerejä. Havaittiin myös raudoituksen betonipeitteen riittämätön paksuus, mikä altistaa rakenteen teräkset korroosiolle. (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 2). Uuden komposiittisillan rakentaminen vanhan sillan viereen aloitettiin vuonna 2019. Käyttöön uusi silta otettiin 2021 vuoden lopussa, ennen vanhan vieressä olevan sillan purkamista, joten vanha silta oli vapaa koekuormituksille tammikuussa 2022. (Kalix Bridge Project 2022, 11.)

Luulajan Yliopiston tutkijaryhmä oli suunnitellut kattavan uutta ja jo käytössä olevaa teknologiaa ja käytänteitä sisältävän tutkimusalustan Kalixin vanhalle sillalle tutki ja kehittä -toimijoiden käyttöön. Tavoitteena Luulajan tutkimusryhmällä oli luoda NDT (Non Destructive Testing) eli ainetta rikkomaton ja SHM monitorointiin perustuva testipohja Kalixin sillalle. (Kalix Bridge Project 2022.) SHM tulee sanoista Structural Health Monitoring ja sillä tarkoitetaan rakenteen kunnon monitorointia. Monitorointi voi olla eri fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien mittaamista kuten esimerkiksi kuormituksen, siirtymän, iskua, pH-tason, halkeaman leveyden ja värinän mittausta ja seuranta. (Putkinen 2019, 6–7.) Kalixin tutkimusalusta koostui erilaisista mittausten menetelmistä, joilla kartoitettiin sillan kuntoa sekä instrumentoinnista, jonka avulla tutkittiin sillan rakenteiden käyttäytymistä kuormituksen alla. Instrumentoinnilla tarkoitetaan rakenteiden toiminnan jatkuvaa mittausta ja monitorointia sekä datan tallentamista. Sillalle suoritettiin erilliset koekuormitukset tammikuussa 2022. Projekti on monivuotinen ja jatkuu vielä tämän opinnäytetyön valmistuttuakin. Sillasta otettiin myös betoninäytteitä, jotka toimitettiin laboratorioon tutkittaviksi. (Kalix Bridge Project 2022.) Projektista on tehty jo useita julkaisuja.

Kalixin silta on jännitetty kotelopalkkisilta, jonka tyyppisiä siltoja on Ruotsissa paljon, Suomessa ei niinkään. Tavoitteena Kalixin sillan tutkimuksissa oli olemassa olevien esijännitysvoimien

määrittäminen mikä on tärkeää, jotta sillan kapasiteettia ja kantokykyä voidaan arvioida ja tehdä purkamisesta turvallista. Toki muut ikääntymiseen liittyvät ja rakenteiden tutkimiseen liittyvät asiat ovat yhteneväisiä myös muillekin siltatyypeille. Kaikilla mailla ei myöskään ole olemassa ohjeita siltojen kuormitustestauksen suorittamiseen (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 1). Kalixin kattavien mittaus-ten perusteella pyritään tulosten kautta ymmärtämään sillan rakenteiden käyttäytymistä ja tätä kautta pystytään paremmin arvioimaan kapasiteettia sekä tarvittavia jatkotoimenpiteitä. Siltojen iän ja vaurioiden määrän kasvaessa ollaan usein tilanteessa, jossa täytyy päättää, onko toimenpiteenä korjaus vai uuden rakentaminen. Korjauksen hyötynä on taloudellisten syiden rinnalla myös ympäristön kuormituksen pienentäminen.

Kalixin tutkimusprojektissa paljon painoa oli myös turvallisen purkamisprosessin selvittämisellä, koska kyseessä oli jännitetty rakenne, vapautuu sen purkamisessa paljon voimia nopeasti, mikä voi johtaa rakenteen yllättävään romahtamiseen. Silta sijaitsee lisäksi Natura 2000-alueella ja purkamisen täytyi tapahtua myös luonnon kannalta turvallisesti ja hyvin suunnitellusti.

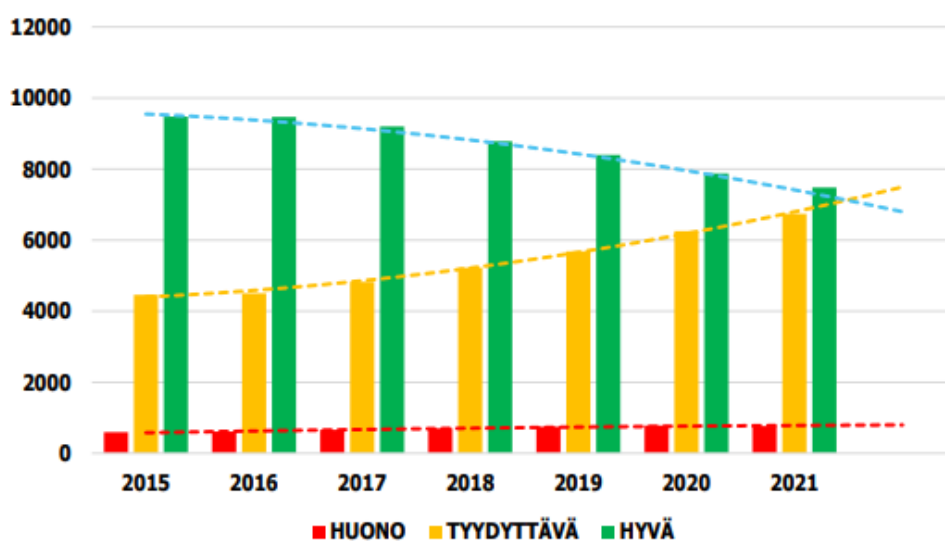
2.2 Kantavuus

Projektin taustalla vaikuttaa vuonna 2014 sillalle tehty kantavuuden tarkastelu. Tarkastelu tehtiin selvittämään kestäkö silta kuormituksen lisääntymisen. Sillan kantavuustutkimuksen suoritti Sweco, mikä on ruotsalainen Euroopassa toimiva rakennusalan asiantuntijayritys. Swecon raportissa laskennassa käytetyiksi kuormiksi on ilmoitettu omapaino, päällysrakenteet, puristusvoima, liikenteen kuormat, maakaasurata, jarrukuorma sekä tuulikuorma. Tuulikuorma on huomioitu vain laakereita tutkittaessa. Kantavuuslaskennassa perustui sille, että sillan leveys 7,74 mahdollisti 2 kuormakaistaa. Kantavuutta laskettaessa kuormista tehdään erilaisia yhdistelmiä sillalle käytössä olevaan ohjeistukseen perustuen ja etsitään näistä yhdistelmistä se huonoin ja eniten kuormittava tapaus sillan kantavuuden kannalta. Swecon raportissa todetaan muun muassa, että sillalla ei ole kapasiteettia, koska esijännityskaapeleiden betonipeite on riittämätön. Myös välitukien poikki-palkit eivät täyttäneet murto- käyttö- ja väsymisrajatilatarkasteluja. Viides jänneväli ei myöskään täytä vetojännityksen ja murtolujuuden osalta vaatimuksia. Lisäksi sillassa olleet halkeamat viittasivat kuormitukseen esijännityskaapeleissa. (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 2.)

Sillat suunnitellaan kestäväksi kuormia, joita eivät todennäköisesti tule kohtaamaan. Murtorajatilatarkasteluissa tarkastellaan rakenteen varmuutta murtumisesta vastaan. Murtorajatilat ovat jaoteltu Eurokoodin Rakenteiden suunnitteluperusteissa syntyvän mukaan. Rakenne voi menettää tasapainonsa (EQU). Kantava rakenne voi murtua tai voi tapahtua kantokyvyn menetys, joka on aiheutunut rakenteen muodonmuutoksesta (STR). Myös rakenteen alla olevassa maaperässä voi tapahtua merkittäviä muodonmuutoksia ja näistä voi aiheutua murtuma (GEO). Kantava rakenne tai sen osa voi myös murtua väsymismurtona (FAT). Murtorajatilatarkastelussa käytetään erilaisia kertoimia ja osavarmuuslukuja laskennassa. Tavoite suunnittelussa on löytää riittävän pieni todennäköisyys rakenteen murtumiselle. Käyttörajatilassa tarkastellaan, että rakenne kestää normaalikäytössä ja pitkäikäisiä kuormia. (Betoniteollisuus 2010, 3.)

2.3 Siltakannan kunnan muutokset

Sillat vaikuttavat suuresti maantieverkon kulkuyhteyksiin. Tyydyttäväkuntoisten siltojen osuus on lisääntynyt voimakkaasti ja huonokuntoisten siltojenkin määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan vaikkei niin nopeasti. (Tieto.traficom 2021b). Pohjois-Savon ELY-keskuksen Tienpidon ja liikenteen suunnitelma 2022:ssa todetaan, että alueen painopiste on maanteiden ja siltojen päivittäisessä hoidossa ja korjauksessa (ELY-Keskus 2022). Siltojen kunnan heikkeneminen tulee esille myös Siltatekniikan päivillä esitetystä Kuvassa 1 tiesiltojen kunto, mistä voidaan nähdä tyydyttäväkuntoisten siltojen määrän kasvun ja vastaavasti hyväkuntoisten siltojen määrän laskun. Siltatekniikan päivät on vuosittain järjestettävä silta-alan ammattilaiset yhteen keräävä tapahtuma, jonka järjestäjänä toimivat Väylävirasto ja Betoniyhdistys (Väylävirasto 2022).

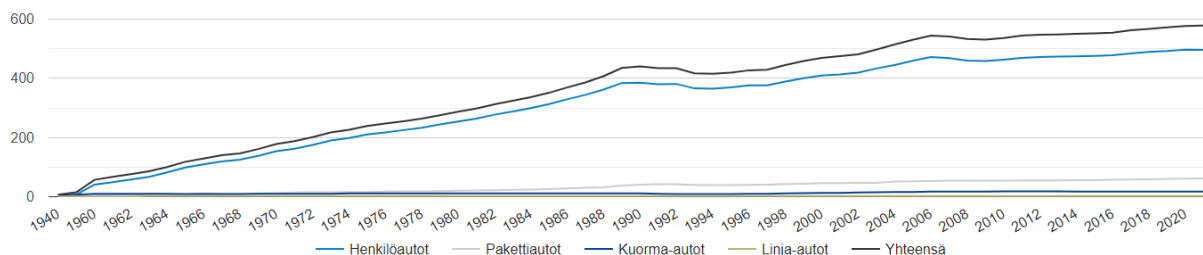


KUVA 1. Tiesiltojen kunnan kehitys (Äijälä 2022)

Kalixin siltahankkeen raportissa todetaan, että merkittävä osuus siltojen romahtamisista johtuu rakenteellisen kunnan tietämättömyydestä. Taustalla voi olla siltoihin vaikuttaneita rasituksia, jotka ovat aiheutuneet luonnonkatastrofeista, kuten tulvista ja maanjäristyksistä. Sillan mekaaniset ominaisuudet heikkenevät, minkä taustalla voi olla raudotteiden korroosiota, betonin karbonatisoitumista tai rakenteiden väsymistä. Myös alkuperäinen suunnittelu tai rakenne voi olla riittämätön. Kuitenkin maailmalla tapahtuneet viimeaikaiset siltojen romahtamiset liittyvät ongelmiin leikkausvoimissa sekä esijännitysvoimien menetykseen. Tutkimukset ja monitoroinnit hankkeessa ovatkin suunniteltu kartoittamaan esijännitysvoimien häviöitä ja jäljellä olevien voimien todentamista, joiden katsotaan antavan hyvää arviota sillan olemassa olevasta kapasiteetista. (Kalix Bridge Project 2022, 45.)

2.3.1 Liikennemäärät ja kuormien kasvu

Liikennemäärät Suomen maanteillä ovat kasvaneet vuosittain lähes poikkeuksetta. Tämä näkyy myös siltojen liikennemäärien kasvuna. (Väylävirasto 2019). Vuoden 2021 lopussa oli kuorma-autoja Suomessa käytössä noin 96000 kappaletta koko autokannan ollessa noin 3,2 miljoonaa autoa. Alla olevassa kaaviossa on esitetty autotiheyden kehitys Suomessa 1940-luvulta 2021-luvulle saakka. Kuva 2 kuvaa autojen määrää/ 1000 asukasta. (Autoalan tiedotuskeskus 2022.)



KUVA 2. Autotiheyden kehitys Suomessa vuosina 1940–2021 (autoa/ 1000 asukasta). Ahvenanmaa ei ole mukana. (Autoalan tiedotuskeskus 2022.)

Suomessa siltojen kuormien arvioinnista ensimmäiset merkinnät löytyvät 1900-luvun alusta. 1971 käyttöön tuli yhteispohjoismainen mitoituskuorma PKM71, mikä nimettiin IK1-kaavioksi ja oli käytössä 2010 vuoteen saakka. Suomessa 1991 Tielaitos julkaisi Siltojen kuormat -julkaisun, mikä täydensi 1971 vuoden julkaisua. Vuodesta 2010 lähtien on sovellettu ohjetta NCCI 1: Eurokoodin sovel-lusohje: Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet. Se kattaa siltojen, rautatiesiltojen sekä kevyenlii-kenteen siltojen suunnittelun. Kuormiin on tehty muutoksia vastaamaan ajoneuvoasetuksen vaati-muksia, kun käytössä olevien ajoneuvojen kuormat ovat lisääntyneet (NCCI 1; RIL 179-2018. Sillat-suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 150.)

Vuonna 2013 tehty ajoneuvoasetus nosti raskaiden ajoneuvojen mittoja ja massoja. Ajoneuvoyhdis-telmien maksimikokonaispaino nousi tuolloin 76 tonniin ja suurin sallittu korkeus 4,4 metriin. (ELY-keskus 2023 & Tieto.Traficom 2021a). Maksimipituus yhdistelmällä on nykyään 34,5 metriä. (Tieliik-kennelaki 729/2018 125§, Valtioneuvoston asetus 31/2019.) Painorajan noston seurauksena tiesilto-jen käyttöikä lyhenee noin 0–30 vuotta. Iän lyheneminen näkyy varsinkin nyt jo ikääntyneitä siltoja suurimmat ongelmat tulevat lisääntyneestä painosta, mutta myös ajoneuvojen sallitun korkeuden kasvattaminen näkyy matalien siltojen törmäilyvaurioiden määrän lisääntymisenä. (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 373–374).

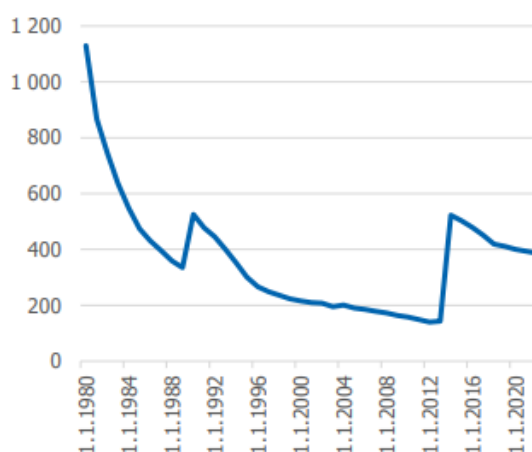
Vuonna 2022, reilun kahden ja puolen vuoden päästä siitä, kun suurin sallittu pituus vuonna 2019 nostettiin 25,25 metristä oli noin 7 % kuorma-autoliikenteestä vähintään 27 metriä pitkiä ajoneu-voyhdistelmiä. Vähintään 30 metriä pitkien osuus on noin 2 % (Traficom 2022.) HCT eli High Capa-city Transport tarkoittaa sallittua pidempää tai raskaampaa yhdistelmää, jota ei kuitenkaan pidetä erikoiskuljetuksena. Sillä tarkoitetaan yli 25,25 metriä pitkiä ajoneuvoyhdistelmiä. (Traficom 2020 & 2022.) Sallituista arvoista pidempiä tai raskaampia kuin 76 tonnia HCT-kuljetuksia on poikkeusluvalla saanut liikennöidä vuodesta 2013 lähtien. Vuonna 2020 poikkeusluvalla liikennöiviä

ajoneuvoyhdistelmiä oli liikenteessä 21 kappaletta, joiden paino ylitti 76 tonnia ja 10 kpl alle 76 tonnia. (Traficom 2020.)

Suurin säästö raskaiden ajoneuvojen hiilidioksidipäästöihin ja kuljetuskustannuksiin on saatu kasvatamalla mittoja (Raunio 2022), mikä mahdollistaa suuremmat kertakuljetuserät ja tätä kautta minimoi ajokertoja ja siitä aiheutuvia kaluston kulumisia ja palkkakustannuksia. Rahallisen säästön arvioidaan Traficom -sivuston mukaan olevan noin 5–20 % kuljetusalasta riippuen.

Ajoneuvojen kasvaneet painot ovat kasvattaneet siltojen suunnittelukuormia ja näin ollen vanhoille silloille kohdistuu uusista säädöksistä johtuen suurempia kuormia mille ne ovat suunniteltu. Liasta kuormasta aiheutuu vaurioita sillan kantaville rakenteille. Vauriot voivat näkyä olla halkeamina, taipumina tai siirtyminä. (Liikennevirasto 2013, 11.) Pitkällä aikavälillä nämä aiheuttavat sillan käyttötään lyhenemistä, ongelmia käytettävyyteen sekä kantavuuden alenemaa. Tarve sillan kantavuuden uudelleentarkastelulle on olemassa, mikäli on havaintoja vaurioista, tien poikkileikkausmuutoksista tai raskaan kaluston kuljetustarpeen muutoksista. (Raunio 2022.) Kantavuuspuutoksien takia pelkkä peruskorjaus ei useinkaan riitä vaan koko silta joudutaan uusimaan. (Tieto.Traficom 2021b).

Väyläviraston julkaiseman artikkelin mukaan painorajoitettuja siltoja on vuonna 2019 ollut yli 400 kappaletta. Siltojen painorajoitukseen päädytään, kun sillan kantavuus ei riitä ajoneuvoasetuksen mukaisille kuormille. (Väylä 2019; Tieto.Traficom 2021b). Toisaalta vuonna 2021 painorajoitettujen siltojen kokonaislukumäärä oli 387 kappaletta. Painorajoitukset painottuvat pienempiin teihin ja suurin osa painorajoitetuista silloista onkin yhdys- ja seututeiden siltoja. (Väylävirasto 53/2022, 55–56). Vuonna 2012 tehty painorajoituksen nosto näkyy selkeänä piikkinä painorajoitettujen siltojen määrässä mikä on esitetty kuvassa 3.



KUVA 3. Painorajoitettujen siltojen määrä yleisillä teillä 1.1.1980–31.12.2021.

2.3.2 Ikääntyminen ja korjausvelka

1960-luvulta aina 1990-luvulle saakka siltoja rakennettiin Suomessa runsaasti. 1900-luvun alkupuolella siltoja rakennettiin varsinkin vesistöjen yli (Väylävirasto 2022, 3). Sodan jälkeen maan elyessä valtatieverkkoa alettiin uudistamaan 1950-luvulla ja uudistamiseen meni kaksi vuosikymmentä. 1960-luvulla alettiin teitä päällystämään (Nenonen, 20121). Siltojen kuntoa on järjestelmällisesti

seurattu 1970-luvulta lähtien yleistarkastuksien avulla, joista aiemmin on kerrottu. Peruskorjaus on ajankohtainen, kun sillan ikä on noin 40–45 vuotta, eli suuri määrä siltoja odottaa peruskorjaamista. Tällä ajanjaksolla rakennetuilla silloilla on todettu myös ongelmaa kosteuseristyksen toiminnassa betonin kanssa. (Yle 2018.) Suunnittelukäyttöikä betoni- ja teräsilloille on nykypäivänä yleensä 100 vuotta (RIL 179-2018, 371). Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty valmistumisvuoden yhteys kuntoluokkiin. Kuntoluokat silloille ovat 1...5, 1 ollessa erittäin huono ja 5 erittäin hyväkuntoinen (Väylävirasto 2022, 66).

TAUKUKKO 1: Siltojen kuntoluokka valmistumisvuoden mukaan (Väylävirasto 2022, 66).

Valmistumisvuosi	Kuntoluokka						Yhteensä
	1	2	3	4	5	Ei tietoa	
-1949	7	92	578	289	6	1	973
1950–1959	6	101	757	389	2		1 255
1960–1969	33	172	1 258	787	9	2	2 261
1970–1979	49	162	1 577	865	8	2	2 663
1980–1989	28	72	1 248	843	4	1	2 196
1990–1999	9	17	1 055	1 458	9	4	2 552
2000–2009		2	218	1 303	111	2	1 636
2010–2019			53	668	474	66	1 261
2020–2021				44	203	56	303
Ei tietoa	1	3	4	5		4	17
Yhteensä	133	621	6 748	6 651	826	138	15 117

5 = Erittäin hyvä, 4 = Hyvä, 3 = Tyydyttävä, 2 = Huono, 1 = Erittäin huono

Kun sillat ikääntyvät niiden huoltamisen rooli korostuu ja turvallisuus sekä pitkäikäisyys voidaankin varmistaa riittävällä ylläpidolla. Korjausvelalla tarkoitetaan tilannetta, kun kunnan ylläpitämiseen reaaliajassa ei ole riittävää määrärahoitusta vaan kasaantuu korjauskustannuksia. (Uudenmaan ELY-keskus 2022.)

Tämän vuoksi Kalixin -projektin tausta-ajatus on myös Suomessa hyvin ajankohtainen. On tärkeää kartoittaa siltojen todenmukainen kunto ja kantavuus, jotta voidaan ennakoida sillan elinkaaren pituutta ja tätä kautta suunnitella tarvittavat korjaustoimenpiteet luotettavasti ja turvallisesti. Väyläverkon korjausvelkaa oli Väyläviraston mukaan 2,9 mrd euroa (Anttila 2022). Koska nykyinen rahoitustaso ei riitä tarvittaviin toimenpiteisiin, jotta kartoitetut peruskorjauksen tarpeessa olevat sillat saataisiin kunnostettua ja uusittua kohteet, joissa ei peruskorjaamisella päästä haluttuun lopputulokseen tai se on taloudellisesti kannattamatonta korjausvelka kasvaa koko ajan huonokuntoisten siltojen määrän kanssa. (Uudenmaan ELY-keskus 2022; Yle 2021.)

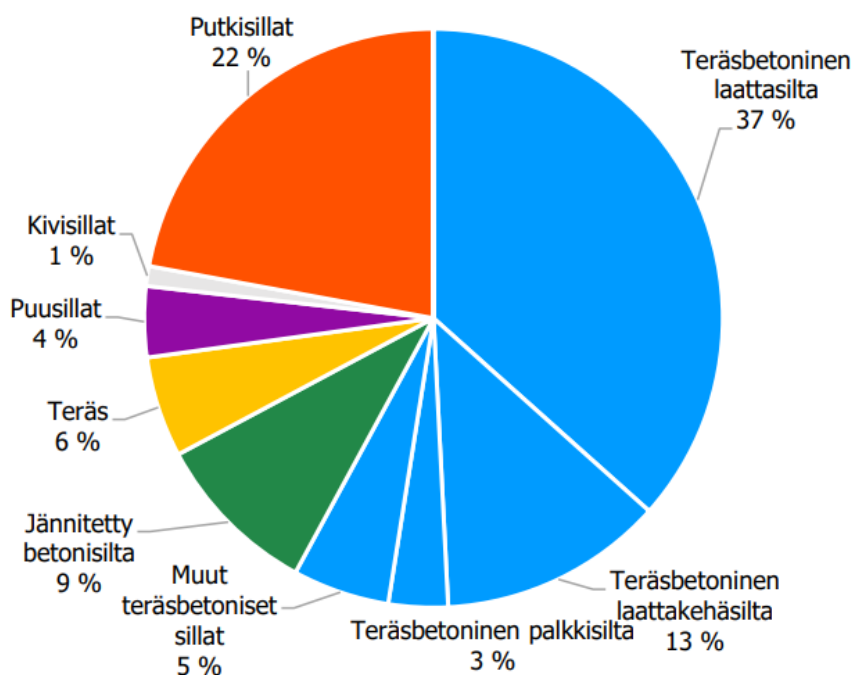
2.3.3 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutoksen vaikutukset heijastuvat myös siltojen kuntoon. Siltojen suunnittelukäyttöikä on pitkä, yleensä 100 vuotta, minkä aikana ilmastossa voi tapahtua suuriakin muutoksia. Ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät myrskyjen ja tulvien lisääntymisenä ja vedenpinnan korkeuden vaihteluina. Kun talvet lauhtuvat myös pakkaskausi lyhenee ja tätä kautta tieverkon suolaustarve lisääntyy. Nämä lisäävät kuormitusta rakenteen teräsosion korroosiolle. Kun liikutaan nollan asteen molemmin puolin niin sulamis-jäätymissykliä määrä kasvaa, mikä lisää pakkasrapautumista (Äijälä 2022.) Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomen siltoihin näkyvät ehkä selkeimmin tulvien

voimistumisina. Vesistösiltoihin nämä vaikutukset näkyvät erityisesti, koska tulvat kuljettavat mukanaan jäätä ja irtonaisia aineksia, mutta vaikuttavat myös virtauksen kautta ja aiheuttamalla nostetta. Voimakkaat virrat kuljettavat myös maa-aineita mikä aiheuttaa uomien pohjiin eroosiota. Sään ääri-ilmiöiden muutokset näkyvät kuivina ja sateisina kausina mikä puolestaan heijastuu pohjavedenpinnan tasoon muutoksina, mikä puolestaan voi vaikuttaa sillan perustusten kantavuuteen. Korroosion kehitykselle raudoitteissa ja sillan teräsrakenteissa talvien lämpeneminen luo suotuisat olosuhteet. Keskilämpötilan nousu voi näkyä siltoja kuormittavana tekijänä lämpötilarasituksien kautta, kun lämpölaajeneminen vaikuttaa materiaaleihin. (Määttä 2021, 100.)

2.1 Siltakannan rakenne

Suomen silloista suurin osa on betonisia. Kuvassa 4 on esitettyä Väyläviraston sillat -julkaisusta kuva Suomen siltatyypin jakaumista. Kuvassa näkyy olemassa olevien siltojen osuudet siltatyypeittäin, mistä voi huomata teräsbetonisten laattasiltojen ylivoimaisen enemmistön. Väyläviraston Sillat -julkaisun mukaan vuonna 2021 uusia siltoja valmistui 123 kappaletta, joista 35 % oli teräsbetonisia, 15 % jännitettyjä palkkisilloja, 5 % puisia ja teräksisiä siltoja ja 38 % putkisilloja. Teräsbetonisia siltoja rakennetaan paljon ja jännitettyjen betonirakenteiden osuus on kasvanut kuten myös putkisiltojen. (Väylävirasto 53/2022, 39.)



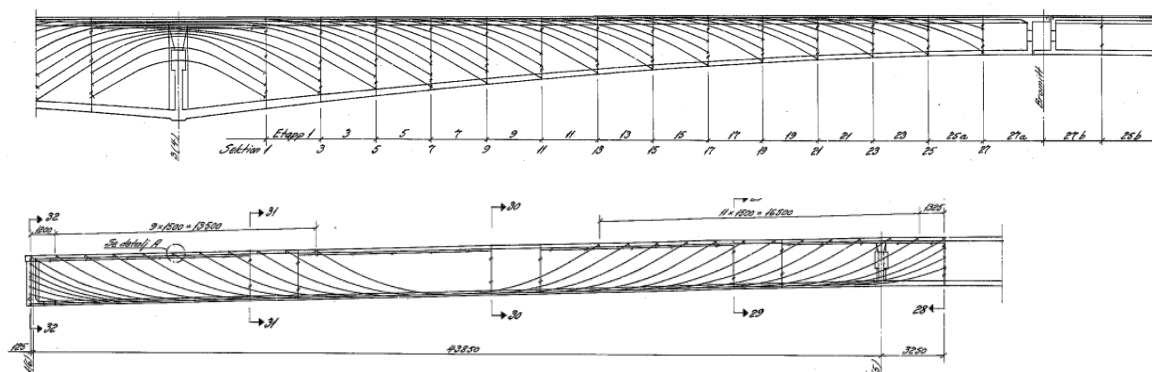
KUVA 4. Siltojen lukumäärien jakauma siltatyypeittäin (Väylävirasto 53/2022, 34)

3 JÄNNITETTY KOTELOPALKKISILTA

3.1 Jännitetty rakenne

Betonin jännittämisellä tarkoitetaan betoniin aikaansaattua puristusjännitystilaa (Mikkola, Nyman & Paasikallio 1986, 2). Betonin kyky sietää puristusta on hyvä, mutta vetoa vetolujuus on vain noin kymmenesosa tästä. Teräs puolestaan kestää vetoa hyvin. Jännitetty betonirakenne muodostuu, kun kohdistetaan betoniin puristusta jänneterästen avulla. (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 204.) Tämä näkyy jänteiden asemoinnissa sillan kannessa. Jännekaapeli sijaitsee vedetyn pinnan puolella (kuva 5). Jännittämisen tavoite on saada aikana tila, jossa betonirakenne pysyy ulkoisesta kuormituksesta huolimatta pääasiassa puristettuna, halkeilemattomana sekä taipumattomana. (Mikkola ym. 1986, 22) Jännittämisen avulla pyritään saamaan aikaan hoikempia rakenteita, jolloin betonin osuus ei kasva ylisuureksi, milloin se olisi luontoa kuormittavaa sekä epätaloudellista. (Betonitieto 2022; Rakennustaito 2016.) Jännittäminen mahdollistaa rakenteen poikkileikkauksen pienentämisen. Tavoitteena on tehdä rakenteesta halkeamaton ja tiivis, jolloin se kestää ulko-olosuhteita pidempään. (Nyblom 2016, 2–3.)

Yleisellä tasolla puhutaan esijännitetystä rakenteesta, mikä tarkoittaa, että rakenne on jännitetty ennen käyttöönottoa. Rakenteen jännittäminen itsessään voidaan tehdä pääasiassa joko esi- tai jälkijännittämällä. Ero näiden välillä muodostuu voiman välittymistavassa (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 204). Yleensä elementit esijännitetään ja paikallavaletut rakenteet jälkijännitetään. (Betonitieto 2022; Rakennustaito 2016.) Esijännittäminen suoritetaan jännettä venyttämällä ennen betonin valamista. Kun betoni on valettu ja kovettunut jänteen ympärille jänne katkaistaan. Esijännitysvoima pysyy rakenteessa betonin ja jänteen välisen adheesio vuoksi. (Lundin, 3; Betonitieto 2022.) Jälkijännittämisessä jänteiden kiristäminen tapahtuu betonivalun jälkeen. Sillassa jännitettävä osa on kansi. Kannen sisään laitetaan muottivaiheessa vaijeriputket joihin jänneteräokset tulevat. Valun valmistuttua ja betonin saavutettua riittävän puristuslujuuden, tehdään jännittäminen eli jännitys vaijerit kiristetään suunniteltuun vetojännitykseen ja lukitaan eli ankkuroidaan. Lopuksi putket injektoidaan sementillä ruostumisen estämiseksi. (Betonitieto 2022; Rakennustaito 2016.)



KUVA 5. Kalixin sillan jännekaapeleiden radat (Kalix Bridge Project 2022)

Jännitetty betonirakenne mahdollistaa pidemmät jännevälit. Kilpailukykyiseksi se tulee teräsbetoniin verrattaessa, kun sillan jännemitta on tieliikenteessä yli 20 metriä ja puolestaan yli 18 metrin raideliikenteen kuormilla. (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 204). Suomessa otettiin jännittäminen käyttöön 1940-luvulla siltarakenteissa (Nenonen 2021).

Esijännitysvoiman säilyminen siltarakenteessa on suuntaa antava tekijä sillan kapasiteetin arvioinnissa. Kalixin projektissa onkin pyritty löytämään keinoja arvioida alkujännitysvoimien häviötä. (Kalix Bridge Project 2022, 45.) Tässä opinnäytetyössä on keskitytty enemmän kuvaamaan tutkimusprosessia kokonaisuudessa syventymättä jännitettyjen rakenteiden toimintaan enemmän.

3.2 Kotelopalkkisilta

Kotelopalkkisilta soveltuu hyvin pitkiin jänneväleihin, kun pääjanteen pituus ylittää 70 metriä. Tämän vuoksi se on hyvä valinta myös vesistösiltoihin. Kotelopalkkisillan etuina voidaan pitää suurta taivutus- ja vääntöjäykkyyttä. Kotelopalkkia voi käyttää myös lyhyimmillä jänneväleillä. Mikäli maantiesilloissa kannen hyötyleveys on alle 14 metriä, voidaan silta toteuttaa yhdellä kotelopalkilla ilman että kansilaattaa tarvitsee jännittää poikittain. Kotelo muotona aikaansaa sen, että pääsuunnan taivutus- ja vääntöjännitykset jakautuvat koko poikkileikkaukselle. Leveämpiin siltoihin toteutetaan useammasta kotelosta muodostuva kantava rakenne. Suomessa kotelopalkkisiltaa on käytetty kaksiraiteisten rautatiesiltojen toteutuksessa hyvien jäykkyysominaisuuksiensa vuoksi. (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 53–54.)

Rakentaminen toteutetaan usein tekemällä alalaatta ja seinät ensin ja kansilaatta erikseen. (RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 53–54.) Toinen vaihtoehto toteuttaa on tasapainotettu ulokemenetelmä, mikä tarkoittaa, että tuen kummallekin puolelle lisätään betonisegmenttejä saman tahtisesti. Yleisesti tasapainotetussa ulokemenetelmässä segmentit ovat pituudeltaan 3–6 metriä pitkiä ja ne voivat olla joko elementtejä tai paikalla valettuja. (Lundin 2021, 4.)



KUVA 6. Näkymä Kalixin sillan jännevälistä viisi. Silta muodostui yhdestä kotelopalkista. (Roslöf 2022)

3.3 Kalixin silta

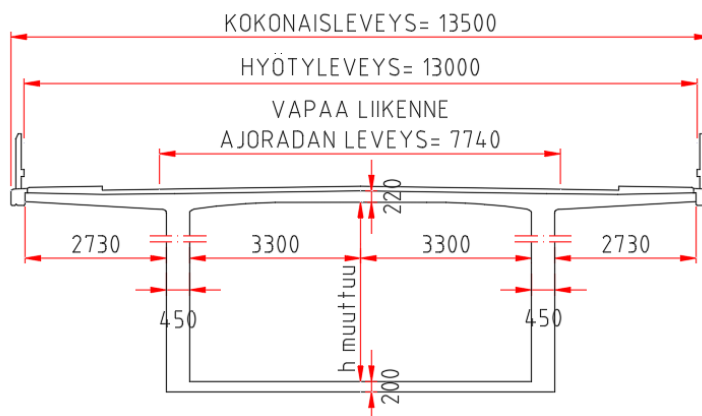
Kalixin tutkittava silta (kuva 7) purettiin vuonna 2022. Se on mitoitettu vuoden 1955 määräysten mukaan. Tiedot sillan materiaaleista ja geometriasta ovat peräisin Kalix Bridge Project:n raportista sekä rakennusaikaisista kuvista ja dokumenteista.



KUVA 7. Uusi Kalix-joen ylittävä silta vasemmalla ja tutkittu silta oikealla (Roslöf 2022)

3.3.1 Materiaalit ja geometria

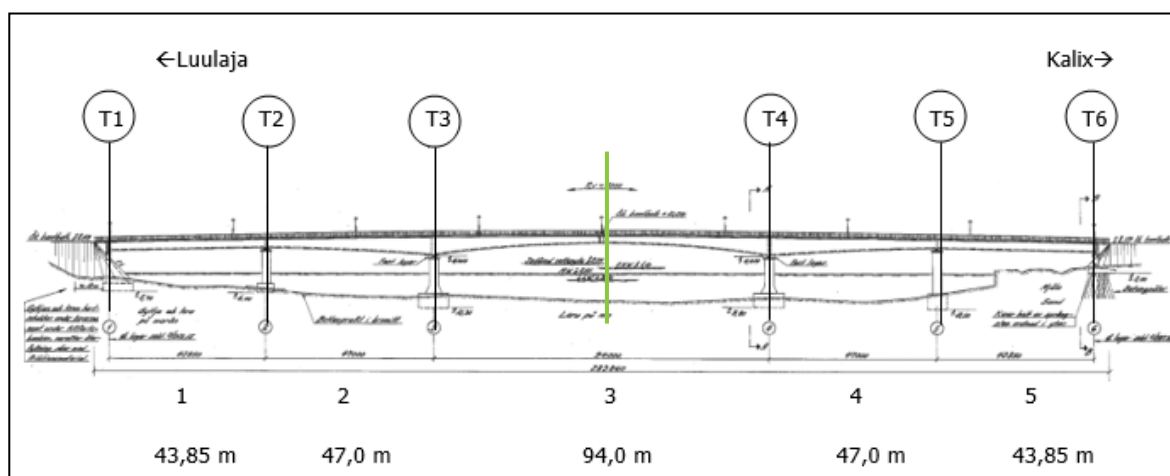
Kalixin silta on 5-jänteinen esijännitetty betonisilta, jonka rakenne koostuu yhdestä kotelopalkista. Sillan kokonaispituus on 283,86 metriä ja hyötyleveys on 13 metriä. Hyötyleveydellä tarkoitetaan mitta, mikä jää siltakaiteiden sisimmäistäisten osien väliin kohtisuoraan (kuva 8). Silta on symmetrinen keskikohdan suhteen sillan pituuden suuntaan. Kotelopalkin geometriassa vain palkin korkeus h muuttuu sillan pituuden matkalla sekä pohjalaatan paksuus kasvaa 500 mm:iin jännevälissä kolmentäessä kohti sillan keskikohtaa. Muuten sillan poikkileikkaus pysyy muuttumattomana.



KUVA 8. Sillan yleinen poikkileikkaus (Roslöf 2023)

Pisin jänneväli sijaitsee keskiaukossa ja se on 94 metriä. Sillan puolikkaat ovat kiinni nivelellisesti toisissaan. Jännevälit 1 ja 5 ovat uloimpia ja välit 2 ja 4 sisempiä jännevälejä. Tukien 3 ja 4 väliä kutsutaan tässä työssä konsoliksi. Puolikkaan konsolin pituus on sama kuin sisempien jännevälien eli 47 m. Sillan pituusleikkauskuvassa (kuva 9) on esitetty tukilinjat sekä jännevälien mitat. Vihreällä viivalla on merkitty sillan keskikohta, jonka suhteen silta on peilikuva. Kalixin tutkimuksissa pääpaino oli jänneväliässä viisi kuten myös tässä opinnäytetyössä.

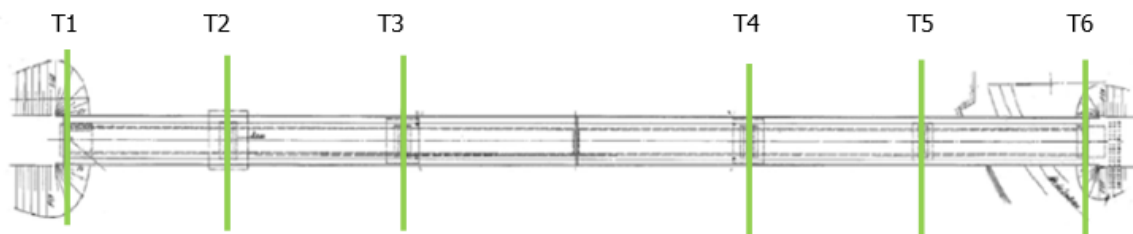
Päällysrakenteen betoni Kalixin sillassa on luokkaa K45. Sillan betonin laatua on arvioitu vanhojen piirustusten sekä jatkuvan testauksen perusteella rakennusvaiheessa. Sillan valu on toteutettu osissa. Uloimmainen jänneväli on valettu 11:ssä vaiheessa, sisempi jänneväli 14:ssä ja konsoli 15:ssä vaiheessa. Sisäjänne ja konsolin puolikas on valettu saman tahtisesti tasapainotetulla uloke-menetelmällä. (Kalix Bridge Project 2022, 12–15.)



KUVA 9. Alkuperäisten suunnitelmien mukainen kuva Kalixin sillan pituusleikkauksesta. (Kalix Bridge Project 2022.)

3.3.2 Tuet ja laakerointi

Sillan vinous on määritelty RIL 179-2018 Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito, s 40 seuraavasti: "Sillan vinous on päällysrakenteiden tukilinjan ja sillan keskilinjan normaalin välinen kulma". Tukilinjat ovat 100 gonin eli 90 asteen kulmassa siltaan nähden eli 0 astetta sillan keskilinjan normaaliin, jolloin sillan vinous on 0 gon. (RIL 179-2018 Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito, 3). Mikäli se olisi tästä poikkeava arvo, sillalla olisi vinoutta. Tukilinjat ovat esitettynä kuvassa 10.



KUVA 10. Sillan tukilinjat (Kalix Bridge Project)

Laakerointi mahdollistaa sillan kannen liikkumisen ja elämisen niin, että liikkeet ja kuomitukset, jotka välittyvät alusrakenteille ja näitä pitkin maahan ovat hallittuja, eivätkä aiheuta halkeilua ja muita vaurioita rakenteisiin. Toiminnan perusteella laakerit voidaan jaotella yhteen ja kahteen suuntaan liikkuviin sekä kiinteisiin laakereihin. Kiertyminen on yleensä sallittu kaikilla laakereilla vähintään päätaivutustasossa. Laakereiden alla sijaitsee yleensä laakerikoroke. (Silko 1.352. Laakerit ja nivelet 3/2021, 4.)



KUVA 11. Sillan tuet. (Roslöf 2022)

Kuvassa 11 on vasemmalla esitettynä kiinteä tuki, joka on tuilla 3 ja 4. Keskimmaisessä kuvassa on rullalaakerit, jollaiset ovat tuilla 2 ja 5. Oikealla on kuva päätytukien 1 ja 6 rullalaakereista. Rullalaakerit ovat poikittaisen liikkumisen rajoittavat ja sillan pituussuuntaisen liikkeen mahdollistavat laakerit. Rullalaakereita ei nykyään suunnitella uudiskohteisiin ja vanhoissa silloissakin ne usein kovataan, koska pieniläpimittaisissa Kreuz-teräslaakereissa on tullut ilmi vaurioita, joiden seurauksena laakerit voivat haljeta (Silko 1.352. Laakerit ja nivelet 3/2021, 7). Tuet 3 ja 4 ovat jäykkiä ja niillä on kiinteät laakerit. Kiinteät teräslaakerit estävät kannen liikkeen

kumpaakin suuntaan toimien sen sijaan nivelinä. (Silko 1.352. Laakerit ja nivelet 3/2021, 8.) Kalixin sillan keskiosa on rakennettu konsoliksi ja sen liike on rajoitettu vain x-suunnassa. Kuvassa 12 on esitetty puolikkaan sillan tuennat sekä punaisella värillä myös paikat, joiden betoninäytteitä tullaan tutkimaan laboratoriossa, joista vielä ei ole tuloksia saatavilla.



KUVA 12. Kuvassa esitetty tuennat sillan puolikkaalle (Kalix Bridge Project 2022, 164)

4 SILLAN KUNNON ARVIOINTI

4.1 Kunnan määrittely ja seuranta Suomessa

Suomessa siltojen kuntotietoja kerää Väylävirasto, mikä julkaisee vuosittain myös tilastotietoja silloista (Väyläviraston sillat 31.12.2021, 9). Sillat voidaan jakaa tiesiltoihin, rautatiesiltoihin sekä ja putkisiltoihin. Suomessa käsitteellä silta kutsutaan rakennetta, joka johtaa liikenteen esteen yli ja jonka vapaa-aukon koko on vähintään kaksi metriä. (Liikennevirasto 2013, 10.) Väyläviraston omistuksessa vuoden 2021 lopussa oli 15117 tiesiltaa. Yhteensä Suomessa tie- ja ratasiltoja oli noin 17600 kappaletta ja yleisillä teillä (myös katu- ja kaavatiet) olevien siltojen määrä oli noin 20500 (Väyläviraston sillat 31.12.2021, 9; RIL 179-2018. Sillat- suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018, 369). Siltojen tarkastuksesta Suomessa vastaa ELY-keskus. Tarkastuksen perusteella päätetään tarvittavista toimenpiteistä sillan kunnon, ulkonäön ja kantavuuden parantamiseksi sekä käyttökunnon ja liikenneturvallisuuden ylläpitämiseksi.

Sillat kuuluvat taitorakenteina Väyläviraston pitämään taitorakennerekisteriin. Taitorakennerekisteri korvasi Siltarekisterin vuonna 2017, jonne ennen siltatiedot päivitettiin. (Väyläviraston sillat 31.12.2021, 3.) Liikenneviraston julkaisema Taitorakenteiden tarkastusohje (LO 17/2013) määrittelee taitorakenteet seuraavasti: *"Taitorakenteita ovat kaikki sellaiset rakenteet, joiden rakentamiseksi on laadittava lujuuslaskelmiin perustuvat suunnitelmat ja/ tai joiden rakenteellinen vaurioituminen suunnittelu- tai rakennusvirheen seurauksena saattaa aiheuttaa vaaraa ihmisille tai liikennejärjestelmälle ja merkittäviä korjauskustannuksia rakenteelle tai sen välittömälle ympäristölle"*. Rekisteri sisältää perustiedot rakenteista sekä niiden kantavuudesta. Sinne kirjataan myös tarkastus- ja korjaustiedot sekä historiatiedot. Muita tie- ja rautatiesiltojen ohella taitorakenteiksi luettavia rakenteita ovat esimerkiksi tunnelit, tukimuurit, laiturit sekä paalulaatat. (Liikennevirasto 2013, 5.) Ruotsissa vastaava sillanhallintajärjestelmä on BaTMan (Kalix Bridge Project 2022, 83).

Silloille tehdään kunnon kartoittamiseksi erilaisia tarkastuksia. Vuosittain tehdään silmämääräiset vuositarkastukset ja ne kuuluvat osaksi siltojen hoitoprosessia. Vuositarkastukset kuuluvat alueurakoitsijalle. (Väylävirasto 2019.) Silloille tehdään noin joka viides vuosi myös yleistarkastus. Yleistarkastusta ohjaa Taitorakenteiden tarkastusohje, Sillantarkastuskäsikirja sekä Yleistarkastuksen laatuvaatimukset. (Liikennevirasto 2013, 10.) Tarkastus myös kirjataan taitorakennerekisteriin. Yleistarkastuksista saatavan tiedon avulla voidaan seurata siltojen kuntoa ja ohjelmoida ylläpito- ja korjaustoimenpiteitä. (Liikennevirasto 2013, 55.) Ruotsissa silloille tehtävä päätarkastus suoritetaan joka kuudes vuosi (Kalix Bridge Project 2022, 83). Suurille silloille tai tavanomaista vaativimmille kohteille, joita ei ole mahdollista tavanomaisessa yleistarkastuksessa tarkistaa, vaan joiden tarkastamiseen vaaditaan erikoiskalustoa ja -järjestelyjä, suoritetaan laajennettu yleistarkastus noin joka kahdeksas vuosi. (Liikennevirasto 2013, 65.)

Mikäli sillan kunnossa yleistarkastuksen yhteydessä ilmenee tarkastajan laatiman kuntoarvioraportin mukaan korjaustoimenpiteitä tai lisätietoja vaatia kohtia, tehdään sillalle erikoistarkastus. Erikoistarkastuksessa otetaan tutkimusnäytteitä sillasta, kun taas yleistarkastus on silmämääräinen tarkastus. Erikoistarkastuksesta saadaan korjaussuunnittelulle pohjatiedot. (Liikennevirasto 2013, 68.)

Siltojen tarkastaminen tulee suorittaa vuodenaikana, jolloin se on järkevää ympäristöolosuhteet huomioiden, esimerkiksi vedenkorkeus tulee huomioida tarkastusta suunniteltaessa. Muita huomioitavia asioita on myös liikenne, joka tulee järjestää myös niin, että työ on turvallista tehdä. Osaa tarkastettavista rakenteista voi olla hankalaa tai mahdotonta päästä tarkastamaan ilman telineitä tai erikoisvälineitä. Kaikki nämä aiheuttavat kustannuksia sekä niihin voi liittyä epätarkkuutta. Kalixin silta-hankkeessa onkin ollut tavoitteena tutkia rakenteita rikkomatonta tekniikkaa kartoittamaan rakenteen vaurioita. (Kalix Bridge Project 2022, 83.)

4.2 Kunnonarvioinnin tavoitteet ja keinot Kalixissa

Kuten kappaleessa 2.1 todettiin, on Kalixin sillaprojektissa tavoitteena ollut tutkia sillan kuntoa usealla rakennetta rikkomattomalla menetelmällä vaurioiden kartoittamiseksi ja kunnon selvittämiseksi. Ruotsissa käytössä olevan normaalin päätarkastuksen lisäksi projektissa sovellettiin virtuaalista tarkastusta sillan sisältä käsin. Tavoitteena tämäntapaisen tarkastuksen kehittämiseksi olisi, että tarkastavan konsultin ei tarvitsisi olla paikan päällä vaan kerätty data voitaisiin digitaalisessa muodossa. Tähän toki liittyy paljon avoimia kysymyksiä ja haasteita. (Kalix Bridge Project 2022, 83.)

Tutkimusmenetelmät jakautuvat ainetta rikkomattomiin (NDT) ja ainetta rikkoviin testimenetelmiin. Rikkomaton testaus ei vaaranna sillan käytettävyyttä tai kapasiteettia. (Kalix Bridge Project 2022, 42). Betonin puristuslujuuden määrittäminen on usein korjausrakennuskohteessa työläästä ja haastavaa. Jotta saataisiin luotettavia tuloksia, tulee ottaa poralieriönäytteitä puristuskoeanalyysiä varten. Näytteenotossa tulee varoa olemassa olevia raudotteita. (Junkkari 2019, s. 6)

4.2.1 Virtuaalinen tarkastus

Sillan sisä rakenteet kuvattiin käyttämällä Agisoft PhotoScan Pro -ohjelmistoa ja järjestelmäkameraa. (Kalix Bridge Project 2022, 83). Agisoft on itsenäinen fotogrammetrinen ohjelmisto maastojen ja pintojen kuvaamiseen. Kuvat muutetaan digitaaliseen muotoon ja muodostetaan pistepilviä pinoista. Näin on mahdollista luoda 3D -malleja, joita voidaan vielä jälkikäteen muokata. (Agisoft 2017.) Tarkkuus kuvauksiin määrittyi Ruotsin Liikenneviraston, Trafverket:n asettamista vaatimuksista, joiden mukaan suositeltava resoluutio tulee olla vähintään 0,1 mm:n halkeaminen havaitsemiseksi sopiva. Haasteena kuvaamisessa olivat kapea kotelopalkin sisätila ja valaistusolosuhteet. Tämän vuoksi käyttöön otettiin tasaisen valaistuksen tuottava valokaapeli. Kuvat otettiin 1,5 m etäisyydeltä 1,5 m välein, jotta saatiin tarpeeksi päällekkäisyyttä kuviin. Lopuksi uloimman jännevälän, välin 5–6, skannatut kuvat kummastakin kotelopalkin puolikkaasta yhdistettiin yhtenäisiksi poluiksi jännevälän suhteen. (Kalix Bridge Project 2022, 83.)

Ongelmana lopputuloksissa oli, että virtuaalimallia ei pysty tarkentamaan, joten mallia olisi hyvä täydentää korkearesoluutioisella 3D mallilla kriittisiltä osin. Hyötynä tekniikassa on autonominen halkeamien havaitseminen. Ohjelma tunnistaa ja merkitsee halkeamia, joita voi paljain silmin olla vaikea havaita. Tämä vaatii kuvattavan pinnan olevan suhteellisen puhtas. Menetelmä voi kehittämisen myötä olla hyvä apu tarkastuksiin. (Kalix Bridge Project 2022, 90.)

4.2.2 Ainetta rikkomaton testaus ja arviointi

Ainetta rikkomaton testaus ja arviointi tunnetaan myös lyhenteenä NDT & E, mikä tulee sanoista Non-Destructive Testing & Evaluation. Tässä kappaleessa on käyty läpi hankkeessa käytetyt laitteet sillan rakenteen kunnon selvittämiseksi ja jännekaapeleiden sekä raudoitusten paikantamiseksi.

Kimmovasara

SilverSchmidt. Kimmovasara on betonin tasaisuuden ja puristuslujuuden määrittämiseen tarkoitettu, paljon käytetty työkalu. Toiminta perustuu paluuiimpulssin muuntamiseen puristuslujuuden arvoksi. (Kalix Bridge Project 2022, 92.) Se toimii seulontatestauksena, jonka avulla voidaan heikot kohdat paikallistaa, mutta tarkemmat kokeet tulee tehdä porakappalein. Testattavasta kohdasta tulee ottaa vähintään yhdeksän kimmoarvoa, joista lasketaan mediaani (kuva 13). Kimmoarvojen perusteella voidaan määrittää lujuusluokka, mutta tuloksissa esiintyy suurta hajontaa, minkä vuoksi se luotettavuus on saanut osakseen kritiikkiä. (Pukki 2022.)

Kimmovasaraa käytettiin Kalixin sillan tutkinnassa puristuslujuuden sekä betonin materiaalin yhdenmukaisuuden arvioimiseen. Tutkimuspaikka sijaitsi neljän metrin päässä päätytuelta 6. Yhteensä mitattiin 5 sarjaa, joista kolme oli sillan keskitasossa korkeudeltaan, yksi mittaussarja yläpuolella ja yksi alapuolella. Betonin puristuslujuuden mediaaniksi saatiin 68 MPa, standardipikkeama oli 3 MPa. Mittaustuloksissa ei havaittu merkittäviä eroja palkin ala- ja yläpuolen välillä. (Kalix Bridge Project 2022, 92).



KUVA 13. Kimmovasara (Kalix Bridge Project 2022, 92)

Ultraäänen nopeusmenetelmä

Ultrasonic Pulse Velocity, UPV. Pundit PL200. Ultraäänen käyttöön perustuva ultraäänipulssin nopeusmenetelmä on myös ainetta rikkomaton menetelmä, jota voidaan käyttää betonin kunnan arviointiin eri keinoin. (Screening Eagle 2022). Ultraääniksi kutsutaan ääntä, joka on taajuudeltaan ihmisen kuuloalueen yläpuolella, eli yli 20 kHz. Se tarvitsee väliaineen liikkuaakseen, koska se on atomien mekaanista aaltoliikettä. Tyhjiössä ultraääni ei kulje lainkaan ja sen liikenopeus riippuu väliaineesta. (Koskela 2011, 8.) Ultraääni heijastuu, siroaa ja taittuu aineiden rajapinnasta ja tähän perustuu sen käyttö tutkimuksissa eri aloilla.

Tässä tutkimuksessa sen avulla mitattiin halkeamien syvyyden kokoa. Menetelmässä mitataan aika, mikä ultraäänellä kestää kulkea mitattava polku, eli tässä tapauksessa kauanko kestää, kun ultraääni on kiertänyt halkeaman. Ultraääni ei etene halkeamassa vaan koska se tarvitsee väliaineen edetäkseen, se liikkuu betonissa. Mittauksessa halkeaman toiselta puolen synnytetään ultraääniaalto, joka rekisteröidään sen kuljettua halkeaman vastakkaiselle puolelle. Mittausasetelma esitetty kuvassa 14. Nopeusmenetelmä vaatii pääsyn mittaamaan kummaltakin puolelta, ja tällä hetkellä onkin kehitteillä ultraäänikaikumenetelmä, mikä mahdollistaa sellaisten kohteiden mittauksen, joissa on pääsy vain toiselle puolelle mittaamaan. (Kalix Bridge Project 2022, 93.)



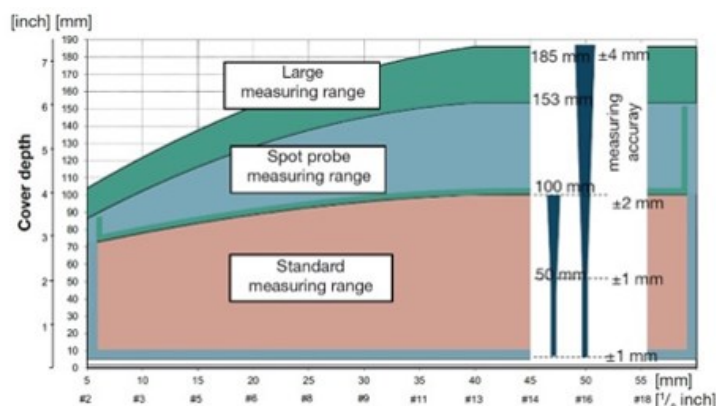
KUVA 14. Halkeaman kiertoajan mittaaminen ultraäänen avulla (Kalix Bridge Project 2022, 93)

Halkeaman syvyyden arvot olivat suurempia poranäytteisiin verrattuna. Keskimääräisen halkeamasyvyys poranäytteissä oli noin 80 mm, kun taas uä-tekniikalla saaduissa mittauksissa 116 mm. Ero saattoi johtua halkeamaa ympäröivästä tiheästä raudoituksesta, mikä muutti uä-aallon nopeutta. Toisaalta eroa voi aiheuttaa myös se, että halkeama jatkuu pidemmälle, mitä paljaalla silmällä pystyi poranäytteistä havainnoimaan. (Kalix Bridge Project 2022, 93.)

Peitemittari

Profometer 650AI. Peitemittari ilmaisee betonipeitteen paksuuden ja betonissa sijaitsevan pinta-raudoituksen. Peitemittareiden toiminta raudoitustankojen havainnoimisessa perustuu sähkömagneettiseen pulssi-induktiotekniikkaan. Laitte muodostaa virtaimpulssien avulla magneettikentän. (Screening Eagle 2022a.) Asetuksista riippuen, kuten kuvasta 15 käy ilmi, pienin havaittava raudoitustanko 70 mm betonipeitteen sisässä on 6 mm halkaisijaltaan. Raudoituksia, joiden halkaisija on paksumpi, voidaan havaita syvemältä, mikäli raudoitukset eivät ole hyvin tiheät. (Kalix Bridge Project 2022, 95.)

Laitetta voidaan käyttää myös korroosion todennäköisyyden arviointiin. Tässä hankkeessa mitattiin pintaraudoituksen sijaintia läheltä tukea 6. Mittaukset varmistettiin maatutkalla. Pystysuoran raudoitusvälin keskiarvo oli 200 mm ja 170 mm etelän puoleisessa seinässä ja 170 mm pohjoisen puoleisessa seinässä. Betonipeitteen paksuudeksi vastaavasti saatiin 13,6 mm ja 17,7 mm. Seinämien vaakaraudoituksen todettiin olevan 160 mm:n jaolla. Kannen poikkiraudoitus oli 160 mm:n välein. (Kalix Bridge Project 2022, 95.)

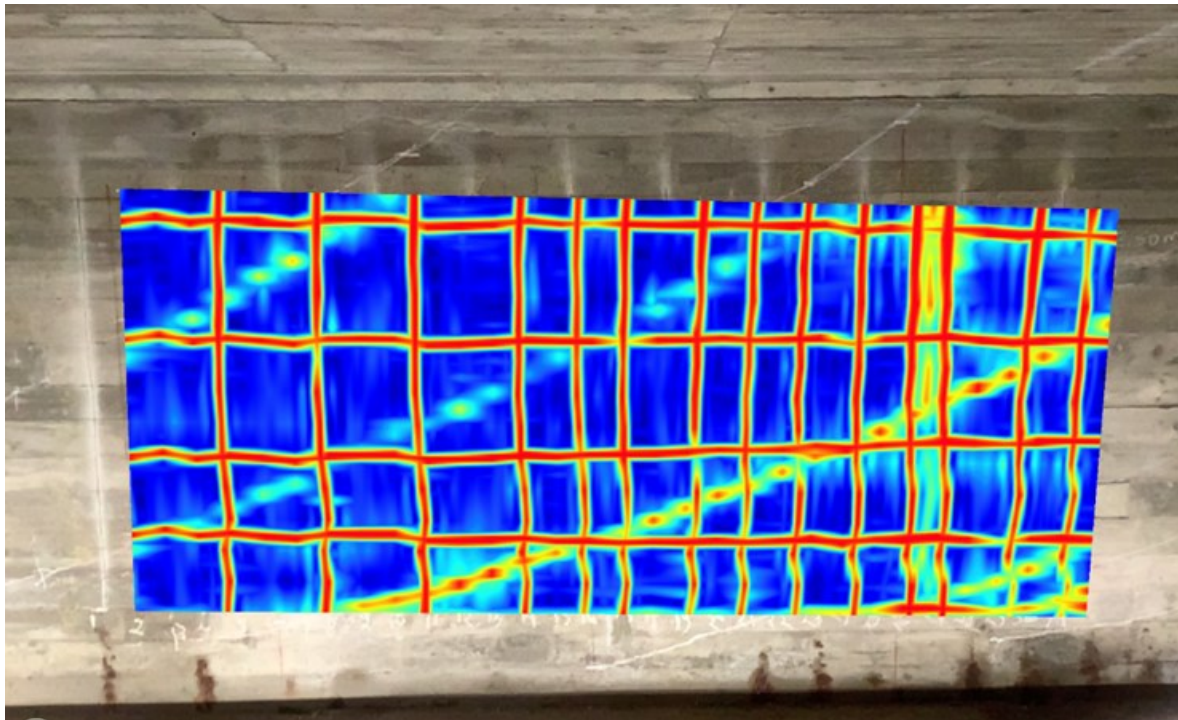


KUVA 15. Vasemmalla mittaustilanne peitemittarilla. Oikealla on esitetty peitemittarin mittaustarkkuutta sekä syvyyttä peitesyvyyden ja raudoituksen koon muuttuessa. (Kalix Bridge Project 2022, 96.)

Maatutka

Ground Penetrating Radar, GPR. Proceq GP8000. Maatutkan avulla on mahdollista paikantaa ja mitata raudoituksen syvyys sekä jännekanavat. Sitä voidaan käyttää myös paikantamaan tyhjiöitä betonilaattojen alla sekä selvittämään maapeitteen paksuutta ja kalliopinnan syvyyttä. Kalusto valitaan sen mukaan, miltä syvyydeltä paikannettavaa tietoa halutaan. Korkeataajuisilla antennilla syvyysluotaus on alle metrin, mutta yksityiskohtainen, kun taas matalilla taajuuksilla tietoa pinnoista voidaan saada jopa useaan kymmeneen metrin syvyyteen saakka. (Suomen Maatutkapalvelu; Kalix Bridge Project 2022, 98.) Tulosten luotettavuuden takia tulkintaa tulisi harjoittaa siihen erikoistuneen henkilön. Maatutkan toiminta perustuu antennin materiaaliin lähettämiin sähkömagneettisiin pulsseihin. Toisistaan poikkeavien materiaalien rajapinnat heijastavat osan pulssien energiasta takaisin, mikä havaitaan vastaanottimella. (Ruotanen 2012, 3.)

Tässä tutkimuksessa maatutkaa käytettiin pintarauhoituksen ja jännekaapeleiden paikantamiseen jännevälissä viisi, missä suoritettiin myös muita tutkimuksia. Maatutkakartoitusta pidettiin varmistuksena muille mittauksille. Kuvassa 16 on maatutkamittauksella useasta viivaskannauksesta muodostettu kuva yhdistettynä mittauspäivän valokuvaan. Kuvassa näkyvät kotelopalkin seinän pysty- ja vaakarauhoitukset sekä jännekaapelit. (Kalix Bridge Project 2022, 98.)

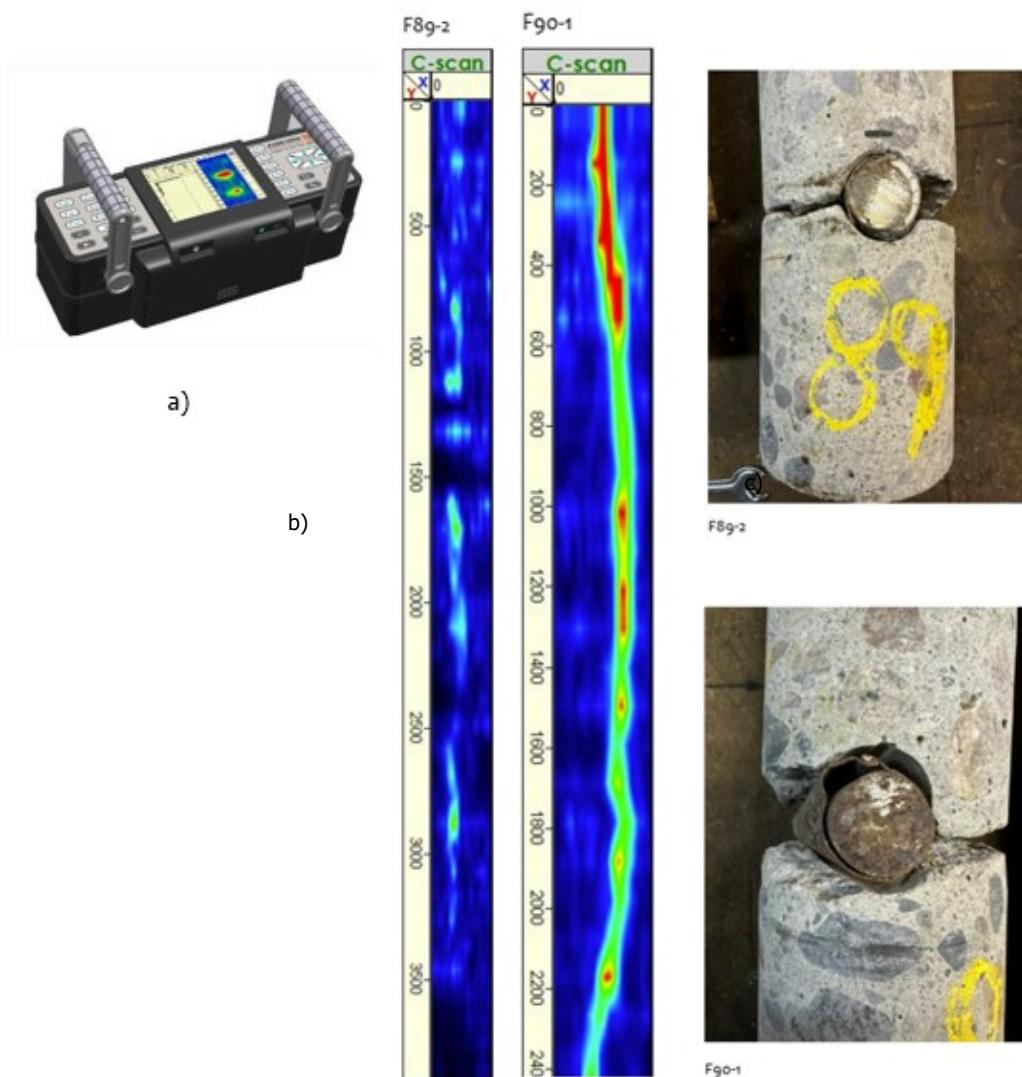


KUVA 16. Maatutkamittauksella muodostettu kuva yhdistettynä mittauspäivän valokuvaan (Kalix Bridge Project 2022, 98.)

MIRA- ultraäänitomografia

MIRA:n toiminta perustuu matalataajuisen, ~25–85 kHz, ultraäänen käyttöön. Etuna on kuvantamissyvyys mikä voi olla jopa 2,5 metriä materiaalista riippuen. (Kiwa julkaisu aika tuntematon.) Ultraäänen leikkausaallon heijastuksen perusteella muodostetaan 3D-kuva tietokoneavusteisesti. MIRA- ultraäänitutkimukset perustuvat lähetetyn ultraääniaallon taittumiseen ja heijastumiseen epäjatkuuskohtassa. Anturirivi lähettää signaaleja, jotka muut anturirivit vastaanottavat siten, että jokainen anturirivi toimii lähettimenä vuorollaan ja palaava aalto rekisteröidään. MIRA:a voidaan käyttää siltojen kuntoa tutkittaessa betonin vaurioiden paikantamiseen, kuten halkeamien ja tyhjätilojen, mutta myös putkien ja kaapeleiden paikantamiseen. (Koskela 2011, 16; Kalix Bridge Project 2022, 99). Mittausdatan tulkitsijalla tulee olla kokemusta käytännön tutkimuksesta sekä tietoa tutkituista ja avatuista rakenteista. MIRA-tutkimuksia on käytetty kartoittamaan betonirakenteiden kuntoa sekä jännitettyjen siltojen kuntotutkimuksiin. Sen avulla voidaan tutkia jänneterästen suojausputkien injektioinnin onnistumista, mikä puolestaan vaikuttaa terästen korroosioherkkyyteen. (Koskela 2021, 3)

Kuvassa 17a on esitetty MIRA-mittalaite. Kvanttamalla saadut ultraäänitomografiakuvat esijännitys-kaapeleista näkyvät kuvassa b missä vasemmalla on esijännityskaapeli F89-2, jonka injektointi on kunnossa ja oikealla kaapeli F90-1, jossa on tyhjää tilaa suojauputuksessa. Punaiset alueet osoittavat intensiivisiä heijastuksia, eli rajapinta kahden materiaalin välissä on ollut huomattava F90-1 kaapelissa. Tällainen rajapinta on esimerkiksi betoniin verrattuna ilma. Myös teräs erottuu betonista. C-kohdassa näkyvät vastaavat kuvat otetuista betoniporanäytteistä. Ylhäällä oikealla kuvassa on lieriönäyte F89-2 mikä varmistui näytteenotolla olevan kunnossa injektoinnin puolesta ja alhaalla F90-1, missä on tyhjää ilmatilaa suojauputuksessa, jonka injektointi on ollut riittämätön.



KUVA 17. Ultraäänitomografiatulosten vertailu poranäytteisiin (Kalix Bridge Project 2022, 104–107)

Ultraääniskannaus

Elop Insight Rolling Ultrasound Scanner. Käytössä sillan tutkimuksissa oli myös ultraääntä hyödyntävä Elop Insight -ultraäänitutkimuslaite, joka on suunniteltu liikuteltavaksi pyörillä (kuva 18). Laite on suunniteltu betonirakenteiden skannaamiseen. Ultraäänianturit lähettävät ja vastaanottavat akustisia signaaleita ja muodostavat kohteesta 3D kuvan. Käytössä on pilvipohjainen sovellus, jonne kerätty data lähetetään ja mistä se on tarkasteltavissa. Laitteella pystytään havaitsemaan betonirakenteen jännekanavat ja teräkset, halkeamat, ilmatyhjiöt sekä arvioimaan betonin paksuutta ja tiheyttä.

Sillan seinän jännekanavat saatiin paikannettua. Tutkimuksissa kävi ilmi, että varmuudella ei voitu osoittaa, onko jännekanavissa reikiä, todennäköisesti kanavien pienuuden vuoksi sekä reikien pienen koon vuoksi. Skannaustaajuutena täytyi betonirakenteen ja pinta-alan vaihtelun vuoksi käyttää alinta taajuutta, jonka tarkkuus oli pienin. (Kalix Bridge Project 2022.)

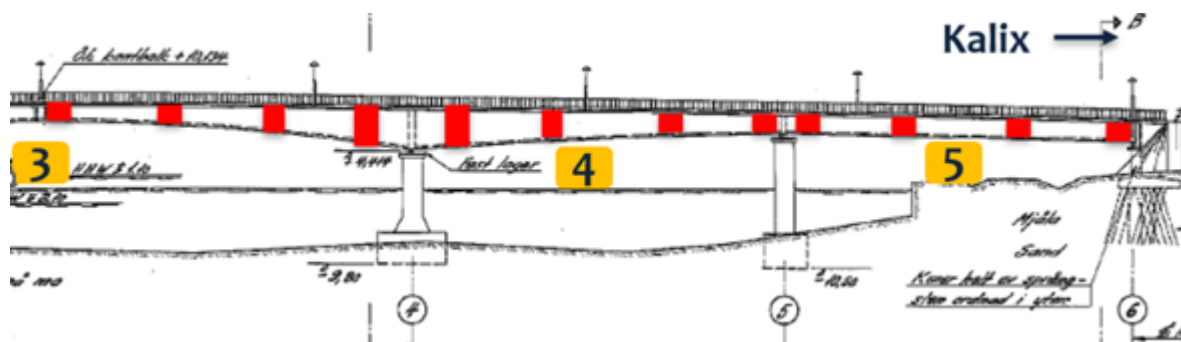


KUVA 18. Elop Insight (Elop.no)

4.2.3 Ainetta rikkovat menetelmät

Betonimittaukset

Betoniytimien koekappaleet tulisi ottaa kohdista, jossa ei ole raudoitusta eli käytännössä läheltä elementtien reunoja ja liitoksia. Koekappaleiden määrälle ei ole suoraa suositusta, vaan määrä riippuu suunnittelijan näkemyksestä, sillä perusteella, mitä koekappaleista halutaan saada irti ja millaiset resurssit tutkimuksille on. Olemassa olevista silloista voidaan ottaa suhteellisen pieni määrä näytteitä ytimistä. Tämän vuoksi kohdat on tärkeä valita edustamaan hyvin testattavaa aluetta. Alla olevassa kuvassa 19 on esitetty paikat, joista näytelieriöt porattiin.



KUVA 19. Poraliieriönäytteiden ottokohdat (Kalix Bridge Project 2022, 119)

Näytteet otettiin jänneväleistä kolme, neljä sekä viisi, jokaisesta merkitystä kohdasta 9 ydintä samasta palkin kohdasta (seinä, pohja- ja ylälaatta) (kuva20). Näistä yhdeksästä näytteestä kolmelle tehtiin puristustesti, kolmen avulla määritettiin kimmomoduuli ja kolmella murtumisenergia. Yhteensä näytteitä otettiin 108 kappaletta. Suunnitelluista kohdista mitattiin betonin lujuus ensin kimmovasaralla. (Kalix Bridge Project 2022, 119–120.) Betoninäytteiden koetuloksia ei ollut opinnäytetyn kirjoitushetkellä saatavilla.



KUVA 20. Kuvassa vasemmalla on kuvattuna näytteenotto betonista. Oikealla on esitetty otettuja näytekappaleita (Kalix Bridge Project 2022, 119–120).

5 KUORMITUSKOKEET

5.1 Yleistä siltojen kuormittamisesta

Sillan koekuormittaminen on vanha ja käytetty tapa sillan kantavuuden arviointiin. Sitä tehtiin järjestelmällisesti Ruotsissa silloille 1960-luvulle saakka, jolloin siitä luovuttiin, koska oli saatu riittävästi tietoa suunnittelun ohjeisiin eikä ne tuottaneet uutta tietoa. Lisäksi kuormitusten järjestäminen on kallista. Kun vanhan sillan kantavuuskykyä nykyajan kunnossa ja suuremmilla kuormilla arvioidaan, on usein tehtävä arvioita materiaalien kunnosta ja oletuksia rakenteiden toiminnasta. Jotta voitaisiin vähentää oletuksia, suoritetaan silloille erilaisia kuormituskokeita. Kuormituskokeita on kolme päätyyppiä: Diagnostiset testit, koekuormitukset (proof load) ja murtumiskokeet. (Kalix Bridge Project 2022, 7.)



KUVA 21. Kuva Tanskassa 2021 suoritetusta kuormitustestistä (DTU)

Tanskan tievirasto yhdessä konsulttiyhtiön kanssa suoritti vuonna 2016–2017 Tanskassa suuren määrän kuormitustestejä tietyn tyyppisille betonisille tiesilloille niiden maksimikantavuuden määrittämiseksi (kuva 21). Tavoite oli saada tarpeeksi suuri otanta siltoja tutkittua, jotta voitaisiin saada luotettava kuva siltojen kunnosta. Koekuormitusten nopeuttamiseksi ja kuormien vakioimiseksi niihin kehitettiin oma laitteisto. Tuloksena tässä projektissa oli, että sillat kestivät enemmän kuin mitä niiltä odotettiin. Tärkeää tässä projektissa oli myös instrumentoinnin ja kuormitusten yhteys, että kokeet saatiin pysäytettyä riittävän aikaisin, ennen kuin materiaalivaurioita oli aiheutumassa. (DTU julkaisu-aika tuntematon.)

Diagnostisessa testissä siltaa kuormitetaan alhaisilla kuormitustasoilla rakenteen vastetta mitaten. Saatuja mittaustuloksia verrataan analyttisesti ennustettuun vasteeseen, joka saadaan elementtimallista, mikä sillasta on tuotettu. Näiden mittaustulosten erot minimoidaan päivittämällä mallia mahdollisilta osin. (Lantsoght 2020, 2.)

Koekuormituksessa siltaa kuormitetaan laskennallisella tavoitehyötykuormalla, joka on kuitenkin murtorajatilakuormaa pienempi. Suunnitteluvaiheessa tulee elementtimallin avulla määrittää, epäedullisin asema kuormalle suurimman mahdollisen vaikutuksen saamiseksi. (Lantsoght 2020, 6.) Jos silta kestää koekuormituksen ilman merkkejä häiriöistä, voidaan testin katsoa onnistuneen eikä lisättestausta enää tarvita. Testi suoritetaan usein käyttämällä täydessä kuormassa olevia rekkoja, jotka ajavat hitaasti tasaisella vauhdilla ja pysähtyvät ennalta määrättyihin pisteisiin. Silta

instrumentoidaan ja seurataan reaaliajassa kuormittamisesta aiheutuvia muutoksia, eli sillan liikumista ja siltaan kohdistuvia voimia. Reaaliaikainen seuraaminen on tärkeää, että koe voidaan pysäyttää, mikäli ennakkoon määritetyt epälineaarisen käyttäytymisen merkit täyttyvät eli silta alkaa olemaan vaurioitumisen kynnyksellä. (Lantsoght 2020, 1.) Koekuormituksen tarkoitus on kuitenkin osoittaa toteen, että silta täyttää kohteesta riippuen vaaditun kapasiteetin ilman, että siitä aiheutuu vaurioita tai sillan rikkoontumista (Cai & Shahaway 2003, 3).

Kolmas kuormittamisen tyyppi on kuormittaa siltaa murtorajatilaan saakka, jolloin pysyviä vaurioita ilmenee tai silta romahtaa. Tätä ei tietenkään voi käyttää sillalle, jonka on tarkoituksena pysyä käytössä. (Frontiers 2023.) Gonzales- Libreros ym. esittää Kalixin sillan tutkimushankkeeseen perustuvassa julkaisussa jälkijännitetyn betonisen kotelopalkkisillan koekuormituksen ja monitoroinnin menettelyn. Kaikilla mailla ei ole ohjeita siltojen kuormitusten suorittamiseen ja olemassaolevat ohjeistukset poikkeavat toisistaan suurestikin. (Gonzalez-Libreros ym. 2022; Lantsoght 2020, 7).

Kuvassa 22 on esitty kuvia murtoon asti kuormitetusta sillasta Kiirunassa Pohjois-Ruotsissa. Silta oli 121,5 metriä pitkä esijännitetty betonisilta. Kuormitustesti suoritettiin sillalle vuonna 2014 ja laboratoriossa tehdyt kokeet vuonna 2019. Laboratoriossa tutkittiin sillasta otettuja betoninäytteitä betonin vetolujuuden ja murtumisenergian määrittämiseksi. Usein nämä betonin ominaisuudet on arvioita puristuslujuuden avulla, joten tutkimuksella haluttiin tuoda uutta tietämystä vetolujuuden osalta. Tutkimus tuotti erilaisia menetelmiä murtumiseen tarvittavan energian määrittämiseksi sekä suosituksia arvointimenettelyyn. Vasemmalla kuvassa näkyvät betonin vauriot ja liikutettava nosturi, jonka avulla vaurion kuvaaminen DIC menetelmällä onnistui. Oikealla on esitetty DIC mittauksen alue. (Nilimaa, Nilforoush, Bagge & Elfren 2017, III.)



KUVA 22. Kiirunan sillan murtokuormituskoe (Bagge 2017)

5.2 Kalixin koekuormitukset

Yksi Luulajan yliopiston tavoitteista oli luoda koekuormitusmenetelmä silloille, koska kaikissa nykystandardeissa ei ole menettelysuosituksia kuormituskokeiden suorittamiseen. Kalixissa tavoite oli kuormittaa siltaa käyttörajatilassa eli tarkkailla sillan käyttäytymistä mahdollisessa todellisuutta vastaavassa tilanteessa ja seurata sillan käyttäytymistä kuormien alaisena instrumentoinnin avulla.

5.2.1 Laskennallisesti kriittiset paikat

Kuormituskoe suunniteltiin sillan FEM-laskentamallin ja aiempien tutkimusten perusteella siten, että saataisiin aikaan huonoin mahdollinen tilanne, eli suurimmat rasitukset sillalle. Instrumentointi sekä muut sillalle suoritettavat tutkimukset suunniteltiin tähän perustuen. Taulukossa 2 on esitetty pääte-tyt täysperävaunurekkojen paikat eri kuormitusyhdistelmissä.

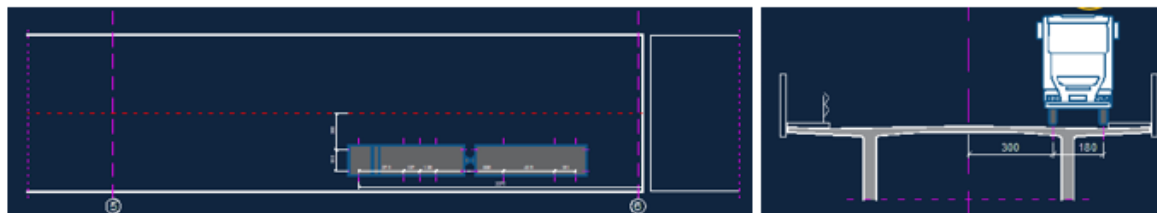
TAULUKKO 2. Täysperävaunurekkojen etuakselien etäisyydet tuelta 6 ja 4 mitattuna eri kuormitustapauksissa.

Paikka	Kuormitustapaukset I ja II		Kuormitustapaus III	
	Etuakselin etäisyys (m)	Tuelta	Etuakselin etäisyys (m)	Tuelta
1	23,7	6	31,8	6
2	26,1	6	41,1	6
3	42,3	6	46,2	6
4	53,5	4	65,2	4

Malliin perustuen on arvioitu eri kuormitustapauksista aiheutuvat leikkausvoimat ja momentit. Suurimmat muutokset voimasuureissa saadaan aikaan raskaimmalla kuormituksella eli kuormitustapauksessa III, missä neljä täysperävaunurekkaa on täydessä kuormassa. Leikkausjännitykset ovat suurimmillaan tukien lähellä, kun taas taipuma sekä taivutusmomentti jännevälin keskellä. (Kalix Bridge Project 2022). Todellisuudessa koekuormituksissa ajoneuvoyhdistelmät sijaitsivat keskellä siltaa.

Kuormitustapaus I

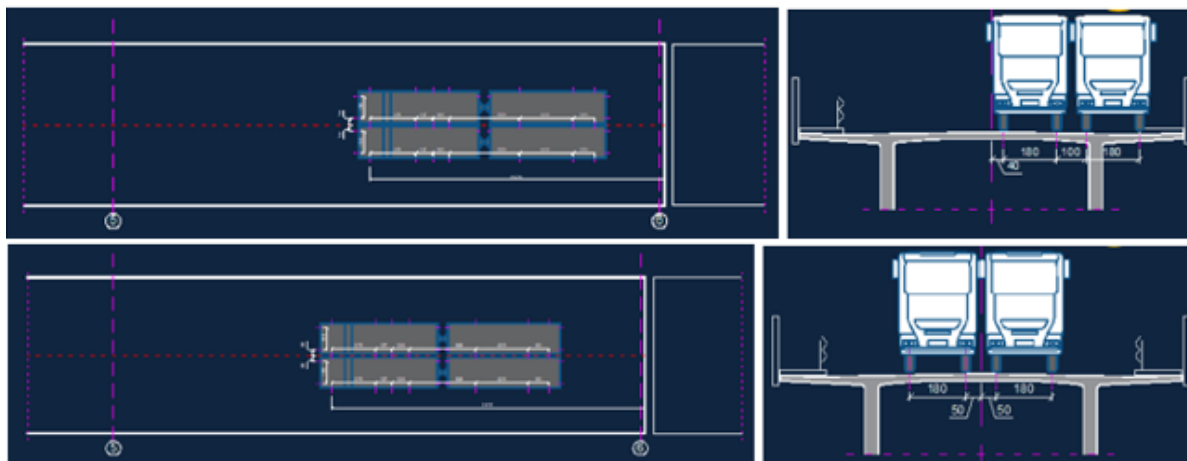
Suurin leikkausvoima saavutetaan, kun rekka on asemassa 1 eli etäisyys tuelta 6 on 23,7 metriä ja ajoneuvokuorma on mahdollisimman lähellä reunaan (kuva 23).



KUVA 23. Kuormitustapaus I, maksimi leikkausvoima (Kalix Bridge Project)

Kuormitustapaus II

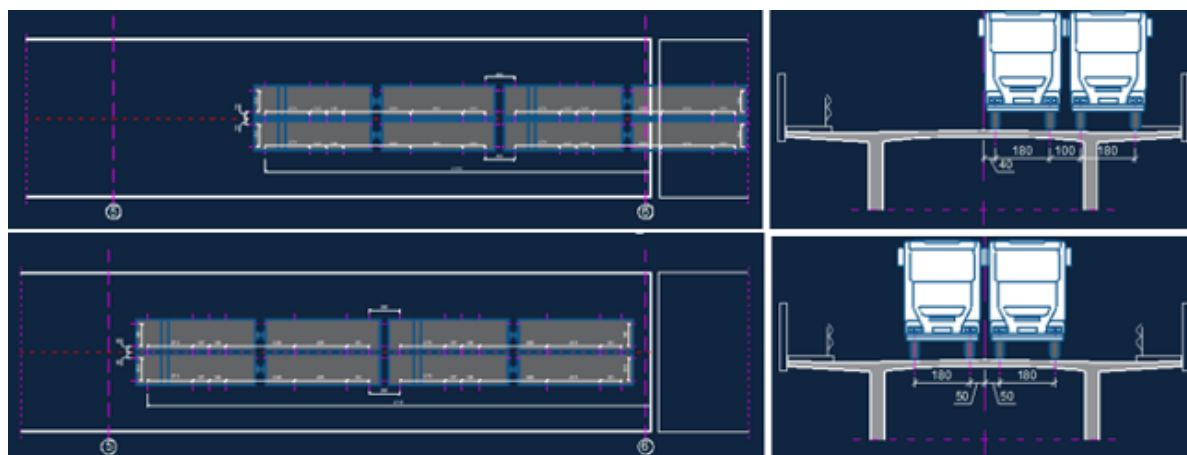
Suurin leikkausvoima saavutetaan, kun autot ovat asemassa 1, eli etäisyys tuelta 6 on 23,7 metriä ja ajoneuvokuorma on mahdollisimman lähellä reunaa. Suurin taivutusmomentti saavutetaan, kun autot asemassa 2 eli etäisyys tuelta 6 on 26,1 metriä ja ajoneuvokuorma on keskellä (kuva 24).



KUVA 24. Kuormitustapaus II, maksimi leikkausvoiman paikka ylhäällä ja maksimi taivutuksen alhaalla esitettyinä (Kalix Bridge Project)

Kuormitustapaus III

Suurin leikkausvoima saavutetaan, kun autot asemassa 1 eli etäisyys tuelta 6 on 31,8 metriä ja ajoneuvokuorma on mahdollisimman lähellä reunaa. Suurin taivutusmomentti saavutetaan, kun autot asemassa 2 eli etäisyys tuelta 6 on 41,1 metriä ja ajo-neuvokuorma on keskellä (Kuva 25).



KUVA 25. Kuormitustapaus III, maksimi leikkausvoiman paikka ylhäällä ja maksimi taivutuksen alhaalla esitettyinä (Kalix Bridge Project)

5.2.2 Koekuormitus



KUVA 26. Kuormituskoe Kalixissa (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 8)

Kuormituskoe järjestettiin Ruotsin Kalixissa 10.1.-12.1.2022. Ennen varsinaista mittauspäivää järjestettiin esitesti marraskuun 2021 lopussa. Kuormituksessa tarvittava kalusto ja lastaamiseen tarvittava materiaali tuli sillan läheiseltä louhokselta. Testeissä käytettiin neljää täysperävaunurekkaa. Tyhjän auton paino on 22,8 tonnia ja enimmäispaino täydessä kuormassa on noin 62 tonnia. Kuormat punnittiin lastaustilanteessa. (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 3)

Testit suoritettiin kolmella erilaisella kuormitustapauksella testauksen aikana. Rekat sijaitsivat näissä keskellä poikkileikkausta.

Kuormitustapaus I: Yksi ajoneuvoyhdistelmä keskellä poikkileikkausta

Kuormitustapaus II: Kaksi ajoneuvoyhdistelmää, kahdessa rivissä

Kuormitustapaus III: Neljä ajoneuvoyhdistelmää, kahdessa rivissä (kuva 26 & 27).

Jokaisessa kuormitustapauksessa oli kolme erilaista kuormitusmuotoa: 0 %, 50 % ja 100 % kuorma. (Kalix Bridge Project 2022, 123.) Taulukossa 3 on esitetty käytetyt kuormat ja eri kuormitusyhdistelmät. Taulukkoarvot ovat teoreettisia arvoja, todelliset arvot hieman poikkesivat näistä ja laskenta tapahtui todellisen kuormituksen mukaan. Painon jakautuminen eri akseleille huomioidaan akseli-kuormissa, kun akseleiden paikat kannella määritetään.

TAULUKKO 3. Yhdistelmäajoneuvojen painot kuormitustapauksittain eri kuormamäärillä.

Kuormitustapaus	Rekkojen määrä	Paino (Tonnia)		
		Tyhjä 0 %	50 %	Täysi kuorma, 100 %
I	1	22,8	42,4	62,0
II	2	45,6	84,8	124,0
III	4	91,2	169,6	248,0

Autoille oli suunniteltu tietyt tarkat merkityt paikat, joihin kohtiin ne pysähtyvät sillalla ja viipyvät kussakin kohdassa 5 minuuttia, mikä oli määritetty riittämään tarvittavien mittausten tekoa varten. Swecon tutkimusraportin mukaan 5. jänneväli oli ylikuormitettu, joten instrumentointi keskitettiin pääasiassa tähän jänneväliin. Jänneväli viisi sijaitsi sillan Kalixin puoleisessa päädyssä. Tutkijaryhmä oli asemoinut ja esivalmistellut instrumentointilaitteiston valmiiksi sillalle etukäteen. Haastetta työhön teki kova pakkanen ja tuuli.



Kuva 27. Kuormitustapaus III: Rekat perävaunuineen odottamassa lähtölupaa. (Puurula 2022.)

6 INSTRUMENTOINTI JA SEN TULOKSET KALIXIN TUTKIMUKSISSA

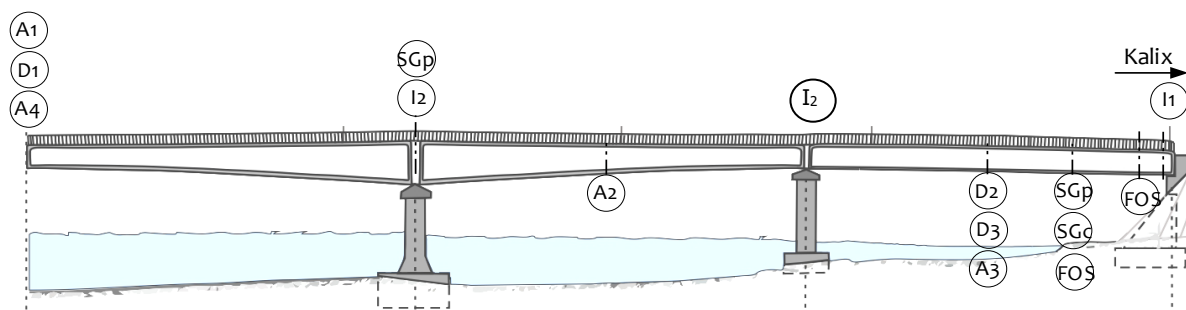
6.1 Tavoitteet

Instrumentointi on suunniteltu siten, että saadaan kattavaa tietoa esijännitysjänneiden jäljellä olevasta kapasiteetista. Instrumentoinnilla tarkoitetaan tässä mittalaitteita ja koko mittausprosessia, jolla voidaan määrittää mitattavan kohteen käyttäytymistä sekä tallentaa mittausdataa. Siihen kuuluvat mittausanturit sijoitteluineen, käyttöliittymät ja laitteistot. (Kalix Bridge Project 2022.) Monitoroinnin tavoitteena on saada numeerista dataa kerättyä käyttämällä erilaisia mittalaitteita sekä antureita. Näin päästään tutkimaan reaaliaikaista käyttäytymistä esimerkiksi tässä yhteydessä sillan kuormitusten aikana. Monitorointi voi olla myös pitempiaikaista tiedonkeruuta. (Putkinen 2019, 7.)

Suoritettavien mittausten tarkoituksena oli tutkia sillan halkeilua ja sen havaitsemista sekä kehittää ulkopäin suoritettavia havaitsemiskeinoja niin, että voitaisiin näkyvän halkeaman perusteella arvioida halkeaman syvyyttä ja vaurion vakavuutta. Tämä vaatii taustalle tutkittuja siltoja ja paljon kerättyä dataa halkeamien syvyyden suhteesta sillan kuntoon, jotta vertailua olisi mahdollista suorittaa.

6.2 Laitteiden aseointi

Swecon tekemän analyysin sekä sillasta muodostetun elementtimallin (FEM) perusteella instrumentointi asemoitiin sillalle (kuva 28, taulukko 4). Lyhenne FEM tulee sanoista Finite Element Method ja sillä tarkoitetaan laskentamallia rakenteen rasituksen selvittämiseksi. Mallissa huomioitiin jännekaapelit ja asemoitiin täysperävaunurekat kuormitusyhdistelmäkohtaisesti eri paikkoihin siltaa ja valittiin kaikista epäedullisimmat paikat, joissa sillan kuormitus oli maksimaalinen. Paikka 13,8 metriä tuelta 6 oli tärkeimpiä mittauspisteitä alustavien laskelmien perusteella. Swecon 2014 tekemän tutkimuksen mukaan jänneväli viisi oli ylikuormitettu. Pohjalaatan esijännitysjänneiden käyttöaste taivutuksessa yli 100 % tässä välissä. Keskellä siltaa ja jänneväliä viisi havainnoitiin taipumia. Tukien 5 ja 6 vieressä havainnoitiin leikkausvoimia. Tuen 5 läheisyydessä oli havaittu halkeamia betonissa ennakkotarkastuksen yhteydessä. (Gonzalez-Libreros ym. 2022, 3).



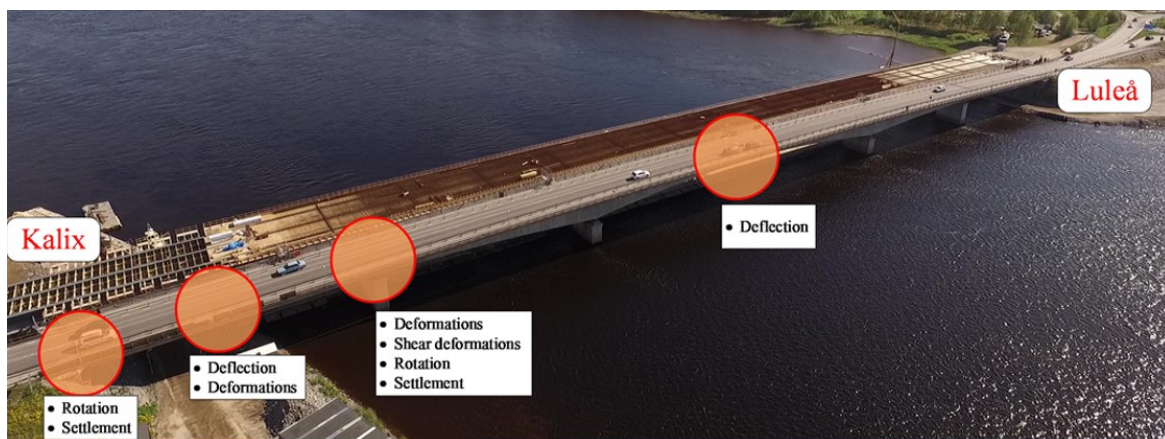
Kuva 28. Sillan mittalaitteiden aseointi. Lyhenteet ovat suomennettu ja avattu Taulukossa 4. (Kalix Bridge Project 2022, 21.)

TAULUKKO 4. Mittalaitteiden lyhenne, mitattava kohde, mittaussuunta sekä asemointi sillalla (Kalix Bridge Project 2022, 22–23)

Lyhenne	Mittalaite	Suunta	Paikka
A1	kiihtyvyyssmittari (accelerometer)	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 3
A2	kiihtyvyyssmittari	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 4
A3	kiihtyvyyssmittari	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 5
A4	kiihtyvyyssmittari	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 3
D1	siirtymä (deflectometer)	pysty- ja vaakasuunta	keskellä jänneväliä 3
D2	taipuma/ siirtymämittari	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 5
D3	taipuma/siirtymämittari	vaakasuunta	keskellä jänneväliä 5
I1	kaltevuusmittari (inclinometer)	-	tuella 5
I2	kaltevuusmittari	-	tuella 6
S	venymämittari SGp jänneteräksiin venymämittari SGc betonipintaan		11 venymämittaria: 6 kpl 13,79 m tuelta 6 5 kpl 46,50 m keskeltä siltaa 6 venymämittaria: 6 kpl 13,79 m tuelta 6
FOS	kuituoptinen järjestelmä (Fiber Optic System)	Ss-leikkausjännitys monitorointi Sa- aksiaalinen monitorointi	30 m alueella 10 m ylälaatassa 10–15 lattiassa ja seinässä jänneväliissä 5–6
TEM	lämpötila (temperature)		T-tyypin lämpöpari 2 betoniseinän sisällä 1 kaapissa sillan sisällä 1 kotelopalkissa 1 ulkona

6.3 Mitattavat suuret

Tärkeimmiksi mitattaviksi arvoiksi oli Kalixin -siltahankkeessa oli asetettu sillan jännitykset, siirtymät, kaltevuus, lämpötila ja kiihtyvyys. Mittauksia täydennettiin video- ja still-kameroiden otteilla. Seuraavissa kappaleissa on esitetty eri mitattuja suureita, välineistöä sekä mittaustuloksia. Koska opinnäytetyö perustuu Kalixin sillan tutkimusraporttiin, ei osasta mittauksia tuloksia ollut kirjoitushetkellä saatavilla. Tutkimus jatkuu vielä tämän opinnäytetyön valmistuttuakin. Kuvassa 29 näkee, että taipumia mitattiin keskeltä jänneväliä viisi sekä sillan keskikohdasta.



KUVA 29. Eri suureiden mittausspaikkoja Kalixin sillalla (Kalix Bridge Project)

6.3.1 Siirtymä, taipuma

Siirtymäanturit (D2 ja D3): OptoNCDT ILR2250-100. Siirtymät mitattiin sillan ulkopuolella sijainneilla taipumamittareilla (kuva 30). Toimiakseen ja mitatakseen suhteelliset siirtymät mittari tarvitsee vertailupisteen, joka sijaitsee tasaisessa liikkumattomassa pinnassa, johon ei kohdistu häiriötekijöitä. Tässä kokeessa mittari osoitti sillan alla kulkenutta jäätyynyttä joenpintaa kohti, joten lumen tasolla on ollut mahdollista vaikutusta tuloksiin. (Kalix Bridge Project 2022, 23-26.)



KUVA 30. Taipumamittari D2 keskellä jänneväliä 5 sekä asemointi poikkileikkauksessa. (Kalix Bridge Project 2022, 21 & 24.)

Siirtymäanturi (D1): PMS-200. Keskellä siltaa D1 pisteessä oleva anturi mittasi pitkittäistä- ja poikittaista siirtymää. Mittarin toiminta perustuu laserlähettimeen ja optoelektrodiseen vastaanottimeen. Lähetin sijaitsi tuessa 4 ja vastaanotin sijaitsi sillan keskikohdassa. Vertailupiste oli koskematon piste sillan vieressä (kuva 31).



KUVA 31. Siirtymämittari D1 (Lähetin ja vastaanotin) sekä laitteiden sijainti sillalla. (Kalix Bridge Project 2022, 26–27)

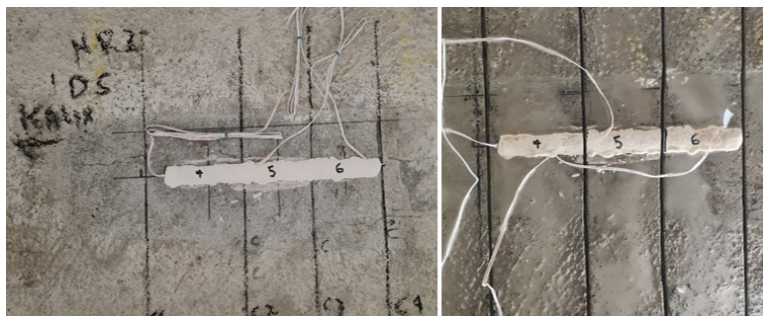
6.3.2 Venymät

Venymämittarit (S)

KCW-5-120-G10-11G3M3S ja KC-60-120-A1-11L1M3R. Venymämittarit pistehitsattiin pitkittäis- ja pystysuuntaisiin esijännitysteräksiin kotelopalkin pohjassa ja päällislaatassa (kuva 32) sekä kiinnitettiin epoksilla betoniin seinissä (kuva 33). Mittauksessa oli mukana yhteensä 17 venymämittaria: 6 betonipinnalla ja 11 jänneeräksissä. Mittarit olivat mittaria nro 6 lukuun ottamatta sillan pituusakselin suunteiset. Mittari 6 oli 5,4 asteen kulmassa pitkittäisakseliin nähden. Luotettavan toiminnan varmistamiseksi alle -15 asteen lämpötilassa epoksiliimattava alue lämmitettiin 72 tunnin ajan ennen asennusta. (Kalix Bridge Project 2022, 27-29.)

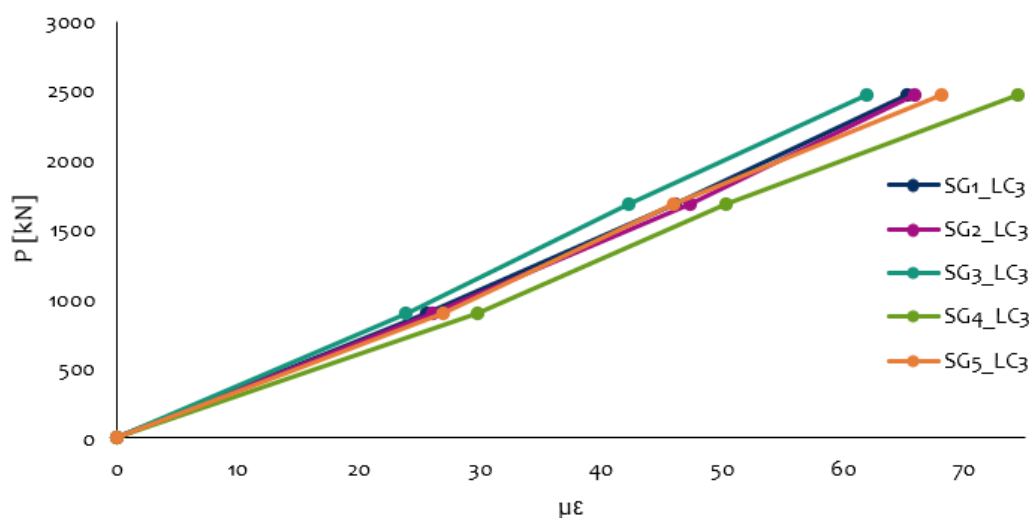


KUVA 32. Hitsatut anturit, jotka kiinnitetty paljastettuihin jänteisiin, KCW-5-120-G10-11G3M3S. (Kalix Bridge Project 2022, 28.)



KUVA 33. Seinään sijoitetut venymäanturit. KC-60-120-A1-11L1M3R. (Kalix Bridge Project 2022, 28.)

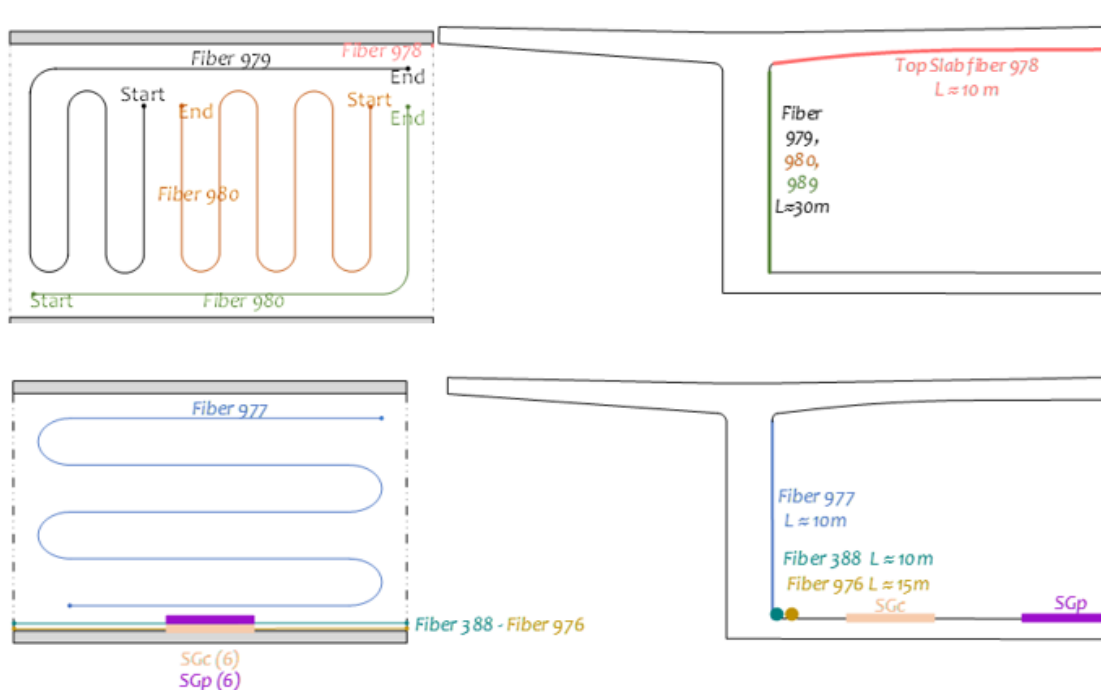
Kuvassa 34 on esitetty diagrammi kuormituksesta venymän funktiona kuormitustapaus III:ssa. Tässä kuormitustapauksessa häiriöiden määrä oli vähäisin ja onkin selkeästi havaittava lineaarinen elastinen käyttäytyminen. Pystyakselilla on esitetty kuormitustapauksen III, eli neljä rekkaa, kuormat 0 %, 50 % ja 100 %. Vaaka-akselilla puolestaan on esitetty venymät eri venymämittareilla SG1...SG5. Venymämittari 6 on jätetty pois laskelmista ja esitettävistä tuloksista sillä se oli sijoitettuna 5,4 asteen kaltevuuteen sillan pääakseliin nähden ja se selkeästi tuotti pienempiä mittaustuloksia muihin antureihin verrattuna (Kalix Bridge Project 2022, 52). Taulukossa 3 oli esitettyinä rekkaasaattueiden painot eri kuormilla. Täyteen kuormaan lastatut rekat painavat 2480 kN. Tässä kuvassa on havaittavissa täysien rekkojen aiheuttaman venymä olevan 60-70 μm .



KUVA 34. Kuorma venymän funktiona kuormitustapauksessa III (Kalix Bridge Project 2022, 52)

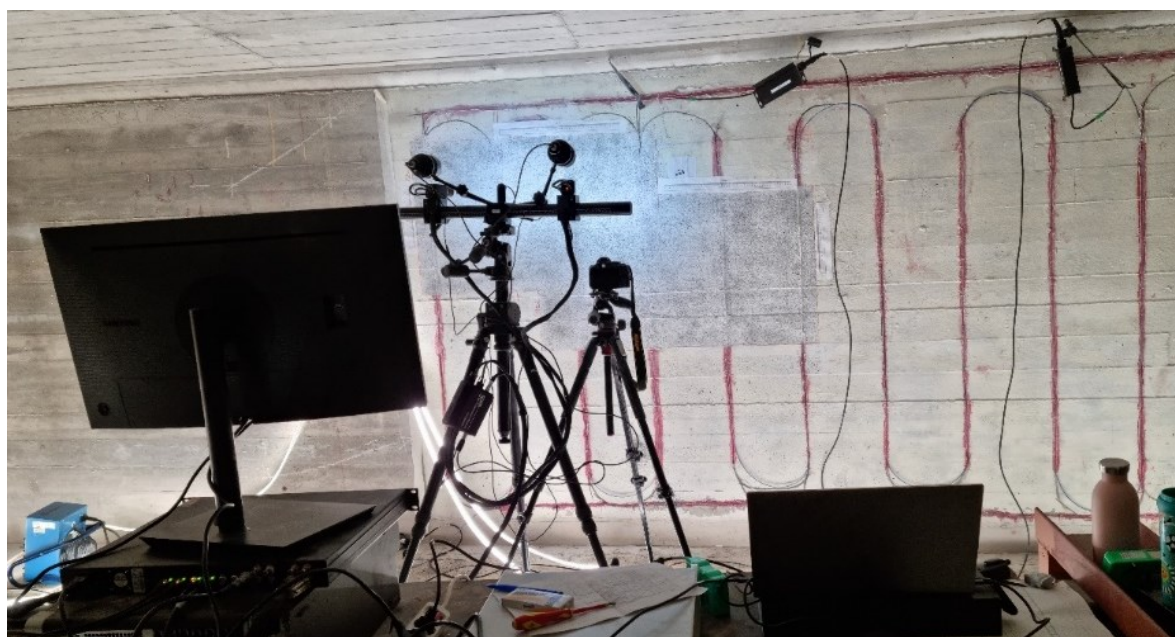
Kuituoptinen järjestelmä FOS

Jotta mittauksissa saataisiin tarkempia tuloksia, käytössä oli myös teräväpiirtokuituoptinen tunnistus High-Definition Fiber Optic System HD-FOS, joka oli asennettu epoksilla liimattuna tärkeimmiksi määriteltyihin kohtiin kotelopalkin sisäpuolelle kattoon, seinään sekä pohjaan jänneväliin viisi. Kaapelit upotettiin betoniin leikattuihin uriin kuvien 35 ja 36 osoittamalla tavalla. Kuvassa 35 merkittynä ovat myös pohjalaattaan asennetut venymämittarit. (Kalix Bridge Project 2022, 30.)



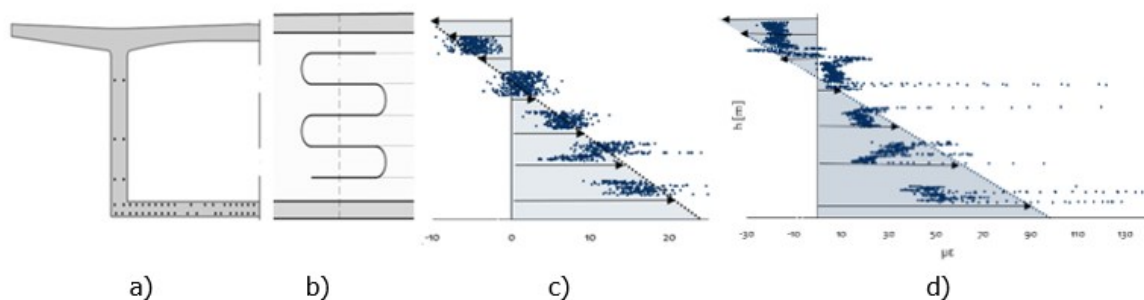
KUVA 35. Ylhäällä on esitetty leikkausjännityksiä havainnoiva FOS ja alemmassa kuvassa vastaavasti aksiaalisiä jännityksiä havainnoivan FOS kaapelin sijoittelu. (Kalix Bridge Project 2022, 22.)

HD-FOS:n toiminta perustuu Rayleigh'n takaisinsirontaan. Rayleigh'n sironta on sähkömagneettisen säteilyn pääosin elastista sirontaa hiukkasilla, jotka ovat aallonpituutta huomattavasti pienempiä. FOS:n etuna on, että optinen kuitu on joustavaa ja jopa 50 m pitkä, kuitenkin vain 0,2 mm halkaisijaltaan, joten sen avulla päästään paikkoihin, joihin perinteisillä menetelmillä ei välttämättä päästä. Optiset kuidut pystyvät tarkasti havainnoimaan venymästä ja lämpötilan muutoksista aiheutuneet muutokset. Käytössä ollut ODiSI 6 pystyy tulkitsemaan heijastuneen signaalin koko kuidun pituudella 0,65 mm:n välein. (Luna 2022.)



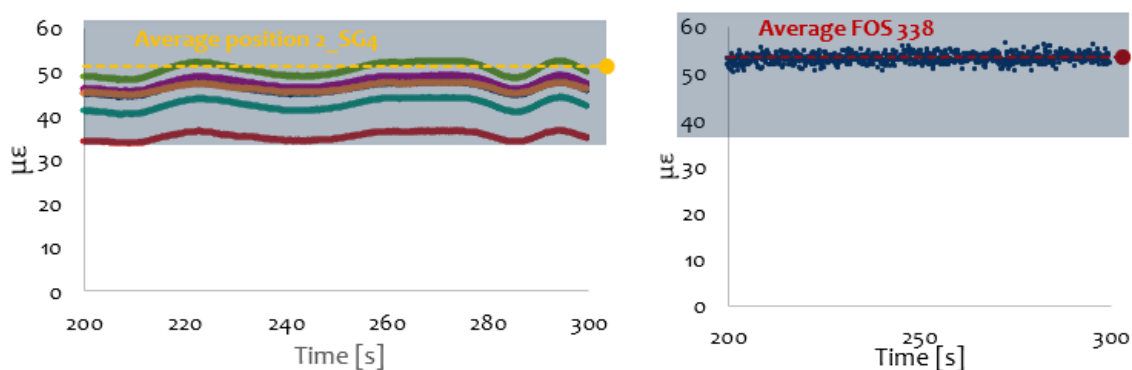
KUVA 36. Seinälle asennettu FOS (Roslöf 2022)

Kovan pakkasen (-25°) vuoksi kuidut eivät kestäneet käsittelyä ja yksi taivutusta mittaava pääkuitu lakkasi toimimasta ja se täytyi korvata uudella kuidulla. Taivutusta mitattiin siis neljässä eri kohdassa. Kohtaan 13,8 metriä tuelta 6 asetettiin FOS-kaapeli, jotta tuloksia voitaisiin vertailla venymämittareista saataviin tuloksiin. Kuvassa 37 on esitetty FOS:n asemointi sillan sisällä ja asemointia vastaavat venymä- ja puristumatulokset kahdella eri kuorman suuruudella. Suuremmalla kuormalla voi havaita venymämittojen oleva suurempia ja tuloksissa olevan hajontaa. (Kalix Bridge Project 2022, 65.)



KUVA 37. a) Kotelopalkin puolikkaan poikkileikkaus. b) Seinälle asetettu FOS. c) Venymä/ puristusjakauma: Korkeus venymän funktiona paikassa 2, kuormitustapauksessa II 50 %:n kuormalla ja 100 %:n kuormalla kohdassa d) (Kalix Bridge Project 2022, 65)

Kalixin projektissa tavoitteena oli vertailla eri mittausmenetelmillä saatujen tulosten vastaavuutta ja sitä kautta suoritettujen mittausten luotettavuutta. Tavanomaisen venymämittarin ja kuituoptysen mittarin tuloksien vertailu mittausspaikassa 13,8 metriä tuelta 6 on esitetty kuvassa 38. Kuvasta voi havaita keskimääräisten tulosten vastaavan toisiaan.

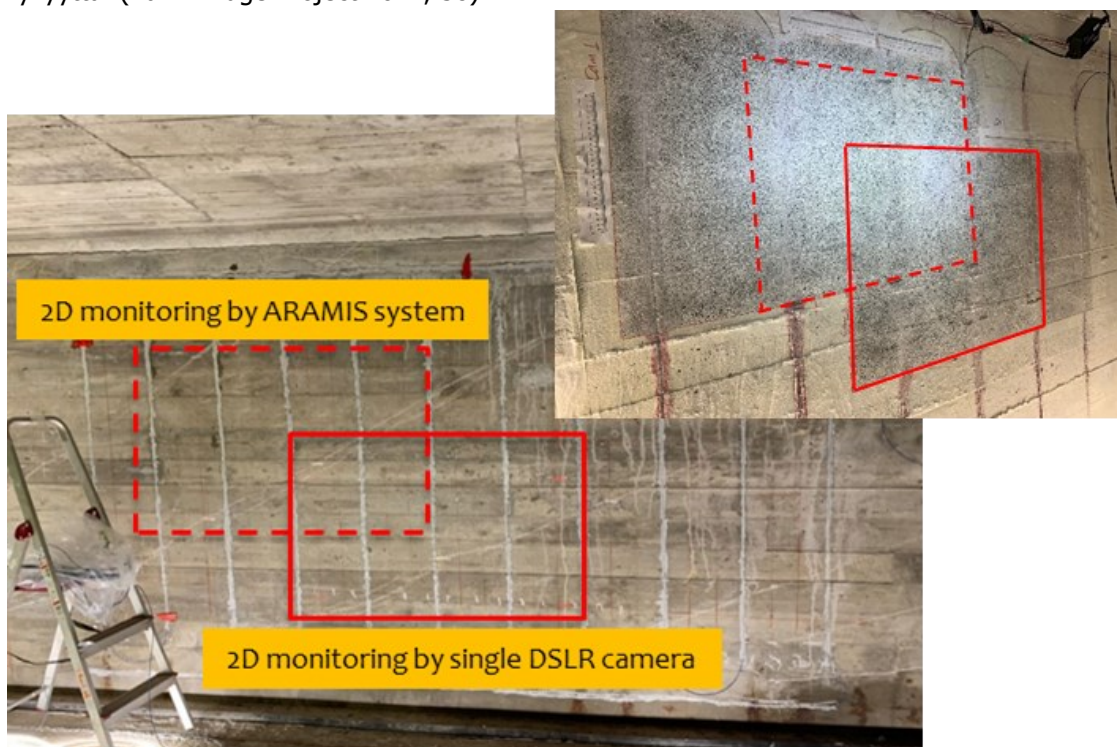


KUVA 38. Venymämittarin SG4 ja vastaavassa paikassa olleen FOS kaapelin venymät ajan funktiona (Kalix Bridge Project 2022, 65)

DIC (Digital Image Correlation)

ARAMIS-järjestelmä ja DSLR kamera. ARAMIS on optinen venymämittari. Sen toiminta perustuu digitaaliseen kuvakorrelaatioon ja fotogrammetriaan. Se on kosketukseton ja materiaalista riippumaton mittaussysteemi. Kohteena voi olla alue muutamasta millimetristä metreihin. ARAMIS antaa

vaihtoehdon tavanomaisille venymämittareille. (Trilion 2023.) Kalixin projektissa tavoitteena oli tal-
 lentaa leikkausjännityksestä aiheutuvia seinäpinnan muodonmuutoksia jänneväliässä viisi (Kalix
 Bridge Project 2022). Tässä menetelmässä kohteesta otetaan kuva, jota pidetään vertailukuvana.
 Menetelmä tunnistaa kohteen pintakuvion ja antaa koordinaatit pikseleille. Jos mitattava pinta on
 hyvin tasainen, voidaan pinnalle levittää esimerkiksi stokastinen ruiskukuvio. Muodonmuutoksen ai-
 kana tallennetaan lisää kuvia, joita verrataan lähtökuvan paikkatietoihin. Näin saadaan selville siir-
 tymä ja muodonmuutos. (Kalix Bridge Project 2022; Trilion 2023.) Tässä kokeessa käytössä oli ARA-
 MIS järjestelmä stereokameralla sekä DSLR yksittäinen kamera, joita käytettiin osin päällekkäin tu-
 losten vertailemisen mahdollistamiseksi (kuva 39). Haastetta mittaamiseen toi pakkasesta aiheutu-
 neet kidemuodostelmat mitattavaan pintaan, koska kiteet heijastivat valoa ja heikensivät kuvion nä-
 kyvyyttä. (Kalix Bridge Project 2022, 38)



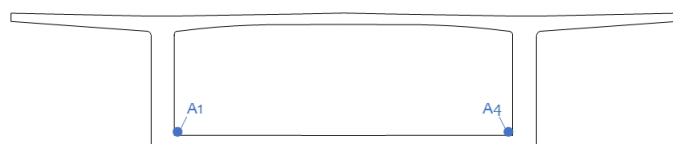
KUVA 39. Leikkausjännityksen monitorointia: FOS ja DIC (yksittäinen ja kaksoiskamera) (Kalix
 Bridge Project 2022, 33)

6.3.3 Kiihtyvyyssmittaus

Kiihtyvyyssmittarit (A1-A4): PCB 393B31, 4 kpl. Kiihtyvyyssmittaus perustui sillan värähtelydatan ke-
 räämiseen. Sillan värähtelyä tutkittiin keräämällä jatkuvia kiihtyvyyssaikeasarjoja normaalin liikenteen
 alaisuudessa vaihtuvissa ympäristöolosuhteissa. Kalixin sillan dynaamista vastetta liikenteelle mitat-
 tiin asettamalla kiihtyvyyssmittarit kotelopalkkisillan sisälle, jännevälien keskelle (kuva 40). Kiihtyvyyss-
 ja lämpötilatiedot kerättiin ennen kuormituskokeita normaalin liikenteen aikaan aikavälillä
 18.10.2021-12.11.2021. Aineistosta valittiin otos kuvaamaan normaalitilan liikenteestä aiheutuvaa
 värähtelyä. (Kalix Bridge Project 2022, 33.)

Olennaisinta värähtelymittauksessa oli rekisteröitävän tiedon rajaaminen keräysvaiheessa sekä kerä-
 tyn olennaisen värähtelydatan erottaminen muusta tiedosta. Saatuja tuloksia verrattiin Luulajan

Yliopiston muodostamaan FE-malliin ja ne olivat samankaltaiset. Päätelmänä näiden perusteella oli, että jännitetyissä betonisilloissa on enemmän vaimennusta kuin suunnitteluprosessissa sitä oletetaan olevan. (Kalix Bridge Project 2022, 115.)



KUVA 40. Kiihtyvyydsmittari mittausspaikalla sillan sisällä sekä mittareiden A1 ja A4 asemointi poikkileikkauksessa esitettynä (Kalix Bridge Project 2022, 23 & 33)

6.3.4 Kaltevuusmittaus

Seinäkaltevuusmittarit (I): A716-2 (2kpl). Mittarit asennettiin pilareihin 5 ja 6 (kuva 41). Kaltevuusmittareita käytetään siltojen taipumien valvontaan, mutta myös muuhun tarkkuutta vaativaan mittaamiseen.



KUVA 41. Seinäkaltevuusmittari tuessa 5 (vasemmalla), tuessa 6 (keskellä) ja mittari oikealla esitettynä. (Kalix Bridge Project 2022, 35)

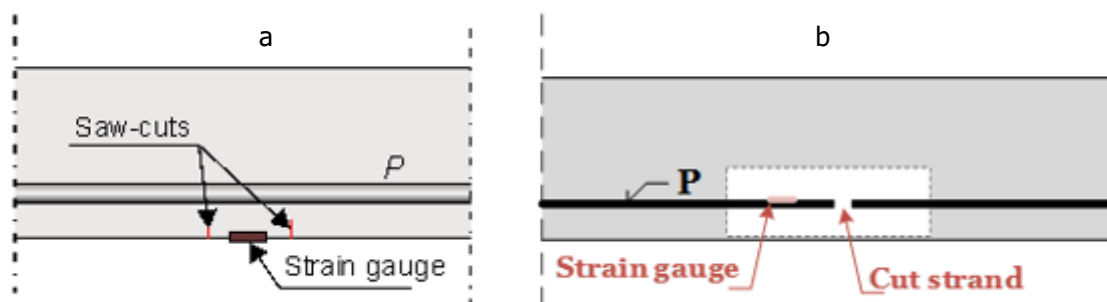
6.3.5 Lämpötilaseuranta

Lämpötilaa mitattiin kokeiden ajan usean T-tyyppin lämpöparin avulla. Lämpötilaa mitattiin betoniin sijoitetuissa rei'istä, tiedonkeruukaapeleiden säilytyskaapista, sillan sisältä sekä kansilaatasta sillan ulkopuolelta.

6.4 Jännösesijännitysvoiman mittaaminen

Jännityshäviöt jännevoimissa voidaan jakaa muodostumisajankohdan perusteella kahtia: Välittömiin häviöihin sekä pitkäaikaisiin häviöihin. Välittömiä häviöitä jännevoimiin aiheutuu esimerkiksi betonin kimmoisen muodonmuutoksen seurauksena kitkahäviönä sekä ankkuroinnin liukumisesta. Viruma ja kutistuma sekä relaksaatio ovat ajasta riippuvia häviöitä. (NCCI 2, 2022, 42–44.)

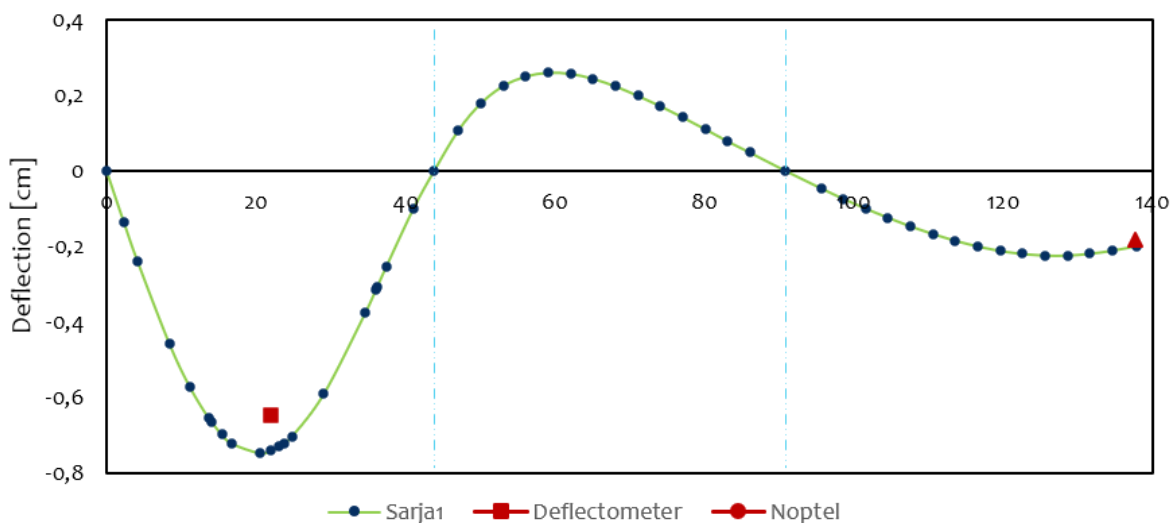
Jännösesijännitysvoiman mittaaminen tehtiin sahaus-, taivutus- ja säikeen leikkausmenetelmällä (kuva 42). Sahausmenetelmässä aluetta, johon venymämittarit olivat kiinnitetty eli kotelopalkin seinät, alettiin eristämään leikkaamalla syvemmälle betonipeitettä samalla tarkkaillen venymäarvoja (kuva 42a) Alueen katsottiin saavuttaneen täydellisen eristyksen, kun sahausvyödyden kasvaminen ei enää johtanut muutoksiin venymäarvoissa. Jännösesijännityksen arvioimiseksi on vuosien mittaan tehty enemmän testejä ainetta rikkovilla kuin ei rikkovilla menetelmillä. (Kalix Bridge Project 2022, 67.)



KUVA 42. Sahausmenetelmän (a) ja säikeen leikkausmenetelmän (b) periaatteet (Kalix Bridge Project 2022, 56 & 78)

Niin rikkovissa kuin ei-rikkovissa tutkimusmenetelmissä venymäpohjaiset testit ovat eniten tutkittuja ja käytettyjä. (Kalix Bridge Project 2022, 74.) Venymämittauksiin perustuvat mittausmenetelmät eivät kuitenkaan huomioi usean asiaa, kuten esimerkiksi jännittämättömien terästen, viruman ja kutistuman vaikutuksia. Ainetta tuhoamattomien testimenetelmien osalta tarvitaan vielä lisätutkimuksia kenttäolosuhteissa, sillä lähes kaikki tutkimustulokset on saatu aikaan laboratorio-olosuhteissa, missä satunnaisuuteen ja epävarmuuteen perustuvat ongelmat eliminoiduvat. Lisäksi olemassa olevissa tutkimuksissa on tarkasteltu suorakaiteen muotoisia esijännitetyjä elementtejä, eikä mittausmenetelmien luotettavuudesta kotelopalkkirakenteelle ole kokeellista näyttöä. Tulevien mittausmenetelmien olisi perustuttava kokeellisten tulosten, FEM-analyysin ja voimassa olevien standardikoodien vertailuun.

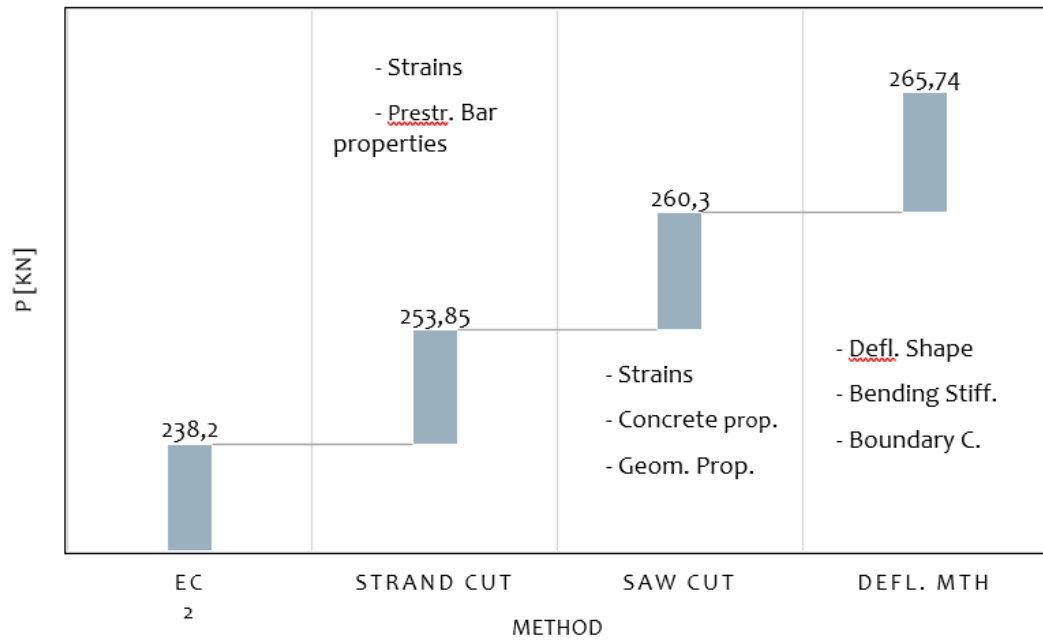
Kuvassa 43 on esitettyä numeerisen taipumamallin (sarja 1) taipumakäyrä sekä kahden eri pisteen deflektometreistä saatujen tulosten taipumakäyrä 100 %:n kuormalla kuormitustapauksessa III. Noptelilla tarkoitetaan sillan keskikohtaa.



KUVA 43. Taipumakäyrä kuormitustapaus III 100 % kuormalla. (Kalix Bridge Project 2022, 76)

Kolmas keino jäljellä olevien esijännitysvoimien arviointiin on säikeen leikkausmenetelmä. Tämä menetelmä otettiin käyttöön, jotta saataisiin referenssimittaus kahdelle muulle menetelmälle (kuva 42b). Menetelmässä esijännityskaapeliin säikeisiin kiinnitetään mitta-anturi tarkkailemaan säikeen katkaisusta aiheutuvia venymiä. Nämä mittaukset tehtiin pohja- ja kansilaattaan, kuten mittausmenetelmät osiossa aiemmin on esitetty. Betoni kaapelin ympäriltä poistetaan ennen säikeen katkaisua. Tähänkin menetelmään liittyy epävarmuustekijöitä, esimerkiksi katkaisu voi vahingoittaa mittaria, paikallinen esijännitysvoiman menetys sekä epävarmuus siitä, voiko säie edustaa koko kaapelia tarkasti.

Saaduista tuloksista on laskettu esijännitysvoima, jota on verrattu 1959 vuoden rakennuspiirustuksissa ilmoitettuun esijännitysvoimaan. Alkujännitysvoimaksi ankkureissa on saatu 266,67 kN. Eurokoodi 2 yksinkertaistetulla kaavan avulla on laskettu ajasta riippuvat häviöt. Leikkausmenetelmällä saadut arvot osuivat laskennallisia arvoja lähimmäksi. Kuten aiemmissakin tutkimuksissa EC2 laskelmat antoivat kenttämittauksia suuremmat jännitehäviöarvot. Kuvassa 44 on esitettyä eri menetelmillä saadut jäännösjännitysvoimat. EC= Eurokoodi-laskelmiin perustuvat arvot, strand cut tarkoittaa jänteen katkaisumenetelmää ja saw cut sahausmenetelmää. Deflection on taipuman perusteella tehty arviointi. (Kalix Bridge Project 2022, 82.)



KUVA 44. Jännösjännitysvoima jaoteltuna menetelmän mukaan (Kalix Bridge Project 2022, 82.)

7 RAKENNEMALLIN MUODOSTAMINEN

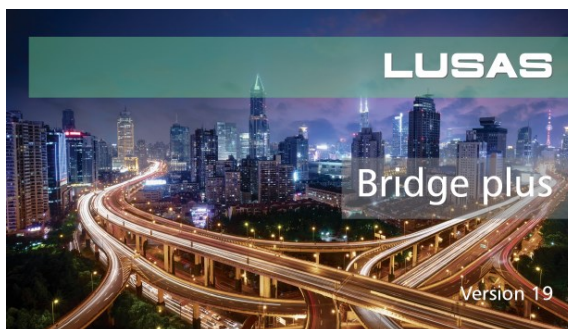
7.1 Tavoitteet

Tavoitteena tässä opinnäytetyössä oli muodostaa Kalixin sillan jännevälissä viisi Lusas-malli sekä perehtyä laskentaan muodostetun mallin takana. Koska ohjelma laskee mitä sinne syötetään, on tärkeää pystyä varmentamaan tulokset käsin, jotta mallissa käytettyihin ratkaisuihin voidaan luottaa. Tavoitteena oli opinnäytetyön kautta päästä alkuun rakenteen tutkimisessa, kun Lusas:n toimintaperiaatteet tulevat tutuiksi.

7.2 Lusas Bridge Plus

Lusas on Elementtianalyysi (Finite Element Analysis, FEA) sovellusohjelma. Ohjelmiston takana olevan yrityksen nimi on myös LUSAS. Elementtianalyysi tarkoittaa fysikaalisen ilmiön simulointia käyttämällä numeerista tekniikkaa nimeltä FEM. (Syrjä 2019, 6) Elementtimenetelmä eli FEM tulee sanoista Finite Element Method. Se on numeerinen tekniikka, joka jakaa kappaleen pienempiin osiin, elementeiksi, jotka muodostuvat viivojen ja solmupisteiden yhdistelmästä. Näille pieni äärelliselle määrälle luodaan ratkaistavat differentiaaliyhtälöt, jotta saadaan ulos haluttu numeerinen arvo. (Syrjä 2019, 6; Lundin, 50).

Destian sillansuunnittelussa on käytössä Lusas Bridge Plus (kuva 45) siltojen sekä muiden suunniteltavien rakenteiden ja kantavuuden suunnittelussa, ja kun tuli mahdollisuus osallistua Kalixin sillan tutkimusprosessiin oli Lusas:n mukaan ottaminen opinnäytetyöhön luontevaa.



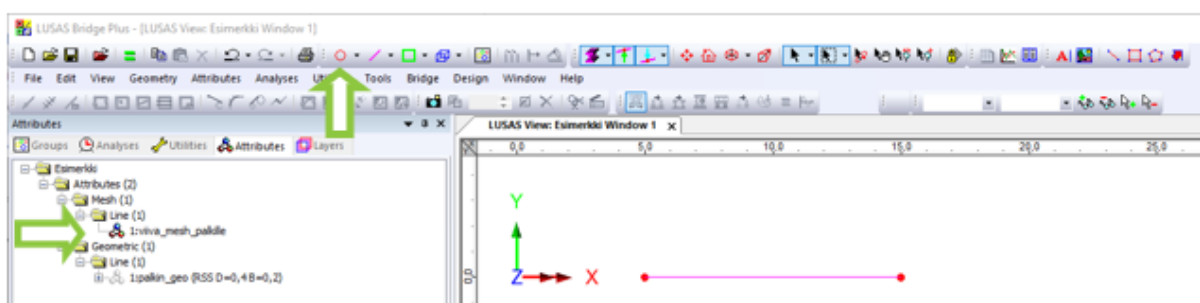
KUVA 45. Lusas Bridge Plus (Roslöf 2023)

7.3 Lähtökohdat Lusas-mallin luomiselle

Työssä lähdettiin liikkeelle hyvin yksinkertaisen mallin muodostamisesta, jolle saadaan käsin laskettua myös halutut tulokset. Näin voitiin varmistua, että mallista saatavat arvot pitävät paikkansa. Ensin tarkastelin tavallista suorakaidepalkkia. Sen jälkeen kotelopalkkia ja sitten muuttuvan poikkileikkauksen omaavaa kotelopalkkia jännevälissä viisi. Tässä kappaleessa on esitetty perusteet ja käytetyt kaavat käsinlaskuille yksinkertaisella palkilla ja verrattu tuloksia Lusas:lla saatuihin. Opinnäytetyö eteni samoin käytännössä; ensin ilmiöihin ja laskentaan tutustumalla ja siinä rinnalla Lusas:n käyttöä opettelemalla.

Lusas:lla löytyy omia ohjeita paljon, joissa lähdetään liikenteeseen yksinkertaisista pienistä kappaleista, mutta esimerkkejä löytyy todella monen tasoista kappaleista. Lisäksi internetistä löytyy opasvideoita, joiden avulla voi alkuun pääseminen olla jopa selkeämpää.

Työskentelypohjaksi alussa valitaan 3D. Aloittaessa voi ensin muodostaa kappaleen piirtoikkunaan mikä näkyy kuvassa 46 oikealla tai luoda sen ominaisuudet Attribuuttien alta. Kun Attribuutit ovat määritelty ne tulevat harmaina näkymään puunäkymään vasemmalle. Kun kuvapuolelta valitaan kappale, esimerkiksi viiva, voidaan halutut ominaisuudet raahata kuvanäkymään ja valittu kappale saa nämä ominaisuudet. Tämä voidaan tehdä myös hiiren oikean kautta -assign. Ominaisuudet voidaan myös irroittaa deassign kohdasta. Kuvassa 46 on esitetty Lusas:n perusnäkö. Värikkäänä puunäkymässä olevat ominaisuudet ovat jo viety kappaleelle. Harmaana näkyviä ominaisuuksia ei ole vielä lisätty.



KUVA 46. Perusnäkö Lusas:ssa (Roslöf 2023)

Tässä työssä palkit ovat mallinnettu tekemällä ensin piste piirtoikkunan valintanauhassa olevalla Uusi piste -työkalulla, mikä on osoitettu kuvassa 46 valintarivissä ylhäällä. Tämä piste on valittu ja hiiren oikean painikkeen lata löytyvällä sweep-käskyllä liikutettu eli sweepattu 43,85 m x-suuntaan, jolloin Lusas muodostaa loppupisteen ja pisteiden väliin viivan. Tässä on yksinkertaisuudessaan tavallinen palkki jolle voi alkaa ominaisuuksia antamaan (kuva 47).



KUVA 47. Lusas:een tehty elementti (Roslöf 2023)

7.3.1 Ominaisuuksien antaminen

Attributes= Attribuutit. Attribuutteja käytetään kuvaamaan mallin ominaisuuksia. Tämän valikon alta löytyvät keinot lisätä kappaleelle halutut ominaisuudet. Tässä Lusas:en valikoista ja ominaisuuksista on käyty läpi ne olennaisimmat asiat tähän työhön liittyen.

Seuraavat otsikot löytyvät Attribuuttivalikon alta:

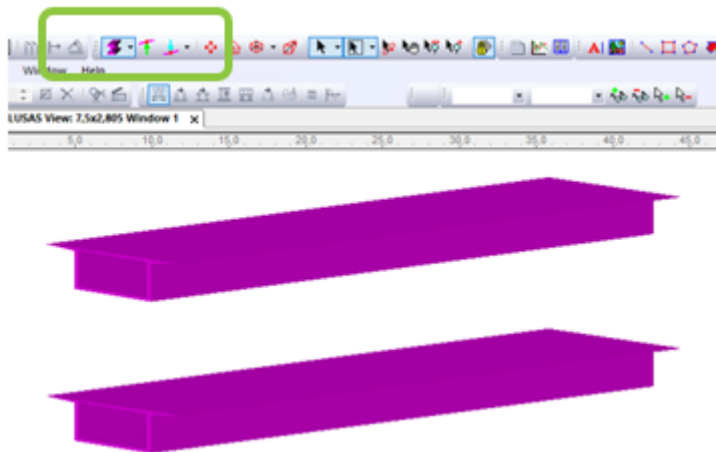
Mesh=Verkko

Tämän kohdan alta valitaan, millainen laskentaverkko kappaleelle muodostetaan. Tässä työssä Mesh tehtiin palkkikappaleelle. Muita vaihtoehtoja ovat piste, pinta tai tilavuus. Tämän jälkeen valitaan elementin tyyppi mitä käytetään. Tässä tapauksessa käytettiin paksua palkkia. Laskentaverkon koko voidaan määrittää myös asetuksista eri tavoin. Tämä riippuu mallinnettavan kappaleen koosta ja muodoista. Jos jako on hyvin tiheä ja kappale suuri, tulee laskennasta raskas. Jos taas jako on liian suuri niin se ei kuvaa mallin käyttäytymistä riittävän tarkasti. Mesh voidaan määrittää olemaan myös rigid eli jäykkä, kuten Kalixin sillan tukien kohdalla olevien lähes umpinaisten kotelotukipalkkien oletettiin olevan.

Geometric= Geometriset ominaisuudet: Poikkileikkaus, tiheys.

Valikosta löytyy poikkileikkauskirjasto, jossa on yleisiä eri materiaalien poikkileikkauksia maakohtaisesti. Tässä valikossa on myös käyttäjän oma poikkileikkaus -kohta, jonka alta on valittavissa itse muodostettu poikkileikkaus, kun sen ensin muodostaa toisaalla. Geometric -kohdan alta löytyvät myös tässä työssä käytetyt Tapered Section ja Multiple Varying Section. Näiden työkalujen avulla voi palkin poikkileikkauksesta tehdä muuttuvan.

Kun kappaleille on määritetty Mesh ja poikkileikkaus voi niitä tarkastella 3D-muodossa valitsemalla ylävalikosta Flushing-kohdan aktiiviseksi. Sen vieressä on myös valintaikkunat, josta saadaan näkyviin tuet ja kuormat. Nämä ovat rajattuna vihreällä alla olevassa kuvassa 48.



KUVA 48. Palkit 3D -muodossa (Roslöf 2023)

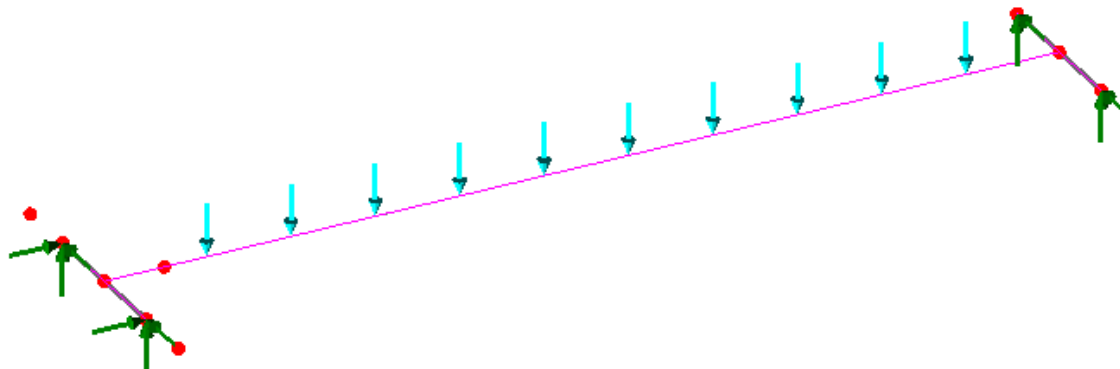
Material= Materiaali: Määrittelee materiaalin mekaanisen käyttäytymisen.

Materiaalikirjastosta valittiin materiaaliksi betoni C34/45. Materiaalin valinnan jälkeen näkyy myös käytettävä Young's modulus eli kimmokerroin sekä Poissonin suhde. Laskettaessa käsin palkkien ominaisuuksia on tässä työssä käytetty Lusas:n käyttämiä vastaavia arvoja.

Support= Tuki: Määrittelee miten rakenne on tuettu, mihin suuntaan liike estetty ja sallittu.

Kalixin sillassa tuella 6 ja 1 sekä 5 ja 2 oli rullalaakerit. Tässä työssä ne on mallinnettu tukina, jotka sallivat liikkeen x-suunnassa eli sillan pituusakselinsuunnassa, sekä kiertymät. Sen sijaan liike y ja z-

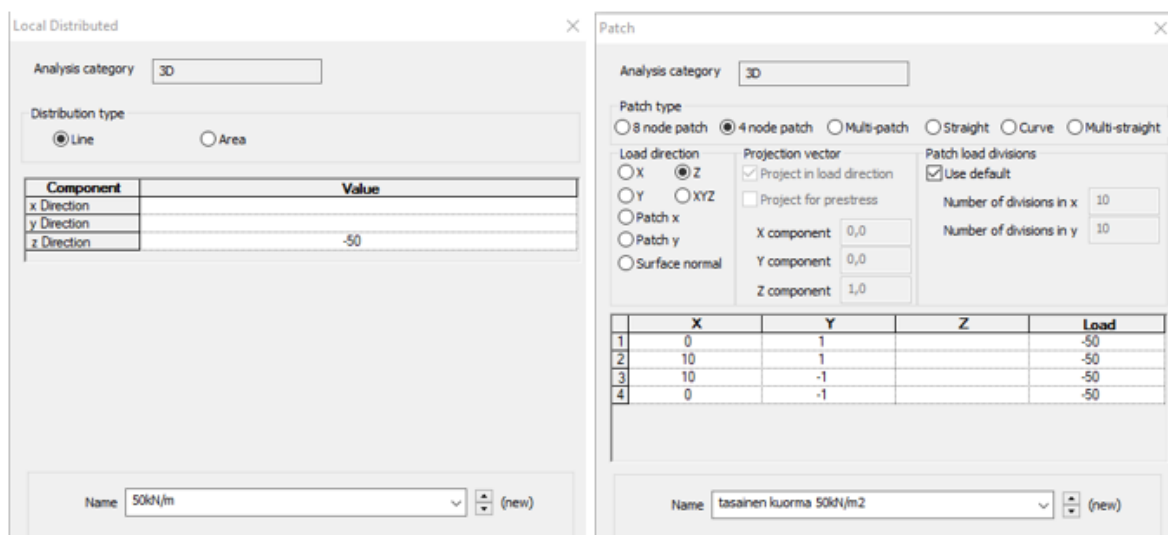
suuntiin on estetty. Tuet 3 ja 4 olivat kiinteitä ja keskellä siltaa oli nivel, jonka ajateltiin pysyvät paikoillaan. Koska tarkasteltavana tässä työssä oli pääasiassa pelkästään jänneväli viisi, valittiin tuelle 5 x-suunnan liikkeenkin estävä tuki, joka salli kiertymät. Toki kaikki nämä ominaisuudet ovat vain teoreettisia malleja, joiden avulla yritetään todentaa todellista tilannetta mahdollisimman tarkasti. Tässä valikossa oli mahdollista valita myös jouset kuvaamaan kappaleen tuentaa.



Kuva 49. Palkin malli, jossa on tuennat ja rekkojen kuorma esitettyinä (Roslöf 2023)

Loading= Kuormat: Määrittelee miten rakenne on kuormitettu.

Kuormat kappaleesta tätä työtä tehdessä on käytetty Local Distributed -kohtaa minkä avulla saadaan muodostettua tasainen viivakuorma kappaleelle. Lisäksi on käytetty myös kohtia Point luomaan pistekuorma ja Patch, jonka alta voi muodostaa pintakuorman halutulle alueelle.



KUVA 50. Kuormien lisääminen Lusas:ssa

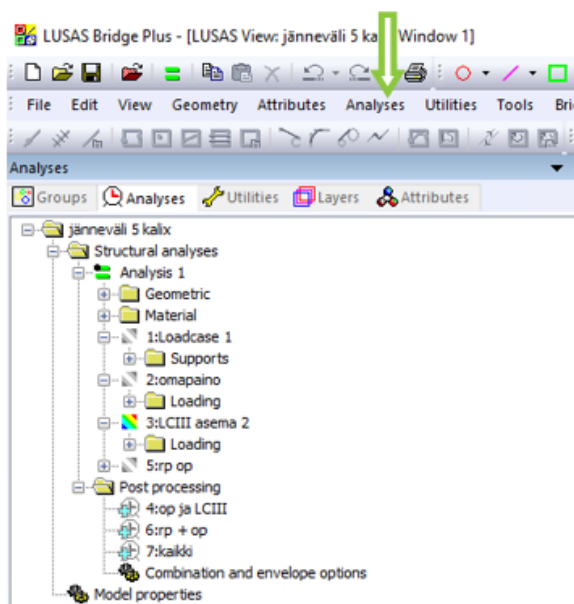
Kuvassa 50 vasemmalla on näytetty tasaisen viivakuorman lisääminen. Z -akselin suunta on ylöspäin, joten miinus-merkki kertoo kuorman suunnan olevan alaspäin. Oikealla on esitetty kuinka tietylle alalle luodaan kuorma. Ajatuksena on määrittää kuormitettavan alueen nurkkapisteiden

koordinaatit, siten että origo $x = 0$, $y = 0$ jää vasempaan reunaan keskelle. Ennen kuin nämä vietään malliin, tehdään Attribuutit valikosta Search Area työkalun avulla tässä tapauksessa palkista alue valitsemalla palkki päätypisteineen. Tämä ilmestyy vasempaan puu-ikkunaan ja tämäkin ominaisuus lisätään palkille vetämällä. Sitten luodaan vielä irtonainen piste johonkin kohti piirustusikkunaa, joka liikutetaan siihen kohti, missä tehdyn pintakuorman origon ajatellaan sijaitsevan. Tähän raahataan luotu pintakuorma. Kuorma ei tarvitse sijaita konkreettisesti luodun palkin päällä, vaan se voi olla vaikka metrin päässä ulkoreunasta. Ohjelma laskee palkkiin kohdistuvat voimat kuorman ja kuorman etäisyyden perusteella.

Kun nämä edellä mainitut ominaisuudet on annettu kappaleelle voidaan laskenta suorittaa. Laskenta tapahtuu $=$ -merkin alta. Mikäli jokin ominaisuudesta puuttuu, tai on väärin, ei Lusas suorita laskentaa, vaan antaa virheilmoituksen, josta voi tarkastella missä kohti virhe esiintyy.

7.3.2 Laskentatulosten valinta

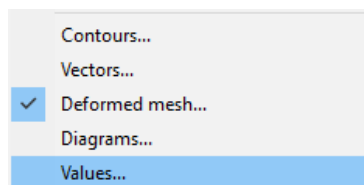
Lasketut tulokset löytyvät Lusas:ssa Analyses-lehden alta puunäkymän puolelta. Sieltä voi valita kuormitustapauksen, jonka haluaa aktiiviseksi. Kuormien lisäsvaiheessa ohjelma kysyy mille kuormitustapaukselle ne halutaan lisätä. Selkeintä on lisätä kaikki kuormat omina tapauksina, joita voi sitten laskennan jälkeen yhdistellä. Yhdistely tapahtuu Analyses välilehdeltä (kuva 51). Lusas:ssa kuormia pystyy yhdistelemään Basic ja Smart Combinations -työkalujen avulla. Tässä työssä yhdistelyt tehtiin Basic-työkalun avulla. Smart Combinationsin alta kuormille voidaan lisätä kuormakertoimet, joita kantavuudenlaskennassa käytetään. Tässä työssä keskityttiin tarkkailemaan omapainon aiheuttamaa käyttäytymistä sekä lisäkuorman sijainnin muutoksen vaikutuksia.



KUVA 51. Analyses-valikko (Roslöf 2023)

Layers-lehden alta voi tarkastella laskettuja tuloksia. Piirtoikkunassa hiiren oikean painikkeen alta löytyy Values eli arvot kohta (kuva 52), jonka voi lisätä aktiiviseksi. Tällöin se tulee näkyviin Layers-

lehdelle. Values-kohdasta pystyy valitsemaan arvot, joita haluaa tarkastella. Tässä työssä tarkasteltaviksi valittiin taipumat DZ , momentti M_x ja M_y , jännitys $S_x(M_y)$ sekä tukireaktiot FZ . Deformed mesh näyttää palkin muodonmuutoksen. Valikosta löytyy myös muita vaihtoehtoja tulosten tarkasteluun valittavaksi.

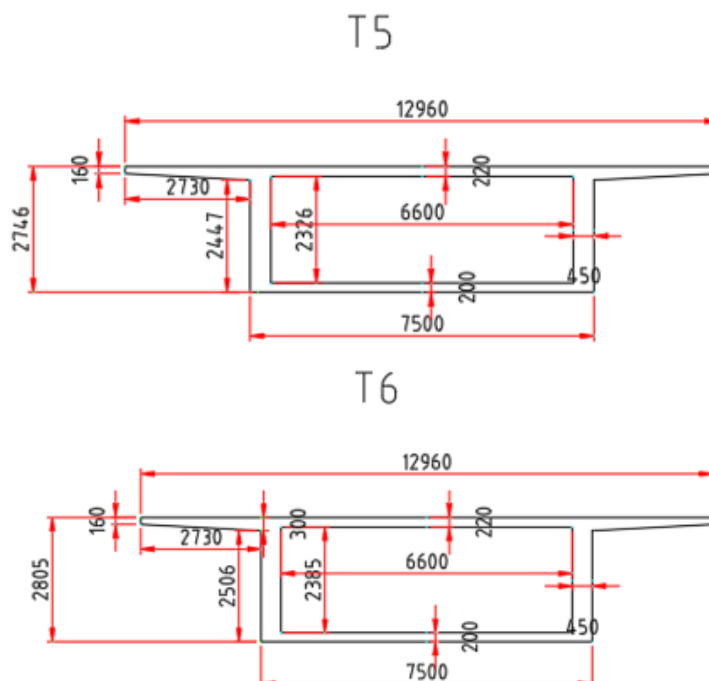


KUVA 52. Laskennan tulosten arvot löytyvät Values -valinnan takaa (Roslöf 2023)

7.4 Rakennemallin muodostaminen Kalixin sillasta

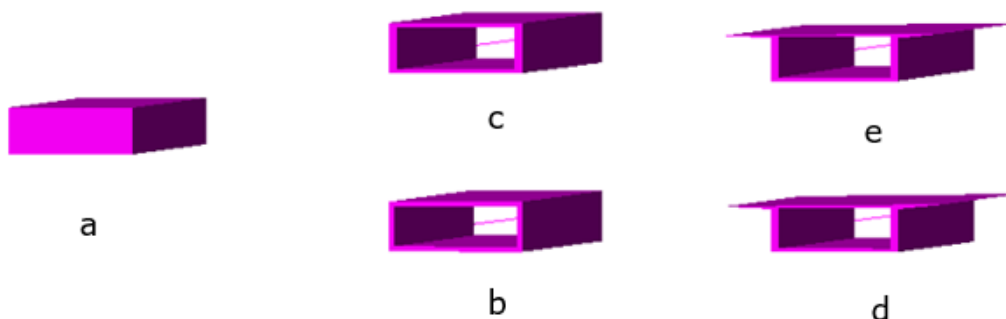
Tässä työssä ei oteta kantaa raudoituksiin, jänneteräksiin, virumaan eikä halkeamiin. Opinnäyte-työssä on keskitytty käsinlaskennan ja Lusas:n tulosten vastaavuuteen, tarkastelemaan voimasuureita kuten taivutusmomenttia, tukireaktioita, jännitystä sekä taipumaa. Vertailun vuoksi jännevälistä viisi on tuotettu ensin erilaisia poikkileikkauksia ja tarkasteltu niiden käyttäytymistä omapainosta aiheutuvalla kuormalla. Tämän jälkeen on käyty läpi muuttuvan poikkileikkauksen ja varsinaisen rakennemallin muodostamista.

Kalixin sillan jännevälän viisi pituus on 43,85 m. Palkin korkeus tuella 6 on 2,805 m, josta se pienee tukea 5 kohti arvoon 2,746 m. Poikkileikkauksuvassa (kuva 53) on esitetty keskeiset mitat tuella 5 ja 6.



KUVA 53. Sillan poikkileikkaukset tukien 5 ja 6 kohdalla (Roslöf 2023)

Kuvassa 54 on esitetty erilaisilla poikkileikkauksilla tehtyjä palkkeja. Kaikissa palkin laatikko-osan leveys on sama 7,5 m ja korkeus 2,805 m, paitsi muuttuvassa poikkileikkauksessa korkeus pienenee mentäessä tuelta 6 kohti tukea 5. Kohdassa a on jänneväli tehty umpipalkkina ja sen taipuma onkin eniten. Kohdassa b palkki on tehty onttona, mutta sen seinämänpaksuus on vakio, kun taas c -kohdassa on palkki tehty työkalulla missä seinämälle voi antaa oman paksuuden ja pohja- sekä kansi-laatalle oman. Kohta d on tehty kotelopalkki -työkalulla. Poikkileikkauksena on käytetty tuen 6 kohdalla olevia mittoja. Viimeinen kohta, kohta e on muodostettu muuttuvana kotelopalkkina, missä korkeus pienenee 59 mm tukien 6 ja 5 välillä. Näille kaikille malleille on laskettu myös käsin vastaavat arvot kuten edellä on mainittu. Liitteessä 1 on esitetty pääperiaatteet laskennan taustalla. Erilais- ten palkkien vertailu tehtiin siksi, että voidaan tarkastella muutosten vaikutuksia sekä Lusas:n ominaisuuksia. Taulukossa 5 on esitetty eri poikkileikkauksisten palkkien tulosten vertailua niin keske- nään, kuin myös käsinlaskennan ja Lusas:n välillä.



KUVA 54. Eri tavoin mallinnetut palkit (Roslöf 2023)

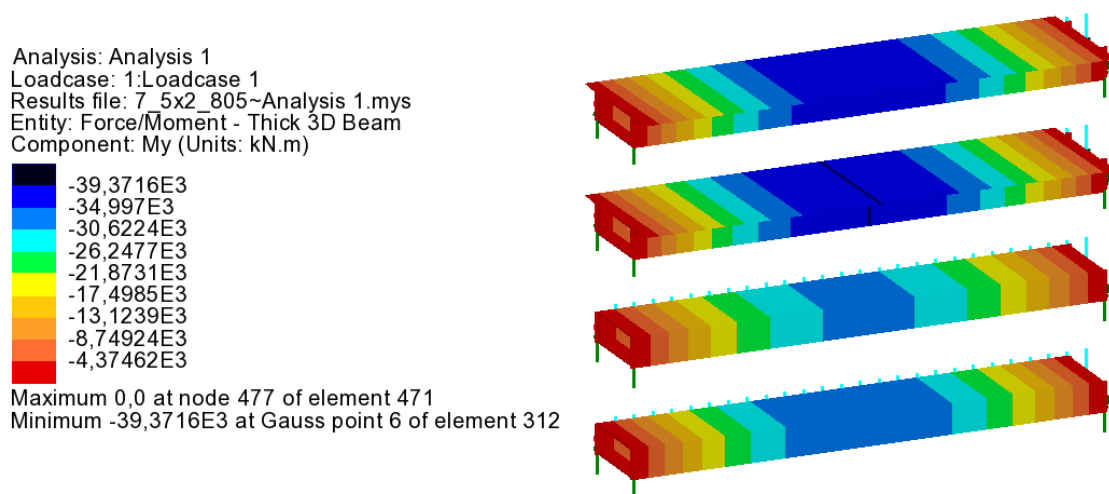
TAULUKKO 5. Viiden erilaisella poikkileikkausgeometrialla muodostetun palkin vertailutaulukko.

L= Lusas:sta otettu vertailuarvo. Muuttuvan kotelon tapauksessa on käytetty keskiarvoja korkeu- dessa, pinta-alassa ja jäyhysmomentissa.

		Umpinainen palkki 2,805 x 7,5 m	Ontto seinämät vakiot =0,30 m	Ontto pohja, katto= 0,21 seinä= 0,45	Kotelo tasainen h= 2,805	Kotelo h muuttuva h= 2,805-2,746
L= pituus	m	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85
b= leveys	m	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
h= korkeus	m	2,805	2,805	2,805	2,805	2,776
A= poikkileikkauksen pinta-ala	m ²	21,04	5,82	5,2965	6,552	6,524
q= kuorma omapainosta	kN/m	525,94	145,54	132,38	163,81	163,09
I= Jäyhysmomentti (suorakaide)	m ⁴	13,794	7,63	6,33	7,93	7,73
L	m ⁴	13,794	7,63	6,33	7,93	7,72
M _y = Momentti	kN	126411	34981	31818	39372	39199
	*10 ³ kN	126,41	34,98	31,82	39,37	39,20
L	*10 ³ kN	126,40	34,99	31,83	39,37	39,20
w= taipuma	m	0,054	0,027	0,030	0,029	0,030
L	m	0,054	0,030	0,032	0,031	0,032

Taulukossa 5 on esitetty viidelle erilaiselle palkille lasketut jäyhysmomentit, taiputusmomentit sekä taipumat. Taipuma-arvoissa on eroavaisuutta käsinlaskennan ja Lusas:n välillä noin 2 mm, missä Lusas:lla saadut arvot ovat noin 7 % suuremmat mitä käsin lasketut. Muut arvot vastaavat hyvinkin tarkasti toisiaan. Kuvassa 55 on esitetty onttojen poikkileikkausten taiputusmomenttikuvaajat.

Umpinainen palkki jätettiin pois, jotta eroavaisuudet onttojen palkkien välillä erottuvat selkeämmin kuvassa (kuva 55). Sininen väri osoittaa momentin suurimman arvon (negatiivinen suunta alaspäin).



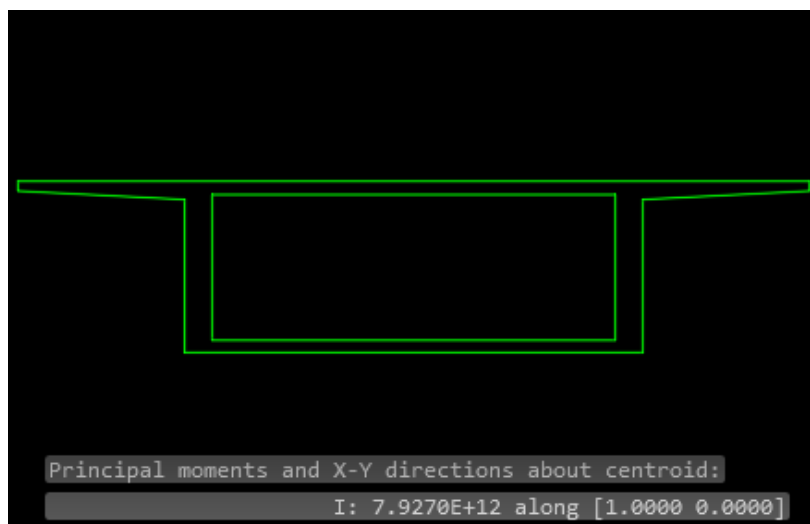
KUVA 55. Taivutusmomentit. Kuvassa on ylhäältä katsottuna muuttuva poikkileikkaus, tasainen kotelopalkki, ontto palkki eri seinämäpaksuuksilla ja alimmaisena ontto palkki vakioseinämällä. (Roslöf 2023.)

7.4.1 AutoCAD

Muodostettaessa sillasta mallia, kannattaa muodot yksinkertaistaa käsinlaskennan helpottamiseksi, jos mahdollista. Saadut tulokset tulee olla tarkastettavissa suuruusluokaltaan. Nyt AutoCad -ohjelmalla muodostettiin sillan poikkileikkausta vastaava poikkileikkaus, jota muutettiin niin, että kansilaatan yläpinta oli suora. Koska sillan poikkileikkauksesta oli olemassa jo Luulajan yliopiston tuottama Cad-malli, käytettiin siinä olevia mittoja laskennassa. Alkuperäisissä 1955-luvun piirustuksissa korkeus oli hieman pienempi, mutta nostamalla korkeutta jätettiin tässä erikseen laskuista pois sillan kannen pintakerrokset, kun vertailun perusteella niiden arvioitiin kuuluvan jo mittaan.

Kotelopalkin poikkileikkauksen jäyhyysmomentti AutoCad ohjelmassa saadaan laskettua, kun muodostetaan ulkokehästä ja kotelon reiästä omat alueet Region -komennolla minkä jälkeen vähennetään Subtract-komennolla ulkokehästä aukko. Komento tekee kappaleesta yhden kokonaisuuden, josta Massprop-käskyn avulla saadaan selville jäyhyysmomentti ja massakeskipiste. Kuvassa 56 on esitetty AutoCad ohjelmalla laskettu kotelopalkin poikkileikkaus sekä jäyhyysmomentti. Vastaava Jäyhyysmomentti Lusas:ssa (kuva 58) on $7,929 \text{ m}^4$.

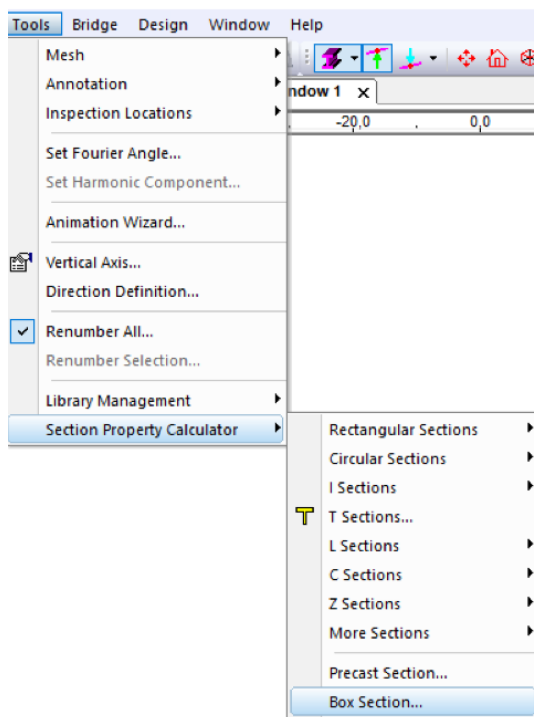
Vertailun vuoksi työssä laskettiin myös käsin vastaavan palkin jäyhyysmomentti Steinerin säännön avulla jakamalla kotelopalkki pienempiin osiin. Näitä laskuja ei ole tässä avattu vaan tyydytään toteamaan, että käsinlaskenta vastaa saatuja tuloksia.



Kuva 56. AutoCad -kuva: Kotelopalkin jäyhyysmomentti (Roslöf 2023)

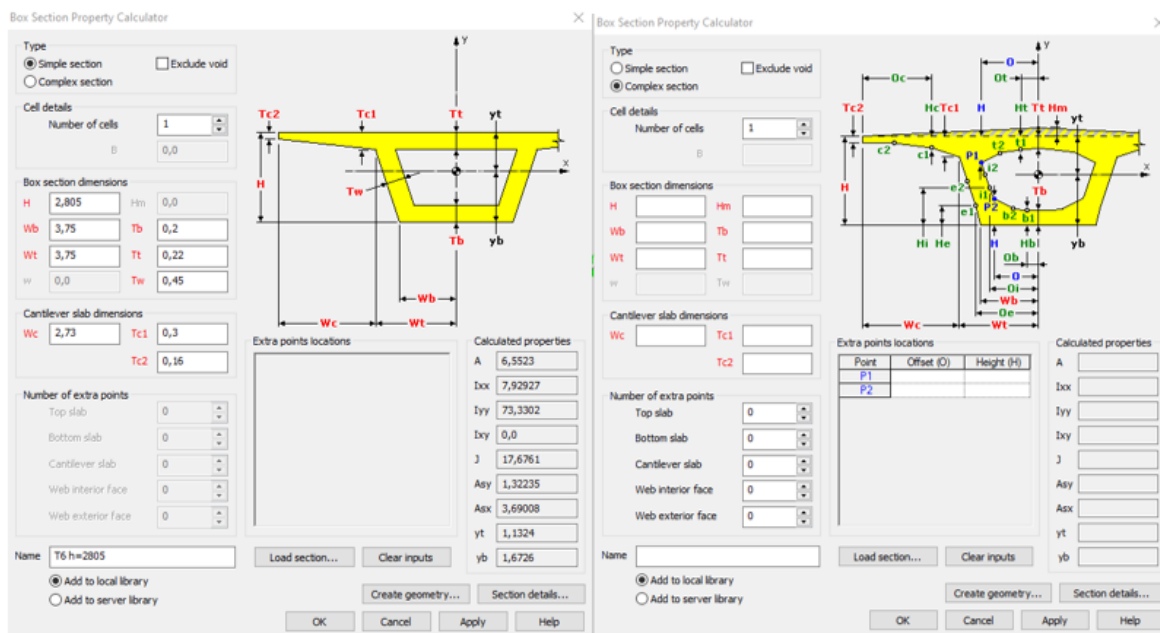
7.4.2 Kotelopalkkityökalu

Kotelopalkin tekemiseen on Lusas:ssa useampi vaihtoehto: Kansilaatan ja muun palkin voisi muodostaa erikseen tai käyttää kotelopalkki-työkalua kuten tässä työssä on tehty. Kotelopalkkityökalu löytyy Tools -valion alta (kuva 57).



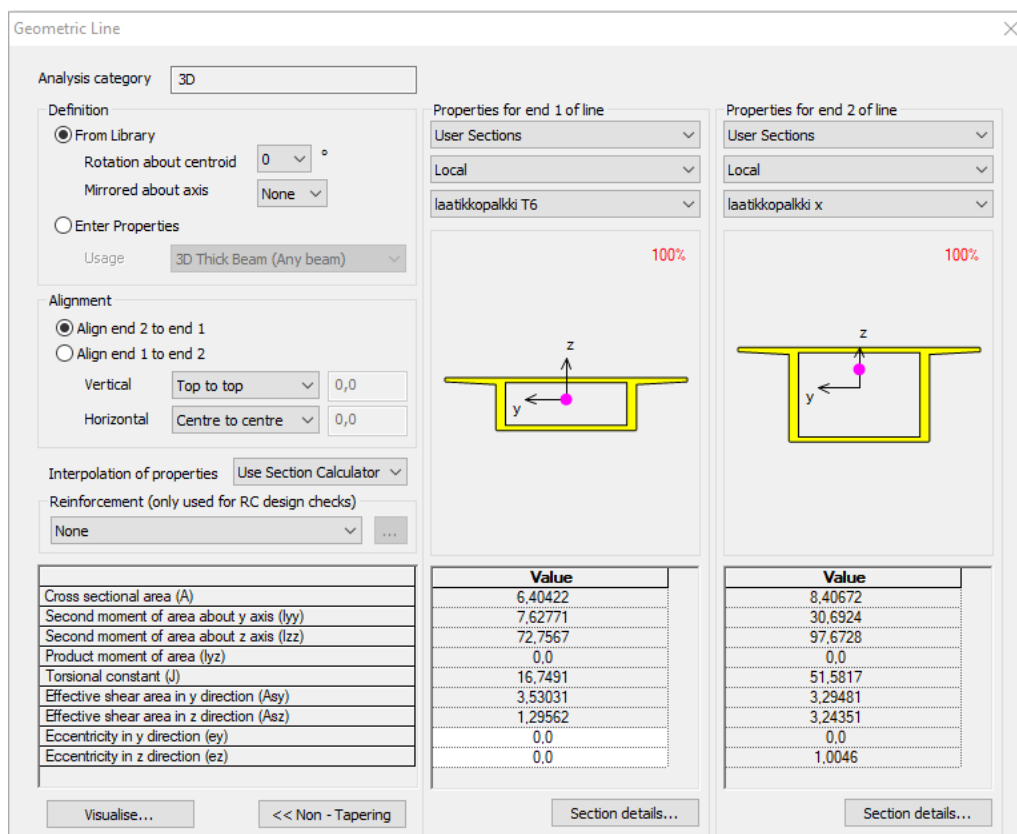
KUVA 57. Kotelopalkkityökalun sijainti (Roslöf 2023)

Kotelopalkkityökälussa on Simplex eli yksinkertainen ja Complex eli monimutkainen poikkileikkaus vaihtoehdot (kuva 58). Lisäksi palkin voi valita olevan myös umpinainen tai useammalla aukolla varustettu. Tässä tapauksessa riitti yksinkertaisen poikkileikkaus- vaihtoehdon käyttäminen rakenteen geometrian vuoksi. Tehdyt poikkileikkaukset voidaan tallentaa käyttäjän omaan kirjastoon, mistä ne ovat valittavissa malliin. Lusas laskee annettujen mittojen perusteella kappaleelle laskennallisia arvoja kuten jäyhyysmomentin.



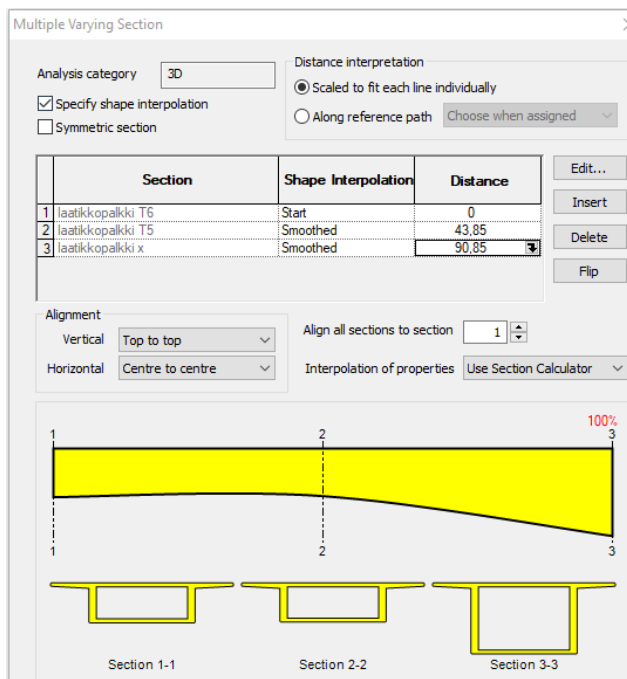
KUVA 58. Kotelopalkkityökälun kaksi eri tyyppiä (Roslöf 2023)

Attribuuttien alta poikkileikkauskirjastosta voi valita, halutaanko käyttää valmiita poikkileikkauksia vai itse tehtyjä ja tallennettuja. Käyttäjän poikkileikkaukset -kohdan alta löytyvät tallennetut leikkaukset. Jos halutaan koko välille yksi ja sama poikkileikkaus se valitaan. Jos taas halutaan, että poikkileikkaus muuttuu niin, että se on kummassakin päädyssä eri korkeinen, voidaan valita valikosta Tapered section tai Tapering valitun poikkileikkauksen kohdalta. Tätä työkalua käyttäessä kappaleen perusmuodon tulee olla sama kummassakin päädyssä. Kuvassa 59 on esitetty työkalun käyttöä. Aligmentkohdassa voi valita, miten ohjelma kohdistaa kappaleet toisiinsa nähden. Nyt valinnaksi kuvassa on valittu kohdistaa ne yläpinnan suhteen, mistä aiheutuu epäkeskisyyttä.



KUVA 59. Lusas Bridge Plus: Yksinkertainen muuttuva poikkileikkaus (Roslöf 2023)

Toinen vaihtoehto muuttuvan poikkileikkauksen tekemiseen on tehdä se Multiple Varying Section -kohdan alta (kuva 60). Tässä työkalussa on mahdollista määrittää usean kappaleen liittyminen toisiinsa syöttämällä alku ja loppupisteen etäisyydet. Muodonmuutoksen tapahtumisen voi asettaa muuttuvaksi eri tavoin kuten esimerkiksi liukuvaksi tai jotain tiettyä funktiota mukailevaksi.



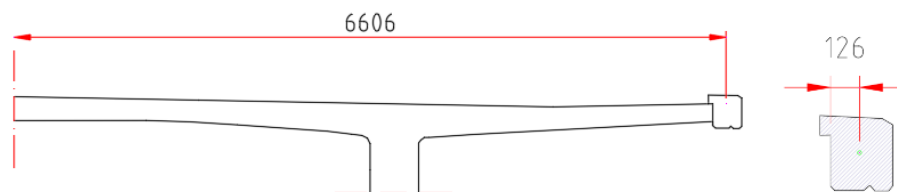
KUVA 60. Multiple Varyin Section -työkalulla voi liukuvasti muuttaa poikkileikkausta (Roslöf 2023)

7.4.3 Kuormat

Omapaino on mahdollista lisätä Lusas:ssa kuormaksi suoraan Bridge -Loading -Gravity -valikosta valitsemalla g, jolloin raahaamalla sen kappaleelle ohjelma laskee tilavuuteen perustuvan painon sillalle. Gravitaatiolla tarkoitetaan maan vetovoimaa ja sen suuruus on $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Laskennassa yleensä se pyöristetään varmalle puolelle, kun kappaleiden painoja kappaleiden painoja muutetaan kilogrammoista voiman yksiköiksi eli Newtoniksi (N). $1 \text{ kg} \Rightarrow 1 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N} \approx 10 \text{ N}$.

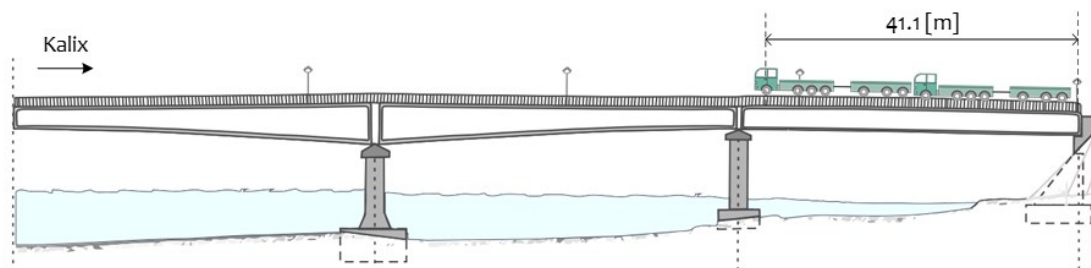
Toinen vaihtoehto lisätä omapaino on joko viivakuormana tai pinta-alakuormana tietylle alueelle. Mikäli omapainokuorma lisätään viivakuormana, tulee kappaleen olla symmetrinen pituusakselin suhteen ja jos se lisätään pinta-alalle, tulee kappaleen koko poikkileikkauksen olla symmetrinen ja homogeeninen. Tässä tapauksessa kuorma lisättiin ensin viivakuormana ja sen jälkeen vertailun vuoksi suoraan gravitaation lisäämisen kautta. Tasapaksussa, muuttumattomassa poikkileikkauksessa viivakuorma on tasainen, mutta muuttuvassa poikkileikkauksessa palkin korkeus kasvaa ja samalla myös tilavuus minkä vuoksi korkeuden muutos tulee huomioida kasvavana kolmiokuormana tasaisen kuorman lisäksi. Näin tehtiin jännevälin viisi käsinlaskuissa, ja tätä kautta saatiin tukireaktiot laskettua. Palkin korkeuden muutos saa siten aikaan painopisteen siirtymisen.

Laskennassa huomioidaan yleensä kansilaatan hyötyleveys HL, mikä tässä sillassa on 13 m (kuva 61). Esimerkkilaskelmissa on huomioitu kotelopalkin leveys 12,96 m, joten myös Lusas -malli on tuotettu vastaavilla mitoilla. Reunapalkkien massa voidaan lisätä jälkikäteen viivakuormana massakeskipisteen etäisyydelle keskiakselista. Reunapalkin paino on huomioitu viivakuormana massakeskipisteen etäisyydellä keskilinjasta eli etäisyydellä 6,606 m.



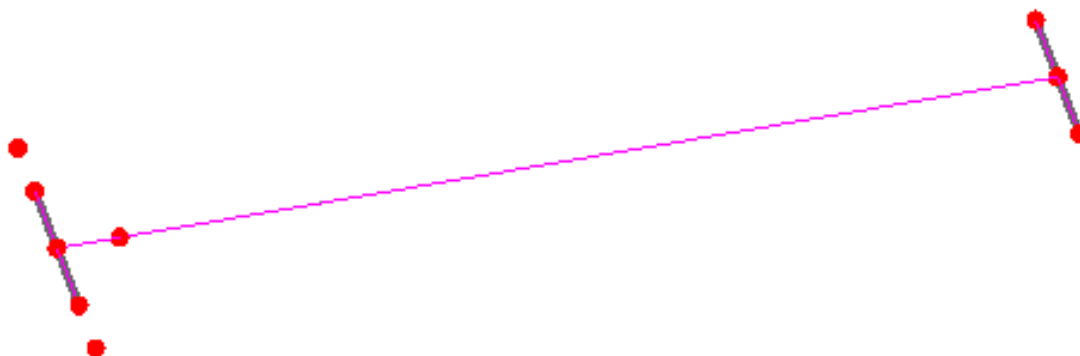
KUVA 61. Reunapalkin massakeskipisteen etäisyys sillan keskilinjasta (Roslöf 2023)

Viimeiseksi lisättiin sillalle vielä Kuormitustapaus III:n 100 %:n kuorma jännevälille viisi. Kuormat lisätään yleensä akselikuormina, mutta tässä tapauksessa se päätettiin lisäys tehdä viivakuormana. Kuorma lisättiin ensimmäisen ja viimeisen akselin väliselle pituudelle eli 38,76 metrin matkalle. Kuorman aloituspaikka oli 41,1 m tuelta 6 mitattuna (kuva 62 & 63).



KUVA 62. Kuormitustapaus III: Rekat asemassa 2 (Kalix Bridge Project 2022)

Sillan omapainosta ilman muita kuormia on muodostettu oma kuormitustapaus. Samoin muista kuormista eri paikoissa on muodostettu omat kuormitustapaukset, jotta tulosten tutkiminen olisi yksinkertaisempaa ja olisi helpommin nähtävillä miten yksittäiset kuormat vaikuttavat voimasuureisiin. Tässä opinnäytetyössä esitetään kuitenkin selkeyden sekä aiheen rajaamisen vuoksi vain Kuormitustapaus III:n vaikutusten tutkinta. Kuvassa 63 on esitetty viivamalli jännevälistä viisi. Tuet ovat mallinnettu Rigid-elementteinä eli niiden ajatellaan olevan palkin muodon ja jäykkyyden vuoksi niin jäykkiä, etteivät reagoi. Tukien päissä olevat pisteet kuvaavat palkin palkkiosan leveyttä ja tukien paikkaa. Pituusakselilla oleva irtonainen piste kuvaa rekkojen kuorman, eli tässä tapauksessa viiva-kuorman, alkamispaikkaa.



Kuva 63. Viivamalli jännevälistä viisi (Roslöf 2023)

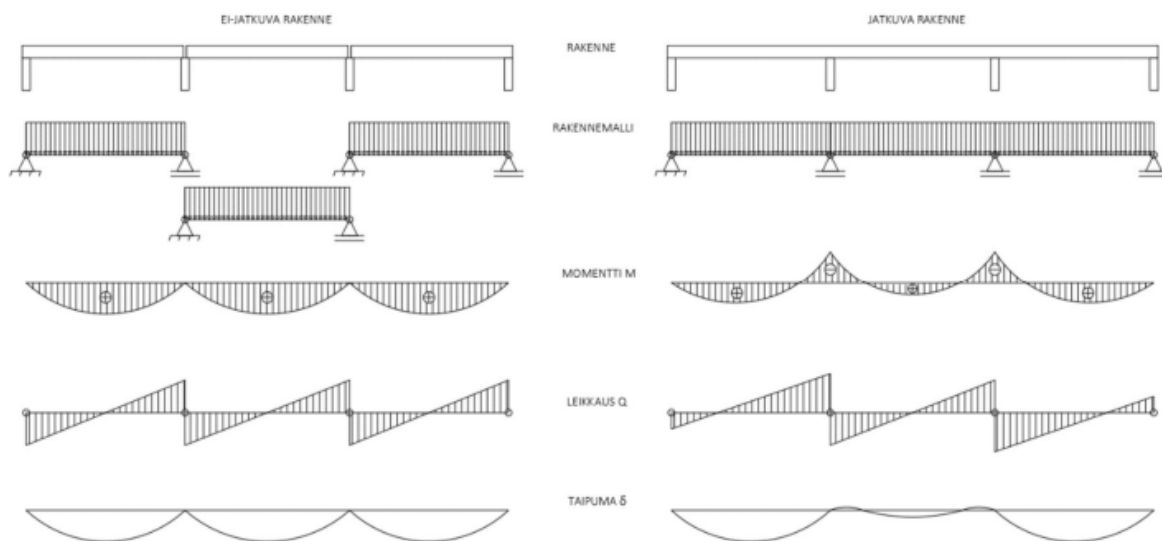
7.4.4 Tulokset, vertailu ja luotettavuus

Taulukossa 6 on esitetty muuttuvan kotelopalkin tulosten vertailu käsinlaskennan ja Lusas-mallin välillä. Käsin lasketut arvot ovat saatu Liitteessä 1 esitettyjen kaavojen avulla. Tulokset ovat suuruusluokiltaan hyvin toisiaan vastaavat. Taulukkoon on lisätty myös Kuormitustapauksen III 100 % kuormasta aiheutuvat muutokset. Koska jännevälin viisi matkalla kotelopalkin korkeus muuttuu vain 59 mm:n verran, ei muuttuvan poikkileikkauksen luomisella ole juurikaan vaikutusta. Jännityksen suhteen Lusasella saadut arvot olivat alle kymmenesosaprosentin pienemmät. Suurin ero tuli taipumissa, joissa 43,85 metriä pitkällä jännevälillä Lusas antoi 2 mm käsinlaskuja suuremmat arvot taipumalle, mikä on prosentuaalisesti 6,5 % suurempi kuin käsinlaskuilla saatu taipuma.

TAULUKKO 6. Käsinlaskuista ja Lusas:sta saadut arvot muuttuvalle poikkileikkaukselle.

	Taivutusmomentti (*103 kNm)	Jännitys (kN/m ²)	Taipuma (mm)	Tukireaktiot (N)
Käsinlaskut omapaino	40,26	5834	31	1833 ja 1838
Lusas omapaino	40,26	5829	33	1834 ja 1839
Lusas omapaino ja kuormitustapaus III	57,63	8356	47	2537 ja 2556

Koska jänneväli viisi on mallinnettu ja laskettu yksiaukkoisena palkkina, ovat taipumat suurempia kuin jos rakenne olisi jatkuva. Jatkuvassa rakenteessa momentit tasaantuvat osittain tukien ja kenttien välillä. Kuvassa 64 on havainnollistettu jatkuvuuden vaikutusta palkin toimintaan momentin, leikkausvoiman ja taipumisen osalta. Kalixin sillassa keskimmäinen aukko oli kaksinkertainen pituudeltaan muihin jänneväleihin.



KUVA 64. Ei-jatkuvan ja jatkuvan rakennemallin eroja (Liimatta 2020, 12)

Jatkuvuuden vaikutuksen havainnollistamiseksi työssä muodostettiin vielä kokonaisen sillan rakennemalli muuttuvan poikkileikkauksen työkalulla (Multiple Varying Section) antamaan suuntaa rakenteen käyttäytymisestä jatkuvana. Kuvassa 65 on esitetty Lusas:lla tuotettu malli Kalixin sillasta, jossa kuormaksi on huomioitu pelkkä omapaino eikä mallissa ole huomioitu jänteiden vaikutusta. Siinä tuet 1/6 ja 2/5 ovat tehty sillan pituussuuntaisen liikkumisen sekä kiertymät mahdollistaviksi. Tuet 3 ja 4, jotka toimivat nivelinä ovat tehty niin, että ne ottavat vastaan liikkeen pysty- ja vaakasuunnissa, mutta sallivat kiertymisen tukien akselin ympäri. Näissä tuloksissa voi esiintyä virhettä, koska näiden vertailuksi ei ole tehty laskennallista tarkastamista käsin.

Kalixin sillasta on Luulajassa tuotettu lineaarinen ja ei-lineaarinen malli, jossa reunaehdot ovat määritetty ottamalla kantaa liikkeisiin x , y ja z -suunnissa, ei kiertymiin. Koska käytetyistä oletuksista ei ole tarkempaa tietoa, ei taipumien vertailu tuo juuri lisätietoa. Materiaalia kyseisestä mallista oli hyvin rajallisesti saatavilla opinnäytetyön tekovaiheessa. Tämän vuoksi tuloksia ei ole avattu sen enempää kuin toteamalla oletuksen taipuman pienenemisestä jännevälissä viisi pitävän paikkansa. Vertailua suoranaisesti Kalixin sillan mittaustulosten on omatuottaman mallin välillä ei ole järkevää tehdä, koska oikea rakenne on jännitetty, millä on vaikutettu sillan kokonaiskäyttäytymiseen ja pyritty hillitsemään taipumien kasvua.



KUVA 65. Koko sillan rakennemalli (Roslöf 2023)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyöprosessi alkoi opiskelujen kolmantena vuotena, kun tuli hieno tilaisuus päästä mukaan Kalixin projektiin ohjaavan opettajani ja esimieheni kautta. Prosessi oli pitkä ja osa suurempaa tutkimuskokonaisuutta. Lähde- ja tutkimusmateriaalia oli todella paljon ja projektin kautta tulleet lähteet olivat kaikki englanniksi ja ruotsiksi, mikä lisäsi omaa ajankäyttöä. Tätä kautta myös virhemahdollisuus herkästi kasvaa, kun tieteellistä tekstiä käännetään toisesta kielestä. Tämä oli myös hyvä tilaisuus päästä lukemaan ja omaksumaan oman alan sanastoa englanniksi, sillä alaan liittyvä yksityiskohtaisempi ja tutkimustieto on usein kansainvälistä ja julkaisut ovat englanniksi.

Prosessi lähti osaltani käyntiin tammikuussa 2022 ja oma osuuteni on tarkentunut ja hakenut muotoaan prosessin myötä. Pidempi aika on mahdollistanut myös asioiden hidasta kypsymistä omassa ajattelussa kokonaisuudeksi. Oli myös hyvin motivoivaa työuran alussa päästä näkemään iso tutkimushanke ja käymään myös paikan päällä, missä pääsi tutustumaan tutkijoiden työhön. Pääsin tätä kautta mukaan tutkimaan siltojen kunnan tutkimusprosessia sekä kuormituskokeita. Projektin laaja materiaali, mitä sain käyttööni Luulajasta tutkimusryhmältä, oli minulle hyvin hieno mahdollisuus saada kootusti tutkittua tietoa omaan ammattiin liittyen eri puolelta maailmaa. Vaikka kaikkea ei ollutkaan opinnäytetyön ajan puitteissa mahdollisuus käydä läpi, on siihen kuitenkin mahdollisuus palata tarvittaessa ja niiden kautta löytää uusiakin julkaisuja.

Kalixin tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää uusien tapojen luotettavuutta siltojen kunnan selvittämisessä. Vertailukohtana rinnalla kulki vanhat ja luotettavat tavat. Tutkimusprosessi Ruotsissa jatkuu vielä, vaikka oma osuuteni loppuikin. Siinä vaiheessa, kun kirjoitin opinnäytetyötä, eivät kaikki tulokset olleet vielä valmistuneet, mutta myös tutkimuksesta oli jo tehty julkaisuja. Tutkimuksissa ollaan hyvin suppealla osaamisalalla, missä maiden väliset käytänteet vaihtelevat paljon, ja valmiita vastauksia ei kaikkiin asioihin ole. Lopputuloksena voi olla, että tutkitun menetelmän luotettavuudesta ei ole riittävää näyttöä ja tarvitaan lisätutkimuksia. Vaikka suuria mullistavia löytöjä ei olisi-kaan, on tällaisen pohjatyön aloittaminen ja tekeminen tärkeää, että voidaan jatkaa uusien menetelmien kehittämistä. Uudet keksinnöt ja teknologia tarvitsevat koekenttää ennen vakiintumista käyttöön.

Kalixin silta oli haastava kohde; pitkä, jännitetty kotelopalkkisilta. Mikäli pääpaino opinnäytetyössä olisi ollut hyvin tarkkaan todellisuutta vastaavan mallin muodostamisessa olisi opinnäytetyö muodostunut pelkästään mallin ympärille. Siksi näen oman opinnäytetyöni painon enemmän tutkimusmenetelmiä kartoittavana ja ensikosketuksena Lusas:n maailmaan kuin välttämättä vertailevana. Pääpaino Lusas-mallin tekemisessä oli saada siitä luotettava ja tätä kautta saada Lusas:sta luotettava työkalu itselle siten, että on ymmärrys, mistä sen ilmoittamat tulokset muodostuvat. Tämän vuoksi olikin tärkeää saada käsinlaskut ja Lusas:sen tulokset vastaamaan toisiaan. Alussa muodostin hyvin yksinkertaisen mallin, jonka käyttäytymisen pystyin laskemalla todentamaan. Tähän malliin lisäsin sitten vähitellen asioita ja monimutkaisuutta niin, että edelleen tulokset vastasivat.

Lusas-mallin tuottamisen koin työssä aika haastavana, koska kyseessä oli itselle täysin uusi ohjelma eikä lähtötilanteessa ollut mitään käsitystä, kuinka se toimii ja mistä asiat löytyvät. Opintojen puolesta olin kyllä käyttänyt toisen yrityksen vastaavaa ohjelmaa. Ohjauksen ja sinnikkään kokeilun

kautta ymmärrys alkoi kuitenkin lisääntyä. Oli hyvin palkitseva vaihe opinnäytetyössä, kun käsinlaskenta vastasi ohjelmasta saatavia tuloksia ja se ruokki omaa kiinnostusta opetella lisää.

Destian hyödyn kannalta oma ammattitaitoni lisääntyi, koska tuleva ammattini tulee olemaan kantavuuden tarkastelun parissa, mille tämä työ ja Lusas:n toiminnan opettelu loivat hyvin pohjaa. Oli hieno mahdollisuus päästä jo opiskeluaikana perehtymään Lusas:n käyttöön, vaikkakin koen vasta pintaraapaisun siihen tehneeni, mutta alkuun on päästy, ja siitä on hyvä lähteä jatkamaan.

Odotan innolla, että saan nähdä Luulajan yliopiston tuloksia projektista lisää, kunhan ne valmistuvat. Tähänastisista tuloksista voinee todeta, että uusien menetelmien käyttö vaikuttaa lupaavalta, tosin lisää kenttätutkimusta tarvitaan vielä. Kuormituskokeet ovat nostaneet päätään viime aikoina hiljaiselon jälkeen koska on ollut tarve selvittää siltojen todellista kapasiteettia. Tämä osoittaa myös, että tarvetta tutkimusmenetelmien kartoitukselle sekä kantavuuslaskennan kehittämiseksi on.

LÄHTEET

- Aalto, Jukka julkaisuaika tuntematon. Rak-51.1200 Rakenteiden lujuusoppi luentoja, osa II. Luento-moniste. Aalto-yliopisto. Pdf-tiedosto. http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/RLP_L.pdf. Viitattu 15.12.2022.
- Anttila, Virpi 2022. Tavoitteena kestävä infra. Siltatekniikan päivät 2022. Väylävirasto. Pdf-tiedosto. https://www.betonyhdistys.fi/media/siltatekniikan-paivat/2022/siltatekniikkapaivat2022_anttila.pdf. Viitattu 15.12.2022.
- Agisoft 2017. PhotoScan. Fully automated professional photogrammetric kit 2017. Pdf-tiedosto. https://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf. Viitattu 30.1.2023
- Autoalan tiedostuskeskus 2022. Tilastot. Autokannan kehitys ja autotiheys. Verkkojulkaisu. Päivitetty 3.1.2022. https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/liikennekaytossa_olevat_autot. Viitattu 15.3.2023.
- Betoniteollisuus 2010. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 1: Eurokoodimitoituksen perusteet. Pdf-tiedosto. https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_1_Eurokoodimitoituksen_perusteet.pdf. Viitattu 3.2.2023.
- Betonitieto 2022. Jännitettyjen rakenteiden perusteet. <https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/rakenteiden-toteutus suunnittelu-ja-mitointi/jannitetyt-rakenteet.html>. Viitattu 5.9.2022.
- BY211 2013. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja. Osa 1. Suomen Betonyhdistys.
- Cai, Chun S. & Mohsen, Shahawy 2003. Understanding Capacity Rating of Bridges from Load test. Pracice periodical on structural design and construction. ASCE. 8(4): 209–216. Viitattu 11.1.2023.
- DTU. Technical University of Denmark. Verkkojulkaisu. <https://www.dtu.dk/english/news/all-news/nyhed?id=c755278a-d61a-48b2-91f2-57d5535c58d5>. Viitattu 27.3.2023.
- EC5 Sovelluslaskelmat Hallirakennus 2010. Eurokoodi 5. Toinen painos. PuuInfo. Pdf-tiedosto. https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1895433/mod_resource/content/0/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf. Viitattu 1.2.2023.
- ELY-keskus 2022. Tienpidon ja liikenteen suunnitelma 2022. Pdf-tiedosto. Julkaistu 6.1.2022. <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/58175/Pohjois-Savon+ELY+Tienpidon+ja+liikenteen+suunnitelma+2022.pdf/17e47882-8470-2150-dcfd-b515ff3afab7?t=1654070394012>. Viitattu 12.12.2022.
- ELY-keskus 2023. Sillat. Verkkojulkaisu. Päivitetty 11.1.2023. <https://www.ely-keskus.fi/sillat>. Viitattu 15.1.2023.
- Frontiers 2023. Diagnostic and Proof Load Tests on Bridges. Verkkojulkaisu. <https://www.frontiersin.org/research-topics/7721/diagnostic-and-proof-load-tests-on-bridges>. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2019.00041/full> Viitattu 16.1.2023
- Gonzalez-Libreros, J.H., Wang, C., Agredo, A., Sarmiento S., Tua, Y., Daescu, C. & Sas, G 2022. Development Of a Bridge Load Test Procedure for Temperature Conditions.
- Junkkari, Tuure 2019. Betonirakenteen puristuslujuuden määrittäminen NDT-menetelmin. Opinnäytetyö. Rakennustekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019112021753>. Viitattu 3.1.2023.
- Järvenpää, Tuomo 2022. Betonisiltojen korjaus- ja vahventamissuunnitteluohje. Siltatekniikan päivät 2022. Ponvia Oy 26.4.2022. Pdf-tiedosto. <https://www.betonyhdistys.fi/media/siltatekniikan->

paivat/2022/tuomo-jarvenpaa-betonisiltojen-korjaus-ja-vahventamissuunnitteluohje-26042022.pdf. Viitattu 12.12.2022.

Kalix Bridge Project 2022. Testbed and Demolition. Final Raport. Raportti ja sen lähdemateriaalit Luulajan yliopiston hallussa.

Kiwa julkaisuaika tuntematon. Betonirakenteiden NDT-tutkimukset. Verkkójulkaisu. <https://www.kiwa.com/fi/fi/kampanjat/turvallinen-ja-terveellinen-kiinteisto-viikko/betonirakenteiden-ultraaani-ja-tutka-aalto-tutkimukset/>. Viitattu 12.1.2023.

Koskela, Tuomo 2011. MIRA-ultraäänitomografian käyttö jännitetyjen siltojen tutkimuksiin. Opinnäytetyö. Rakennustekniikka. YAMK. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27058/Tuomo_Koskela.pdf?sequence=1. Viitattu 12.12.2023.

Lahti, Otto 2019. Traficom: HCT-aikakauden standardimitat. Ammattilehti.fi 29.07.2019. <https://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?162264>. Viitattu 14.12.2022.

Lantsoght, Eva O. L. 2020. Editorial: Diagnostic and Proof Load Tests on Bridges. Frontiers in Built Environment. Pdf-tiedosto. Julkaistu 15.10.2020. <https://www.frontiersin.org/research-topics/7721/diagnostic-and-proof-load-tests-on-bridges>.

Liikennevirasto 2013. Taitorakenteiden tarkastusohje. Liikenneviraston ohjeita 17/2013. Pdf-tiedosto. Julkaistu 12.4.2013. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2013-17_taitorakenteiden_tarkastusohje_web.pdf. Viitattu 16.1.2023.

Liikennevirasto 2015. Siltojen kantavuuslaskentakoulutus. Luentoaineisto. Pdf-tiedosto. Julkaistu 23.4.2015. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Muut/koulutus_2015_siltojen_kantavuuslaskenta_20.4.2015_web.pdf. Viitattu 23.10.2022.

Liimapuukäsikirja Osa 2. Suomen Liimapuuyhdistys Ry ja Puuinfo Oy. Pdf-tiedosto. Julkaistu 17.7.2020. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-2.pdf>. Viitattu 2.2.2023.

Liimatta 2020. FEM- ja käsinlaskennan erot jatkuvien betonipalkkien mitoituksessa. Tekniikka Lappeenranta Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus. Talonrakennustekniikka. LAB-ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335792/FEM-%20ja%20k%C3%A4sinlaskennan%20erot%20jatkuvien%20betonipalkkien%20mitoituksessa.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Viitattu 2.4.2023.

LTU. 2022. Luleå University of Technology. Old bridge gets second life in research. Julkaistu 13.1.2022. <https://www.ltu.se/research/subjects/Bygghkonstruktion/Nyheter/Uttjant-bro-i-forsknings-tjanst-1.212478?l=en>. Viitattu 15.11.2022.

Luna 2022. ODiSI 6000 Series. <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/data-sheet/Luna%20ODiSI%206000%20Data%20Sheet.pdf>. Viitattu 2.1.2023

Lundin, Hanna. 2021. Study of demolition processes for prestressed concrete bridges: Kalix bridge.

Mikkola, Martti, Nyman, Karl-Gustav, Paasikallio, Kari 1986. Jännebetonirakenteiden mekaniikka ja mitoitus. 1-luokan betonirakenteiden suunnittelija 1986 by 131. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Määttä, Riikka 2021. Muuttuvien tulvien vaikutus siltoihin ja niiden suunnitteluun. Diplomityö Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampereen Yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/135933/MaattaRiikka.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

NCCI 1. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet. Eurokoodin soveltamisohje. Liikenneviraston ohjeita 24/2017. Pdf-tiedosto. Julkaistu 6.12.2017. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2017-24_ncci1_web.pdf. Viitattu 15.12.2022.

NCCI 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Eurokoodin soveltamisohje. Väyläviraston ohjeita 5/2022. Pdf-tiedosto. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf. Viitattu 15.12.2022.

Nenonen Marko 2021. Liikenneinfrastruktuuri rakennetun ympäristön muokkaajana Suomessa 1945–2000. <https://www.rakennettuhyvinto.fi/sv/liikenteen-ja-energian-verkostot/liikenneinfrastruktuuri1-rakennetun-ympariston-muokkaajana-suomessa-1945-2000>. Viitattu 15.1.2023.

Nilimaa, Nilfroush, Bagge & Elfgren 2017. Testing to Failure of a 55-year-old Prestressed Concrete Bridge in Kiruna Bending, Shear and Punching of Girders and Slab. Fracture Properties of Materials Test Results, Modelling and Assessment. Final Report BBT 2017-030. Luleå University of Technology.

Nyblom, Jacob. 2016. Jälkijännitetty betonirakenne. Examensarbete för ingenörs (YH)-examen Utbildningsprogrammet för Byggnadsteknik Yrkehögskolan Novia, Vasa. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/115994/Jalkijannitetty_betonirakenne_Opinnaytetyo_Nyblom_09.04.2016.pdf?sequence=1. Viitattu 18.3.2023.

PCTE 2022. MIRA-Ultrasonic Pulse Echo Imaging. Verkkojulkaisu. <https://www.pcte.com.au/mira-ultrasonic-pulse-echo-imaging>. Viitattu 12.1.2023.

Pukki, Jouni 2022. Betonirakenteiden lujuudentestaus – uudet ohjeet. Betoniviidakko Oy. Pdf-tiedosto. https://www.betoniyhdistys.fi/media/betoniaamut_jp_ti.pdf. Viitattu 13.1.2023.

Putkinen, Juha 2019. Siltojen monitorointi. Putkinen J. 2019. Opinnäytetyö. Talonrakennustekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201904307006>. Viitattu 11.12.2022.

Rakennustaito 2016. Siltamestarit alkavat olla harvinaisia. RT 02/2016. Päivitetty 2023. <https://rakennustaito.fi/siltamestarit-alkavat-harvinaisia/>. Viitattu 11.11.2022.

Ramboll. Julkaisuaika tuntematon. Siltojen ja muiden taitorakenteiden tarkastukset. <https://fi.ramboll.com/-/media/files/rfi/product-brochures/infra/siltojen-ja-muiden-taitorakenteiden-tarkastukset.pdf?la=fi>. Viitattu 1.12.2022.

Raunio, Heini 2022. Kantavuustietojen merkitys ja Tietovirrat. Siltatekniikan päivät 2022. Pdf-tiedosto. Julkaistu 24.4.2022. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/siltatekniikan-paivat/2022/siltatekniikan-paivat-2022-heini-raunio.pdf>. Viitattu 15.12.2022.

RIL 179-2018 Sillat. Suunnittelu, toteutus ja ylläpito 2018. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Ruotanen, Juho 2012. SIR-3000-maatutkan soveltuvuus teräsbetonirakenteiden tutkimiseen. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012060311341>. Viitattu 14.12.2022.

Screening Eagle 2022a. Profometer. Operating Instructions. Proceq. Pdf-tiedosto. https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Profometer_Operating%20Instructions_English_high.pdf. Viitattu 13.1.2023.

Screening Eagle 2022b. Pundit PL-200. Ultrasonic pulse velocity. Proceq. Pdf-tiedosto. https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf. Viitattu 13.1.2023.

Silko 1.352. Laakerit ja nivelet. Yleiset laatuvaatimukset 3/2021. Väylävirasto Taitorakenneyksikkö. Pdf-tiedosto. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/silko/kansio1/s1352_web.pdf. Viitattu 15.12.2022.

Sormunen, Timo 2005. Statiikan peruskurssin oppimateriaali. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Talonrakennustekniikka. https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/529823/mod_resource/content/0/Statiikan_oppimateriaali.pdf. Viitattu 2.4.2023.

Suomen Maatutkapalvelu julkaisuaika tuntematon. Maatutkaluotaus. <https://www.maatutkalla.fi/maatutkaluotaus/>. Viitattu 17.12.2022.

Syrjä, Risto 2019. Elementtimenetelmään perustuvan ohjelman käytön perusteet. Aalto Yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu Rakennustekniikan laitos. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/952739/course/section/143156/L_FEM_FI_20190905.pdf.

Tieliikennelaki 10.8.2018/729. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180729#L5P126>. Viitattu 5.11.2022.

Tieto.Traficom 2021a. Raskaan liikenteen erityisasiat. Verkkajulkaisu. Päivitetty 30.1.2023. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/raskaan-liikenteen-erityisasiat>. Viitattu 5.12.2022.

Tieto.Traficom 2021b. Maantieverkon sillat ja silloituskohteet. Päivitetty 31.01.2023. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/maantieverkon-sillat-ja-silloituskohteet>. Viitattu 5.12.2023.

Traficom 2020. Pidemmät ja raskaammat HCT-rekat. Liikenne- ja viestintäministeriö. Verkkajulkaisu. Päivitetty 13.2.2020. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/pidemmät-ja-raskaammat-hct-rekat?toggle=Julkaisuja%20ja%20tutkimustuloksia>. Viitattu 5.12.2022.

Traficom 2022. Pitkät HCT-rekat yleistyvät nopeaa tahtia. Liikenne- ja viestintäministeriö. Verkkajulkaisu. Julkaistu 7.12.2022. <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/pitkat-hct-rekat-yleistyvat-nopeaa-tahtia>. Viitattu 5.12.2022.

Trafikverket 2023. Så sköter vi broar och tunnlar. <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall/sa-skoter-vi-broar-och-tunnlar/>. Viitattu 19.3.2023.

Trilion 2023. Aramis 3D. Verkkajulkaisu. <https://www.trilion.com/aramis>. Viitattu 11.1.2023.

Uudenmaan ELY-keskus 2022. Sillat ja muut taitorakenteet. Uudenmaan RLY-keskuksen tienpidon ja liikenteen suunnitelma 2023–2026. <https://www.tienpidonsuunnitelma.fi/yhteistyolla-turvallista-ja-sujuvaa-liikennetta/tieverkon-kunnossapito/sillat/>. Viitattu 13.12.2022.

Valtioneuvoston asetus ajoneuvon käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 31/2019. Julkaistu 10.1.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190031?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=ajoneuvosten%20k%C3%A4yt%C3%B6st%C3%A4%20tiell%C3%A4>. Viitattu 7.12.2022.

Väylä 2019. Maantiesiltojen vuositarkastusohje. Väyläviraston ohjeita 17/2019. Pdf-tiedosto. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2019-17_maantiesiltojen_vuositarkastusohje_web.pdf. Viitattu 3.1.2023.

Väylävirasto 2019. Vuosikymmen maanteillä: Liikennemäärät ja korjausvelka kasvaneet. Verkkajulkaisu. Julkaistu 13.12.2019. <https://vayla.fi/-/vuosikymmen-maanteilla-liikennemaarat-ja-korjausvelka-kasvaneet>. Viitattu 7.12.2022.

Väylävirasto 2020. Sillantarkastuskäsikirja. Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Väyläviraston ohjeita 33/2020. Verkkojulkaisu. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-33_sillantarkastuskasikirja_web.pdf. Viitattu 15.12.2022.

Väylävirasto 2021. Liikenneväylien korjausvelka 2021. Väyläviraston julkaisuja 5/2021. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/181983/vj_2021-05_978-952-317-840-3.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu 15.12.2022.

Väylävirasto 2022. Siltatekniikan päivät. Julkaistu 14.12.2022. <https://vayla.fi/-/siltatekniikan-paivat2023>. Viitattu 23.2.2023

Väylävirasto 53/2022. Väyläviraston sillat 31.12.2021. Sillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. Osa 1 Tiesillat, Osa 2 Rataverkon sillat. Väyläviraston julkaisuja 53/2022. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/185731/vj_2022-53_978-952-317-991-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu 10.11.2022.

YIT 2020. Jalkijännitys auttaa kantamaan suurempia kuormia. Verkkojulkaisu. Päivitetty 2023. <https://www.yit.fi/ytimessa/jalkijannittaminen>. Viitattu 23.11.2022.

YLE 2018. Verkkojulkaisu. <https://yle.fi/a/3-10354143>. Viitattu 3.3.2023.

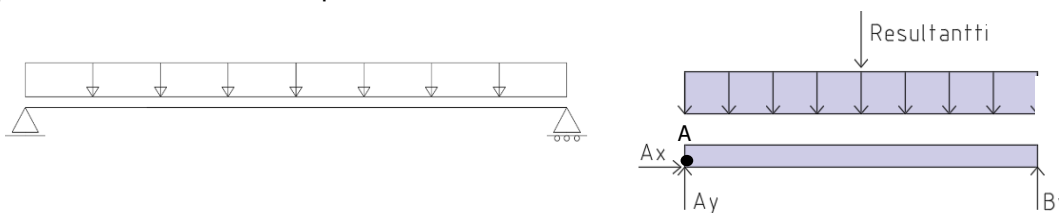
YLE 2021. Siltojen korjausvelka kasvaa rahoituksen puutteessa – Satakunnassa lähes 50 huonokuntoista siltaa. Uutiset. Verkkojulkaisu. Julkaistu 13.3.2021. <https://yle.fi/a/3-11842714>. Viitattu 15.12.2022.

Äijälä, Markku 2022. Ajankohtaisia taitorakenteista ja Taitorakenneyksiköstä. Siltatekniikan päivät 2022. Väylävirasto. Pdf-tiedosto. Julkaistu 26.4.2022. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/siltatekniikan-paivat/2022/ajankohtaisia-taitorakenteista-ja-taitorakenneyksikosta.pdf>. Viitattu 15.12.2022.

LIITE 1. KÄSINLASKENNAN PERUSTEET JÄNNEVÄLIN VIISI TARKAKASTELUSSA

Tasapainotarkastelu ja tukireaktiot

Ensin laskut käytiin läpi yksinkertaisella palkilla. Samanlainen palkki muodostettiin myös Lusas:een. Tämän jälkeen palkiksi valittiin Kalixin sillan mitoilla oleva palkki, jonka poikkileikkaus tarkentui erilaisista palkkivaihtoehdoista muuttuvaan kotelopalkkiin. Palkin alkupään liike on estetty ja siinä on kiinteä tuki, kun taas loppupään liike on sallittu kappaleen pituuden suunnassa. Tästä on rakennemallikuva (kuva 1) alla esitetty. Rakennemallin perusteella tehtiin vapaakappalekuva, jossa näkyy palkin tuenta kummastakin päästä sekä siihen kohdistuvat kuormat.



KUVA 1. Rakennemalli- ja vapaakappalekuvat (Roslöf 2023)

Koska kappale pysyy paikallaan, saadaan tasapainoyhtälöt:

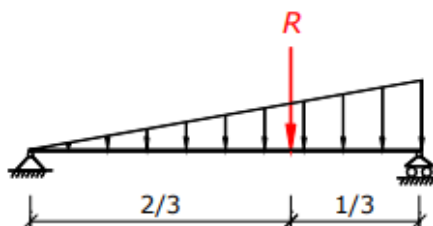
$\Sigma F_x = 0$, Vaakasuuntaisten voimien summa, suunta \Rightarrow positiivinen

$\Sigma F_y = 0$, Pystysuuntaisten voimien summa, suunta \Downarrow positiivinen

$\Sigma M = 0$, Momenttien summa, pisteen A suhteen, suunta \curvearrowright positiivinen.

Mikäli pistemäisten tukien sijaan palkki on tuettu kummastakin päästä kahdella tuella, tapahtuu tukireaktioiden laskenta vastaavalla tavalla huomioiden toki kuorman asemoinnin. Mikäli palkki on edellä mainitun lainen tasainen, tulee palkin kuormasta puolet alkupäättyyn missä se jakautuu edelleen tuille tasaisesti, mikäli kuorma on keskellä. Jos kuorma on epäkeskeisesti keskilinjaan nähden, huomioidaan se voiman etäisyytenä. (Sormunen 2005, 44)

Mikäli voima on tasaisesti ja lineaarisesti kasvava muodostaa se kolmiokuorman ja sen resultantti sijaitsee kolmion painopisteessä, eli kolmanneksen päästä raskaammin kuormitetusta päästä (kuva 2). Esimerkiksi kappaleen korkeuden kasvusta aiheutuvan massan kasvun voi ajatella olevan kolmiokuorma tasaisen kuorman lisänä.



KUVA 2. Kolmiokuorma ja resultantin sijainti (Sormunen 2005, 25)

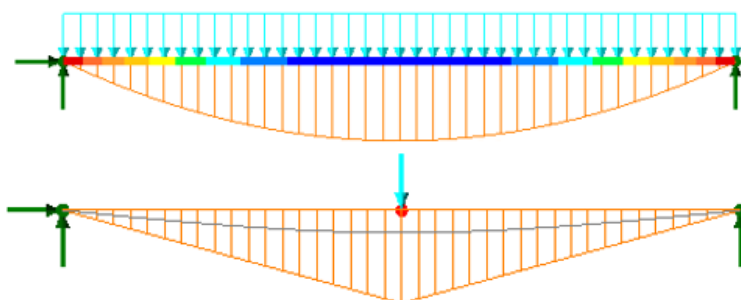
Momentti

Taivutusmomentti M_y

Suoran, tasapaksun palkin maksimi taivutusmomentti tasaisella kuormalla saavutetaan keskellä palkin jänneväliä ja se saadaan kaavalla (1). Tasaisesta kuormasta aiheutuvalle momentille lauseke on (Tekniikan kaavasto, 148):

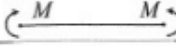

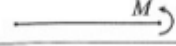

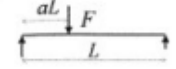
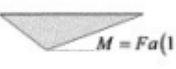
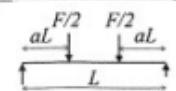

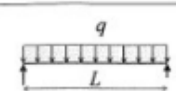

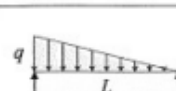

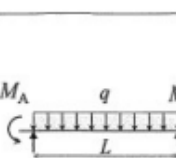
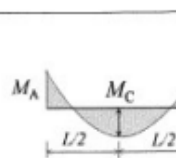
$$M_{MAX} = \frac{qL^2}{8} \quad (1)$$

Yksinkertaisen, päistään tuetun palkin momenttikuvaaja Lusas:sta otettuna on esitetty kuvassa 3. Ylhäällä tasaisesta kuormasta aiheutuva taivutusmomentti M_y ja alhaalla keskellä jänneväliä olevan pistekuorman aiheuttava momentti.



KUVA 3. Momenttikuvaajat Lusas:sta (Roslöf 2023)

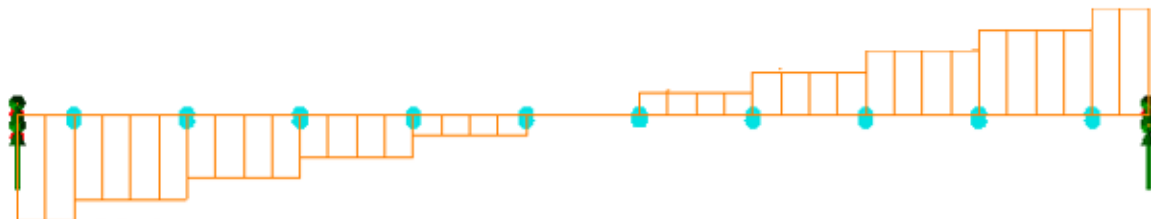
Kuvassa 4, mikä on otettu Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjasta By211, on esitetty suoran palkin taivutusmomentteja erilaisilla kuormilla. Kuvassa on esitetty myös kolmiokuorman momentin laskenta.

Kuormitus	Taivutusmomentti
	 M
	 M
	 $M = Fa(1-a)L$
	 $M = \frac{FaL}{2}$
	 $M = \frac{qL^2}{8}$
	 $M = \frac{qL^2}{9\sqrt{3}}$
	 M_A , M_C , M_B $L/2$, $L/2$

KUVA 4. Taivutusmomenttikuvaajat erilaisilla kuormituksilla (BY211 2013, s. 227).

Momentti Mx

Palkin sivussa sijaitseva kuorma saa aikaan momenttia mikä pyörittää palkkia. Mx momentin kautta voidaan siis tarkastella tukivoimia.



KUVA 5. Tasaisen sivussa olevan kuorman aiheuttama momentti Mx. Palkki ylhäältä päin kuvattuna (Roslöf 2023)

Jäyhyysmomentti

Jotta kappaleelle voitaisiin laskea taipumia, täytyy ensin tietää kappaleen jäyhyysmomentti. Suora-kaiteen muotoiselle palkille jäyhyysmomentti on määritelty:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2),$$

b= palkin leveys

h=palkin korkeus (Tekniikan kaavasto 2000, 144).

Palkin korkeuden kasvaminen lisää myös palkin jäyhyysmomenttia I ratkaisevasti. Jäyhyysmomentin suuruus riippuu kappaleen muodon lisäksi siitä minkä akselin suhteen kappaletta taivutetaan.

Jäyhyysmomentti monimutkaisemman muotoiselle kappaleelle saadaan laskettua jakamalla kappale pienempiin osiin, joiden jäyhyysmomentit pystytään määrittämään. Kokonaisjäyhyysmomentti saadaan Steinerin säännön avulla seuraavasti:

$$I = \Sigma I_i + \Sigma a_i^2 A_i \quad (3),$$

I_i= kappaleen i jäyhyysmomentti

a_i= kappaleen i etäisyys nolla-akselista

A_i= kappaleen i pinta-ala.

Taipuma

Palkki taipuu kahden tuen välissä. Taipumaa aiheutuu palkin omapainosta sekä palkkiin kohdistuvista kuormista. Taipumalaskuissa ei ole huomioitu pitkäaikaisuudesta aiheutuvaa virumaa. Poikkileikkaukseltaan muuttuvan palkin taipumat on laskettu käyttäen Liimapuukäsikirja Osa 2 kaavaa (6-19), tässä kaava (4) (kuva 52):

$$w = \frac{5qL^3}{384EI} + 0,35 \frac{qL^2}{Gb(h_s + h_{max})} \quad (4),$$

E = kimmokerroin (Young's modulus)

I = suorakaidepoikkileikkauksen jäyhyysmomentti

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \text{liukukerroin}$$

ν = Poissonin vakio, betonille 0,1 ... 0,2

h_{max} = h_l , palkin korkeus tuella 2

h_s = palkin korkeus tuella 1

$$h_e = h_s + 0,45 L * \tan$$

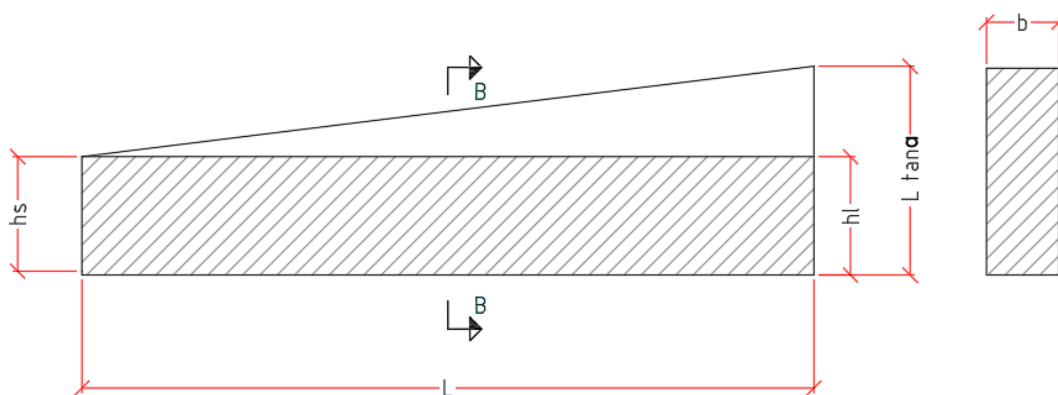
$$I = \frac{bh_e^3}{12}$$

Laskennassa kimmokertoimen E arvona on käytetty Lusas:ssa C34/45 betonille ilmoitettua arvoa 34 GPa eli 34 000 N/mm². Kuvassa 6 on esitetty pulpettipalkin pituus- ja poikkileikkaukset.

Poissonin vakio on materiaalin poikittaisen venymän ja pitkittäisen venymän suhteen vastaluku (Aalto julkaisuaika tuntematon, 4):

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon} \quad (5)$$

Toisella termillä ei kotelopalkin tapauksessa ole juurikaan merkitystä, koska se antaa taipumaan lisää kymmenesosamillimetrejä, millä ei ole merkitystä taipumien kannalta tässä tarkastelussa.



KUVA 6. Pulpettipalkin poikkileikkaus ja taipumatarkastelu (Roslöf 2023)

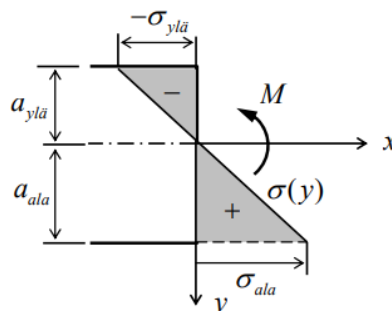
Taivutusjännitys

Taivutusjännitys eli normaalijännitys määritellään kaavan (EC5 Sovelluslaskelmat hallirakennus 2010, 27) mukaan:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{M}{I}y \quad (6),$$

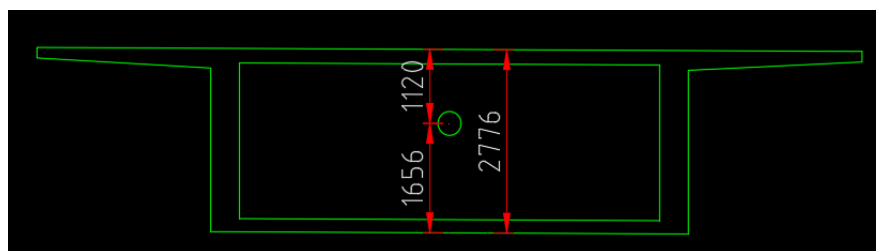
W = taivutusvastus

y = neutraaliakselin maksimireunaetäisyys.



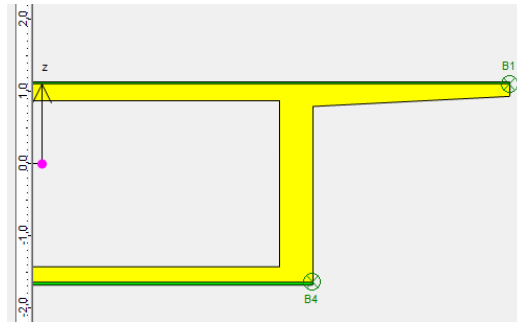
KUVA 7: Normaalijännityksen jakautuminen palkissa (Aalto julkaisuaika tuntematon, 123)

Kuvassa 7 on esitettyä taivutusjännityksen jakautuminen palkissa. Palkin neutraaliakselilla $\sigma = 0$ ja reunoilla saavutetaan maksimiarvot. Sivusuunnassa jännitys on vakio. Koska taivutusjännitys on suoraan verrannollinen momenttiin My , on se suurimmillaan momentin maksimikohdassa. Koska jännitys riippuu etäisyydestä neutraaliakseliin, täytyy Lusas:ssakin valita minkä palkin nurkan suhteen se määritetään. Jännityksen laskennassa kotelopoikkileikkaukselle täytyi huomioida kotelopalkin massakeskipisteen sijainti. Sijainnin määrittämiseen käytettiin AutoCad ohjelmaa. Koska poikkileikkaus muuttuu tukien 5 ja 6 välillä, otettiin korkeuksista keskiarvo edustamaan palkin korkeutta (kuva 8).



KUVA 8. Muuttuvan kotelopalkin massakeskipisteen sijainti (Roslöf 2023)

Taivutusjännitys laskettiin kaavalla (4) ja se määritettiin kansilaatan ylänurkan suhteen, jonka etäisyys massakeskipisteestä on 1,12 m (kuva 8). Vastaava piste B1 on esitetty Lusas:sta otetussa kuvakaappauksessa (kuva 9).



KUVA 9. Poikkileikkaus tuelta 5 katsottuna. Punaisella näkyy massakeskipiste (Roslöf 2023)