

H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteen asennus olemassa oleville tiesilloille

Tiivistelmä

Tekijä Törmä, liro	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 38	Valmistumisaika 2023
Työn nimi H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteen asennus olemassa oleville tiesilloille		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK)		
Toimeksiantajat Jani Valokoski, Osastopäällikkö, DI, Sitowise Oy Mikko Peltomaa, Asiantuntija, DI, Väylävirasto		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä selvitettiin tiettyjen Väyläviraston omistamien tiesiltojen kykyä ottaa vastaan H4b-törmäyskestävyysluokan siltakaiteen edellyttämät törmäyskuormat. Raskaan ajoneuvon suistuminen sillalta alittavalle väylälle on tunnistettu suuronnettomuusriski ja siten peruste H4b-kaiteiden käytölle asiaankuuluvilla silloilla.</p> <p>Työssä tunnistettiin yleisimpiä tiesiltojen rakennetyyppejä ja arvioitiin niiden rakenteellista kestävyyttä H4b-törmäyskuormille laskennallisesti. Kaidetörmäyksen aiheuttamien rasiusten määrittämiseksi hyödynnettiin FEM-laskentaa ja saatujen rasiusten avulla laskettiin siltojen kansirakenteen käyttöasteet leikkaus- ja taivutuskestävyydelle.</p> <p>Laskennan tuloksena havaittiin, että käyttöikänsä alkupuolella olevat sillat kestävät korkeamman törmäyskestävyysluokan kuormat hyvin. Vanhemmalla tarkastellulla sillalla korkeammat törmäyskuormat olivat kriittisempiä ja vaara rakenteen kapasiteetin ylitykselle on olemassa. Kyseisen siltarakenteen vahventaminen todettiin myös epärealistiseksi vaihtoehdoksi, joten H4b-luokan kaiteiden asennus ei vaikuttanut järkevältä. Yleisesti todettiin, että vanhemmille silloille kaiteen vaihtoa suunniteltaessa on tehtävä kohdekohtainen kaidetörmäystarkastelu.</p>		
Asiasanat FEM-laskenta, mitoitus, siltakaide, törmäyskestävyysluokka		

Abstract

Author Törmä, Iiro	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 38	
Title of Publication Installing a vehicle parapet of containment level H4b onto existing road bridges		
Degree and field of study Engineer (UAS)		
Clients Jani Valokoski, Department manager, M.Sc.(Tech.), Sitowise Oy Mikko Peltomaa, Expert, M.Sc. (Tech.), Väylävirasto		
Abstract <p>The aim of the thesis was to gauge the ability of certain Väylävirasto owned road bridges to withstand the crash impact loads required from vehicle parapets of containment level H4b. A major accident caused by a heavy-duty motor vehicle falling off a bridge is recognized as a risk and is the reason for H4b-class vehicle parapet usage on relevant bridges.</p> <p>In the thesis, some of the most common Finnish road bridge structure types were identified and their structural capacity utilization under the H4b-level crash impact loads was estimated. FE-analysis was used to determine the stresses generated by crash impact loads in the bridge deck. These stresses were then used to calculate the bending and shear capacities for the structure.</p> <p>Based on the calculations of this study, newer bridge types that have yet to reach the latter half of their designed life span can comfortably carry the higher crash impact loads of the H4b-class parapet. On the older bridge that was analyzed, the increase in crash impact loads appeared to push the structure to its capacity's limits. Reinforcing the bridge appeared unfeasible, so installing a containment level H4b vehicle parapet on such a bridge was deemed impractical. On a more general note, it was concluded that on older bridges a case-by-case structural analysis of crash impact loads is necessary when planning the replacement of vehicle parapets.</p>		
Keywords bridge, containment level, FE-analysis, structural capacity, vehicle parapet		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Siltakaide ja kaidetörmäys	3
2.1	Siltakaiteen tehtävät ja rakenne	3
2.2	Kaiteen törmäyskestävyysluokitus	3
2.3	Kaidetörmäyksen aiheuttamat voimat	6
3	Tarkasteltavat siltakohteet ja kaidetuotteet	9
3.1	H4b-kaiteen tarve nykyisillä silloilla	9
3.1.1	Siltojen nykyiset kaiteet	9
3.1.2	Jatkotarkasteluihin valitut periaaterakenteet	12
3.2	H4b-kaidetuotteita.....	12
3.2.1	Birsta 3PH4b siltakaide.....	13
3.2.2	Nordic R H4b siltakaide	14
3.2.3	KREMSBARRIER 3 RH4 siltakaide	14
4	Kaidetörmäyksen staattinen analyysi.....	16
4.1	Törmäystarkastelun rajaus.....	16
4.2	Törmäystilanteen kuormat rakenteessa	16
4.3	Reunapalkin mitoitus H4b-kaidejärjestelmälle.....	17
4.4	Siltakannen mallinnus kaidetörmäykselle.....	21
5	Siltakannen kapasiteetti törmäystilanteessa.....	27
5.1	Kaidetörmäyksen aiheuttamat rasitukset rakenteessa	27
5.2	Rakenteen käyttöaste törmäystilanteen kuormille	30
5.3	Reunapalkin halkeilun vaikutus reunaulokkeen poikkisuuntaisiin rasituksiin	31
5.4	Laskentamallin epäkeskisyyden vaikutus palkkisillan rasituksiin	33
6	Yhteenveto, johtopäätökset ja pohdinta	35
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Laatan käyttöaste taivutukselle

Liite 2. Laatan käyttöaste leikkaukselle

1 Johdanto

Raskaan liikenteen määrän lisääntyessä ja ajoneuvoyhdistelmien massojen alati kasvavassa myös liikenteen turvallisuusriskit kasvavat. Tieverkolla sillat ovat paikkoja, joissa liikenneonnettomuuden seuraukset ovat usein vakavimmat, sillä ajoradalta suistuminen johtaa ajoneuvon putoamiseen yleensä korkealta joko vesistöön tai alittavalle väylälle. Siltojen liikenneturvallisuudesta puhuttaessa avainasemassa ovat siltakaiteet, sillä ne pyrkivät estämään ajoneuvojen ja kevyen liikenteen putoamisen sillalta onnettomuustilanteessa.

Väylävirasto on hiljattain päivittänyt siltakaiteiden suunnitteluohjettaan ja osana tätä päivitystä tuonut ohjeeseen uudet kriteerit sillan kaiteen törmäyskestävyysluokan valinnalle. Vaikka suunnitteluohje koskee ensisijaisesti uusien siltojen suunnittelua, on Suomen tieverkolla joukko siltoja, joiden nykyiset kaiteet eivät vastaa uuden suunnitteluohjeen asettamia vaatimuksia kaiteen törmäyskestävyydelle. Liikenneturvallisuuden kannalta olisikin suotavaa, että kyseisille silloille asennettaisiin uuden ohjeistuksen mukaiset kaiteet. Korkeamman törmäyskestävyysluokan kaiteet tuovat kuitenkin mukanaan suuremmat mitoittavat törmäyskuormat, ja olemassa oleville silloille uusia kaiteita asennettaessa on ensin osoitettava rakenteen riittävä kestävyys näille suuremmille kuormille. Ei ole järkevää asentaa uutta, suurempia törmäyskuormia kestävä kaidetta sillalle, jonka rakenteellinen kestävyys ei riitä ottamaan vastaan niin suuria kuormia.

Työn tilaajana toimivat Väylävirasto ja Sitowise Oy. Väylävirasto on valtion virasto, jonka vastuulla on Suomen tie-, rata- ja vesiväyläverkkojen kehitys ja ylläpito. Sitowise Oy on pohjoismaisen rakennetun ympäristön asiantuntija- ja digipalveluita tuottava konsulttiyritys. Työn tavoitteena on antaa yleisen tason käsitys olemassa olevien teräsbetonisten siltojen kyvystä ottaa vastaan H4b-törmäyskestävyysluokan kaidetörmäyskuormia 2000-luvun alkupuolelta asti käytetyn H2-luokan tai vanhempien, standardoimattomien törmäyskuormien sijaan. Työssä tarkastellaan kolmen erityyppisen Suomen tieverkolla esiintyvän sillan päällysrakenteen kestävyttä, kun niille asetetaan vaikuttamaan H4b-luokan törmäyskuormat. Törmäystarkastelun pohjaksi on tutustuttu ensin siltakaiteiden törmäyskestävyysluokitukseen ja törmäystestaukseen, kaidetörmäyksen mitoitusperusteisiin sekä H4b-luokan kaide-
tuotteisiin.

Törmäystarkastelu tehdään yksinkertaistetulla staattisella menetelmällä FEM-laskentaa hyväksi käyttäen, jolloin voidaan tarkastella useampaa eri rakennetyyppiä työhön varattujen resurssien puitteissa ja siten saavuttaa käyttökelpoisempi lopputulos. Tarkastelussa oletetaan, että H4b-luokan kaiteita asennettaessa joudutaan aina uusimaan myös sillan reunapalkki. Siten voidaan perustellusti rajata reunapalkin ja reunaulukkeen liitoksen mitoitus tarkastelun ulkopuolelle, sillä liitosaluetta on helppo vahventaa reunapalkkia uusittaessa.

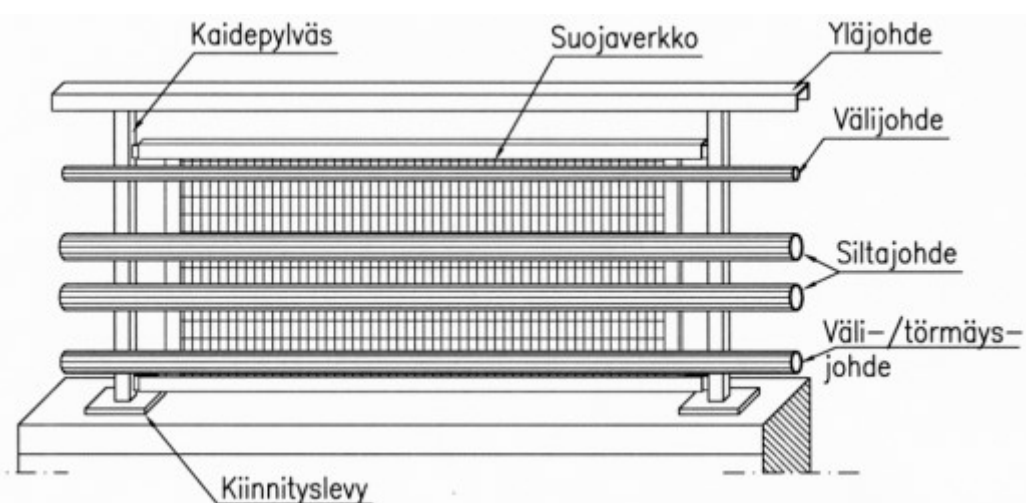
Kaiteen osalta törmäystarkastelu rajataan yhteen H4b-kaidetuotteeseen, sillä Suomessa tällä hetkellä saatavilla olevat H4b-kaidetuotteet eroavat toisistaan vain vähän.

2 Siltakaide ja kaidetörmäys

2.1 Siltakaiteen tehtävät ja rakenne

Siltakaiteen ensisijainen tehtävä on taata turvallinen liikkuminen sillalla sen kaikille käyttäjille (RIL 179-2018, 271). Tiesilloilla kaide estää törmäystilanteessa ajoneuvon putoamisen sillalta sekä absorboi törmäysenergiaa ja johtaa sitä sillan muihin rakenteisiin (Väylävirasto 2022).

Tiesilloilla yleisesti käytetty kaidetyyppi on kuumasinkitty teräksinen siltakaide. Se koostuu kaidepylväistä kiinnitysjärjestelmästä, yläjohteesta ja ajo- eli siltajohteesta sekä mahdollisista välijohteista ja suojaverkosta tai säleiköstä. (Väylävirasto 2022.) Kuvassa 1 on esitetty teräksisen siltakaiteen rakenneosia ja niiden nimiä. Myös teräsbetonisia siltakaiteita voidaan käyttää tiesilloilla, kun halutaan rajoittaa melun tai suolasumun vaikutuksia siltaympäristöön tai kun tavoitellaan teräskaitteita parempaa törmäyskestävyyttä.



Kuva 1. Kaitteen rakenneosien nimiä (Väylävirasto 2022)

Tarkempia vaatimuksia siltakaiteiden rakenteelle, materiaaleille ja ominaisuuksille Suomessa on määritelty Siltakaiteiden suunnittelu -ohjeessa (Väylävirasto 2022) sekä InfraRYL kohdissa 42040 ja 42531 (Rakennustieto 2022).

2.2 Kaitteen törmäyskestävyyden luokitus

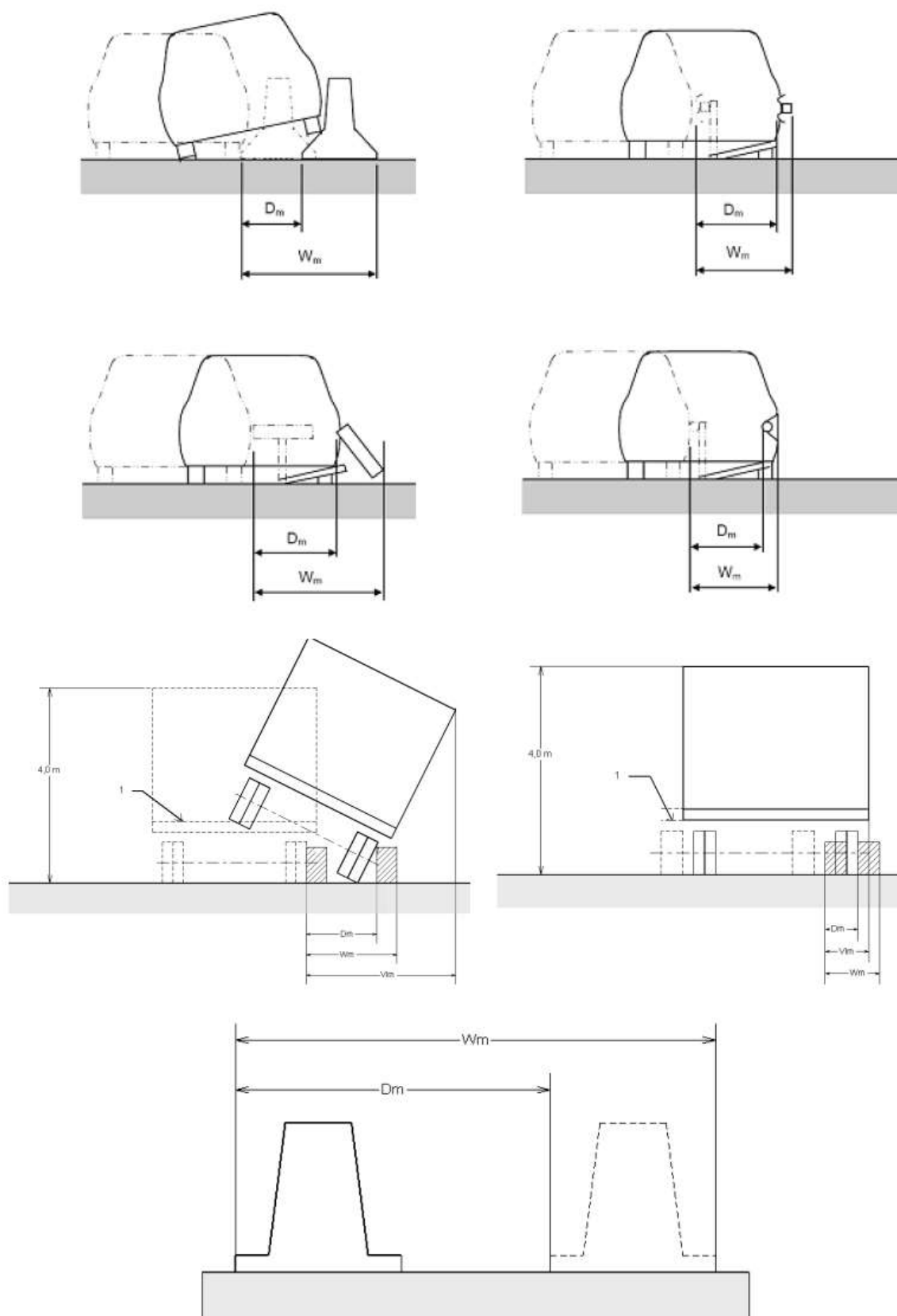
Kaidejärjestelmät luokitellaan Suomessa eurooppalaisen standardin SFS-EN 1317-2 mukaisesti törmäyskestävyyden luokkiin N1-N2, H1-H4b sekä L1-L4b. Luokitus perustuu törmäystesteihin, joissa törmäävän ajoneuvon massa ja nopeus, ajoneuvon tyyppi sekä törmäyskulma vaihtelevat kestävyysluokasta riippuen. Eri törmäyskestävyyden luokkien törmäystestien parametrejä on eritelty taulukossa 1. Törmäyskestävyyden luokkien L1-L4b

törmäystestaus vastaa luokkia H1-H4b, mutta L-luokan kaiteille tulee lisäksi tehdä törmäyskoe TB32 (1500 kg henkilöauto, 110 km/h tuntinopeus ja 20° törmäyskulma). (Suomen standardoimisliitto SFS 2011.)

Törmäyskestävyysluokka	Törmäyskoe	Ajoneuvo	Paino (tonnia)	Nopeus (km/h)	Kulma (astetta)
N1	TB31	ha	1,5	80	20
N2	TB32	ha	1,5	110	20
	TB11	ha	0,9	100	20
H1	TB42	ka	10	70	15
	TB11	ha	0,9	100	20
H2	TB51	la	13	70	20
	TB11	ha	0,9	100	20
H3	TB61	ka	16	80	20
	TB11	ha	0,9	100	20
H4a	TB71	ka	30	65	20
	TB11	ha	0,9	100	20
H4b	TB81	kapp	38	65	20
	TB11	ha	0,9	100	20

Taulukko 1. Törmäyskestävyysluokat ja niille suoritettavat törmäyskokeet (Väylävirasto 2022)

Törmäyskokeissa määritetään tarkasteltavalle rakenteelle kaiteen sivusiirtymä D_m , kaiteen toimintaleveys W_m sekä ajoneuvon ulottuma V_m . Raja-arvot näille sekä muille vaadituille parametreille eri törmäyskestävyysluokissa on määritelty standardissa SFS-EN 1317-2 (Suomen standardoimisliitto SFS 2011). Kaiteen sivusiirtymällä tarkoitetaan törmäyskokeen aikana havaitun kaiteen etupinnan äärimmäistä sijaintia verrattuna törmäystä edeltäneeseen kaiteen etupinnan sijaintiin. Kaiteen toimintaleveydellä tarkoitetaan törmäyskokeen aikana havaitun kaiteen takapinnan äärimmäistä sijaintia verrattuna törmäystä edeltäneeseen kaiteen etupinnan sijaintiin. Ajoneuvon ulottumalla tarkoitetaan sitä etäisyyttä törmäystä edeltäneestä kaiteen etupinnasta, jolla 4 m korkean ajoneuvon yläreuna kävisi törmäystilanteessa. (Väylävirasto 2022.) Näitä kolmea parametriä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Kaiteen sivusiirtymän (D_m), toimintaleveyden (W_m) ja ajoneuvon ulottuman (V_{Im}) mitatut arvot (Suomen standardoimisliitto SFS 2011)

Standardin SFS-EN 1317 osien 1-2 mukaisissa törmäystesteissä törmäykselle määritetään myös riskitasoluokka. Luokka perustuu törmäyksen aikana mitattavista voimasuureista johdettaviin ASI (Acceleration Severity Index, kiihtyvyyden kovuusindeksi) ja THIV (Theoretical Head Impact Velocity, teoreettinen pään iskeytymisnopeus) -arvoihin, joiden mukaan testatut kaidetuotteet jaetaan riskitasoluokkiin A, B ja C. Luokka A kuvaa matalinta ja luokka C korkeinta riskitasoa. (Suomen standardoimisliitto SFS 2011.)

Suomessa tiesilloilla käytetään yleisesti törmäyskestävyysluokan H2 kaiteita. H4b-luokan kaiteita käytetään erityistä suojaa vaativilla silloilla, esimerkiksi kannen yläpuolisten kantavien rakenteiden suojaamiseksi tai sillalta putoavan ajoneuvon aiheuttaman suuronnettomuusriskin ehkäisemiseksi. (RIL 179-2018, 272.)

2.3 Kaidetörmäyksen aiheuttamat voimat

Suomessa käytettävät onnettomuusmitoituksen kuormat kaidetörmäykselle on esitetty Eurokoodin soveltamisohjeessa Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 (Liikennevirasto 2017). Niitä on käyty läpi H2-törmäyskestävyysluokan kaiteen osalta Liisa Vesalon opinnäytetyössä Sillan reunapalkin rakenneanalyysi kaidetörmäykselle (Vesalo 2022). H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteen mitoituseriaatteet ovat samat, kaidetörmäyksen kuormien ollessa H2-luokkaa huomattavasti suuremmat. Kun kaidejärjestelmän pylväsväliksi asetetaan 2 m, Eurokoodin soveltamisohje NCCI 1:n mukaan H4b-luokan kaiteen kiinnitykselle yleensä riittävät törmäyskuormat ovat 450 kN suuruinen leikkausvoima (sillan poikkisuunnassa) sekä 90 kNm suuruinen momentti (reunapalkin pituussuuntaisen akselin ympäri). Vaihtoehtoisesti voidaan laskea kaiteelle tarkemmat kuormat kaidepylvään plastisesta taivutuskestävyydestä: Momentti kertomalla plastinen taivutuskestävyys varmuusluvulla 1,5 (Birsta 3PH4b: $58,6 \text{ kNm} \cdot 1,5 = 87,9 \text{ kNm}$) ja leikkausvoima jakamalla saatu momentti momenttivarrella 0,2 m ($87,9 \text{ kNm} / 0,2 \text{ m} = 439,5 \text{ kN}$). Se, mihin tämä momenttivarren mitta perustuu, ei käy ilmi Eurokoodin soveltamisohjeesta NCCI 1. (Liikennevirasto 2017.)

Eurokoodissa (Suomen standardoimisliitto SFS 2004) on esitetty käytössä olevilla sillankaitteilla tehtyihin törmäyskokeisiin perustuvat siltarakenteeseen törmäystilanteessa siirtyvien vaakavoimien suositusluokat A-D (Taulukko 2). Luokat eivät suoraan riipu kaiteen törmäyskestävyysluokasta, vaan kuvaavat kaidejärjestelmän kiinnityksen jäykkyyttä. Esimerkiksi Suomessa yleisesti käytetyt H2-luokan pulttikiinnitetyt kaiteet kuuluvat usein matalimpaan A-suositusluokkaan joustavan kiinnityksensä takia.

Suositusluokka	Vaakavoima (kN)
A	100
B	200
C	400
D	600

Taulukko 2. Ajoneuvoliikenteen kaiteen tai törmäysvaimentimen kautta siirtyvän vaakasuuntaisen voiman suositusluokat (Suomen standardoimisliitto SFS 2004)

Vaakavoima asetetaan vaikuttamaan poikittain 0,5 metriä pitkänä viivakuormana joko 100 mm kaiteen yläreunan alapuolelle tai 1 m ajoradan pinnan yläpuolelle, riippuen siitä kumpi näistä sijainneista on alempana. Törmäystilanteessa vaakavoiman kanssa samanaikaisesti vaikuttaville pystysuuntaisille kuormille eurokoodi antaa suositusarvoksi $0,75 \cdot \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k}$ (= 225 kN), jossa Q_{1k} on eurokoodin kuormakaavion 1 kuormakaistan 1 akselikuorma ja α_{Q1} on akselikuorman sovituserroin. Samalla eurokoodi kuitenkin toteaa, että kyseinen kuorma voidaan määrittää kansallisessa liitteessä.

Törmäyskuormien tutkimus Itävallassa

Itävallassa vuonna 2018 toteutettiin tutkimushanke, jonka tavoitteena oli arvioida eurokoodissa määritettyjen törmäyskuormien soveltuvuutta siltakannen ulokkeen mitoitukseen. Tutkimus suoritettiin FEM-mallinnuksen avulla, ja siinä vertailtiin 14 mitoiltaan erilaista reunauluketta. Tutkimuksessa pystyttiin osoittamaan useita tarkennuksia ja korjauksia eurokoodin törmäyskuormamäärittelyyn:

- Eurokoodissa vapaaehtoiseksi määritelty, vaakakuormien kanssa samanaikaisesti vaikuttava pystysuuntainen kuorma on mitoituksen kannalta välttämätön. Tutkimuksessa pystykuorma määritettiin erikseen jokaiselle suositusluokalle, jolloin luokittelu muodostui riippuvaiseksi ulokkeen pituudesta muttei paksuudesta.
- Eurokoodin määrittämä vaakakuorman 0,5 metrin vaikutuspituus on ristiriidassa törmäystesteistä saatujen tulosten kanssa. Itävallassa päädyttiin tutkimuksen perusteella käyttämään vaakakuorman vaikutuspituutena 4 metriä.
- Todelliset vaakavoimat ovat aina huomattavasti suurempia kuin eurokoodissa määritetyt matalien suositusluokkien voimat.
- Eurokoodissa ei ole määritetty törmäyksen momenttikuormaa riittävän yksityiskohdaisesti, vaikka se on mitoituksen kannalta olennainen.

Tutkimuksen tuloksena eurokoodin kansalliseen liitteeseen tuotiin Itävallassa ulokkeen mitoitus varten standardissa esitetyn taulukon 2 korvaava, suositusluokkien A-D vaakavoimat sisältävä taulukko 3, joka on esitetty alla. Lisäksi määriteltiin alla taulukossa 4 esitetyt neljä kuormaluokkaa EK1-4 ja niille mitoittavat voimasuuret, jotka asetetaan vaikuttamaan 4 metrin matkalle reunapalkilla. Taulukon voimasuuret vasemmalta oikealle: Vaakakuorma, Pystykuorma, Momenttikuorma (Stangl 2018.)

Klasse A	300 kN
Klasse B	300 kN
Klasse C	375 kN
Klasse D	450 kN

Taulukko 3. Eurokoodin Itävallan kansallisen liitteen mukaiset vaakakuormat suositusluokille A-D (Stangl 2018)

Einwirkungsklasse	Horizontalkraft [kN/m]	Vertikalkraft [kN/m]	Moment [kNm/m]
EK1	50	50	45
EK2	67	67	60
EK3	110	110	99
EK4	150	150	135

Taulukko 4. Eurokoodin Itävallan kansallisen liitteen mukaiset kuormaluokat EK1-4 (Stangl 2018)

Koska tämän opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella siltojen kestävyyttä Suomessa, on työssä käytetty eurokoodin ja sen Suomen kansallisen liitteen määrittämiä törmäyskuormia, jotka on käyty läpi luvun 2.3 alussa. Todellisissa kohteissa kaidejärjestelmän vaihtoa suunniteltaessa on kuitenkin harkittava, miten luotettavia tuloksia eurokoodin mukainen mitoitus-tapa antaa.

3 Tarkasteltavat siltakohteet ja kaidetuotteet

3.1 H4b-kaiteen tarve nykyisillä silloilla

Siltakaiteiden suunnittelu -ohjeessa on esitetty useita eri parametrejä, joiden perusteella voidaan arvioida H4b-kaiteen tarvetta siltapaikalla sekä rautatien että maantien ylittävillä tiesilloilla. Lähtökohtana H4b-kaiteen käytölle on, että sillalla on voimassa yli 60 km/h nopeusrajoitus. Muut parametrit on eritelty taulukoihin, joissa sillan ylittävän raskaan ajoneuvoliikenteen määrän suhteen on määritetty riskitasot erikseen jokaisen parametrin osalta. Rautatien ylittävillä silloilla näitä parametreja ovat ylitettävien raiteiden määrä, radan kunnossapitotaso sekä matkustajajunan sallittu nopeus. Risteyssilloille parametrinä on alittavan tien liikennemäärä. Molemmille siltatyypeille on lisäksi parametrinä sillan kaarevuus. (Väylävirasto 2022.)

Väylävirasto on kriteerejä asettaessaan tunnistanut joukon siltakohteita, joille H4b-kaiteen asentaminen voisi olla hyödyllistä. Tunnistettuja siltapaikkoja on 18 ja H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteita tarvitsevia siltoja niillä yhteensä 30. Yleisimmät siltatyypit kohteissa ovat laatta- ja ulokelaattasillat (12 kpl) sekä jännitetyt palkki- ja ulokepalkkisillat (12 kpl). Muita tunnistetuilla siltapaikoilla esiintyviä siltatyyppejä ovat ontelolaattasillat (3 kpl), laattakehäsilat (2 kpl) ja yksi kotelopalkkisilta. Kaikki edellä mainitut siltarakenteet ovat teräsbetonisia.

Laattasillat voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: Vanhemmat, 1960- ja 70-luvuilla rakennetut laattasillat, joihin on myöhemmin peruskorjauksen yhteydessä tehty uudet reunapalkit ja samalla vaihdettu uudet siltakaiteet, sekä uudemmat, 1990- ja 2000-luvuilla rakennetut laattasillat, joilla on alkuperäiset reunapalkit ja kaiteet. Jännitetyt palkkisillat ovat pääosin uudempia, 1990- ja 2000-luvuilla rakennettuja siltoja, joilla on alkuperäiset reunapalkit ja kaidejärjestelmät.

3.1.1 Siltojen nykyiset kaiteet

Tunnistetuilla 30 sillalla on tällä hetkellä kolmenlaisia siltakaideratkaisuja. Selkeästi yleisin niistä on pulttikiinnitteinen, tyyppisarjan R15/DK 1 korkea teräspalkkikaide (Kuva 4). Vanhemmilla silloilla esiintyy R15/DK 1 -sarjan kaidetta upottamalla kiinnitettynä (Kuva 5). 2000-luvun alkupuolella otettiin Suomessa käyttöön kuvassa 3 näkyvät H2-törmäyskestävyysluokan vaatimukset täyttävät sillankaiteet (Tiehallinto 2004) ja niille tyyppiirustussarja R15/DK H2. Tätä vanhemmat teräspalkkikaideratkaisut eivät täytä nykystandardien törmäyskestävyysvaatimuksia. Teräskaitteiden lisäksi esiintyy joillakin kaupunkialueiden silloilla kuvassa 6 näkyvää Tielaitoksen tyyppiirustussarjan R15/DK 10 mukaista

betonielementtikaidetta, jota ei ole tutkittu H2-törmäyskestävyyssluokan vaatimuksien suhteen. Edellä mainituista tyyppisarjoista vain R15/DK H2 on nykyisin voimassa.



Kuva 3. H2-törmäyskestävyyssluokan teräskaide R15/DK H2 (TREX tietokanta 2014)



Kuva 4. Pulttikiinnitteinen teräskaide R15/DK 1 (Kapanen 2018)



Kuva 5. Upottamalla kiinnitetty teräskaide R15/DK 1 (TREX tietokanta 2005)



Kuva 6. Betonielementtikaide R15/DK 10 (Kapanen 2019)

Sähköradan ylittävillä silloilla on kaiteisiin kiinnitetty kosketussuojaseinät. Kosketussuojan tehtävä on estää sillan käyttäjien mahdollisuus joutua kosketuksiin sähköistetyin rautatien jännitteisten osien kanssa sekä suojata radan johtimia ja kalustoa auraslumelta (Tiehallinto 2001). Vastaavasti ajoneuvoliikenteen väylän ylittävillä silloilla kaiteisiin on kiinnitetty suojaverkot, joiden tehtävä on suojata alittavia väyliä auraslumelta. Joillakin silloilla onkin

sekä kosketussuojaseinät että suojaverkot sen mukaan, minkälaisen väylän silta ylittää kulakin siltajänteellä.

Työn rajaamiseksi on seuraavissa osioissa oletettu, että tarkasteltaville silloille on asennettu H2-törmäyskestävyysluokan mukainen kaidejärjestelmä. Kaiteen varusteet, kuten kosketussuojaseinät ja suojaverkot, eivät vaikuta merkittävästi kaidejärjestelmän käyttäytymiseen törmäystilanteessa, joten ne jätetään tämän työn rakenteellisissa tarkasteluissa huomiotta.

3.1.2 Jatkotarkasteluihin valitut periaaterakenteet

Laattasilloista voidaan tunnistaa kaksi tyypillistä rakennetta: Vanhempi, kapeampi noin 10 metrin hyötyleveyden laattasilta, joka on jännemitoiltaan 10 - 15 metriä, ja uudempi, leveämpi noin 13 metrin hyötyleveyden laattasilta, joka on jännemitoiltaan noin 20 metriä. Jännitettyjen palkkisiltojen tyypillinen rakenne koostuu noin 13 metriä leveistä, 25 - 40 metriä pitkistä jänteistä. Näiden kolmen tyypillisen rakenteen mukaiset esimerkkisillat on esitelty luvussa 4.4.1.

Koska sillankaiteen uusimistyöhön liittyy usein myös reunapalkin kunnostaminen tai uusiminen, on tässä työssä oletettu, että tarkasteltavien siltakohteiden reunapalkit uusitaan H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteiden vaatimuksia vastaavaksi kaiteen uusimisen yhteydessä. Näin voidaan keskittyä tarkastelemaan alkuperäisten kansirakenteiden kestävyyttä kaidetörmäyskuormille. Periaatteessa kaiteen uusimisen yhteydessä ei aina ole tarvetta reunapalkin uusimiselle, mikäli vanha reunapalkki täyttää uuden kaidejärjestelmän sille asettamat vaatimukset.

3.2 H4b-kaidetuotteita

Suomessa saatavilla olevia kaidetuotteita on listattu Liikenneviraston oppaassa Markkinoilla olevia kaidetuotteita. H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteita on oppaassa neljä, ja niistä sillan reunapalkkiin kiinnitettäväksi soveltuvia tuotteita on kaksi: Birsta 3PH4b teräsputkikaide sekä Nordic R H4b teräsputkikaide. (Väylävirasto 2022.)

Suomessa voidaan siltakaiteina käyttää mitä tahansa kaidetuotetta, joka on CE-merkitty ja täyttää standardin SFS-EN 1317, aurauskestävyysluokan 4 sekä Väyläviraston Siltakaiteiden suunnitteluohjeen vaatimukset. Tällaisia, H4b-törmäyskestävyysluokan kaidetuotteita on Euroopan markkinoilla useita. Tuotteet voivat kuitenkin olla muilla tavoilla ongelmallisia tai epäsoveltuvia suomalaisiin siltarakenteisiin muun muassa mittasuhteidensa tai materiaaliensa osalta. Esimerkinomaisesti tässä työssä on tarkasteltu Keski-Euroopan

markkinoilla olevaa kaidetuotetta KREMSBARRIER 3 RH4, jota valmistaa ja markkinoi itävaltalainen voestalpine Krems Finaltechnik GmbH.

3.2.1 Birsta 3PH4b siltakaide

Birstan 3P-sarjan kaiteet ovat kuumasinkittyjä teräskaiteita. Kaikki sarjan kaidetuotteet ovat CE-merkittyjä ja auraskestävyysluokkaa 4. Lisäksi kaidejärjestelmät P3H4b (Kuva 7) ja P3H4g täyttävät törmäyskestävyysluokan H4b vaatimukset, mutta vain P3H4b soveltuu siltakaiteeksi perustusratkaisunsa ansiosta. Siinä, missä P3H4g-kaidejärjestelmän kaidetolpat upotetaan maahan, P3H4b-järjestelmä käyttää siltakaiteelle tyypillistä kiinnityslevy ja -pulttikokoonpanoa. Kiinnityslevyä kutsutaan myös pohjalevyksi (englanniksi base plate).



Kuva 7. Birsta 3PH4b (Birsta 2015)

P3H4b koostuu kaidetolpista, ylä- ja siltajohteista, törmäysvaimennuselementeistä sekä kiinnityslevyistä ja -pulteista. Kaidetolpat ovat HEB 120 -teräsprofiilia ja tolppien välinen etäisyys 2 m. Kaidetolpan korkeus on 1,3 m, jolloin kaiteen kokonaiskorkeudeksi suunnitellusta tienpinnasta mitattuna muodostuu 1,5 m. Siltajohteet ovat putkiprofiileja, halkaisijaltaan 90 mm. Yläjohde koostuu yhdestä putkiprofiilista, siltajohde kahdesta. Siltajohteet kiinnittyvät pulttiliitoksilla teräslevystä taiteltuun törmäysvaimennuselementtiin, joka puolestaan kiinnittyy pulttiliitoksilla kaidetolppaan. Kaidekokoonpanon kokonaisleveys sillan poikisuunnassa siltajohteen kohdalla on 365 mm. Kaiteen toimintaleveysluokka on W3 (1,0 m) ja törmäyksen riskitasoluokka B. (Birsta 2015.)

3.2.2 Nordic R H4b siltakaide

Nordic Road Safety'n kaidejärjestelmä Nordic R H4b (Kuva 8) on rakenteeltaan ja toiminnaltaan lähes identtinen Birstan 3PH4b -kaidejärjestelmän kanssa. Ainoa rakenteellinen ero näiden kahden välillä on Nordic R H4b -kaidejärjestelmään sisältyvä lisäjohte ja yläjohteen välissä. Kaidejärjestelmän toimintaleveys on hivenen Birstan P3H4b:tä pienempi, 0,9 m. Muut törmäystesteissä mitatut ominaisuudet ovat näillä kahdella kaidejärjestelmällä samat. (Nordic Road Safety AB 2020.)



Kuva 8. Nordic R H4b (Nordic Road Safety AB 2020)

3.2.3 KREMSBARRIER 3 RH4 siltakaide

Voestalpinen KREMSBARRIER 3 RH4 (Kuva 9) on törmäyskestävyysluokalle H4b testattu, kuumasinkitty teräksinen siltakaidejärjestelmä. Järjestelmä koostuu kahden edellä kuvatus kaiteen tavoin kaidetolpista, johteista, törmäysvaimennuselementeistä sekä kiinnityslävistä ja -pulteista.



Kuva 9. KREMSBARRIER 3 RH4 (Voestalpine 2015)

Tämänkin kaiteen tolpat ovat HEB 120 -teräsprofiilia, mutta niiden välinen etäisyys on 1,33 m. Kaidetolpan pituus on 1,45 m ja kaiteen kokonaiskorkeus tienpinnasta on 1,65 m. Kaiteen yläjohteena toimivat kaksi vetotankoa, halkaisijaltaan 32 mm. Ne kiinnittyvät kaidetolppiin U-pulttiliitoksien, 200 mm etäisyydelle toisistaan. Sylinterimäinen törmäysvaimennuselementti koostuu kahdesta puolikaariprofiilista, joihin aaltoprofiilinen siltajohde kiinnitetään kiinnitysraudan avulla. Kaidekokoonpanon kokonaisleveys sillan poikkisuunnassa siltajohde kohdalla on 590 mm. Kaiteen toimintaleveysluokka on W4 (1,3 m) ja törmäyksen riskitasoluokka A. (Voestalpine 2015.)

4 Kaidetörmäyksen staattinen analyysi

4.1 Törmäystarkastelun rajaus

Tässä työssä ei ole tehty dynaamista törmäystarkastelua, vaan törmäystarkastelu on tehty yksinkertaistetusti staattisten korvauskuormien avulla, joihin dynaamiset vaikutukset sisältyvät. Tämä yksinkertaistus on Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen NCCI1 mukainen ja perusteltu, koska työn tavoitteena ei ole määrittellä tarkasti rakenteiden todellista kantavuutta, vaan yleisemmällä tasolla arvioida suuremman törmäyskuorman vaikutusta sillan kansirakenteeseen. Dynaamisten törmäystarkastelujen tekeminen olisi huomattava lisä sekä työn tekniseen vaativuuteen että ajankäyttöön, eikä sitä koettu tarkoituksenmukaiseksi.

4.2 Törmäystilanteen kuormat rakenteessa

Suomessa käytettävät kaiteen törmäyskuorman voimasuureet on esitetty Eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 1 ja tämän työn luvussa 2.3. Kaiteen kiinnitysratkaisun tulee johtaa kyseiset kuormat sillan reunapalkkiin ja siitä kansirakenteeseen. Törmäyskuorma asetetaan vaikuttamaan täysimääräisesti törmäyskohdan kaidepylväälle ja puolittaisena sen viereisille pylväille. (Väylävirasto 2017.)

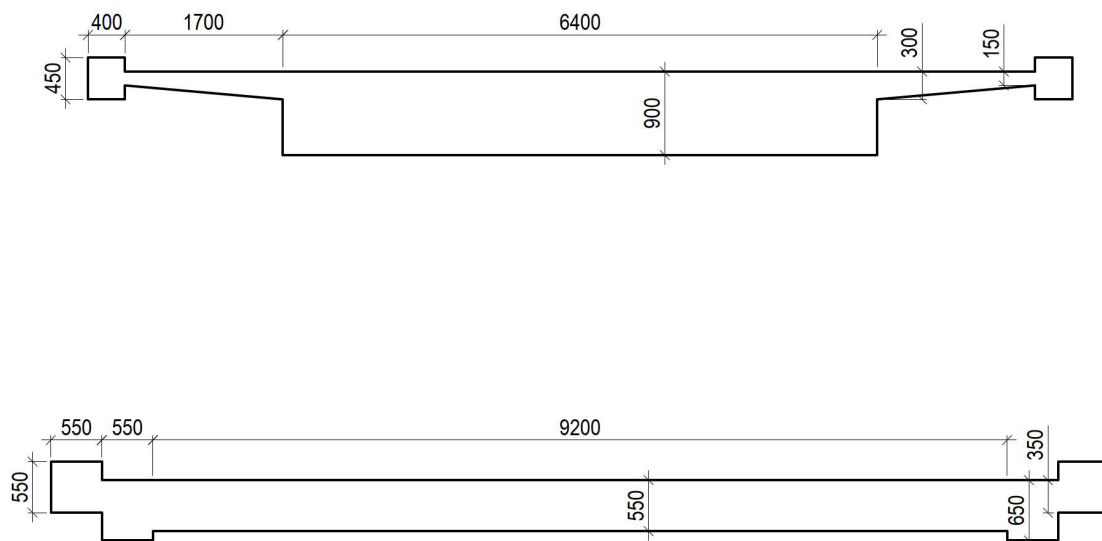
Törmäyskuorman lisäksi onnettomuusmitoitukseen sisältyy reunapalkin yläpinnalle tuleva rengaskuorma, jonka arvona käytetään kuormakaavion LM1 akselikuorman tavanomaista arvoa puolitettuna. Kuormakaavio LM1 on telikuorma, jossa on kaksi akselia ja kullakin akselillä kaksi rengasta. Törmäystilanteen mitoituksessa huomioidaan vain yksi renkaista ja se asetetaan vaikuttamaan reunapalkin päällä. Rengaskuorma jaetaan tasaisesti pinta-alakuormaksi $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ alueelle ja sijoitetaan keskelle reunapalkkia törmäyskohdassa. Lasketaan kuormakaavion LM1 mukaisen tavanomaisen kuorman arvo yhdelle renkaalle: $(300\text{ kN} \times 0,75) / 2 = 112,5\text{ kN}$, ja jaetaan se alalle: $112,5\text{ kN} / (0,4\text{ m} \times 0,4\text{ m}) = 703\text{ kN/m}^2$. (Väylävirasto 2017.)

Myös rakenteen omapaino huomioidaan onnettomuusmitoituksessa. Tässä opinnäytetyössä omapainot on jaettu FEM-laskentaa varten kolmeen eri kategoriaan: Betonin omapaino, jonka laskentaohjelma laskee itse elementtien geometrian ja materiaaliominaisuuksien avulla, sillan pintarakenteen omapaino, joka määritellään tasaisena pinta-alakuormana siltakannelle, ja sillan kaidejärjestelmän omapaino, joka on laskettu kaidevalmistajan teknisten piirustusten perusteella. Reunapalkin mitoituksessa kaiteen omapaino jaettiin pisteittäisi kuormiksi reunapalkeille kahden metrin välein simuloimaan kaidetolppia, ja koko kannen tarkasteluissa se mallinnettiin reunapalkeille jatkuvana viivakuormana.

4.3 Reunapalkin mitoitus H4b-kaidejärjestelmälle

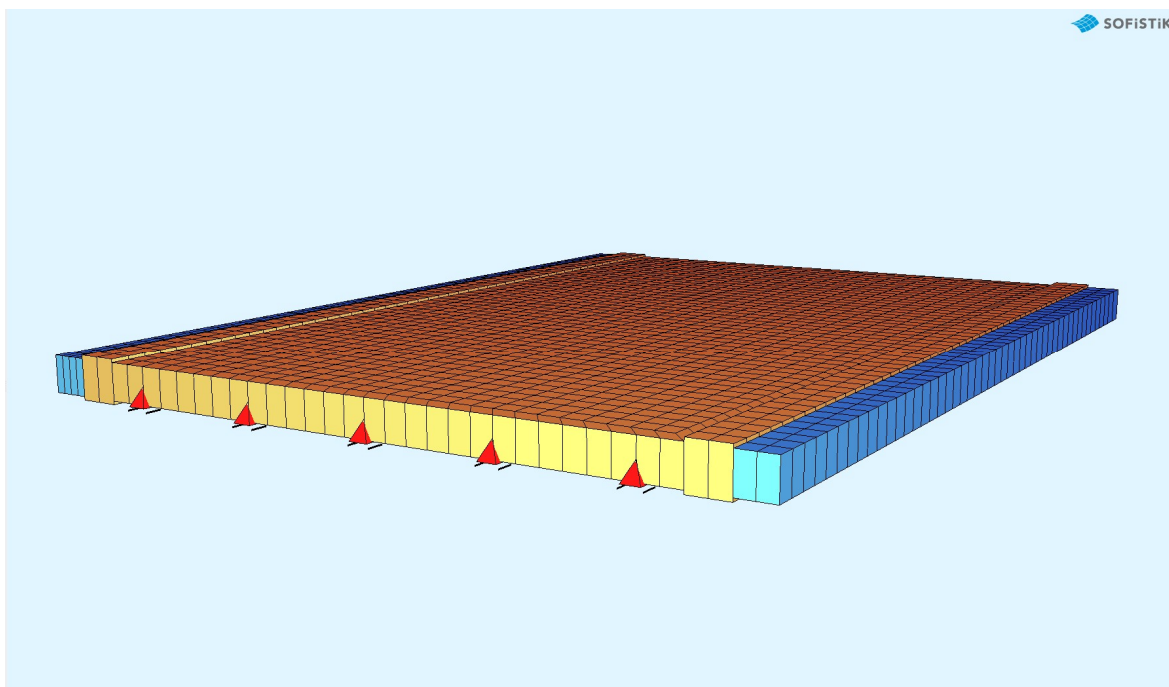
Ennen kokonaisten siltakansien tarkastelua oli tarpeen määrittää kaidejärjestelmän vaatima reunapalkin koko. Reunapalkki mitoitettiin leikkauksen ja taivutuksen osalta edellisessä luvussa esitetyille kuormille. Mitoituksessa noudatettiin standardia SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1.1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt (Suomen Standardoimisliitto SFS 2015) ja kansallista Eurokoodin soveltamisohjetta NCCI 2 (Väylävirasto 2022). Kaidetoimittaja Saferoad Finland suosittelee toimittamiin H4b-kaidejärjestelmille reunapalkin leveydeksi 550 mm, joten se valittiin mitoituksen lähtökohdaksi. Reunapalkin korkeudeksi valittiin olemassa olevien H4b-kaiteellisten esimerkkikohteiden (Vähäjoen ylikulkusilta Hollolassa, Ahvenkosken itäinen silta Pyhtäällä) perusteella 550 mm. Reunapalkin ja sillan kansirakenteen liitoksen mitoitus on rajattu tämän opinnäytetyön laajuuden ulkopuolelle.

Reunapalkin mitoituksessa hyödynnettiin FEM-laskentaa. Laskennan lähtökohtana käytettiin Liisa Vesalon opinnäytetyössään käyttämää SOFiSTiK- mallia (Vesalo 2022), johon tehtiin muutoksia sekä sillan poikkileikkaukseen, tukipisteisiin että kaiteen törmäys- ja omapainokuormien suuruuteen. Poikkileikkauksen referenssiksi valittiin tämän työn kohdan 3.1.2 rakennetyypeistä epäedullisin reunapalkin rasiusten suhteen; 10x15 m reuna-olokkeeton laattasilta. Poikkileikkauksen mitat reunapalkkia lukuun ottamatta perustuvat luvussa 3.1 esitettyjen vanhemman tyyppin laattasiltojen suunnitelmapiirustuksiin. Kuvassa 10 on esitetty Vesalon lopputyössään käyttämä kannen poikkileikkaus sekä tässä työssä käytetty kannen poikkileikkaus. Mitoituksessa rakenteet mallinnettiin kuvasta poiketen vaaka-akselinsa suhteen keskeisesti.



Kuva 10. Liisa Vesalon opinnäytetyössään käyttämä siltakannen poikkileikkaus (ylempi) ja tässä työssä reunapalkin mitoitukseen käytetty siltakannen poikkileikkaus (alempi)

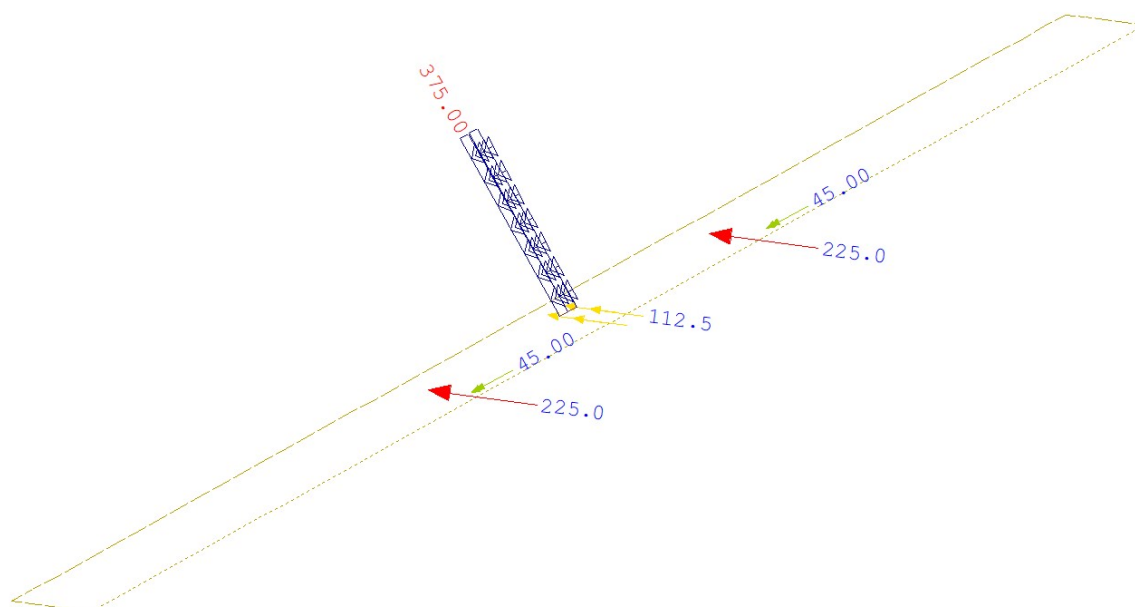
Tämän työn reunapalkin mitoituksessa käytetty kolmiulotteinen SOFiSTiK-ohjelmistolla luotu laskentamalli on esitetty kuvassa 11. Mallissa on esitetty reunapalkit sinisenä ja muu kansirakenne keltaisena. Törmäyskuormat asetetaan vaikuttamaan kuvassa vasemmanpuoleiselle reunapalkille.



Kuva 11. Reunapalkin mitoitukseen käytetty SOFiSTiK-malli

FEM-laskennalla selvitettiin reunapalkin momentti- ja leikkausvoimien poikkisuuntaisten resultanttien maksimiarvot mitoituslaskentaa varten. Elementtiverkon koko mallissa oli törmäyksen vastaan ottavalla reunapalkilla 150 mm ja muualla 300 mm. Kannen molempiin päihin asetettiin 5 kpl tukipisteitä simuloimaan sillan laakereita. Tukipisteet estävät sillan liikkeen pysty- ja poikkisuunnassa.

Kuvassa 12 on havainnollistettu törmäyskuormien jakoa reunapalkin yläpinnalla laskentaohjelmassa. Törmäyskohdassa leikkausvoima 450 kN jaettiin tasan kaidetolpan neljälle kiinnityspultille ja törmäyskohdan viereisille kaidetolpille syötettiin 50 % törmäyskohdan leikkausvoimasta pistemäisenä kuormana. Törmäyskohdan momentti 90 kNm muunnettiin 240 mm viivakuormaksi kaidekiinnityksen pulttien välille ja törmäyskohdan viereisille tolpile momentti syötettiin 50 % suuruisena pistemomenttina.



Kuva 12. Reunapalkin törmäyskuormat

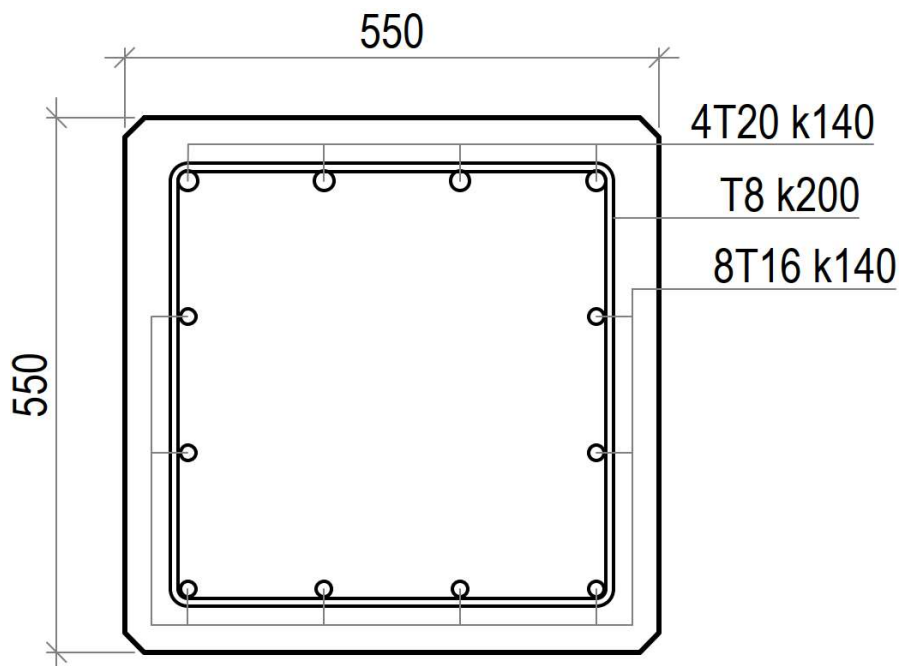
Mitoitusarvoina käytettiin kahden vierekkäisen elementtirivin lukuarvojen keskiarvoja mahdollisten mallinnuksen epätäydellisyydestä johtuvien paikallisten ylisuurien maksimiarvojen kompensoimiseksi. Mitoituksessa käytetyt lukuarvot olivat kuvassa 13 korostettujen alueiden elementtiarvojen keskiarvot jaettuna reunapalkin leveydellä 550 mm. Momentin mitoittavaksi arvoksi saatiin näin 219 kNm ja se muodostui reunapalkin keskelle, kaidetörmäyksen kohdalle. Leikkausvoiman mitoittavaksi arvoksi saatiin 72,3 kN, joka sijaitsi noin 2 metriä reunapalkin päädyistä. Huomionarvoista on, että etenkin leikkausvoiman paikallinen maksimiarvo kaidetörmäyskohdassa reunapalkin ulkoreunalla on huomattavasti koko palkin

leikkausvoiman leveyssuuntaisen keskiarvon maksimia suurempi. Siten se voi vaatia suurempaa paikallista rauditusmäärää kuin tämän työn mitoituslaskennalla saadut määrät. Reunapalkin raudituksen tarkka määrittäminen ei kuitenkaan kuulu tämän työn tavoitteisiin, ja tehdyn mitoituksen tarkoituksena oli pääasiassa osoittaa valitun poikkileikkauksen riittävyys pääraudoituksen vaatiman tilan suhteen.

378.25 +	401.19 +	403.12 +	403.09 +	401.06 +	377.84 +
374.20 +	387.40 +	407.50 +	407.48 +	387.29 +	373.84 +
371.92 +	379.67 +	395.50 +	395.48 +	379.56 +	371.63 +
370.62 +	376.30 +	386.59 +	386.56 +	376.30 +	370.39 +
-188.10 +	-186.88 +	-188.25 +	-187.82 +	-184.96 +	-180.25 +
-118.01 +	-118.12 +	-121.19 +	-122.62 +	-122.49 +	-121.73 +
-95.65 +	-97.15 +	-100.39 +	-102.57 +	-103.65 +	-104.30 +
-107.95 +	-110.47 +	-113.21 +	-115.27 +	-116.34 +	-116.58 +

Kuva 13. Reunapalkin taivutusmomentin (sininen, kNm/m) ja leikkausjännityksen (punainen, kN/m) arvoja elementtiverkossa

Mitoituksessa määrääväksi suureeksi osoittautui reunapalkin momenttikestävyys. Riittävä momenttikestävyys saavutetaan palkin rasitetussa pinnassa 4 kpl 20 mm pituussuuntaisella raudituksella, jolloin käyttöasteeksi murtorajatilassa saadaan 83 % ja onnettomuusyhdistelmällä 74 %. Leikkauksen suhteen edellä mainittu pituussuuntainen rauditus on ilman hakoja riittävä tarvittavan leikkauskestävyyden saavuttamiseksi, joten asetetaan reunapalkille Eurokoodin soveltamisohje NCCI 2:n määrittämä reunapalkin minimihakarauditus (8 mm haat 200 mm jaolla). Reunapalkin poikkileikkauksen rauditus on esitetty kuvassa 14. Momenttikestävyuden ja Eurokoodin soveltamisohjeen vaatimilla rauditusmäärillä reunapalkin käyttöasteeksi saadaan koko reunapalkin leikkauksen suhteen 30 %. Käyttämällä mitoitukseseen reunapalkin paikallista leikkausvoimamaksimia koko poikkileikkauksen keskiarvon sijaan saadaan samalla rauditusmäärällä käyttöasteeksi 94 %.



Kuva 14. Raudoitus reunapalkin poikkileikkauksessa

4.4 Siltakannen mallinnus kaidetörmäykselle

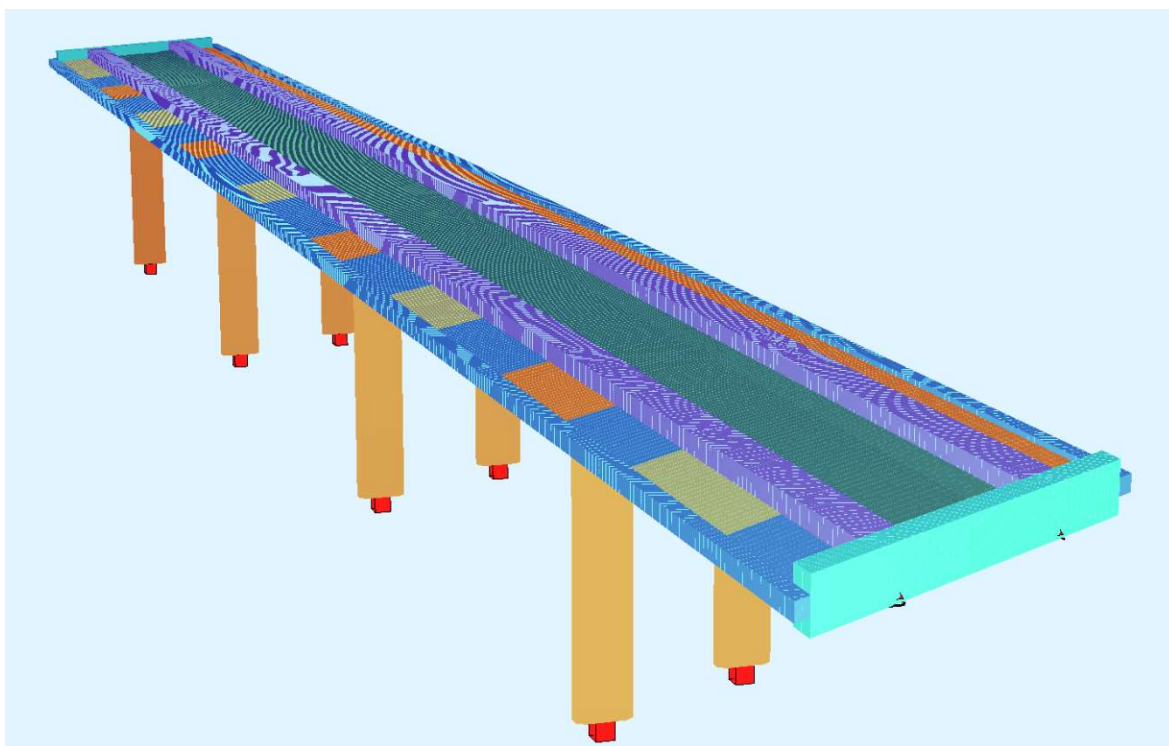
Kuten reunapalkin mitoituksessa, myös siltakannen mitoituksessa käytettiin FEM-laskentaa SOFiSTiK -ohjelmistolla. Yksittäisen tukivälin sijaan mallinnettiin sillan koko päällysrakenne sekä välituet, jotta pystyttiin luotettavammin simuloimaan rakenteen käyttäytymistä ja voimien siirtymistä törmäystilanteessa. Rakennemallit luotiin käyttäen SOFiSTiK-ohjelmiston tekstipohjaista tiedonsyöttötyökalua Teddyä, jonka lisäksi elementtien kulmapisteiden määrittämisen apuna käytettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmistoa.

Siltamalleja tuotettiin kolme erilaista, ja niiden geometriat perustuivat olemassa oleviin, luvussa 3.1.2 esitettyjä periaaterakenteita vastaavien tiesiltojen suunnitelmapiirustuksiin. Laskennan luotettavuuden lisäämiseksi päällysrakenteet mallinnettiin kuitenkin todellisista siltakohteista poiketen poikkileikkauksen vaaka-akselin suhteen keskinä, sillä epäkeskisissä malleissa osa taivutusmomentista siirtyy virheellisesti leikkausvoimaksi (Vesalo, 2022). Siltojen päällysrakenteet mallinnettiin laattaelementteinä ja välitukipilarit palkkielementteinä. Elementtiverkon kokona käytettiin koko rakenteelle 300 millimetriä. Pilarien alapäihin mallinnettiin jäykät tukipisteet ja pilarien yläpäätt sidottiin kansilaattaan niin ikään jäykästi. Kansilaattojen päihin mallinnettiin pistemäisiä tukia kuvaamaan siltojen laakereita, ja niiden sallitut liikesuunnat määriteltiin vastaamaan todellisten referenssiltojen laakeroin-teja.

Törmäystilanteen kuormat mallinnettiin pääasiassa samalla tavalla kuin reunapalkin mitoituksessa. Rakenteen omapainoista kaiteen painon mitoitus muutettiin pistemäisistä kuormista viivakuormaksi, jolloin voitiin vapaammin liikuttaa törmäyskuormaa sillan pituussuunnassa. Törmäyskuormat sekä törmäystilanteen rengaskuorma reunapalkilla mallinnettiin yhtenä kuormakokonaisuutena, jota liikutettiin aina 0,5 metriä kerrallaan sillan pituussuunnassa. Kuormitustapauksista muodostettiin lopuksi verhokäyrät, joissa laskentaohjelmisto laski elementtiverkon jokaiselle elementille mitoittavien voimien arvot paikallisesti epäedullisimman törmäyskohdan mukaan.

Tarkasteltujen rakennetyyppien referenssisillat

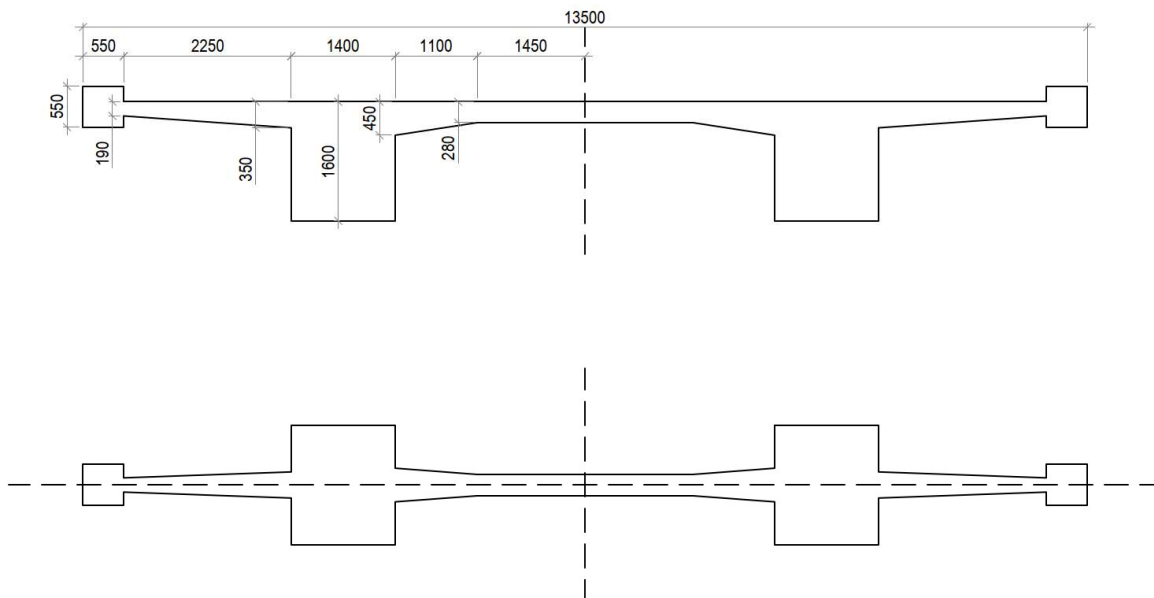
Palkkisillan mallirakenteeksi valikoitui valtatie 1:llä, Paimion kaakkoispuolella sijaitseva Pitkäportaan ylikulkusilta (siltatunnus T-2456). Vuonna 1999 valmistunut silta ylittää yhden raiteen Helsinki-Turku-rataosuudella, yhdystien nro. 2351 sekä muuhun tieverkkoon kuuluvan Vierustien (TRES 2023). Siltapaikalla on vierekkäin kaksi rakenteeltaan samanlaista siltaa, joista eteläisempää on tarkasteltu tässä työssä. Sillan laskentamalli on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Palkkisillan SOFiSTiK-malli

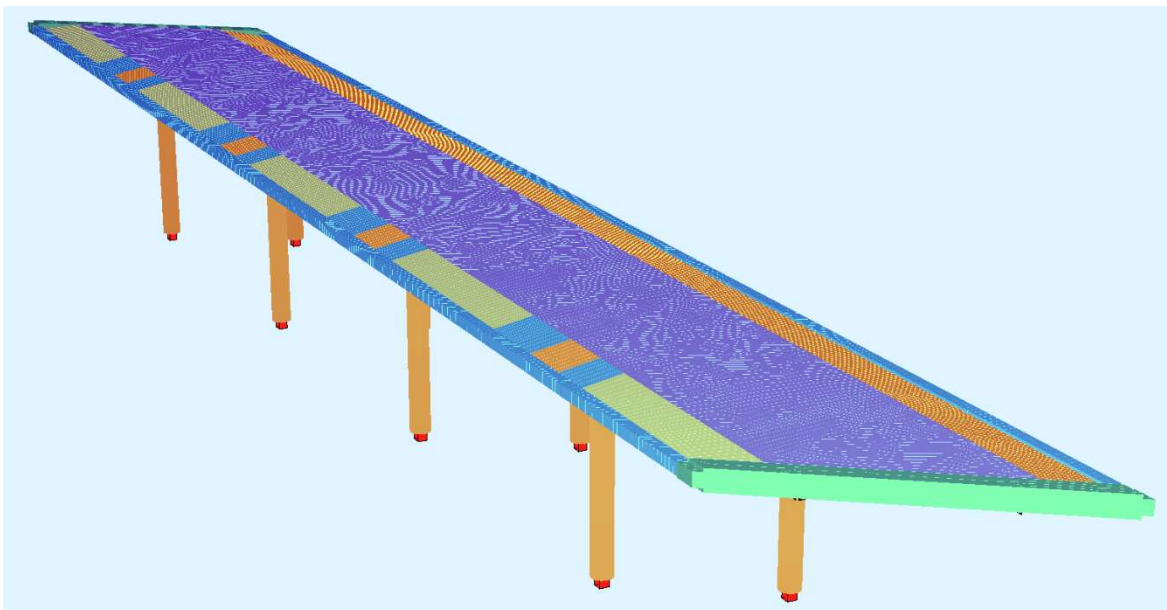
Silta on viisijänteinen, jännitetty teräsbetonipalkkisilta, jonka jännemitat vaihtelevat 22 metristä 32 metriin. Kullakin välituella on kaksi välitukipilaria, yksi kullekin sillan pääkannatinpalkeista. Silta on noin 32 astetta vino. Sillan kokonaispituus on 147 metriä, kokonaisleveys 13,3 metriä ja hyödyllinen leveys 12,5 metriä. H4b-kaiteen vaatimat, nykyistä suuremmat

reunapalkit nostivat mallinnetun sillan kokonaisleveyden 13,5 metriin. Kuvassa 16 on esitetty poikkileikkaukset sekä sillan todelliselle että laskentamallissa käytetylle kansirakenteelle.



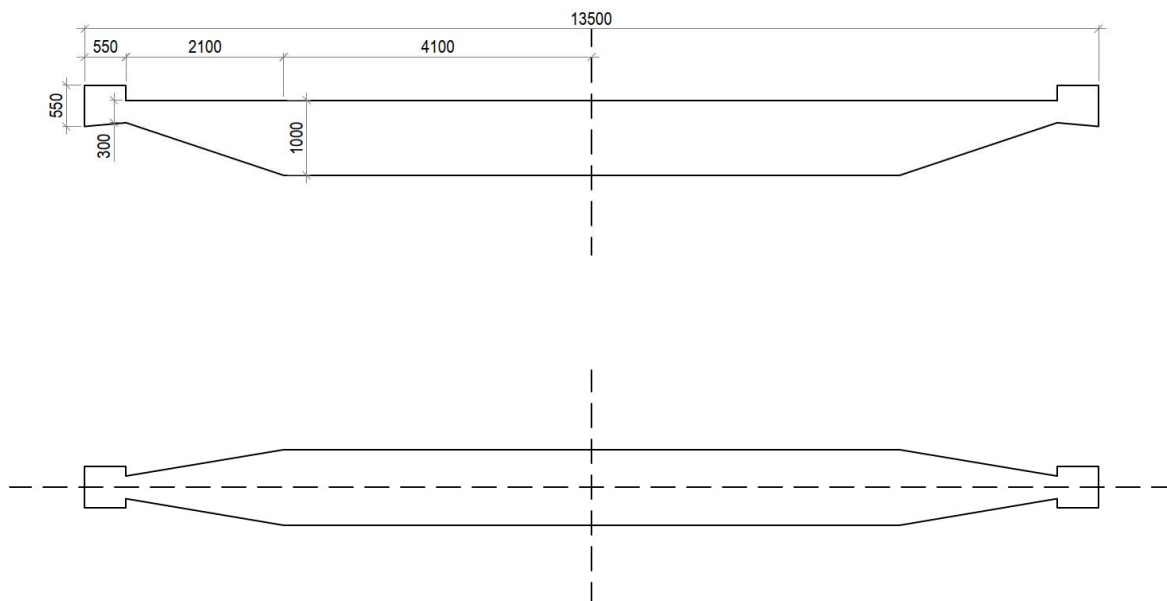
Kuva 16. Palkkisillan kannen todellinen, epäkeskinen (ylempi) ja mallinnuksessa käytetty keskinen (alempi) poikkileikkaus

Ulokkeellisen laattasillan mallirakenteena toimi Kaarinassa, Piikkiön itäpuolella sijaitseva Vehkamäen ylikulkusilta (siltatunnus T-2402). Pitkäportaan ylikulkusillan tavoin Vehkamäen ylikulkusilta on Valtatie 1:llä ja ylittää yhden raiteen Helsinki-Turku-rataosuudella. Lisäksi vuonna 1993 valmistunut silta ylittää yksityistien. (TREX, 2023) Tälläkin siltapaikalla on vierekkäin kaksi rakenteeltaan toisiaan vastaavaa siltaa, joista pohjoisempi toimi tämän työn mallirakenteena. Sillan laskentamalli on esitetty kuvassa 17.



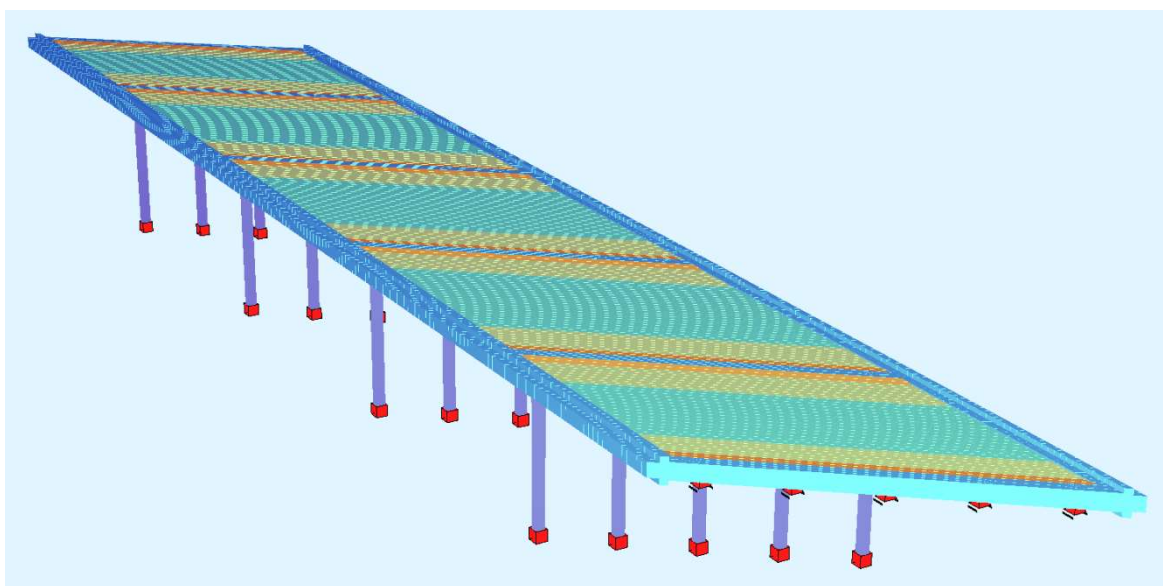
Kuva 17. Reunaulokkeellisen laattasillan SOFiSTiK-malli

Tällä teräsbetonisella laattasillalla on 5 jännettä, joiden pituudet vaihtelevat 16 metristä 20 metriin. Välituilla on kullakin 2 pilaria ja silta on noin 41 astetta vino. Sillan kokonaispituus on 104 metriä, kokonaisleveys 13,3 metriä ja hyödyllinen leveys 12,5 metriä. Uudet, suuremmat reunapalkit kasvattivat FEM-mallissa kannen kokonaisleveyden 13,5 metriin. Kuvasssa 18 on esitetty poikkileikkaukset sekä sillan todelliselle että laskentamallissa käytetylle kansirakenteelle.



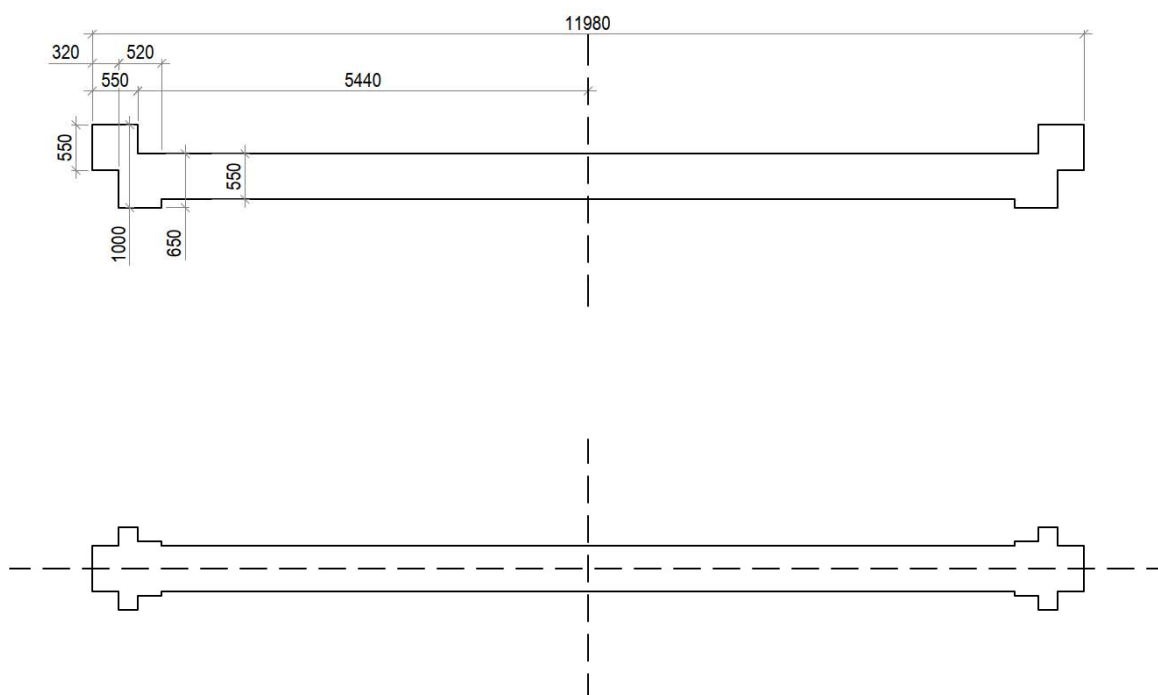
Kuva 18. Ulokkeellisen laattasillan todellinen, epäkeskinen (ylempi) ja mallinnuksessa käytetty keskinen (alempi) poikkileikkaus

Ulokkeettoman laattasillan mallirakenteena käytettiin Espoossa sijaitsevaa Tuomarilan ylikulkusiltaa (siltatunnus U-2616). Tämäkin silta on valtatiellä 1. Vuonna 1960 valmistunut silta ylittää kaksi raidetta Helsinki-Turku-rataosuudella sekä Tuomarilantien kevyen liikenteen väylineen. (TREX, 2023) Kahden muun referenssikohteen tavoin siltapaikalla on rinnakkain kaksi rakenteeltaan samanlaista siltaa, joista läntisempi oli tarkasteltavana tässä työssä. Sillan päällysrakenne vastaa tyyppisiltaa BB/42 ja sen laskentamalli on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Reunaulokkeettoman laattasillan SOFiSTiK-malli

Tälläkin teräsbetonisella laattasillalla on 5 jännettä, ja niiden pituudet vaihtelevat 10 metristä 13 metriin. Välitukipilareita on kullakin tukilinjalla viisi, ja silta on noin 38 astetta vino. Sillan kokonaispituus on 66 metriä, kokonaisleveys 11,2 metriä ja hyödyllinen leveys 10,4 metriä. Uudet, suuremmat reunapalkit kasvattivat laskentamallin kannen kokonaisleveyden 12 metriin. Kuvassa 20 on esitetty poikkileikkaukset sekä sillan todelliselle että laskentamallissa käytetylle kansirakenteelle.



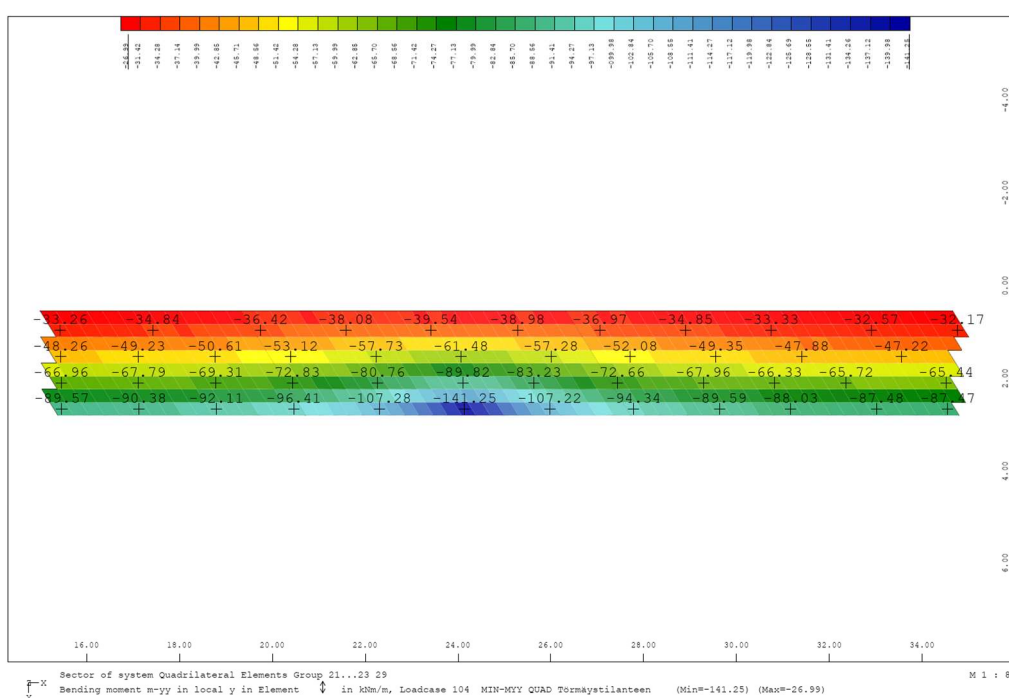
Kuva 20. Ulukkeettoman laattasillan todellinen, epäkeskinen (ylempi) ja mallinnuksessa käytetty keskinen (alempi) poikkileikkaus

Kaikkien kolmen sillan päällysrakenteet mallinnettiin kokonaisuudessaan. Siltatyypistä riippuen päällysrakenteeseen kuuluivat reunapalkit, kansilaatat, pääkannatinpalkit, reunaulokkeet sekä päätypalkit. Päällysrakenteiden lisäksi mallinnettiin välitukipilarit sekä pistemäisinä tukina laakerit, joita sillan molemmissa päissä oli välitukipilareita vastaava määrä: Joko kaksi tai viisi kappaletta.

5 Siltakannen kapasiteetti törmäystilanteessa

5.1 Kaidetörmäyksen aiheuttamat rasitukset rakenteessa

Tarkasteltavat voimasuureet sillan kannella olivat poikkisuuntainen taivutusmomentti, poikkisuuntainen leikkausvoima sekä kannen vääntömomentti. Tarkasteltavana siltakannen rakenneosana oli siltatyyppistä riippuen koko kansilaatta (reunaulokkeeton laattasilta) tai kannen reunauloke (palkkisilta ja reunaulokkeellinen laattasilta). Kuvassa 21 on tasokuva palkkisillan reunaulokkeen poikittaisen taivutusmomentin minimiarvoista välituen ympäristössä, sillan keskilinja kuvassa alhaalla.



Kuva 21. Taivutusmomentin minimiarvoja välituen ympäristössä palkkisillalla, törmäyskuormitetun reunapalkin puoleisella reunaulokkeella

Kukin tarkasteltava rakenneosajettiin FEM-mallissa elementtiryhmiin sen mukaan, minkä verran rakenteessa oli kullakin alueella suunnitelmapiirustusten mukaan käytetty poikkisuuntaista raudoitusterästä. Tämä helpotti rakenteen käyttöasteiden laskentaa, koska pystyttiin nopeasti löytämään tarkasteltavien voimasuureiden maksimiarvot erikseen kaikille rakenteessa esiintyvillä raudoitusmäärillä.

Laskentadata tarkasteltavilta rakenneosilta siirrettiin SOFiSTiK-ohjelmiston Result-työkalulla Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jossa tulokset eriteltiin elementtiryhmiin mukaan.

Kuvassa 22 on ote laskentatulosten Excel-taulukoinnista. Jokaiselle elementtiryhmälle haettiin sekä taivutusmomentin että leikkausvoiman minimi- ja maksimiarvot. Minimiarvot oli tarkasteltava, koska voimasuureen etumerkki kuvaa voiman vaikutussuuntaa ja siten voimasuureen arvoja vertailtaessa tulee käyttää tuloksien itseisarvoja.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	myy [kNm Grp		QUAD		MAX		myy [kNm Grp		QUAD		MAX		myy [kNm Grp		QUAD		MAX
2	-85.14	21	2100001		1.140299		-89.79	22	2200001		-26.0891		-97.25	23	2300001		-28.7545
3	-85.73	21	2100002		-89.5039		-89.66	22	2200002		-104.77		-98.80	23	2300002		-141.253
4	-86.15	21	2100003		MIN		-89.57	22	2200003		MIN		-100.61	23	2300003		MIN
5	-86.42	21	2100004				-89.56	22	2200004				-102.77	23	2300004		
6	-86.86	21	2100005				-89.75	22	2200005				-105.04	23	2300005		
7	-87.21	21	2100006				-90.00	22	2200006				-107.28	23	2300006		
8	-87.28	21	2100007				-90.19	22	2200007				-110.97	23	2300007		
9	-87.43	21	2100008				-90.38	22	2200008				-115.43	23	2300008		
10	-87.32	21	2100009				-90.78	22	2200009				-120.70	23	2300009		
11	-87.93	21	2100010				-90.99	22	2200010				-128.23	23	2300010		
12	-88.19	21	2100011				-91.43	22	2200011				-137.03	23	2300011		
13	-88.06	21	2100012				-91.94	22	2200012				-141.25	23	2300012		
14	-88.23	21	2100013				-92.11	22	2200013				-136.61	23	2300013		
15	-87.94	21	2100014				-92.27	22	2200014				-128.82	23	2300014		
16	-87.90	21	2100015				-92.85	22	2200015				-122.03	23	2300015		
17	-88.53	21	2100016				-94.29	22	2200016				-115.72	23	2300016		
18	-88.79	21	2100017				-95.81	22	2200017				-111.04	23	2300017		
19	-88.73	21	2100018				-96.41	22	2200018				-107.22	23	2300018		
20	-88.65	21	2100019				-77.62	22	2200019				-84.78	23	2300019		
21	-88.51	21	2100020				-77.84	22	2200020				-85.79	23	2300020		
22	-88.92	21	2100021				-77.68	22	2200021				-87.01	23	2300021		
23	-88.57	21	2100022				-77.89	22	2200022				-88.81	23	2300022		
24	-88.57	21	2100023				-78.04	22	2200023				-90.57	23	2300023		
25	-89.50	21	2100024				-78.07	22	2200024				-92.77	23	2300024		
26	-73.11	21	2100025				-78.37	22	2200025				-95.19	23	2300025		
27	-73.94	21	2100026				-78.65	22	2200026				-97.89	23	2300026		
28	-74.27	21	2100027				-78.75	22	2200027				-101.13	23	2300027		
29	-74.69	21	2100028				-79.17	22	2200028				-104.32	23	2300028		
30	-75.09	21	2100029				-79.40	22	2200029				-106.77	23	2300029		
31	-75.18	21	2100030				-79.55	22	2200030				-108.39	23	2300030		
32	-75.63	21	2100031				-80.05	22	2200031				-109.09	23	2300031		
33	-75.66	21	2100032				-80.22	22	2200032				-109.09	23	2300032		

Kuva 22. FEM-laskennan tulosdataa taivutusmomentin minimiarvoille palkkisillan reunaulokkeella, tuotuna Excel-taulukkoon

FEM-mallissa tukipisteiden ympäristöön muodostuu virheellisen suuria rasiusten arvoja, koska laskentaohjelma olettaa tukipinnan alan olevan nolla. Nämä virheet on otettava huomioon FEM-laskennan tuloksia tarkasteltaessa ja Eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 2 onkin esitetty tavat niiden huomioimiseen. Leikkausvoiman lokaalien virhearvojen hallitsemiseksi NCCI 2 esittää mitoituksessa käytettävien leikkausvoimien vähimmäisetäisyydeksi tuelta $d/2$, eli puolet rakenteen tehollisesta korkeudesta tukilinjalta. Laatan tukimomenttia voidaan soveltamisohjeen mukaan tasata laskemalla elementtikohtaisten momenttien keskiarvo tuen ympäristössä. Tasausalueen laajuuteen vaikuttavat tukipilarin tai laakerin halkaisija D sekä laatan tehollinen korkeus d tarkastelusuunnassa kaavan 1 mukaisesti:

$$b = D + d * 2,0$$

Kaava 1. Tukimomentin tasausleveys betonilaattasillalla

Kaavaa 1 voidaan soveltaa myös palkkisillan poikkisuuntaisille tukimomenteille reunaulokkeella, koska reunauloke käyttäytyy poikkisuunnassa tarkasteltuna laattarakenteen tavoin. (Väylävirasto 2022.)

Näitä kahta keinoa on käytetty tässä työssä SOFiSTiK-mallin laskentatulosten paikallisten virheiden hallitsemiseen. Reunaulokkeettoman laattasillan uloimmat tukipisteet olivat niin

lähellä sekä kannen ulkoreunaa että toisiaan, että tukilinjat päädyttiin rajaamaan kokonaan ulos vääntömomentin tarkastelusta FEM-laskennan tulosten virheellisyyden takia.

Kannen vääntömomentteja tarkasteltiin vertaamalla niitä betonin laskennalliseen vääntökestävyyteen Excel-taulukkolaskentaohjelmassa. Betonin vääntökestävyyteen T_c vaikuttavat betonin puristuslujuus sekä tarkasteltavan poikkileikkauksen kimmainen vääntövastus, ja se voidaan laskea Siltojen kantavuuslaskentaohjeessa esitetyllä kaavalla 2 (Liikennevirasto 2015):

$$T_c = 0,12 * f_{ctd} * W_{tr}$$

Kaava 2. Betonin vääntökestävyys

Betonin puristuslujuus f_{ctd} on ilmoitettu rakenteen suunnitelmapiirustuksissa, ja kimmainen vääntövastus W_{tr} voidaan laskea poikkileikkauksen leveyden ja korkeuden avulla. Kapealle suorakaidepoikkileikkaukselle on esitetty vääntövastuksen laskentakaava julkaisussa Rak-54.1200 Rakenteiden Lujusoppi, luennot osa II (Aalto):

$$W_t = \frac{I_t}{c} = \frac{1}{3}bc^2$$

Kaava 3. Kapean suorakaidepoikkileikkauksen vääntövastus

Yllä esitetyssä kaavassa 3 poikkileikkauksen leveys on b ja poikkileikkauksen korkeus on c . Korkeuden tunnuksena on tämän työn laskennassa käytetty c :n sijaan h :ta.

Poikkileikkauksen korkeutena käytettiin laattaelementin paksuutta, joka voitiin esittää FEM-laskennan tulosdatassa elementtiverkon jokaiselle elementille erikseen. Siten voitiin laskea vääntökestävyys niin ikään jokaiselle elementtiverkon elementille erikseen. Laatalle käytettiin tässä tapauksessa leveyden arvoa 1 metri, jolloin vääntökestävyyden arvot olivat sellaisenaan verrattavissa SOFiSTiK-ohjelman laskemiin vääntömomentin arvoihin. Siten kimmoisen vääntövastuksen laskentakaava yksinkertaistui muotoon:

$$W_{tr} = \frac{1}{3}h^2$$

Kaava 4. Laatan kimmainen vääntövastus

Kuvassa 23 on ote palkkisillan reunaulokkeen vääntömomenttien ja vääntökestävyyksien vertailusta Excel-taulukossa. Taulukon sarakkeen E suure Md_{XY} kuvaa vääntökestävyyden ja vääntömomentin epäedullista erotusta. Md_{XY} :n arvo nolla tarkoittaa, että elementin vääntökestävyys on vääntörasituksen itseisarvoa suurempi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	QUAD	MXY [kNm/m]	h [mm]	Tc [kNm/m]	MdXY				
2	2200561	26.07	340.0	73.38	0		0	maksimi (MdXY)	
3	2200562	26.01	340.0	73.38	0				
4	2300196	25.93	340.0	73.38	0				
5	2200563	25.84	340.0	73.38	0				
6	2300018	25.69	340.0	73.38	0				
7	2300017	25.66	340.0	73.38	0				
8	2200564	25.62	340.0	73.38	0				
9	2300195	25.53	340.0	73.38	0				
10	2300145	25.51	340.0	73.38	0				
11	2300146	25.33	340.0	73.38	0				
12	2200565	25.30	340.0	73.38	0				
13	2300147	24.99	340.0	73.38	0				
14	2200566	24.91	340.0	73.38	0				
15	2300016	24.88	340.0	73.38	0				
16	2300194	24.67	340.0	73.38	0				
17	2300148	24.67	340.0	73.38	0				

Betonin vääntökestävyys on

$$T_c = 0,12 \cdot f_{ctd} \cdot W_{tr}$$

$$W_{tr} = \frac{1}{3} h^2$$

Kuva 23. Reunaulokkeen vääntökestävyyden laskenta ja vertailu elementtikohtaisen vääntörasituksen kanssa Excel-tilaukossa

Tarkasteluissa havaittiin, että jokaisella mallinnetulla siltatyypillä rakenteen vääntökestävyys oli FEM-mallien tarkastelualueiden kaikilla elementeillä suurempi kuin törmäystilanteen vääntömomentti, joten vääntömomentit voitiin jättää huomioimatta rakenteiden käyttöasteita laskettaessa.

Tässä työssä tehty vääntömomenttien tarkastelu on siltojen kantavuuslaskentaohjeiden (Väylävirasto 2015) mukaan riittävä, koska betonin vääntökestävyyttä ei ylitetty. Mikäli betonin vääntökestävyys olisi jossain sillan elementissä ylittynyt, tulisi tarkastelussa lisäksi huomioida väännön aiheuttamat voimat betonirakenteen raudoituksessa.

5.2 Rakenteen käyttöaste törmäystilanteen kuormille

Rakenteen mitoituksista puhuttaessa käyttöasteella tarkoitetaan kuormituksen aiheuttaman rasituksen suhdetta rakenteen maksimikestävyyteen eli kapasiteettiin. Käyttöasteen määrittämiseksi on siis tunnettava FEM-laskennalla tuotettujen rasitusten lisäksi tarkasteltavien rakenteiden kapasiteetit. Tässä työssä tavoitteena oli selvittää käyttöasteet sillan poikkittaiselle taiputukselle ja leikkaukselle, joten tuli myös laskea rakenteiden poikkittaiset taiputuskestävyydet ja leikkauskestävyydet.

Teräsbetonisen laattarakenteen kestävyys riippuu laatan paksuudesta ja betonin puristuslujuudesta, raudoitusteräksen määrästä ja vetolujuudesta sekä raudoituksen sijainnista poikkileikkauksessa. Nämä tiedot haettiin rakenteiden kantavuustarkastelua varten siltojen suunnitelmapiirustuksista, jotka löytyvät Väyläviraston Taitorakennerekisteristä. Taulukossa 5 on esitetty kolmen tarkastellun sillan relevantit materiaaliominaisuudet.

	T-2456	T-2402	U-2616
Laatan tai ulokkeen paksuus [mm]	190-350	300-1000	550
Betonin ominaislujuus [N/mm²]	28,0	24,5	21,0
Raudoitusteräksen ominaislujuus [N/mm²]	500	500	400
Poikittaisten raudoitusterästen määrä rasitetussa pinnassa kannen eri alueilla	T20 k200 + T16 k200 T20 k150 + T16 k300 T20 k100	T20 k200 T20 k100	T15 k550 T15 k275

Taulukko 5. Lähtötietoja tarkasteltujen siltojen kapasiteettien laskentaan

Teräsbetonisen laatan taivutus- ja leikkauskestävyyden laskenta on esitetty liitteissä 1 ja 2. Liitteissä on lähtöarvoina käytetty tässä työssä tarkastellun palkkisillan kentän keskialueen mitoittavia voimia ja materiaaliominaisuuksia. Vastaavat laskelmat toistettiin jokaisen tarkastellun rakenneosan kaikille poikittaisraudoitukseltaan erilaisille alueille. Laskennan tulokset on esitetty koottuna Taulukossa 6.

U-2616, kansilaatta			T-2402, reunauloke			T-2456, reunauloke		
<u>Kenttä</u>			<u>Kenttä</u>			<u>Kentän keskialue</u>		
MY	40.52	69.00 %	MY	183.34	27.84 %	MY	89.50	29.51 %
VY	36.26	20.54 %	VY	184.46	50.67 %	VY	53.97	36.64 %
<u>Tukien ympäristö</u>			<u>Tukien ympäristö</u>			<u>Tukien ja kentän keskialueen välimaasto</u>		
MY	108.07	92.93 %	MY	235.37	18.31 %	MY	104.77	32.57 %
VY	127.14	72.02 %	VY	107.44	29.51 %	VY	52.94	35.96 %
			<u>Tuet</u>			<u>Tuet</u>		
			MY	288.72	15.41 %	MY	141.25	39.57 %
			VY	244.45	60.34 %	VY	86.56	58.84 %
						<u>Kannen terävän päädyn alue</u>		
						MY	84.46	27.85 %
						VY	69.46	47.16 %

Taulukko 6. Tarkasteltujen siltojen mitoittavat voimat ja käyttöasteet poikittaiselle taivutusmomentille MY ja poikkisuunnan leikkausvoimalle VY kannen eri osilla

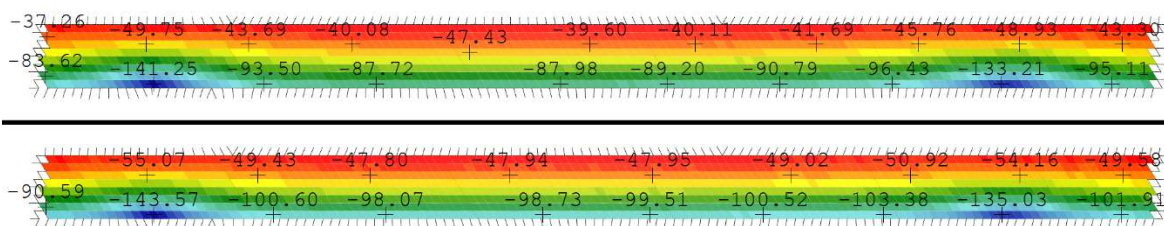
Tuloksista nähdään, että ulokkeellisen laattasillan sekä palkkisillan käyttöasteet pysyvät kaidetörmästilanteessa sillan koko pituudella maltillisina, mutta vanhemmalla ja heikkolaatuisemmista materiaaleista valmistetulla ulokkeettomalla palkkisillalla etenkin momenttikestävyys on koetuksella, kun kaidetörmäys tapahtuu sillan tukien läheisyydessä.

5.3 Reunapalkin halkeilun vaikutus reunaulokkeen poikkisuuntaisiin rasituksiin

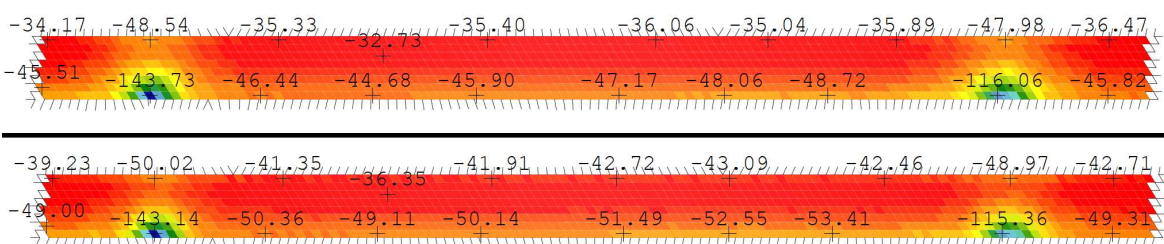
Edellä tehdyissä tarkasteluissa siltojen kaikki rakenteet oli oletettu ominaisuuksiltaan uudenveroisiksi. Todellisuudessa siltarakenteet kuitenkin voivat vaurioitua monin eri tavoin ajan kuluessa. Näistä vaurioista yksi hyvin tyypillinen on sillan reunapalkkien halkeilu. Halkeillessaan betoni menettää merkittävän osan jäykkyydestään, mikä johtaa

kaidetörmäyksessä suurempien voimien siirtymiseen reunapalkilta sillan kansirakenteelle. Osana tätä opinnäytetyötä haluttiin tarkastella, kuinka suuri vaikutus halkeilulla on H4b-kai-teen vaatiman, tavanomaista massiivisemmän reunapalkin tapauksessa.

Eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 2 on esitetty käytäntö halkeilun huomiointiin laattapalkkisillan arinamallin muodostamisessa. Halkeilleen teräsbetonipoikkileikkauksen jäykkytenä käytetään puolta vastaavan, halkeilemattoman poikkileikkauksen jäykkyydestä (Väylävirasto 2022). Koska reunapalkin halkeilulle ei ole ohjeessa erikseen määritetty vastaavaa huomiointitapaa, on tässä työssä käytetty reunapalkin halkeilun tarkasteluun edellä mainittua laattapalkkisillan arinamallin käytäntöä. Näin ollaan rasitustarkastelussa turvallisella puolella. Valittiin tarkastelukohteeksi aiemmin muodostettu palkkisillan FEM-malli, jossa reunapalkin betonimateriaalin kimmomoduulin E alkuperäinen arvo $17\,000\text{ N/mm}^2$ puolitettiin arvoon $8\,500\text{ N/mm}^2$. FEM-laskenta suoritettiin sitten uudelleen ja verrattiin nyt saatuja poikittaisen taivutusmomentin ja leikkausvoiman arvoja alkuperäisen laskennan arvoihin. Kuvissa 24 ja 25 on tasokuvia palkkisillan reuna-alueen voimasuureista yhden välitukivälin alueelta, kun reunapalkki on ehjä ja halkeillut. Sillan keskilinja kuvissa alhaalla.



Kuva 24. Poikittaisen taivutusmomentin arvoja palkkisillan reuna-alueella jännevälillä T2-T3, kun reunapalkki on ehjä (ylempi) ja halkeillut (alempi)



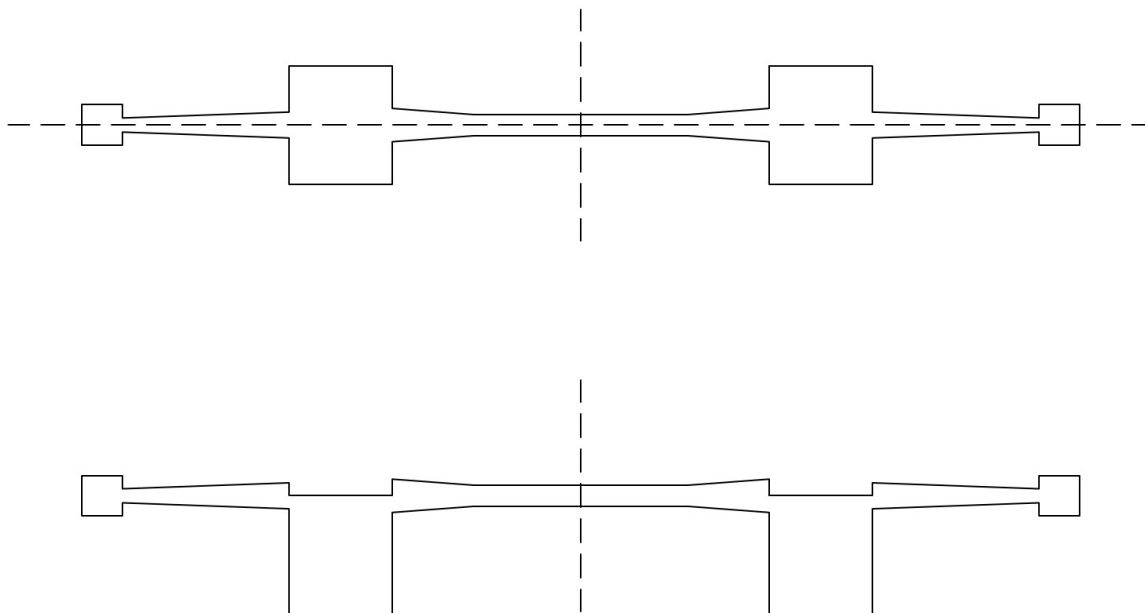
Kuva 25. Poikittaisen leikkausvoiman arvoja palkkisillan reuna-alueella jännevälillä T2-T3, kun reunapalkki on ehjä (ylempi) ja halkeillut (alempi)

Tuloksia analysoitiin tarkemmin Excel-taulukkolaskentaohjelmassa. Havaittiin, että taivutusmomentin mitoittavat arvot kasvoivat välituilla alle 2 %, mutta jännevälien keskialueilla yli 10 % ja sillan päädyissä jopa 14 %. Mitoittavien leikkausvoimien muutokset olivat hieman maltillisempia: Jännteillä mitoittava leikkausvoima kasvoi noin 9 % ja tukialueiden mitoittava leikkausvoima jopa pieneni noin 1 % verran välituilla ja 4 % maatuilla.

Sekä mitoittava momentti että mitoittava leikkausvoima ovat tuilla suurempia kuin jänteen keskiosassa, joten tuloksista voidaan todeta reunapalkin halkeilun tasaavan rasituksia sillan eri alueiden välillä. Toisaalta etenkin momentin suhteen reunapalkin halkeilu aiheuttaa selkeää lisärasitusta sillan kannelle.

5.4 Laskentamallin epäkeskisyyden vaikutus palkkisillan rasitukseen

Palkkisillan keskeisesti mallinnetut, huomattavan paksut palkkielementit aiheuttavat jonkin verran virhettä FEM-laskennalla saatuihin ulokkeen rasitukseen. Tämän virheen suuruutta haluttiin arvioida vertaamalla keskeisen mallin tuottamia tuloksia vastaavan, palkkien suhteen epäkeskisen laskentamallin tuottamiin tuloksiin. Tarkasteltujen laskentamallien poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 26, rakenteen mitat vastaavat kuvan 16 mittoja.



Kuva 26. Keskeisen (ylempi) ja palkkien suhteen epäkeskisen (alempi) laskentamallien poikkileikkaukset

Rasituksia vertailtaessa havaittiin kahden laskentamallin erojen olevan taivutusmomentille keskimäärin 15 % ja leikkausvoimalle 10 %. Molemmat suureet olivat epäkeskisessä mallissa keskimäärin pienempiä. Paikallisesti suurimmat erot syntyivät kannen päädyissä, joissa päätypalkin paikallisvaikutus tuotti huomattavia muutoksia rasitukseen. Vaikka suhteelliset vaikutukset olivat päätyalueilla suuria, rasitusten absoluuttiset arvot eivät olleet mitoituksen kannalta merkittäviä. Suurimmat rasitukset syntyivät edelleen välitukien kohdalle, jossa epäkeskisyyden vaikutus pienensi mitoittavia rasituksia noin 5 %.

Epäkeskisyydestä tarkastelun tulokset osoittivat, että työssä käytetty keskeinen laskentamalli tuottaa hiivien todellista rakennetta suurempia rasituksia. Voidaan siis todeta, että työssä

tehdyt kapasiteetilaskelmat ovat tämän suhteen turvallisella puolella eikä ole tarpeen laskea palkkisillan reunaulokkeen kapasiteetteja uudelleen epäkeskisen laskentamallin rasi-
tusten pohjalta.

6 Yhteenveto, johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Suomen tieverkolla olevien siltojen kansirakenteiden kykyä ottaa vastaan korkeamman, H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteiden törmäyskuormia. Työssä tutustuttiin kaidejärjestelmien törmäyskestävyysluokitukseen ja törmäystaukukseen, saatavilla oleviin H4b-kaidetuotteisiin, käytettävän kaidejärjestelmän valinnan periaatteisiin Suomessa sekä törmäystilanteen mitoitusperiaatteisiin. Tämän jälkeen tarkasteltiin FEM-laskennan avulla kaidetörmäyksessä sillan reunapalkilta kansilaatalle siirtyviä taivutus- ja leikkausvoimia, joiden perusteella määritettiin laskennallisesti käyttöasteet valituille esimerkkirakenteille. Lisäksi tarkasteltiin reunapalkin halkeilun vaikutusta törmäystilanteen kuormiin sillan kannella ja palkkisillan laskentamallin eri keskisyysvalintojen vaikutuksia.

Laskelmat osoittivat, että tyypilliset 1990- ja 2000-luvuilla rakennettujen siltojen kansirakenteet kestivät korkeammat, H4b-luokan törmäyskuormat hyvin. Vanhemmalla sillalla korkeammat törmäyskuormat nostivat rakenteen käyttöasteen lähelle sen maksimikapasiteettia. Lisäksi reunapalkin halkeilu kasvatti kannen poikittaisia rasituksia muutamalla prosentilla. Epäkeskisyyden lisääminen palkkisillan laskentamalliin sen sijaan pienensi poikittaisia rasituksia viiden prosentin verran. Käyttöasteiden laskennassa ei huomioitu rakenteiden mahdollisia vaurioita, valmistusvirheitä tai ikääntymistä, joten etenkin vanhimman esimerkkisillan laskennallisen kapasiteetin on oletettava olevan sen todellista kapasiteettia korkeampi. Voidaan siis olettaa, että vanhemmilla laattasilloilla rakenteen kapasiteetti ylittyy, jos niille asennetaan H4b-törmäyskestävyysluokan kaiteet ilman samanaikaista kannen vahvistamista. Koska mitoittavaksi suureeksi osoittautui laskennassa välitukialueiden taivutusmomentti, tulisi sillan kantta vahvistaa tukialueiden yläpinnasta. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi siltakannen muotoiluvulun yhteydessä raudoitusta lisäämällä. On kuitenkin kohdekohtaisesti harkittava, onko elinkaarensa loppupuolella olevalle sillalle järkevä tehdä mittavia parannustöitä sillan uusimisen sijaan.

Yleisemmällä tasolla voidaan todeta, että vanhemmissa teräsbetonisilloissa on käytetty muun muassa mitoituslujuudeltaan heikompia materiaaleja, ohuempia ulokelaattoja sekä pienempiä liikenteen mitoituskuormia. Tästä syystä, kun ajan kuluessa liikenteen kuormat ovat kasvaneet ja jo ennestään heikommat rakennusmateriaalit ovat kuluneet ja vaurioituneet, näillä silloilla voidaan olla jo lähellä niiden kantokapasiteetin ylitystä. Lisäämällä tällaiseen siltaan kaidejärjestelmä, joka entisestään lisää rasituksia kasvattamalla törmäyskuormia merkittävästi, rakenteesta tulee helposti ylikuormitettu. Etenkin sellaisilla silloilla, joiden kansirakenteeseen kuuluu ohut reunauloke, tulee tapauskohtaisesti laskea rakenteen

kestävyys kaiteen ja reunapalkin korkeammille törmäyskuormille, kun harkitaan vaihtoa törmäyskestävyydeltään suurempaan kaidejärjestelmään.

Jatkossa tulee myös harkita, minkälaisia voimia kaidetörmäyksen mitoituslaskennassa käytetään ja miten ne asetetaan vaikuttamaan rakenteeseen. Itävallassa tehty tutkimus osoittaa, että nykyiset Eurokoodin mukaiset törmäystilanteen mitoitusvoimasuureet ovat kyseenalaiset eivätkä kuvaa todenmukaisesti törmäystilannetta. Eurokoodeja ollaan lähivuosina päivittämässä ja olisi toivottavaa, että päivityksen yhteydessä tarkistettaisiin myös siltojen kaidetörmäyksen mitoitusperusteet.

Tässä työssä tehdyt törmäyskuormalaskelmat perustuvat yksinkertaistettuun, staattiseen tarkasteluun, joten saatuihin tuloksiin sisältyy huomattavasti epätarkkuutta ja niitä tulee tulkita suuntaa antavina. Hankkeissa, joissa siltakohteen rakenne vastaa tässä työssä tarkasteltuja siltatyyppejä, voidaan tämän työn tulosten pohjalta arvioida jo hankkeen alkumetreillä kaidejärjestelmän vaihdon mielekkyyttä sekä tarvetta tarkemmille tutkimuksille tai laskelmille. Tämän hyödyn maksimoimiseksi pyrittiin valitsemaan työhön tarkasteltavaksi Suomen tieverkon yleisimpiä sillan päällysrakenteita.

Yksi H4b-kaidejärjestelmien tuomista suunnitteluhaasteista silloilla on sillan reunapalkin mitoitus. Toisin kuin Suomessa yleiselle H2-törmäyskestävyysluokan kaiteen reunapalkille, Väylävirasto ei ole julkaissut H4b-luokan kaiteen reunapalkille erillisiä suunnitteluohjeita. Suunnittelijan tulee siten suunnitella reunapalkki erikseen jokaisessa siltakohteessa ottaen huomioon reunapalkin vaadittu kapasiteetti sekä fyysiset mitat. Tässä työssä tarkasteltiin hyvin lyhyesti tarvittavaa reunapalkin rauditusmäärää H4b-törmäyskuormille, mutta jatkotutkimuksena tälle työlle voitaisiin tarkastelua laajentaa ja sen pohjalta luoda H2-kaiteita vastaavat yleiset suunnitteluohjeet H4b-kaiteen reunapalkille. Tämä madaltaisi kynnystä käyttää korkeamman törmäyskestävyysluokan kaiteita tulevilla siltahankkeilla ja yhtenäistäisi suunnittelukäytäntöjä.

Lähteet

Aalto, J. Rak-54.1200 Rakenteiden lujuusoppi. Aalto-yliopisto. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/RLP_L.pdf

Infra-RYL 2022/2. 2022. Rakennustieto. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ryl.rakennustieto.fi/ryl/infraryl/2022_2/

Liikennevirasto. 2015. Siltojen kantavuuslaskentaohje. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2015-36_siltojen_kantavuuslaskentaohje_web.pdf

Liikennevirasto. 2017. Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2017-24_ncci1_web.pdf

RIL 179-2018. Sillat -Suunnittelu, toteutus ja ylläpito. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

SFS-EN 1317-1 2011. Road restraint systems. Part 1: Terminology and general criteria for test methods. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1317-2 2011. Road restraint systems. Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-2 2004. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1992-1-1 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden Suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Stangl, E. 2018. Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken – Einteilung in die Klassen der ÖNORM B 1991-2. FSV-aktuell strasse November 2018. 839-840.

Tiehallinto. 2001. Siltojen kosketussuojarakenteet. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla <https://www.tieh.fi/sillat/julkaisut/kosketussuoja01.pdf>

Vesalo, L. 2022. Sillan reunapalkin rakenneanalyysi kaidetörmäykselle. Savonia-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/704533/Vesalo_Liisa.pdf

Väylävirasto. 2022. Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf

Väylävirasto. 2022. Markkinoilla olevia kaidetuotteita 15.6.2022. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/opas_markkinoilla_olevia_kaidetuotteita_150622.pdf

Väylävirasto. 2022. Siltakaiteiden suunnittelu. Viitattu 20.4.2023. Saatavilla https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-9_siltakaiteiden_suunnittelu.pdf

Väylävirasto. 2023. Taitorakennerekisteri. Viitattu 25.4.2023. Saatavilla <https://extra-net.vayla.fi/trex/>

Include << C:\Projektit\Oppari\Mathcad laskelmat\Materiaaliominaisuudet teräsbetoni.mcdx

Laatan taivutus

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 28.00 \text{ MPa}$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \text{ MPa}$$

Momentti

$$m_{Ed} := 89.5 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Poikkileikkausarvot ja raudoitus

Laatan paksuus

$$h := 350 \text{ mm}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 10 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1
koko ja jako

$$\phi_1 := 20 \text{ mm}$$

$$kk_1 := 200 \text{ mm}$$

Lähempänä betonipintaa olevien
toisen suunnan terästen koko,
mikäli on

$$\phi_{pinta} := 0 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 2
koko ja jako

$$\phi_2 := 16 \text{ mm}$$

$$kk_2 := 200 \text{ mm}$$

$$\phi_{kesk} := \begin{cases} \text{if } \phi_2 > 0 \wedge kk_2 > 0 \\ \left| \frac{kk_1^{-1} \cdot \phi_1^2 + kk_2^{-1} \cdot \phi_2^2}{kk_1^{-1} \cdot \phi_1 + kk_2^{-1} \cdot \phi_2} \right| \\ \text{else} \\ \left| \phi_1 \right| \end{cases}$$

$$\phi_{kesk} = 18.22 \text{ mm}$$

$$A_s := \begin{cases} \text{if } \phi_2 > 0 \wedge kk_2 > 0 \\ \left| \frac{kk_1^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_1)^2 + kk_2^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_2)^2}{1} \right| \\ \text{else} \\ \left| \frac{kk_1^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_1)^2}{1} \right| \end{cases}$$

$$A_s = 2576 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset

Nimellisarvo

$$c_{nom} := 35 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{min,dur} := c_{nom} - 5 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 30.00 \text{ mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan raudoituksen betonipeite)

$$c_{true} := c_{nom} + \phi_{pinta} + \phi_{tt}$$

$$c_{true} = 45.00 \text{ mm}$$

Vetorausoitus

Tehokkaan raudoituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{true} + \frac{\phi_{kesk}}{2}$$

$$d_s = 54.11 \text{ mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s$$

$$d = 296 \text{ mm}$$

MRT, taivutuskestävyys

Venymäkuvio

Tehollisen puristuspuunnan korkeus

$$y := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$y = 73.80 \text{ mm}$$

Momenttikestävyys

$$m_{Rd} := (d - 0.5 \cdot y) \cdot (A_s \cdot f_{yd})$$

$$m_{Rd} = 303.27 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{Ed} = 89.50 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Käyttöaste

$$\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} = 29.51\%$$

Laatan leikkauskestävyys

Include << C:\Projektit\Oppari\Mathcad laskelmat\Materiaaliominaisuudet teräsbetoni.mcdx

Kuormat

Mitoittava leikkausvoima

$$V_{Ed} := 53.97 \cdot \frac{kN}{m}$$

Rakenne

Laatan paksuus

$$h := 350 \text{ mm}$$

Betonipeite

(vedetyllä puolella)

$$c_{nom} := 35 \text{ mm}$$

Betoni

$$f_{cd} = 15.87 \frac{N}{mm^2}$$

Raudoitus

(vedetyllä puolella)

$$f_{ctd,v} = 1.29 \frac{N}{mm^2}$$

Vetolujuuden
mitoitussarvo
leikkaus ja lävistys

Työteräksen koko
(vedetyllä puolella)

$$\phi_{tt} := 10 \text{ mm}$$

Toimivien terästen koko, jako,
keskimääräinen halk. ja ala.

$$\phi_1 := 16 \text{ mm}$$

$$\phi_2 := 20 \cdot \text{mm}$$

$$kk_1 := 200 \cdot \text{mm}$$

$$kk_2 := 200 \cdot \text{mm}$$

$$\phi_{kesk} := \begin{cases} \text{if } \phi_2 > 0 \wedge kk_2 > 0 \\ \frac{kk_1^{-1} \cdot \phi_1^2 + kk_2^{-1} \cdot \phi_2^2}{kk_1^{-1} \cdot \phi_1 + kk_2^{-1} \cdot \phi_2} \\ \text{else} \\ \phi_1 \end{cases}$$

$$A_s := \begin{cases} \text{if } \phi_2 > 0 \wedge kk_2 > 0 \\ kk_1^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_1)^2 + kk_2^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_2)^2 \\ \text{else} \\ kk_1^{-1} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_1)^2 \end{cases}$$

$$\phi_{kesk} = 18.2 \text{ mm}$$

$$A_s = 2576 \frac{mm^2}{m}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - \frac{\phi_{kesk}}{2} - \phi_{tt} - c_{nom} = 296 \text{ mm}$$

Kerroin k

$$k := \max\left(1.6 - \frac{d}{m}, 1.0\right) \quad k = 1.30$$

Raudoitussuhde

$$\rho := \frac{A_s}{d} \quad \rho = 0.87 \text{ 1\%}$$

Kestävyys leikkausraudoittamattomana

Leikkauskestävyyden yläraja $V_{u,max} := 0.25 \cdot d \cdot f_{cd}$ $V_{u,max} = 1174 \frac{kN}{m}$

Leikkauskestävyys $V_{c0} := 0.3 \cdot k \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot d \cdot f_{ctd,V}$ $V_{c0} = 214 \frac{kN}{m}$ vs. $V_{Ed} = 54 \frac{kN}{m}$

Käyttöaste leikkaukselle

$\frac{V_{Ed}}{V_{c0}} = 25.16 \%$ --> **Leikkauskestävyys = "OK"**