



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

AJONEUVOLIIKENTEN SILLAN PUUKAIDE TAAJAMANOPEUKSILLE

Rakenneratkaisuiden vertailua

Rasmus Sainmaa

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Rakennustekniikka
Talonrakennus



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Talonrakennus

SAINMAA, RASMUS:

Ajoneuvoliikenteen sillan puukaide taajamanopeuksille
Rakennusratkaisuiden vertailua

Opinnäytetyö 69 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Toukokuu 2016

Tässä opinnäytetyössä selvitetään puun käytön mahdollisuuksia ajoneuvoliikenteen siltojen kaiteissa, koska törmäyskestävyysvaatimukset täyttävää sillan kaidetta ei toistaiseksi ole käytössä. Sillankaiteita on perinteisesti valmistettu teräsbetonista tai teräksestä, ja puuta on lähinnä käytetty esteettiseen ilmeen luomiseen erilaisilla verhoiluilla. Työn aihe liittyi yhteistyöhankkeeseen, jossa tavoitellaan puurakentamisen edistämistä Suomessa.

Tarkoitus oli vertailla puisen ja teräksisen kaiteen rakennusratkaisuja, ja esittää yksi mahdollinen ratkaisu puukaiteeksi, joka soveltuisi taajamanopeuksille. Puukaiteiden käyttö törmäystestaamattomina on Liikenneviraston ohjeiden mukaan mahdollista ainakin silloilla, joiden nopeusrajoitus on enintään 50 km/h. Työssä suunnitellun kaiteen rakennosia verrattiin sillankaiteita koskeviin vaatimuksiin ja käytössä olevien kaiteiden kapasiteetteihin. Työhön myös kerättiin tietoa olemassa olevista kaiderakenteista sekä siltojen kaiteita koskevista määräyksistä, testivaatimuksista ja termeistä.

Kaide-ehdotuksen suunnittelu toteutettiin Eurokoodin ja Liikenneviraston ohjeiden mukaan. Kaiteen kokonaistoimintaa ei tässä työssä mallinnettu, vaan alustava suunnittelu tehtiin erillisille rakennosille valmiita kapasiteettiarvoja hyödyntäen. Rakenteista myös laadittiin periaatteelliset piirustukset. Puukaiteen alustava mitoitus sisälsi kapasiteettien laskentaa liimapuisille kaidepylväille ja törmäysjohteille sekä liitosten teräsosille. Myös kaidepylväsliitoksen törmäysvaimentimien mitoituksen periaatteita käsiteltiin.

Puu materiaalina vaikuttaisi soveltuu kaiderakenteisiin taajamanopeuksille, mutta sen käyttö on jäänyt todella vähälle ennakkoluulojen sekä kalliiden testausjärjestelyiden takia. Puulla on käyttömahdollisuuksia kovempiinkin nopeuksiin törmäystä kestävässä sillankaiteena, mutta kattavaa jatkotutkimusta aiheesta tarvitaan. Suurimmat haasteet puulle ovat terästä huonompi muodonmuutoskyky, hauraat murtotavat sekä hankalat liitokset.

Asiasanat: sillankaide, kaiteet, silta, alustava, suunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Construction Engineering
Structural Engineering

SAINMAA, RASMUS:
Timber Vehicle Parapet for Bridges
Comparison of Structures

Bachelor's thesis 69 pages, appendices 11 pages
May 2016

The possibility of using timber as the structural material for vehicle parapets on bridges was examined in this thesis because there are no timber bridge parapets currently in use with safe impact performance. Vehicle parapets have traditionally been built out of steel reinforced concrete or steel members. Timber has mainly contributed to the aesthetics of vehicle parapets as a separate surface material. The subject of this thesis was part of a collaboration project which aims to promote the use of timber as a construction material in Finland.

The goal of this thesis was to compare steel and timber parapets and to produce one possible preliminary parapet design for vehicle speeds in an urban environment. According to the Finnish Transport Agency it is possible to use untested timber vehicle parapets on bridges with a speed limit up to 50 km/h. The structural parapet members in this thesis were compared to requirements associated with vehicle bridge parapets and to structural members of existing steel parapets. Information about existing vehicle parapets, specifications related to bridge parapets, test requirements and bridge parapet terms were also gathered in this work.

The illustrative parapet design was made according to the Eurocode standards and Finnish Transport Agency instructions. Operations of the entire parapet structure were not simulated in this work but instead the designs were made utilizing set capacity values for separate structural members of the parapet. Simple schematics of the illustrated designs were produced in this work. Preliminary designing included calculating capacities for glue laminated timber posts and rails as well as for steel parts in the parapets joints. This work also featured some principles of designing an impact attenuated post-to-bridge joint.

Timber appears as a valid material to be used in vehicle parapets on roads with urban roadway speed limits but its use has been poor due to preconceptions and the expenses of the required test setups. Timber has potential to be used also as a vehicle parapet for higher speed limit bridges but more extensive research is required. The greatest weaknesses of timber are its lesser transformability compared to steel, brittle failures and challenging joint designs.

Key words: timber, vehicle, parapet, bridge, design

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Työn tarkoitus ja taustat.....	7
1.2	Puusiltojen käyttö ja rakentaminen.....	7
1.3	Puukaiteet.....	9
2	NYKYISET AJONEUVOLIIKENTEN KAITEET PUUSILLOILLA.....	10
2.1	Sillankaiteen määritelmä.....	10
2.2	Kaiteiden osat	10
2.3	Kaiderakenteita	12
3	KAITEITA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET	18
3.1	Vaadittuja ominaisuuksia.....	19
3.2	Yleisiä vaatimuksia.....	19
3.2.1	Mekaaniset ominaisuudet.....	21
3.2.2	Toiminnalliset ominaisuudet.....	22
3.3	Törmäystestit	25
4	PUUKAITEEN ALUSTAVA SUUNNITTELU	30
4.1	Kuormat	32
4.2	Laskentalujuudet.....	34
4.3	Kaidepylväs	34
4.4	Siltajohde	37
4.5	Tyypihyväksytyjen kaiteiden teräksisiä rakenneosia.....	38
4.6	Rakenneosien kapasiteetteja	40
5	LIITOKSET.....	44
6	POHDINTA.....	52
6.1	Puun plastinen käyttäytyminen.....	52
6.2	Puukaiteiden toiminta	54
6.3	Kehitysehdotuksia.....	55
	LÄHTEET.....	57
	LIITTEET	59
	Liite 1. Rakenneosien ja liitosten laskenta 1 (9).....	59
	Liite 2. Plascore CrushLite 1 (2).....	68

LYHENTEET JA TERMIT

G	Liukumoduuli
E	Kimmokerroin
I	Jäyhyysmomentti
W_{el}	Kimmainen taivutusvastus
W_{pl}	Plastinen taivutusvastus
$M_{el,Rd}$	Kimmainen momenttikapasiteetti
$M_{pl,Rd}$	Plastinen momenttikapasiteetti
V_{Rd}	Leikkauskapasiteetti
$N_{t,Rd}$	Vetokapasiteetti
$f_{c,0,k}$	Puun puristuslujuuden ominaisarvo syysuunnassa
$f_{c,0,d}$	Puun puristuslujuuden laskenta-arvo syysuunnassa
$f_{c,90,k}$	Puun puristuslujuuden ominaisarvo syitä kohtisuorassa suunnassa
$f_{t,0,k}$	Puun vetolujuuden ominaisarvo syysuunnassa
$f_{t,0,d}$	Puun vetolujuuden laskenta-arvo syysuunnassa
$f_{v,k}$	Puun leikkauslujuuden ominaisarvo
$f_{v,d}$	Puun leikkauslujuuden laskenta-arvo

$f_{m,k}$	Puun taivutuslujuuden ominaisarvo
$f_{m,d}$	Puun taivutuslujuuden laskenta-arvo
F	Voima, yksikkö newton
f	Taipuma
Ortotrooppisuus	Materiaalilla on eri suuntiin eri lujuusarvoja
Plastisuus	Aineen ominaisuus, jossa voiman vaikutuksesta syntyy palautumattomia muodonmuutoksia
Suisteparru	Puisen sillankannen osa, joka suojaa kannen pinnassa olevia kiinnityspultteja
Hunajakennorakenne	Rakenne, joka muodostuu vierekkäisistä kuusikulmioista eli heksagoneista

1 JOHDANTO

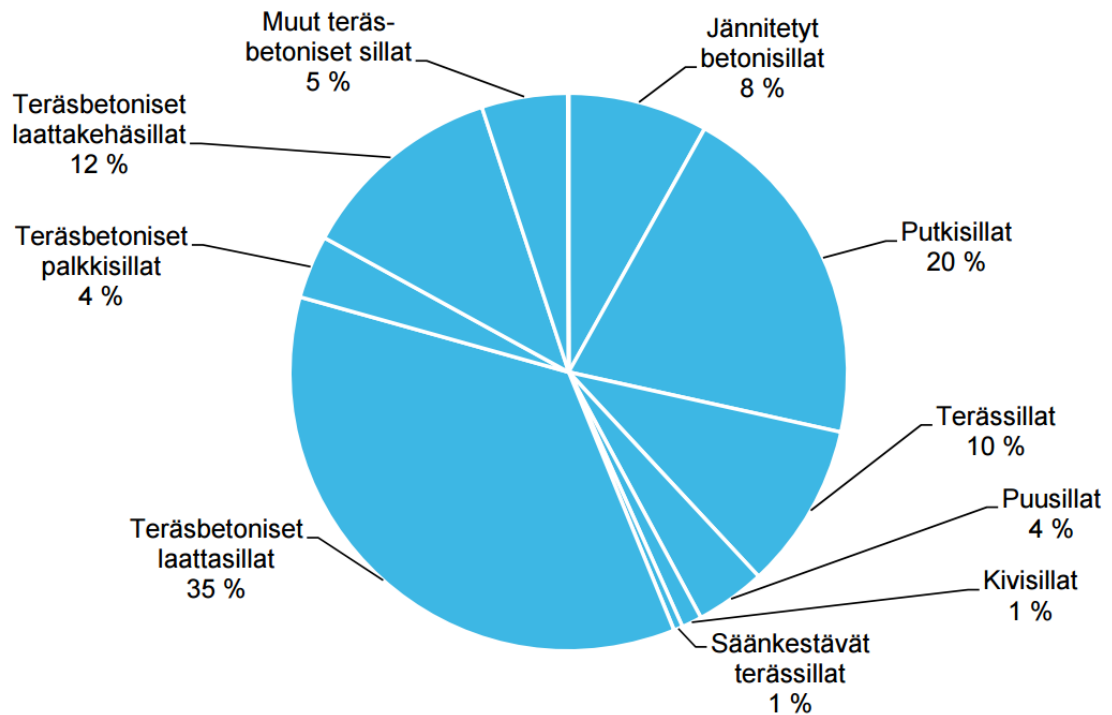
1.1 Työn tarkoitus ja taustat

Tämän työn tarkoitus on esitellä ajoneuvoliikenteen siltojen kaiteiden toiminnallisia ja mekaanisia vaatimuksia sekä näiden vaatimusten pohjalta alustavasti suunnitella yksi esimerkkikaiderakenne ja karkeasti laskea sen rakenneosat sekä liitokset periaatetasolla. Pylväs- ja johdemateriaalina on liimapuu. Esitetyt piirustukset ovat periaatteellisia mahdollisista rakenteista ja laskenta pohjautuu Eurokoodin mukaisiin mitoitusohjeisiin standardeista SFS-EN 1993-1-1 ja SFS-EN 1995-1-1 sekä Liikenneviraston antamiin ohjeisiin sillankaiteiden suunnittelusta. Kaiteen kapasiteettia verrataan ajoneuvoliikenteen silloilla käytettyjen tyyppihyväksytyjen kaiderakenteiden rakenneosien ja Liikenneviraston ohjeissa annettuihin kapasiteetteihin.

Kysyntä puisille sillan varusteluosille mahdollisesti kasvaa tulevaisuudessa samalla, kun puusiltojen rakentaminen yleistyy. Tällä hetkellä ei ole yhtäkään täysin puista kaiderakennetta markkinoilla, tai käytössä, millään sillalla Euroopassa. Joissain ajoneuvosilloissa on jo suunniteltu ainakin osittain puisia kaideratkaisuja, kuten Tampereen Tervasillalla. Puusillan rakentaminen on Suomessa toistaiseksi lähinnä ekologinen ja arkkitehtoninen kannanotto, vaikka liimapuupalkkisillasta ja puulaattasillasta on jo Liikenneviraston hyväksymät tyyppi- ja piirustukset olemassa ja puusilloilla on myös kustannus sekä työmaateknisiä hyötyjä. Koska kustannukset eivät myöskään ole aina ratkaisevin tekijä siltahankkeessa, vaan se lähinnä ohjaa suunnitteluprosessin suuntaa, on puukaiteella oma lokero markkinoilla teräskaitteen mahdollisesti huokeammasta hinnasta huolimatta.

1.2 Puusiltojen käyttö ja rakentaminen

Nykyisellään Suomessa on puusilloja noin 900 kappaletta eli 4% kaikista rakennetuista silloista. Teräsbetoni on pitkään ollut ylivoimaisesti yleisin sillan rakennusmateriaali. 2010-2014 rakennetuista 584:stä sillasta noin 3% oli puurakenteisia. Ruotsi ja Norja ovat toistaiseksi puusiltarakentamisen edelläkävijöitä; Ruotsin vuotuinen osuus sillan uudisrakennus kohteista on noin 20% ja Norjan 10% kaikista rakennettavista silloista. Kuvassa 1 seuraavalla sivulla on esitetty diagrammissa käytettyjen siltamateriaalien suhteita toisiinsa Suomen siltojen rakennuskannasta. (Puuinfo: Puusillat).



KUVA 1. Liikenneviraston sillat 1.1.2014

Puusiltojen rakentamisessa on paljon etuja verrattuna perinteisiin teräs- ja betonisiltoihin. Puu materiaalina on kevyttä mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon hankaliin perustusolosuhteisiin. Puulla on pieni hiilijalanjälki sillä se sitoo itseensä koko eliniäkseen suuren määrän hiilidioksidia. Puuta on Suomessa hyvin paljon ja elinkaari vaikutuksia arvioi-
 dessa, se on joissain tapauksissa parempi kuin betoni- ja terässillat. Puusiltojen esivalmis-
 tusaste on suuri eikä muottitöitä tarvita, mikä vähentää työmaalla käytettyä aikaa merkittävästi ja laskee sen kokonaisen kustannuksia kilpailukykyisiksi suhteessa muihin siltoihin. (Laura Heinänen 2014.)

Valtaosa puusiltarakentamisen haasteista muodostuu rakennuttajien ennakkoluuloista ja betonisiltojen vahvasta jalansijasta siltarakentamisen kulttuurissa sekä puun haastavista materiaaliominaisuuksista suunnittelun kannalta, joita ovat muun muassa ortotrooppisuus sekä suurehko muodonmuutokset lämmöstä ja kosteudesta. Puusillat usein lukeutuvat pois jo hankkeiden alkuvaiheissa, koska osaamista puuttuu kaikilta hankkeen osapuolilta ja urakoitsija osaa varmemmin arvioida esimerkiksi betonisillan kustannukset. Säältä suojaaminen on myös haastavaa Suomen ympäristöolosuhteissa, missä on kova kosteus- ja kloridirasitus sekä suuria lämpötilavaihteluja. Puun kosteussuojana käytetty suolapainekyllästykseen ja kreosootin käyttö uhkaa loppua EU säädöksiä takia vuonna 2018, mitkä

ovat tällä hetkellä ainoat realistiset ja varmat tavat suojata puuta kosteudelta. (Laura Heinänen 2014.)

1.3 Puukaiteet

Liikenneviraston ohje sallii tyyppihyväksymättömien kaiteiden käytön ajoneuvoliikenteen silloilla tilaajan pyynnöstä, jos se täyttää ohjeen Siltojen kaiteet 2012 kohdan 2.12 vaatimukset. Tyyppihyväksymätön kaide on käytännössä kaide, jota ei ole testattu SFS-EN 1317 -standardin mukaisin törmäyskokein eikä sille ole voitu myöntää CE-merkintää tämän takia.

Tyyppihyväksytyjen puukaiteiden puuttumisen syyt ovat lähinnä suunnittelun ja testaamisen kustannukset. Teräksisiä kaidarakenteita simuloidaan useita kertoja epälineaarisilla elementtimenetelmillä, joissa niihin törmäytetään ajoneuvoja. Näiden simulaatioiden perusteella saadaan tuloksia, joiden perusteella voidaan tehdä päätös kaiderakenteen dynaamisista törmäystesteistä. Puurakenteiden vastaava simulointi on hyvin haastavaa materiaalin ortotrooppisuuden takia ja näin ollen yhtä selkeitä tuloksia kuin teräksellä ei voida saada. SFS-EN 1317 standardin mukaisten törmäystestien hinta voi nousta satoihin tuhansiin euroihin riippuen testien lukumäärästä ja halutusta törmäysluokasta sekä kuvaus- ja anturilaitteiden, törmättävien ajoneuvojen ja testirakenteiden kustannuksista.

Puun käyttöä oletettavasti vältellään myös sen arvaamattoman murtokäyttäytymisen ja hauraan vetomurron takia. Teräs taas on hyvin tasalaatuinen ja sitkeä materiaali, jonka plastisoitunutta ja epälineaarista käyttäytymistäkin voidaan varmemmin ennustaa.

2 NYKYISET AJONEUVOLIIKENTEEN KAITEET PUUSILLOILLA

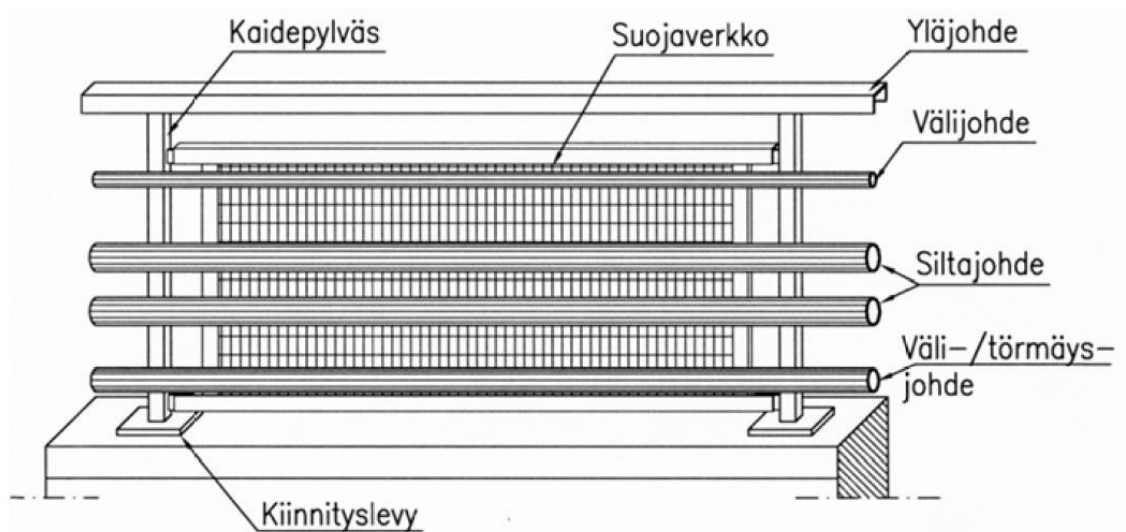
Valtaosa tämän hetkisistä kaiteista on joko teräs- tai teräsbetonirakenteisia, mutta poikkeuksia löytyy. Euroopan unionin markkina-alueelta ei löydy CE-merkittyä ajoneuvoliikenteen sillan puurakenteista kaidetta.

2.1 Sillankaiteen määritelmä

Sillankaide on pystysuora turvarakenne, joka estää ajoneuvoa – tai jalankulkijaa – putoamasta sillalta onnettomuustilanteessa. Optimaalisesti toimiessaan sillankaide törmäystilanteessa ohjaa ajoneuvon takaisin sillalle ja rajoittaa sen kallistumista liikaa kaiteen yli suojaten sillankannen mahdollisia yläpuolisia rakenteita ja estäen sillalta suistumisen. Maantienopeuksille ajoneuvoliikenteen sillankaiteet pitää tyyppihyväksyttää SFS-EN 1317 -standardin mukaisin testein. Tieto testeistä ja suoritustasosta pitää sisällyttää Euroopan unionin harmonisoidun tuotestandardin CE-merkintään. Sillankaide myös estää auraslumen tippumisen alla olevalle väylälle ja toisinaan vähentää ajoneuvoista syntyvää melua.

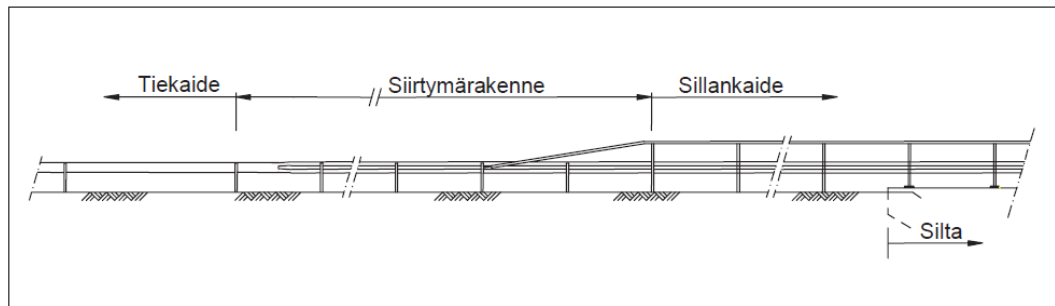
2.2 Kaiteiden osat

Kaiteiden osia ovat kaidepylväs, johteet, säleet, suojaverkot sekä erinäköiset kiinnikkeet. Kaidepylväs on kaiteen pystysuora osa, joka kiinnittää johteet sillanrakenteisiin. Johteet ovat kaiteiden vaakasuoria osia, joiden määrä vaihtelee siltatyypistä riippuen. Kuvassa 2 on esitetty kaideosien nimiä.



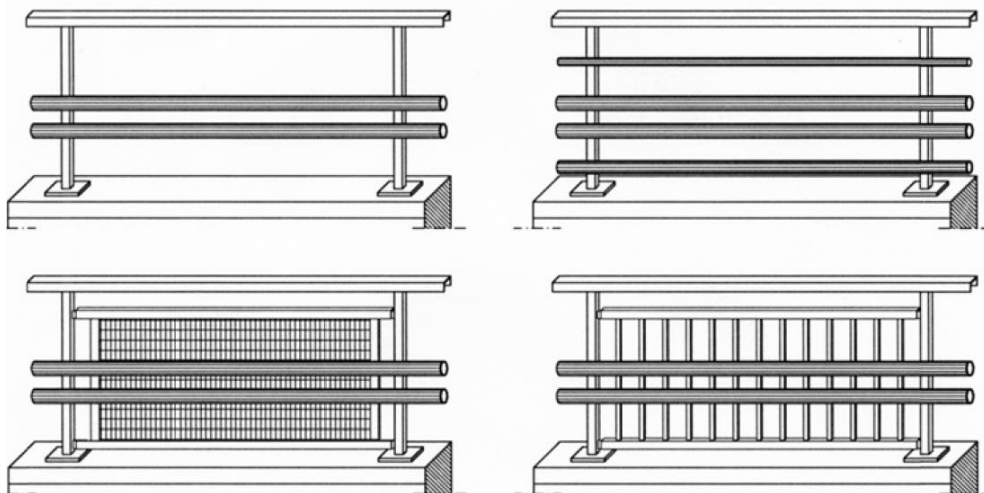
KUVA 2. Sillankaiteen rakenneosien nimiä. (Siltujen kaiteet 2012).

Sillankaiteen siirtymärakennetta käytetään sen liittyessä tiekaiteeseen. Kuvassa 3 esitetyn siirtymärakenteen tarkoitus on tasata sillankaiteen ja tiekaiteen jäykkyys- ja korkeuseroja. Sillankaiteen yläjohde viidostä alas tiekaiteeseen. (Siltojen kaiteet 2012.)



KUVA 3. Siirtymä sillankaiteesta tiekaiteeseen (Siltojen kaiteet 2012).

Kaiderakenteita voidaan varustella vaaka- tai pystysäleillä, suojaverkolla, melusteilla tai lisäjohteilla. Ajoneuvoliikenteen silloilla, joilla kevyt liikenne on sallittu, käytetään tiheää sillankaidetta kevyen liikenteen väylän sisäreunalla ja ulkoreunalla esimerkiksi sälekaidetta tai suojaverkkoa. Silloilla, joissa on kevyen liikenteen väylä, on ulomman kaitteen oltava vaikeasti kiivettävä. Alittava väylä suojataan auraslumelta lähes aina suojaverkolla ulommissa sillankaiteissa, sälekaide ei riitä. Sälekaidetta ei voi myöskään käyttää tiesilloissa, joissa vaaditaan näkyvyyttä sivulle kuten eritasoliittymissä, joissa vaaditaan näkyvyyttä sillalta. (Siltojen kaiteet 2012.) Kuvassa 4 alla on esitetty erityyppisiä kaiderakenteita.

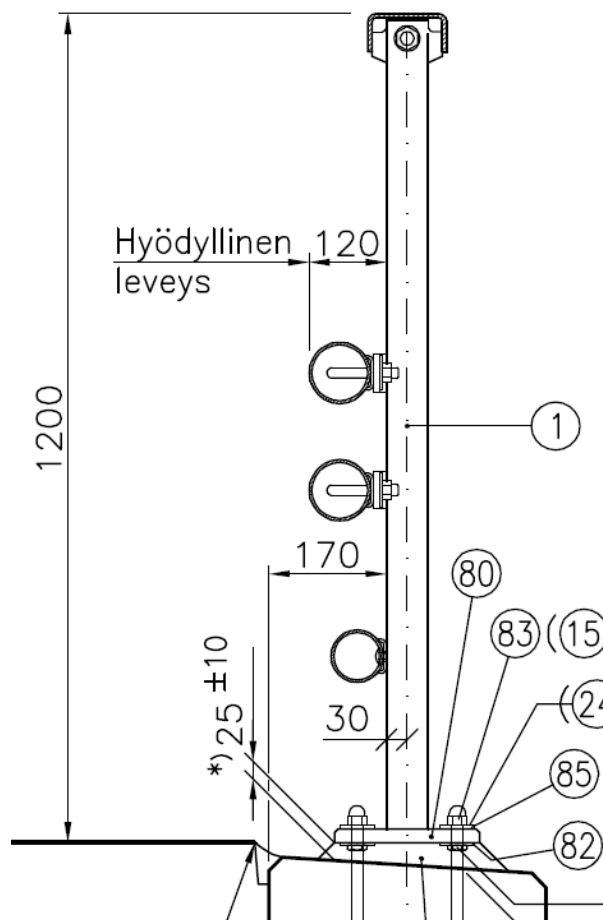


KUVA 4. Harva kaide (yllä vas.), tiheä kaide (yllä oik.), verkkokaide (alla vas.) ja sälekaide (alla oik.) (Siltojen kaiteet 2012).

Sillankaiteiden kiinnitykset tapahtuvat usein uppokiinnityksellä – eli upottamalla kaidepylväs tartuntojen kanssa betonivaluun – tai pulttikiinnityksellä. Pulttikiinnitykseen pultit ovat valettuna sillan reunapalkkiin joihin kiinnitetään kaidepylväs sen kiinnityslevystä. Kiinnityslevyn alle tulee jälkivalu levyn alapintaan asti. Puukantisilla silloilla kaidepylväät pultataan kiinni kansiin. Tyypillinen tapa on pultata lattateräkset tai L-profiilit kiinni kanteen, joihin taas pultataan kiinni kaidepylväät. Yleisin menetelmä kaikilla siltatyypeillä Suomessa on pulttikiinnitys.

2.3 Kaidarakenteita

Yksi yleisimmistä ajoneuvoliikenteen sillankaiteista on teräksinen kuumasinkitty H2 -törmäysluokkaan tyypihyväksytty kaide, joka on esitetty kuvassa 5, kaidepylväs on 50x60 suorakulmainen terästanko ja siltajohteet P88,9x4 pyöreätä teräsputkea.



KUVA 5. Tyypihyväksytty Tieh2 -teräskaide kahdella putkijohteella ja alemmalla siltajohteella matalalle reunapalkille (Liikennevirasto).

Tertu Equipments valmistaa teräksistä H2-luokkaan hyväksyttyä törmäyskestävää sillankaideetta T40 BP, jonka materiaaleina on käytetty sekä terästä että puuta. Kuvasta 6 alapuolella näkee, että tässä rakenteessa teräs on rakenteellinen materiaali ja puuta on käytetty vain kaiteen verhoilussa, vaikka sekin oletettavasti törmäystilanteessa vaimentaa iskuja. Tämä on toistaiseksi ainoa Euroopassa tyyppihyväksytty ajoneuvoliikenteen sillankaide, jolla saa täysin puisen ilmeen sillalle. Pylvään teräsprofiili on HEA 100. (Tertu Equipments, T40 Bridge Parapet).

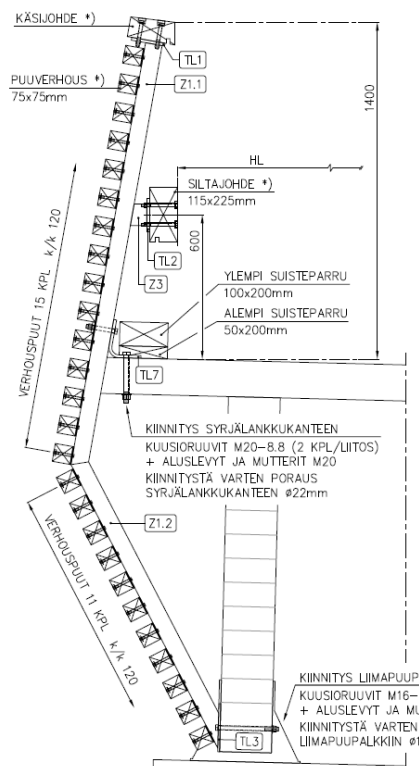


KUVA 6. T40 BP –sillankaide (Tertu Equipments, T40 Bridge Parapet).

Tampereen Vuorekseen on rakennettu Tampereen ensimmäinen puurakenteinen ajoneuvoliikenteen silta. Tervassillaksi ristityn sillankaiteena on käytetty muunnelmaa R15-DK 1-1 – tyyppiirustuksen mukaisesta teräskaitteesta. Alkuperäiset teräksiset johteet on muunnettu puuksi, kaidepylväs on kiinnitetty siltaan kahdesta eri kohdasta pulttikiinnityksin; sillan kannesta sekä liimapuupalkki pääkannattajasta. Kaidepylvään teräsprofiili 80x100x5 on taivutettu ja vuorattu puisilla vaakasäleillä. Pulttikiinnitykset on suojattu ylemmällä ja alemmalla suisteparrulla. Kuvissa 7 ja 8 on kuvattu Tervassillan kaidera-kennettä.



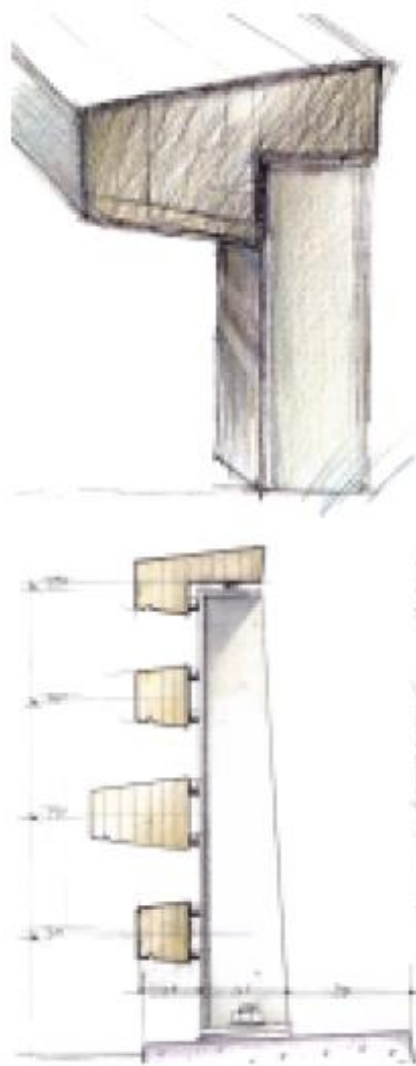
KUVA 7. Tampereen Vuoreksen Tervassillan kaide keväällä 2015 (Rasmus Sainmaa 2015).



KUVA 8. Tervassillan kaiteen rakenne ja osat (Suunnittelukide).

Nordic Wood – ohjelman puitteissa on tutkittu täysin puurakenteisen kaiteen toimintaa. Ohjelma aloitettiin vuonna 1993 ja loppui vuonna 2001, mukana oli viisi Pohjoismaiden

valtiota; Suomi, Islanti, Norja, Tanska ja Ruotsi. (Nordic Innovation 1:2002.) Kuvassa 9 on esitetty ohjelmassa suunniteltu kaideratkaisu, joka jäi luonnosvaiheeseen.



KUVA 9. Nordic Wood -projektin puukaiteen periaatekuva (Nordic Innovation 1:2002).

Yritysten ja yliopistojen yhteistyössä Hollannissa on kehitetty ensimmäinen täysin puinen H2 -törmäysluokan tiekaide. Kaide koostuu jäykästä maahan upotetusta pylväsosasta, pylvään tiejohteesta ja energiaa hävittävää ”tulppaanijohteesta”. Kaidepylväs on upotettu maahan noin metrin syvyyteen. Puulajeina on käytetty Ranskan koivua ja angelimvermelhoa Brasiliasta, koska ne ovat tunnetusti kestäviä. Kaiteen oletettu elinikä on noin 20-24 vuotta. Seuraavalla sivulla kuvissa 10 ja 11 on puukaiteita asennettuna. (van de Kuilen, J. W. G.)



KUVA 10. Ensimmäinen H2 –törmäysluokan puinen tiekaide (van de Kuilen, J. W. G).

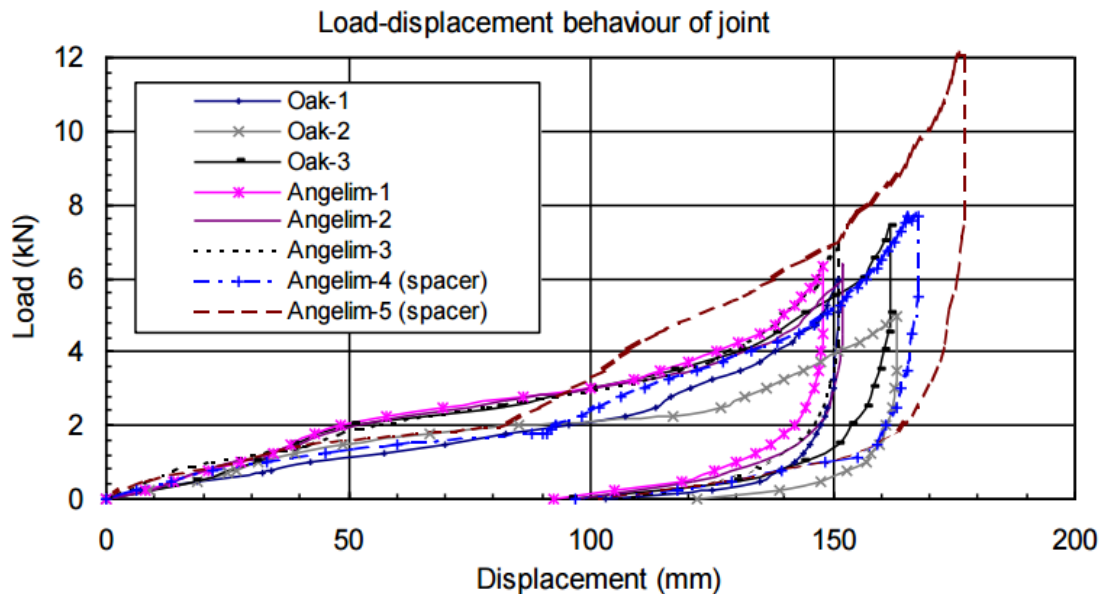


KUVA 11. Puisen tiekaiteen prototyyppi testauspaikalla (van de Kuilen, J. W. G).

Puisen tiekaiteen energiaa hävittävä osa on valmistettu kuumalla höyryllä taivutetusta puuluskoista. Osat testattiin laboratoriossa toiminnan varmistamiseksi, koska taipumaa ei voitu tietää. Liuskat on liitetty pylväisiin kahdella pulteilla ja korotusholkeilla, jotka ovat kaiteen ja liuskan välissä. (van de Kuilen, J. W. G.) Kuvassa 12 alla on kuvia testi-tilanteesta ja kuvassa 13 on testien kuorma-muodonmuutos –kuvaaja. Kuvasta 13 näkee, että höyrytaivutetulla puulla on hyvä muodonmuutoskapasiteetti, johon saa häviämään törmäysenergiaa. Tämä on tärkeää pienille henkilöautoille, ettei törmäys iske matkustajiin liian kovaa.



KUVA 12. Höyrytaivutettujen puuluskojen testausta



KUVA 13. Höyrytaivutettujen puuluskojen kuorma-muodonmuutos –kuvaaja

Puista tiekaidetta on käytössä Hollannissa ja sen kehitystyö jatkuu edelleen. Alkuperäisten testien jälkeen on päästy parempaan törmäyksen riskitasoluokkaan ja kaidepylväiden jakoa on harvennettu. Kolmas dynaaminen testierä on suunnitteilla. (van de Kuilen, J. W. G.)

3 KAITEITA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET

Ajoneuvoliikenteen ja kevyen liikenteen sillankaiteita koskevia määräyksiä on muun muassa seuraavissa voimassa olevissa asiakirjoissa:

- SFS-EN 1317 Road Restraint Systems
- SFS-EN 1991-1-7 Rakenteiden kuormat, onnettomuuskuormat
- SFS-EN 1991-2 Rakenteiden kuormat, siltojen liikennekuormat
- Siltojen kaiteet, Liikenneviraston ohjeita 25/2012
- Eurokoodin soveltamisohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1

SFS-EN standardit käsittelevät lähinnä siltarakenteisiin kohdistuvia kuormia, kevyen liikenteen sillankaiteiden kuormia ja muita onnettomuuskuormia kuten sillan alusrakenteisiin törmääviä ajoneuvoja. Ajoneuvoliikenteen törmäyskestävien sillankaiteiden mitoituskkuormia ei käytännössä ole, koska kaiteen käyttökelpoisuus riippuu sen toiminnallisuudesta minkä voi osoittaa vain SFS-EN 1317 standardin mukaisilla tyyppihyväksytyillä testimenetelmillä. Tyyppihyväksytyjä kaiteita on mahdollista muunnella, kunhan muunnokset täyttävät vaaditut lujuudelliset ominaisuudet. Muunnettujen kaiteiden suunnitteluun ottaa kantaa Liikenneviraston ohje 25/2012 Siltojen kaiteet.

Puukantisilla silloilla voidaan käyttää Liikenneviraston ohjeen mukaan tyyppiin R15/DK1-11 kaidarakennetta tai muuta tyyppihyväksymätöntä kaidarakennetta, jos ajoneuvoja kulkee keskimääräisesti vuorokaudessa alle 100 ja nopeus on enintään 80 km/h tai vuorokauden liikenteen ajoneuvoja on yli 100 ja nopeusrajoitus on enintään 50 km/h sekä Siltojen kaiteet 2012 kohdan 2.12 vaatimukset täyttyvät, jotka ovat esitettyinä alla olevassa taulukossa 1. Tämän rakenteen kiinnityspultit pitää suojata suisteparrulla, joka estää törmäystilanteessa kiinnityspulttien vaurioitumisen. Tilajalla on myös oikeus päättää tyyppihyväksymättömän kaiteen käytöstä, jos nopeus on alle 50 km/h. (Siltojen kaiteet 2012.)

Liikenneviraston ohjeessa Siltojen kaiteet 2012 ei suoraan mainita, että kaidarakenteiden materiaali ei voisi olla puuta, mutta vaatimusten yhteydessä kirjoitetaan jatkuvasti pelkästään teräksestä ja betonisille rakenteille löytyy omat vaatimuksensa. Liikenneviraston taitorakenneyksikön Tomi Harjun (2016) mukaan puuta voidaan käyttää kaidemateriaalina, kunhan törmäysluokka H2 ja aurasluokka 4 täyttyvät sekä minimikorkeus on 1,2 m tai alle 50 km/h nopeuksilla Siltojen kaiteet 2012 kohdan 2.12 vaatimukset täyttyvät.

3.1 Vaadittuja ominaisuuksia

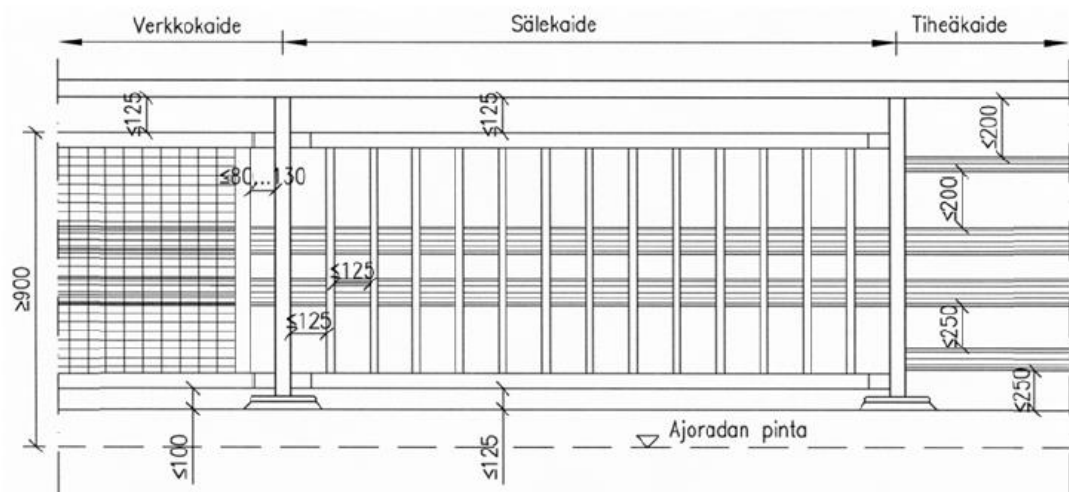
Ajoneuvoliikenteen kaiteilta vaaditaan riittävää taivutusjäykkyyttä, leikkaus-, taivutus- ja vetokestävyyttä sekä muodonmuutoskykyä hävittämään törmäyksen energiaa.

Toiminnallisuuden puolesta vaaditaan:

- hallittuja taipumia
- riittävää läpinäkyvyyttä
- turvallista toimintaa onnettomuustilanteessa
- suojaa alla olevalle tieväylälle tai rakenteille.

3.2 Yleisiä vaatimuksia

Siltojen kaiteiden läpi pitää nähdä. Läpinäkyvyys varmistetaan muun muassa teoreettisella silmäkoolla, jonka on oltava $\leq 1500 \text{ mm}^2$. Eri kaidetyypeillä on usein käytössä säleiden ja johteiden lisäksi suojaverkkoja estämässä aurattavaa lunta tippumasta kannelta, joka voi yhdessä säleiden ja johteiden kanssa rajoittaa näkyvyyttä merkittävästi. Säle-, verkko- ja tiheäkaiteiden osien sijoitteluilla on myös raja-arvoja, joita on esitetty kuvassa 14. (Siltojen kaiteet 2012.)



KUVA 14. Erilaisia siltojen kaiteiden rakenteita ja mittavaatimuksia (Siltojen kaiteet 2012)

Kaiteissa käytetyt terässäleet pitää mitoittaa 1,5 kN pistemäiselle liikkuvalla vaakasuoralle hyötykuormalle, jonka voi olettaa jakaantuvan kahdelle säleelle. Jos käytössä on

joustavampi materiaali kuin teräs, on osoitettava, ettei 130 mm halkaisijaltaan oleva kokoon painumaton pallomainen esine tunkeudu säleiden välistä 0,5 kN voimalla. Verkkokaiteet on mitoitettava 3,75 kN/m² suuruiselle auraslumikuormalle. (Siltojen kaiteet 2012).

Sillankaiteet luokitellaan aerauskestävyysluokkiin 1, 2, 3 ja 4. Näistä luokka 4 on vaativin. Luokittelu tapahtuu käytännössä laskemalla muunneltu kaidepaksuus ja taivutusvasutus sekä tarkastellaan pylvään ja kaiteen liitoksen kestävyyttä pulttien leikkauskapasiteeteilla. Auran liukuvuus kaidetta pitkin pitää olla varmistettu. Aerauskestävyys voidaan osoittaa myös testaamalla tai vertaamalla saman tieosuuden vertailukaiteisiin. (SFS-EN 1317-5.)

Tilaja voi asettaa sillalle läpinäkyvyys vaatimuksia esimerkiksi eritasoliittymissä, joista on tärkeää nähdä sillalla kulkeva liikenne rampilta (Siltojen kaiteet 2012). Taulukossa 1 on esitetty raja-arvoja joita voi verrata yleisellä läpinäkyvyyden kaavalla saatuihin tuloksiin. Yleinen läpinäkyvyyden kaava on esitetty Liikenneviraston ohjeessa Siltojen kaiteet 2012.

TAULUKKO 1. Yleisen läpinäkyvyyden kaavan raja-arvoja (Siltojen kaiteet 2012)

Projektio- kulma α (°)	Läpinäkyvyys IV (%)	
	Tyydyttävä	Hyvä
90	≥ 45	≥ 60
30	≥ 40	≥ 55
10	≥ 25	≥ 40

Yleisiä vaatimuksia kaiteelle ovat lisäksi seuraavat:

- Sillankaiteen pituus on joko sillan kokonaispituus -1,2 m tai jännemittojen summa +8 m
- Kokonaiskorkeus on vähintään 1,2 m
- Kokoonpano on oltava yksinkertainen, jotta huolto ja korjaukset ovat mahdollisia
- Sillankaiteiden osia ei saa olla mahdollista irrottaa ilman työkaluja
- Yli kiipeäminen on oltava vaikeaa, jos sillalla on sallittu kevyt liikenne
- Varustellaan auraslumen putoamisen estävillä rakenteilla alittavan tien kohdalta
- Tulee kuulua aerauskestävyysluokkaan 4

- Ei saa olla leikkaavia tai teräviä reunoja, joihin kevyen liikenteen kulkivat voivat loukkaantua
- Riskitaso luokka on vähintään B, mutta betonikaiteilla sallitaan myös luokka C
- Sähköistetyn radan yläpuolella käytetään kosketussuojaseinämää, -lippaa tai näiden yhdistelmää. (Siltojen kaiteet 2012.)

3.2.1 Mekaaniset ominaisuudet

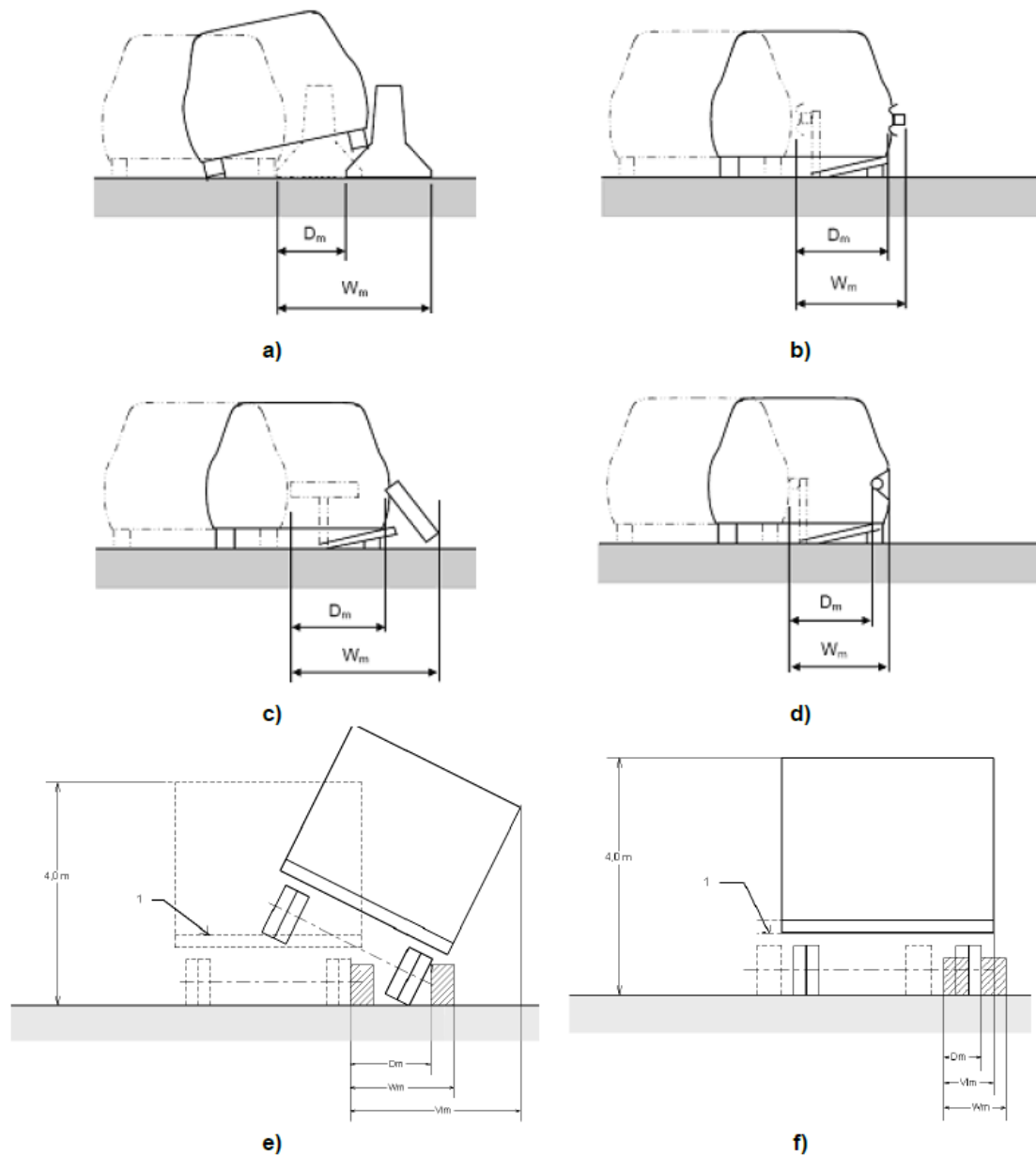
TAULUKKO 2. Siltojen kaiteet 2012 kohdan 2.12 rakenneosien vaatimukset

Rakenneosa	Vaatus
Kaidepylvään jäykkyys	$EI \geq 90 \text{ kNm}^2$
Kaidepylvään ja sen kiinnityksen momenttikapasiteetti molempiin suuntiin	$M \geq 4,3 \text{ kNm}$
Kaidepylvään ja sen kiinnityksen leikkausvoimakapasiteetti molempiin suuntiin	$V \geq 32 \text{ kN}$
Kaikkien johteiden ja niiden liitosten sekä jatkosten vetokestävyys	$F \geq 80 \text{ kN}$

Sillankaiteiden suurin sallittu pylväsväli on 2 metriä, sitä pienemmällä jaolla olevien pylväiden jäykkyysvaatimuksia voidaan pienentää suhteessa pylväsvälin muutokseen. Rakenteiden mitoituksessa käytetään eurokoodin mukaisia menetelmiä. Taulukossa 2 esitettävät vaatimukset ovat rakenneosien kapasiteettien ominaisarvoja eli suunnittelussa käytettäviä varmuuskertoimia ei ole lisätty näihin vaatimuksiin. Yllä olevien vaatimusten lisäksi johteiden pitää olla jatkuvia ja kestää vetoa eikä niistä saa irrota osia, jotka voivat törmäyksessä lävistää ajoneuvon sekä teräsosien teräslaatu on oltava vähintään luokkaa S235 tai vahvempi. Turvallisuuden kannalta on suositeltavaa tuoda yläjohde viistosti siltajohteen tasolle, koko sillankaiteen päättäminen voidaan tehdä ilman siirtymärakennetta. (Siltojen kaiteet 2012.)

3.2.2 Toiminnalliset ominaisuudet

Sillankaiteiden muodonmuutoksia törmäystilanteessa kuvattaessa käytetään kolmea termiä: toimintaleveys (W_m), sivusiirtymä (D_m) ja ajoneuvon ulottuma (V_{Im}). Toimintaleveys on suurin sivuttainen matka mitattuna kaiteen ehjältä osasta lähimpänä liikenteen puolta kaiteen törmäyksessä uloimmaksi siirtynyt osaan. Sivusiirtymä on kaiteen liikenteen puolen pinnan sivuttainen siirtymä. Ajoneuvon ulottuma on matka, jonka korkean ajoneuvon kallistunut kohta on eniten siirtynyt sivuttain kaiteen ylitse, ulottuma mitataan usein valokuvista ja videotallenteista. Alapuolella oleva kuva 15 tarkentaa näitä määritelmiä. (SFS-EN 1317-2.)



KUVA 15. Ajoneuvojen toimintaleveys, sivusiirtymä ja ajoneuvon ulottuma (SFS-EN 1317-2).

Törmäyksen riskitasoon (Impact Severity Level) vaikuttaa kiihtyvyyssindeksi (Acceleration Severity Index, ASI) ja teoreettinen pään iskunopeus (Theoretical Head Impact Velocity, THIV). Tasoja on A, B ja C, joista A on turvallisin taso. Sillankaiteilta vaaditaan vähintään luokan B riskitaso. Riskitason vaatimukset on esitetty taulukossa 2 alapuolella.

TAULUKKO 3. Impact Severity Level (SFS-EN 1317-2).

Impact severity level	Index values		
A	ASI ≤ 1,0	and	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI ≤ 1,4		
C	ASI ≤ 1,9		

Kiihtyvyyssindeksi on ajan skalaari funktio, jolla ei ole ulottuvuutta ja se voi saada vain positiivisia arvoja. Suurempi arvo tarkoittaa suurempaa riskiä matkustajalle törmäystilanteessa ja sen laskentaan käytetään alla olevaa SFS-EN 1317-2 standardissa esitettyä kaavaa 1, jonka arvot saadaan testituloksista. (Järvinen, V. 2004.)

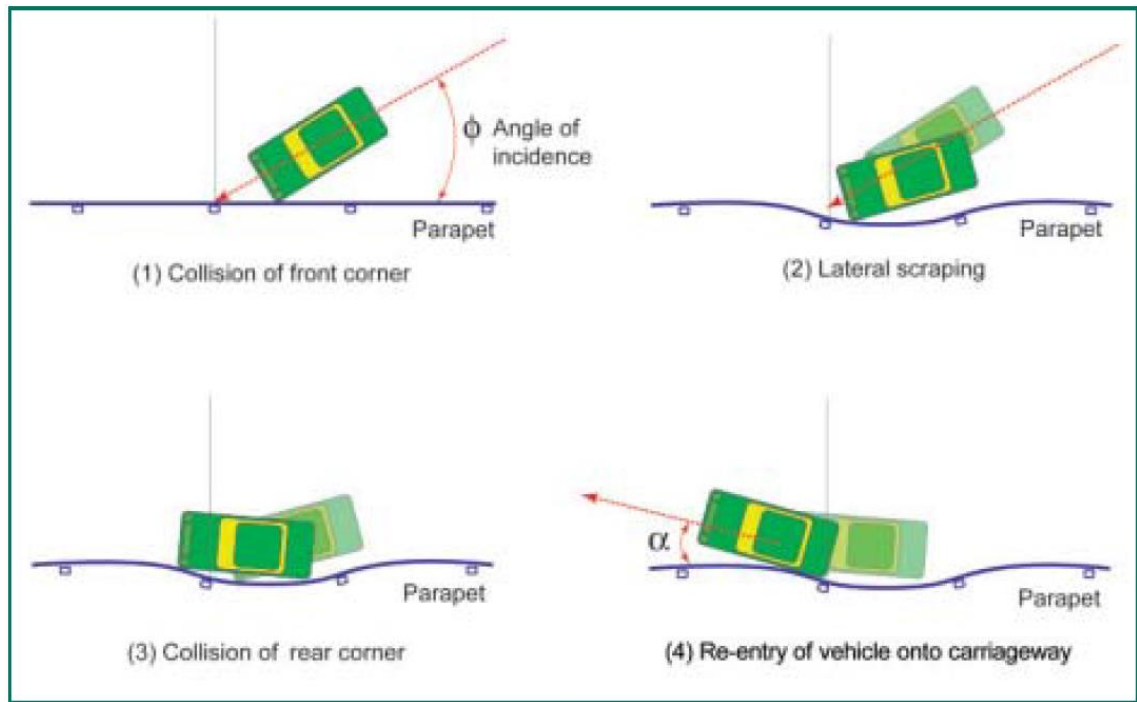
$$ASI = \sqrt{\left(\frac{ax}{\hat{ax}}\right)^2 + \left(\frac{ay}{\hat{ay}}\right)^2 + \left(\frac{az}{\hat{az}}\right)^2} \quad (1.)$$

missä

a on kiihtyvyyden komponentti akseleilla x, y ja z

â on kiihtyvyyden komponenttien raja-arvot. Rajana on käytetty arvoja, joilla matkustajan riskitaso on hyvin matala.

Teoreettinen pään iskunopeus on nopeuden suuruus, kun matkustajan pää iskisi auton sisustan osiin. Ajoneuvon törmätessä kaiteeseen ajoneuvon oletetaan liikkuvan vain vaakatasossa ja matkustajan pää on vapaasti liikkuva kappale ajoneuvon sisällä. Massan hitaus jatkaa pään liikettä, vaikka auton liike hidastuu törmätessä kaiteeseen, niin pää saavuttaa nopeutta kohti auton sisustaa. (Järvinen, V. 2004.)



KUVA 16. Kaiteen köysimäinen toiminta (Vehicular Parapet Design).

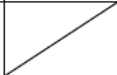
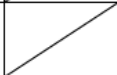
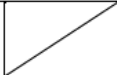
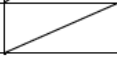
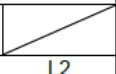
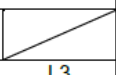
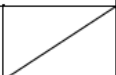
Tielaitoksen teräksisen sillankaiteen törmäysturvallisuus perustuu siihen, että siltajoh-teella ja sen kiinnityksillä kaidepylväisiin on riittävästi muodonmuutoskapasiteettia johon ajoneuvon törmäyksestä aiheutuva liike-energia häviää. Ajoneuvon osuessa kaiteeseen rakenne joustaa ja antaa ajoneuvon liukua sitä pitkin, minkä jälkeen se ohjautuu kaiteen vierelle. Toiminta perustuu siihen, että johteet kestävät taivutusta ja vetoa sitkeästi sekä ovat kiinni kaidepylväissä niin, että törmätessä ne eivät irtoa toisistaan. (Siltojen kaiteet 2012.) Yläpuolella olevassa kuvassa 16 on törmäystilanteen tapahtumat ja kaiteen toi-mintaa havainnoituna.

Pylvään kiinnitys alapäästään voi olla täysin jäykkä, jolloin pylväältä vaaditaan suuria kestävyksiä tai liitos voi olla joustava, jolloin myös liitoksen muodonmuutoskyky hä-vittää liike-energiaa. Tyyppihyväksytyjen kaiteiden liitokset ovat lähes poikkeuksetta jäykkiä. Sillankaiteen on tarkoitus olla osa, joka uhrautuu onnettomuudessa niin, että sil-lan muihin rakenteisiin ei koidu vahinkoa eikä henkilövahinkoja synny.

3.3 Törmäystestit

Kaiteita koskevan eurooppalaisen standardin SFS-EN 1317 mukaan kaiteet on testattava törmäyskokeella, jolla tutkitaan kaiteen toimintaa ajoneuvossa olijoiden turvallisuuden ja kaiteen kestävyuden kannalta. Ajoneuvo ei saa törmäystilanteessa kaatua, ajautua vastaantulevalle kaistalle eikä matkustajiin saa kohdistua liian suurista kiihtyvyyksistä aiheutuvia voimia. Ajoneuvo ei saa lävistyä kaiteesta, mennä sen yli tai ali eikä kaide saa joustaa liikaa, jotta rakenteet joita kaide mahdollisesti suojaa eivät vahingoituisi. Testeistä saaduilla tuloksilla määritetään muun muassa myös kaiteen tarvitsemat kiinnikkeet siltaan tai maahan sekä vaativatko ne päätyankkurointia. (Teiden ja siltojen kaiteet 1995.)

TAULUKKO 4. Törmäyskestävyysluokat (SFS-EN 1317-2 3.2).

Containment levels			Acceptance test
Low angle containment	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 and TB 21
Normal containment	N1		TB 31
	N2		TB 32 and TB 11
Higher containment	H1		TB 42 and TB 11
	L1		TB 42 and TB32 and TB 11
	H2		TB 51 and TB 11
	L2		TB 51 and TB32 and TB 11
	H3		TB 61 and TB 11
	L3		TB 61 and TB32 and TB 11
Very high containment	H4a H4b		TB 71 and TB 11 TB 81 and TB 11
	L4a L4b		TB 71 and TB32 and TB 11 TB 81 and TB32 and TB 11

Sillankaiteille on määritelty standardissa SFS-EN 1317 eri törmäyskestävyysluokat ja jokaiselle luokalle on omat testausvaatimuksensa. Esimerkiksi tyypillisin silloilla käytetty ja vaadittu H2-luokan kaide pitää testata taulukon 4 mukaan kahdella eri testillä; TB 51 ja TB 11, näistä toinen on törmäys henkilöautolla ja toinen linja-autolla. H2, L2, H4 ja L4 – luokat ovat käytössä silloilla, joista H4 ja L4 ovat käytössä, kun on suuri riski, että

sillan kantavat rakenteet vahingoittuisivat onnettomuustilanteessa eli ne ovat käytännössä kestävimmit kaiteet. T1, T2 ja T3 –luokkien kaiteet ovat yleensä tilapäisiä kaiderakenteita tietyömailla. N1, N2 ja H1 –luokat ovat yleensä tiekaiteita eivätkä ole käytössä silloilla.

Törmäystestien vaatimuksissa on neljä eri kriteeriä: törmäysnopeus, törmäyskulma, ajoneuvon massa ja ajoneuvon tyyppi.

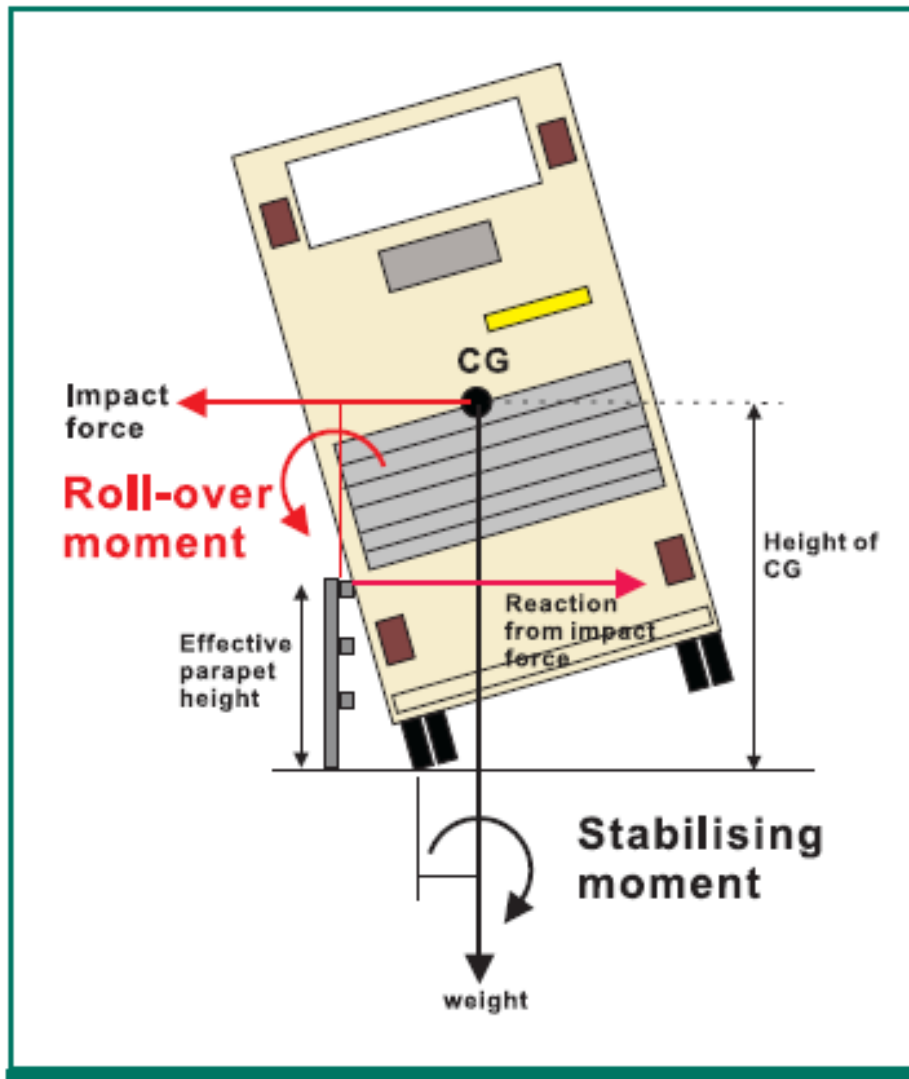
Näistä nopeus, kulma ja massa vaikuttavat kappaleen liike-energiaan ja energian häviämisen aiheuttamaan kuormaan. Ajoneuvon tyyppi vaikuttaa siihen, millä korkeudella kuorma kohdistuu kaiderakenteeseen, kuinka korkealla on massan painopiste ja mikä kaiteen toimintaleveydestä tulee. Korkeammalla ajoneuvolla on painopiste myös korkeammalla ja se voi helpommin kaatua tai kallistua, jolloin toimintaleveydestä tulee mahdollisesti liian suuri. Taulukossa 5 on esitetty kaikki eurooppalaisen standardin SFS-EN 1317 mukaiset testit.

TAULUKKO 5. Testivaatimukset (SFS-EN 1317-2 3.2).

Test	Impact speed km/h	Impact angle °	Total mass kg	Type of vehicle
TB 11	100	20	900	Car
TB 21	80	8	1 300	Car
TB 22	80	15	1 300	Car
TB 31	80	20	1 500	Car
TB 32	110	20	1 500	Car
TB 41	70	8	10 000	Rigid HGV
TB 42	70	15	10 000	Rigid HGV
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Rigid HGV
TB 71	65	20	30 000	Rigid HGV
TB 81	65	20	38 000	Articulated HGV

Pelkkä suurimmalla ajoneuvolla ja suurimmalla törmäyskulmalla testaaminen ei riitä, sillä raskaalle ajoneuvolle hyvin toimiva kaide voi olla liian jäykkä henkilöautolle ja aiheuttaa matkustajille vaarallisen suuria kiihtyvyyksiä ja henkilöauton kaiteen kapasiteetti ei välttämättä riitä esimerkiksi linja-autolle. Kuvassa 17 seuraavalla sivulla on selvennettyä korkean ajoneuvon törmäyksessä syntyviä voimia ja reaktioita; kaiteeseen törmäys aiheuttaa tukireaktion ajoneuvon liike-energialle, mutta jos ajoneuvon painopiste on korkeammalla kuin syntyvä tukireaktio, se aiheuttaa myös momentin joka pyrkii kaatamaan ajoneuvon kyljellensä. Niin kauan kuin ajoneuvon painopiste ei ole kuvassa 17 siirtynyt vasemman rengaslinjan vasemmalle puolelle, pyrkii ajoneuvon massa

tasapainottamaan sen takaisin normaaliin asentoon kaikkien renkaiden varaan. Kyseinen tilanne syntyy sivun 24 kuvassa 16 esittämien törmäyksen vaiheiden 2 ja 3 välillä.



KUVA 17. Korkean ajoneuvon kallistuminen (Vehicular Parapet Design).

Kaidevalmistaja saattaa CE-merkinnässään ilmoittaa vain kaiteen toimintaleveysluokan, taulukossa 6 on esitetty toimintaleveysluokkien leveydet metreinä. Toimintaleveys saattaa olla yksi valittavalle kaiteelle asetetuista kriteereistä, kuten vaikka tilanteessa jossa sillan kannen yläpuolella olevia rakenteita pitää suojata. (Tiekaiteiden suunnittelu 2013).

TAULUKKO 6. Toimintaleveysluokat muunnettuna metreiksi.

Toimintaleveysluokka	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
Toimintaleveys (m)	≤ 0,6	≤ 0,8	≤ 1,0	≤ 1,3	≤ 1,7	≤ 2,1	≤ 2,5	≤ 3,5

Alla olevassa taulukossa 7 on Norjan tiehallinnon Norwegian Public Road Administrationin (Statens Vegvesen) tekemä taulukko, jossa on esitetty törmäysluokiteltujen kaiteiden valintakriteereitä.

TAULUKKO 7. Turvakaiteiden valintakriteerit (Manual N101 Vehicle Restraint Systems).

Containment class	Road conditions
T1	<ul style="list-style-type: none"> • Temporary situations, e.g. by roadwork areas with a temporary speed limit ≤ 50 km/h
T2	<ul style="list-style-type: none"> • Temporary situations, e.g. by roadwork areas with a temporary speed limit of 60 or 70 km/h
T3	<ul style="list-style-type: none"> • Temporary situations such as roadwork areas with a speed limit ≥ 60 km/h, a high traffic volume AADT > 4000 and a large proportion of heavy traffic $> 20\%$ • Temporary situations on roads with a speed limit of ≥ 70 km/h and with a high traffic volume AADT > 4000 • Temporary situations on motorways • Temporary situations on roads where the impact of a vehicle driving off the carriageway or through the safety barriers would involve particularly serious consequences for others. Signs ought to be erected for speed limits ≤ 60 km/h.
N1	<ul style="list-style-type: none"> • Speed limit ≤ 60 km/h and AADT $\leq 12\ 000$ • Speed limit ≥ 70 km/h and AADT $\leq 1\ 500$
N2	<ul style="list-style-type: none"> • Speed limit ≤ 60 km/h and AADT $\leq 12\ 000$ • Speed limit ≥ 70 km/h and AADT $> 1\ 500$ • By retaining walls and precipices (gradients steeper than 1:1.5) that are higher than 1.5 – 4m* • For bridges and culverts with lengths ≤ 4 m and an AADT $< 1\ 500$* • On motorways
H1	<ul style="list-style-type: none"> • On narrow medians < 2 m on motorways and other roads with high speed levels > 80 km/h
H2 or L2	<ul style="list-style-type: none"> • On bridges and retaining walls higher than 4 m • By precipices (gradient steeper than 1:1.5) higher than 4 m or by water deeper than 0.5 m • On narrow medians < 2 m on motorways and other roads with high speed levels > 80 km/h and a high proportion of heavy traffic $> 20\%$) • Locations where consequential damage/injury will be significant, e.g. next to water reservoirs, railways, metro lines, tunnels, fixed obstacles etc., collision with large fuel tanks etc.
H4 or L4	<ul style="list-style-type: none"> • On or under bridges where there is danger of serious damage to the bridge's load bearing structure which upon collapse of the bridge could entail danger for many other road users etc. • Special locations on the motorway and other roads with high speed levels > 80 km/h and a high proportion of heavy traffic $> 20\%$, where the risk of driving off the road is greater than usual or where the consequences of driving off the road would be particularly significant. • On bridges that cross high-speed railways, and along roads where high-speed railways lie within the safety zone

Seuraavalla sivulla on kuvassa 18 tapahtumasarja Hollannissa käytetyn puisen tiekaiteen törmäystesteistä linja-autolla. Kaide toimi törmäyksessä oikein hyvin ja kärsi minimaalisen määrän vahinkoa. Tässä testissä saatiin kiihtyvyyssindeksin arvoksi 1,34 eli alle 1,4 mikä täyttää riskitasoluokan B kriteerit.



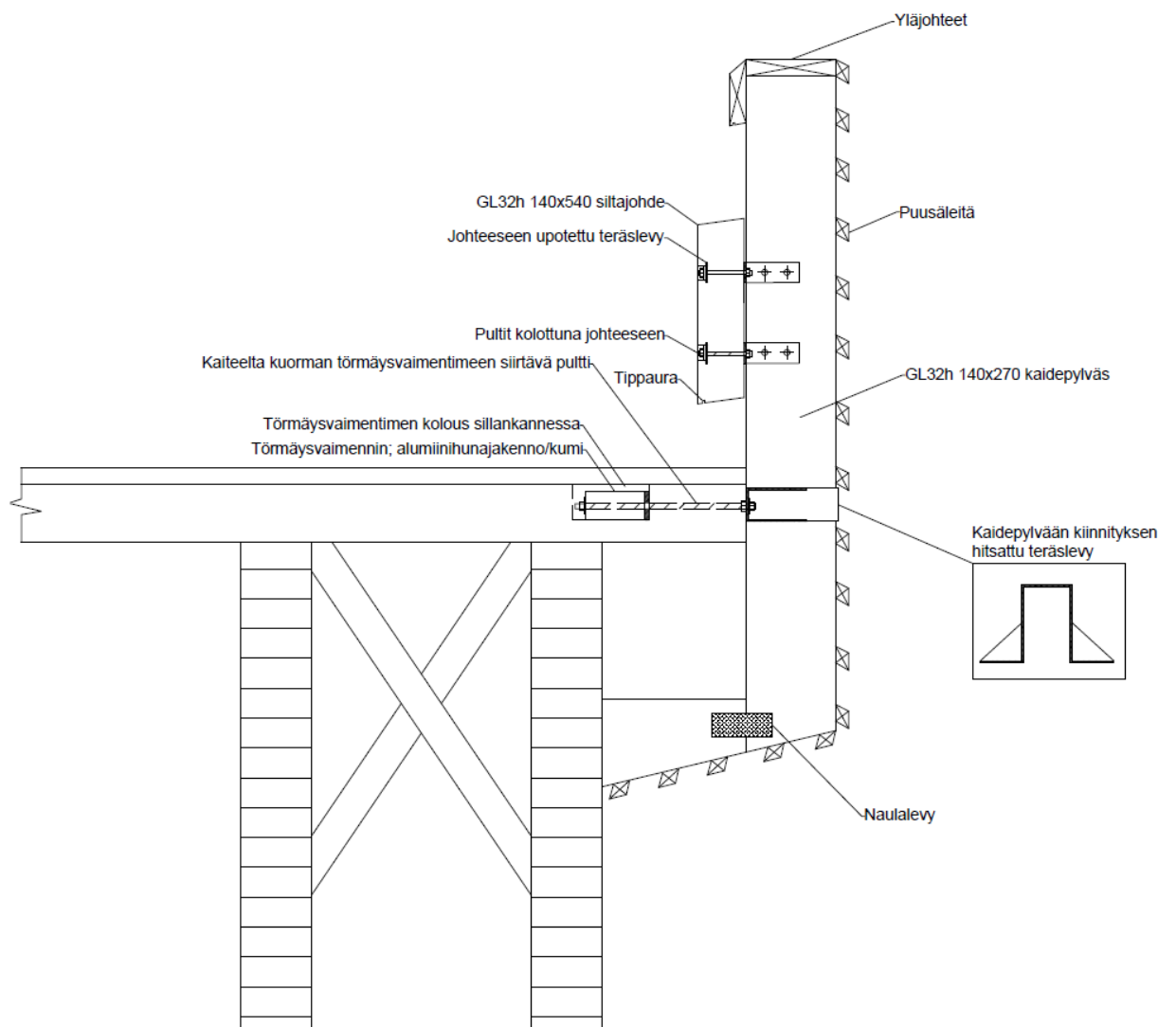
KUVA 18. Puisen tiekaiteen TB 51 –törmäystesti linja-autolla (van de Kuilen, J. W. G).

4 PUUKAITEEN ALUSTAVA SUUNNITTELU

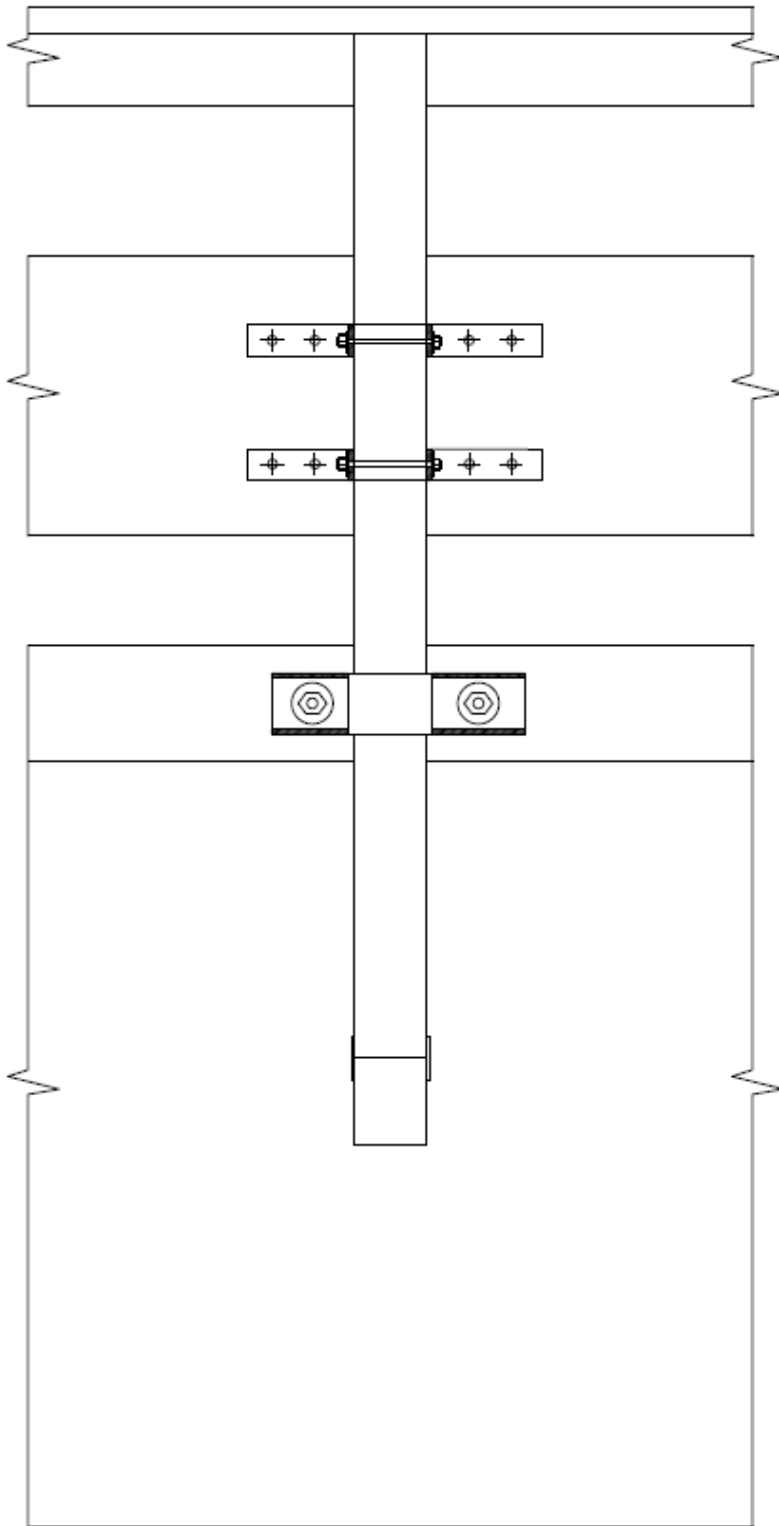
Tässä opinnäytetyössä esimerkkinä esitetty puukaiderakenne on vain alustavasti suunniteltu eikä kohteena ole mitään tiettyä siltaa, joten sillan rakenteisiin ei oteta kantaa muuten kuin periaatetasolla.

Esimerkki puukaiteen suunnitelman rakenneosien ja liitosten kapasiteetit lasketaan karkeasti ja verrataan käytössä oleviin CE-merkittyjen kaiderakenteiden rakenneosiin. Vaikka suunnitelmat perustuvat kapasiteettivertailuihin on kuormia silti käsitelty olennaisena osana tätä työtä.

Laskentojen pohjana on SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu ja RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje.



KUVA 19. Kaiderakenne kuvattuna sillan poikkisuunnasta.



KUVA 20. Kaiderakente kuvattuna sillan pituussuunnasta.

Yllä olevissa rakennekuviissa 19 ja 20 on esitetty tähän opinnäytetyöhön liittyvän sillan puukaiteen alustava suunnitelma. Lyhyt yhteenveto rakenneratkaisuista:

- Siltajohde GL32h 140x540
- Ylä- ja käsijohteet höylättyä sahatavaraa

- Kaidepylväs GL32h 140x270
- Törmäysvaimennettu liitos kaidepylvään ja sillan kannen välillä
 - Kolottu kanteen ja päällä teräskotelo
- Siltajohteen liitos kaidepylvääseen pulteilla ja teräslevyillä
- Puusäleet pinnassa
- Kokonaiskorkeus noin 1250 mm sillankannesta
- Siltajohteen keskipisteen korkeus 600 mm sillankannesta

Seuraavissa kappaleissa on perusteltu alustavan suunnitelman valintojen perusteita sekä ratkaisuita.

4.1 Kuormat

Auton liikkeessä olevan massan liike-energiasta on mahdollista laskea ainakin suuntaa antavia arvoja kaiderakennetta kohtisuoraan kohdistuvalle törmäyskuormalle, jos on tiedossa kaiderakenteeseen aiheutuva suurin mahdollinen taipuma, energian (joule) kaavasta. Käytännössä jokaisen eri sillan kaiderakenteeseen kohdistuu täysin yksilöllinen kuorma, joka riippuu ainakin sillan rakenteen, liitoksen, kaidepylvään ja törmäysjohteen jäykkyydestä ja sitkeydestä sekä törmäävän ajoneuvon massasta, nopeudesta ja törmäyskulmasta.

Kineettinen energia:

$$J = \frac{m \cdot l^2}{t^2} = N \cdot l, \quad (2.)$$

missä

J on joule, liike-energian yksikkö

m on massa kilogrammoina

l on matka metreinä

t on aika sekunteina

N on voima newtoneina

Kineettinen energia kulmassa α törmäävälle ajoneuvolle:

$$J_t = \frac{m \cdot (v \cdot \sin\alpha)^2}{2}, \quad (3.)$$

missä

m on massa kilogrammoina

α on törmäyskulma (0...20°)

v on ajoneuvon nopeus törmäyshetkellä

Alla oleviin taulukoihin 8, 9 ja 10 on listattu eri painoisten ajoneuvojen kineettisen energian määriä, kun törmäyskulma ja nopeus muuttuvat. Kaikki tilanteet eivät ole SFS-EN 1317 –standardin mukaisia tilanteita, kuten 50 km/h nopeus, mutta se on mukana vertailtavana arvona taajamanopeuksiin rajoitetulla ajoneuvoliikenteen sillalla.

TAULUKKO 8. Kineettinen energia törmäyskulmana 20°

km/h	kg	900	1300	1500	10 000	13 000
50		10 154	14 667	16 924	112 826	146 674
70		19 902	28 748	33 171	221 139	287 480
100		40 617	58 669	67 695	451 303	586 694
110		49 147	70 990	81 912	546 077	709 900

TAULUKKO 9. Kineettinen energia törmäyskulmana 15°

km/h	kg	900	1300	1500	10 000	13 000
50		5 815	8 399	9 691	64 610	83 993
70		11 397	16 463	18 995	126 635	164 625
100		23 259	33 597	38 766	258 439	335 970
110		28 144	40 652	46 907	312 711	406 524

TAULUKKO 10. Kineettinen energia törmäyskulmana 8°

km/h	kg	900	1300	1500	10 000	13 000
50		1 681	2 429	2 802	18 682	24 286
70		3 295	4 760	5 492	36 616	47 601
100		6 725	9 714	11 209	74 727	97 145
110		8 138	11 755	13 563	90 419	117 545

4.2 Laskentalujuudet

Taulukossa 11 on esitelty GL32h liimapuun ominaislujuusarvoja ja laskentalujuudet, jotka on jaettu osavarmuusluvulla ja kerrottu aika- ja kosteusvaikutuskertoimella. GL32h on homogeeninen liimapuu eli jokainen laminaatti on saman lujuusluokan puuta. Onnettomuustilanteessa γ_M on 1,0 rakenneosille, mutta koska puurakenteet ovat ulkotiloissa ja kuorma hetkellistä on k_{mod} 0,9.

Puun materiaalilujuuksien Eurokoodin mukaiset laskenta-arvot lasketaan kaavalla 4.

TAULUKKO 11. GL32h liimapuun lujuusarvoja, yksikkö N/mm²

E	$f_{v,k}$	$f_{m,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{v,d}$	$f_{m,d}$	$f_{c,0,d}$	$f_{t,0,d}$
13 700	3,8	32	29	3,3	22,5	3,42	28,8	26,1	20,25

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M}, \quad (4.)$$

missä

X_d on lujuuden laskenta-arvo

X_k on lujuuden ominaisarvo

k_{mod} on kerroin, jolla otetaan huomioon rakenneosien kosteus ja kuorman kesto

γ_M on materiaalin osavarmuusluku

4.3 Kaidepylväs

Laskennassa on käytetty puuprofiileina 140x80, 140x180 ja 140x270 sekä teräsprofiileita 50x60 ja 80x100x5.

Kaidepylväältä vaaditaan lähinnä mekaanisia ominaisuuksia; leikkaus- ja taivutuskestävyyttä molempiin suuntiin sekä riittävää taivutusjäykkyyttä. Vaaditut ominaisuudet on ilmoitettu ominaisarvoina Siltojen kaiteet 2012 –ohjeessa, mutta tässä esimerkissä lasketaan Eurokoodin mukaisilla suunnitteluarvoilla, koska muunneltujen kaiderakenteiden laskennallinen tarkastelu pitää suorittaa Eurokoodien mitoitusohjeiden mukaisesti.

Kuvan 16 mukaisen suunnitelman kaiteen alapäästä tukeva puu pitää kiinnittää sillan rakenteisiin niin, että sen kiertymä ei ole täysin estetty ja voima välittyy joko palkkien puristuspuolelle tai jäykistyslinjoille.

Alustavat dimensiot:

Alla olevaa kaavaa käyttäessä kaidepylvään leveys valitaan itse varastokokoisista palkkeista.

$$h = \sqrt[3]{\frac{EI_{req}}{E \cdot 12} \cdot b}, \quad (5.)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (6.)$$

missä

h on liimapuun poikkileikkauksen korkeus

E on liimapuun ominainen kimmokerroin

EI_{req} on vaadittu kimmokertoimen ja jäyhyysmomentin tulo

b on liimapuun poikkileikkauksen leveys

Liimapuupylvään leveydeksi b valitaan varastokokoinen leveys, missä on riittävästi tilaa kiinnityksille. Tässä esimerkissä leveydeksi valitaan 140 mm taulukosta 12, koska vaadittu taivutuskestävyys saavutetaan matalillakin palkeilla, mutta mahdollisille kiinnikkeille tarvitaan tilaa leveyssuunnassa sekä leveys b on leikkauskapasiteetin suhteen yhtä tehokasta kuin korkeus h palkille.

Vähimmäiskoko kaidepylväälle on 140x180 jäykkyyden suhteen verrattuna S355 80x100x5 – teräsprofiiliin ja 140x80 verrattuna Liikenneviraston vaatimuksiin, mutta suurempia poikkileikkauksia lasketaan, koska puulla on heikko leikkauskestävyys. Palkkien ei tarvitse olla varastosta heti saatavaa tavaraa, koska siltahankkeissa käytetyt poikkileikkaukset ovat lähes poikkeuksetta tilaustavaraa.

TAULUKKO 12. Liimapuun varastokokoja (Puuinfo).

Liimapuun yleisimmät poikkileikkausmitat									
KORKEUS	LEVEYS								
	90	115	140	165	190	215	240	265	290
180	T	T	T	T	T	T	T	O	O
225	V	V	T	T	T	T	T	O	O
270	V	V	T	T	T	T	T	O	O
315	V	V	V	T	T	T	T	O	O
360	V	V	T	V	T	T	T	O	O
405	V	V	V	V	T	T	T	O	O
450	T	V	T	T	T	T	T	O	O
495	T	V	T	T	T	T	T	O	O
540	T	T	T	T	T	T	T	O	O
585	T	T	T	T	T	T	T	O	O

Leikkauskapasiteetti:

Kaidepylvään liimapuinen profiili on suorakaide ja leikkauksen yhteydessä syntyy taivutusjännitystä, joten leikkauskapasiteettia pienennetään arvolla 1,5. Liimapuupalkin leikkauskapasiteetti on poikkileikkauksen x- ja y-suuntiin sama ja se lasketaan alla olevalla kaavalla:

$$V_{Rd} = \frac{f_{v,d} \cdot h \cdot b_{eff}}{1,5}, \quad (7.)$$

missä

V_{Rd}	on leikkauskapasiteetin arvo
$f_{v,d}$	on leikkauslujuuden laskenta-arvo
h	on poikkileikkauksen korkeus
b_{eff}	on tehollinen leikkauspinta-alan leveys

Liimapuut ovat suojaamattomina ulkona kosteassa ympäristössä, joten käyttöluokka on 3 ja tehollinen leikkauspinta-alan leveys on 100 % palkin leveydestä, koska kuivuuden aiheuttamaa halkeiluvaaraa ei ole.

Pylväältä pitää tarkastella taivutuskapasiteetti molempiin suuntiin poikkileikkauksen suhteen. Taivutuskapasiteetti lasketaan alla olevalla kaavalla:

$$M_{C,Rd} = f_{m,d} \cdot W, \quad (8.)$$

missä

$M_{C,Rd}$	on kapasiteetti momenttikuormalle
$f_{m,d}$	on taivutuslujuuden laskenta-arvo
W	on taivutusvastus y- tai x-akselin ympäri

4.4 Siltajohde

Siltajohde on kaiderakenteen osa, joka estää ajoneuvoa suistumasta pois sillalta, ohjaa sen takaisin ajoneuvoliikenteen kaistalle sekä siirtää kuormia kaidepylväiden väliltä. Liikenneviraston ohjeessa Siltojen kaiteet 2012:ssa vaaditaan johteilta ja sen jatkoksilta vain vetokapasiteettia, vaatimus perustuu johteen toimintaan ikään kuin köytenä ajoneuvon siihen törmätessä.

Liimapuisen siltajohteen alustavat dimensiot valittiin leikkauskapasiteetin mukaan, koska massiivisilla puupoikkileikkauksilla on korkea veto- ja taivutuskapasiteetti ja on vaara, että johde leikkaantuu ja lävistää törmäävän ajoneuvon. Suhteutettuna muihin lujuuksiin puulle muodostuu matala leikkauskapasiteetti, josta tulee määräävä tekijä. Johteiden kapasiteetit lasketaan liimapuupalkille 140x540 ja teräskaiteissa käytetylle P88,9x4 putki-profiilille, joita on yleensä kaksi päällekkäin.

Kaikki johteet on hyvä varustaa tippauralla – tai vähintään asentaa ne kaltevasti – jotta vesi tippuu niistä pois, vähentäen pinnan kosteusrasitusta ja pidentäen rakenneosan elinikää.

Johteen leikkauskapasiteetti lasketaan kaavalla 7.

Vetokapasiteetti:

$$N_{t,Rd} = f_{t,0,d} \cdot b \cdot h, \quad (9.)$$

missä

$N_{t,Rd}$	on kapasiteetti vetävälle voimalla
$f_{t,0,d}$	on vetolujuuden laskenta-arvo tai teräkselle myötöraja
b	on poikkileikkauksen leveys
h	on poikkileikkauksen korkeus

4.5 Tyypihyväksytyjen kaiteiden teräksisiä rakenneosia

Tässä osiossa esitetään kaavat, joita on käytetty käytössä olevien tyypihyväksytyjen teräksisten sillankaiteiden rakenneosien Eurokoodin mukaisia kapasiteetteja laskiessa. Teräksisiä on laskettu vertailuarvojen vuoksi ja niiden poikkileikkauksien oletetaan kuuluvan poikkileikkausluokkiin 1 ja 2 kaiderakenteiden oletetun toiminnallisuuden takia. Poikkileikkausluokkien 1 ja 2 poikkileikkauksille voidaan Eurokoodin mukaan käyttää plastisia poikkileikkausarvoja.

Plastinen leikkauskapasiteetti teräkselle:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_M}, \quad (10.)$$

missä

$V_{pl,Rd}$	on plastinen leikkauskapasiteetti
A_v	on leikkauspinta-ala
f_y	on teräksen myötölujuus
γ_M	on materiaalin osavarmuusluku

Valssaamalla valmistetun suorakaiteen muotoisen rakenneputken leikkauspinta-ala:

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)}, \quad (11.)$$

missä

A	on poikkileikkauksen pinta-ala
b	on poikkileikkauksen leveys
h	on poikkileikkauksen korkeus

Pyöreälle rakenneputkelle:

$$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi}, \quad (12.)$$

missä

A on poikkileikkauksen pinta-ala

b on poikkileikkauksen leveys

h on poikkileikkauksen korkeus

Taivutuskapasiteetti teräkselle:

Teräkselle on laskettu myös kimmainen taivutusvastus, jotta on mahdollista käsinlaskea rakenneosien taipumia. Taivutusvastus muuttuu plastisella alueella, kun kappale alkaa saada pysyviä muodonmuutoksia ja saavuttamaan korkeampaa lujuutta. Plastisen alueen taipumat ovat epälineaarisia. Alla olevilla kaavoilla 10 ja 11 voidaan laskea teräkselle kimmoiset ja plastiset taivutuskapasiteetit:

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_M}, \quad (13.)$$

missä

$M_{el,Rd}$ on taivutuskapasiteetti kimmoisalla alueella

W_{el} on poikkileikkauksen kimmainen taivutusvastus

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_M}, \quad (14.)$$

missä

$M_{pl,Rd}$ on taivutuskapasiteetti plastisella alueella

W_{pl} on poikkileikkauksen plastinen taivutusvastus

4.6 Rakenneosien kapasiteetteja

Tässä osiossa on esitettyä laskennallisia tuloksia kaiderakenteiden eri rakenneosista vertailtavaksi keskenään sekä tyyppihyväksytyyn kaiteen muunnelman vaatimukset. Vaatimukset koskevat ainoastaan tyyppihyväksytyyn sillankaiteen muunnelmaa, jota käytetään alle 50 km/h rajoitetulla sillalla tai jos vuorokauden aikana kulkeva liikenne on alle 100 kappaletta ajoneuvoja, niin 80 km/h. Taulukossa 13 on teräsosien kapasiteetit, taulukossa 14 on liimapuusten osien kapasiteetteja ja taulukoissa 15 sekä 16 on näiden käyttöasteita verrattuna Siltojen kaiteet 2012 –ohjeen vaatimuksiin.

TAULUKKO 13. Teräspoikkileikkauksien kapasiteetteja

	V_{Rd}	$N_{t,Rd}$	$M_{pl,y,Rd}$	$M_{pl,x,Rd}$	$M_{el,y,Rd}$	$M_{el,x,Rd}$
S235 50x60	407 kN	-	10,6 kNm	8,8 kNm	7,1 kNm	5,9 kNm
S355 80x100x5	186,3 kN	-	19,6 kNm	16,8 kNm	17 kNm	14 kNm
S355 P88,9x4	139,2 kN	378,7 kN	10,2 kNm	10,2 kNm	7,7 kNm	7,7 kNm
S355 HEA100	154,9 kN	-	29,5 kNm	14,6 kNm	25,8 kNm	9,5 kNm
Vaati- mukset	32 kN	80 kN	4,3 kNm	4,3 kNm	4,3 kNm	4,3 kNm

TAULUKKO 14. Liimapuupoikkileikkauksien kapasiteetteja

	V_{Rd}	$N_{t,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,x,Rd}$
GL32h 140x80	25,5 kN	-	4,3 kNm	7,5 kNm
GL32h 140x180	57,5 kN	-	24 kNm	-
GL32h 140x270	86,2 kN	756 kN	49 kNm	25,4 kNm
GL32h 140x540	172,4 kN	1531 kN	50,8 kNm	196,0 kNm
Vaatimukset	32 kN	80 kN	4,3 kNm	4,3 kNm

Puhtaasti kapasiteettien vertailu kaiderakenteiden osille, joiden tarkoitus on hävittää muodonmuutoksella törmäyksen liike-energiaa, ei ole tarkoituksenmukaista koska kyseiset arvot yksinään eivät kerro kuinka paljon energiaa voidaan törmäystilanteessa hävittää rakenneosan muodonmuutokseen. Taulukkoon 17 on laskettu kaidepylväsprofiilien elastiseen muodonmuutokseen kulutettavaa energiaa. Kaidepylväiksi tarkoitetuille poikkileikkauksille ei ole laskettu vetokapasiteettia.

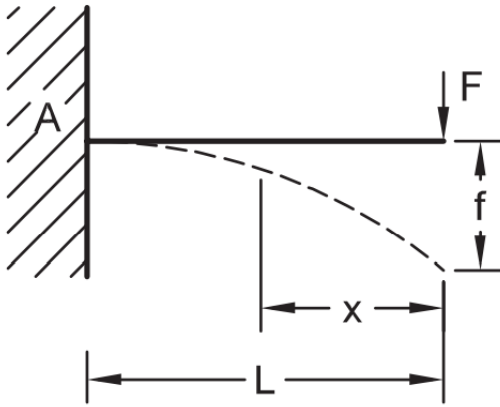
TAULUKKO 15. Kaidepylväs poikkileikkausten käyttöasteet suhteessa vaadittuihin arvoihin

	V_{Rd}	$M_{Rd,y,max}$
S235 50x60	7,8 %	40,6 %
S355 80x100x5	17,2 %	21,9 %
S355 HEA100	20,7 %	14,5 %
GL32h 140x80	128 %	100 %
GL32h 140x180	55,7 %	17,9 %
GL32h 140x270	37,1 %	10,6 %

TAULUKKO 16. Siltajohde poikkileikkausten käyttöasteet suhteessa vaadittuihin arvoihin

	V_{Rd}	$N_{t,Rd}$	$M_{Rd,y,max}$
S355 P88,9x4	22,9 %	21,1 %	42,2 %
GL32h 140x270	37,1 %	10,6 %	8,8 %
GL32h 140x540	18,6 %	5,2 %	8,5 %

Taulukon 15 käyttöasteista voi päätellä, että Siltojen kaiteet 2012 –ohjeen mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset täyttyvät. Vain minimi taivutusjäykkyyden puupoikkileikkauksen (140x80 GL32h) leikkauskapasiteetti jäi vajaaksi vaaditusta arvosta. Puupoikkileikkauksien taivutuskapasiteettien käyttöasteet olivat verrattain matalia suhteessa teräksisiin. Kun taas puun leikkauskapasiteettien käyttöasteet olivat huomattavat korkealla verrattuna teräksisiin.



KUVA 21. Ulokepalkin taipuma.

Ulokepalkkina kuvan 21 mukaan toimivan rakenteen taipuma pistekuormalle kimmoisalla alueella:

$$f = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I'} \quad (15.)$$

missä

F on pisteessä vaikuttava voima

L on etäisyys tuelta pisteeseen, johon voima vaikuttaa

E on kimmokerroin

I on jäyhyysmomentti

TAULUKKO 17. Poikkileikkauksien maksimi vaakakuormia ja niiden aiheuttamia taipumia sekä muodonmuutoksen hävittämä energia kimmoisalla alueella.

PL	V_{Rd}	$M_{Rd,y,max}$	$F_{max}(0,6 m)$	$f(F_{max})$	J
50x60	407 kN	10,6 kNm	17,7 kN	6,74 mm	119,35
80x100x5	186,3 kN	19,6 kNm	32,7 kN	4,96 mm	162,26
HEA100	154,9 kN	29,5 kNm	49,2 kN	4,83 mm	237,67
140x180	57,5 kN	24 kNm	40 kN	3,09 mm	123,59
140x270	86,2 kN	49 kNm	81,7 kN	1,87 mm	152,76

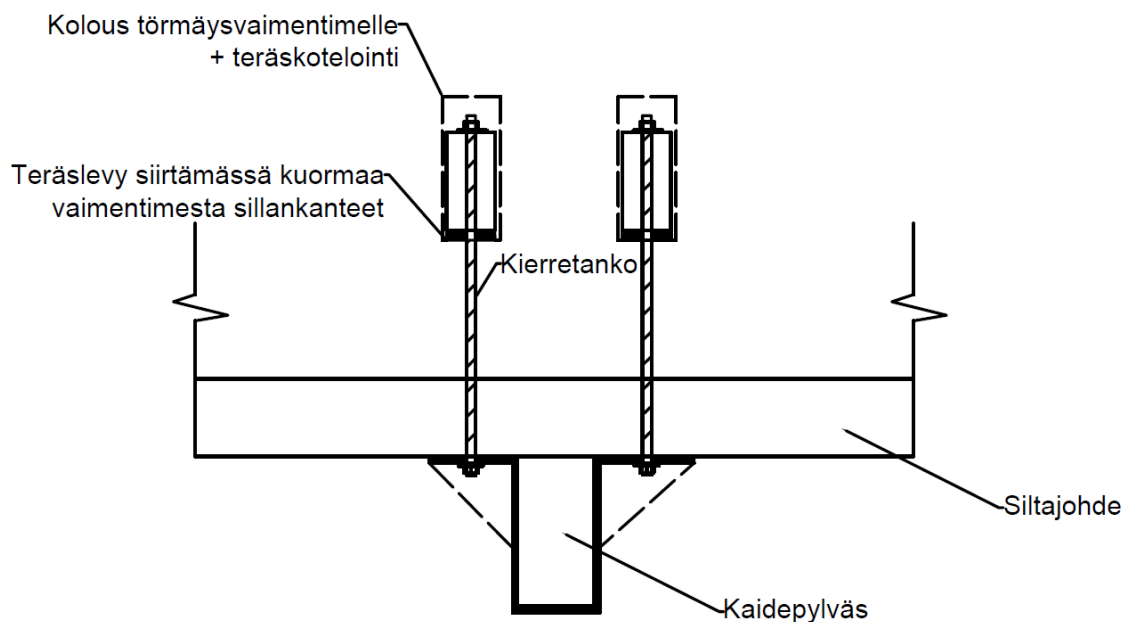
Taulukon 17 poikkileikkauksien muodonmuutokset on laskettu vain materiaalien kimmoiselle alueelle, koska epälineaaristen muodonmuutosten laskenta on liian työläs tämän opinnäytetyön puitteissa. Tulokset antavat sinänsä vääristynyttä kuvaa materiaaleista, koska teräksen suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat plastisella alueella. Voima F_{max}

on suurin vaakavoima, joka on joko yhtä suuri kuin leikkauskapasiteetti tai voima, joka aiheuttaa taivutuskapasiteetin verran momenttia korkeudella 0,6 m sillankannesta. Valtaosa törmäyksen vastaanottavista siltajohteista on 0,6 m korkeudella.

5 LIITOKSET

Kaidepylvään liitoksen pitää kestää leikkausvoimaa, taivutusta sekä vääntöä. Pylväs ja sen liitokset ovat myös uhrautuvia osia törmäyksen sattuessa, joten liitokset pitää mitoittaa murtumaan ennen sillan rakenteiden myötäämistä tai murtumista.

Puun hauraasta vetomurrosta johtuen tässä esimerkissä pyritään tekemään karkeasti alustavat suunnitelmat joustavalle liitokselle, joka mahdollistaa suuremman energiamäärän hävittämisen törmäystilanteessa. Vain osittain jäykkä liitos voi myös onnettomuuden sattuessa rasittaa sillan primäärirakenteita vähemmän kuin täysin jäykkäliitos, jota nykyisessä kaiderakentamisessa suositaan.



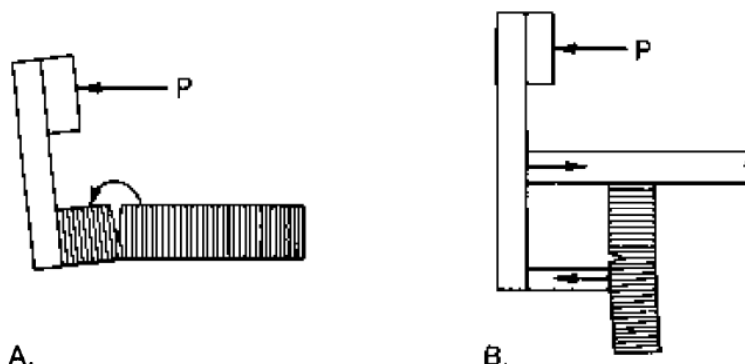
KUVA 22. Kaidepylväsliitos törmäysvaimentimilla sillankannen sisässä

Tässä työssä mitoitetaan alustavasti sillan pituussuunnassa jäykästi toimiva kaidepylvään liitos ja sillan poikkisuunnassa osittain joustavasti toimiva.

Kreosootti- tai suolakyllästettyjen puuosien sisässä olevilla teräskiinnikkeillä on oltava riittävä sinkkikerros pinnassa tai materiaalina haponkestävä teräs.

Kuvassa 22 on luonnos yllä mainitusta liitoksesta, jossa on kaksi törmäyselementtiä sillankansirakenteen sisässä. Törmäyselementit on lovettu puukannen sisään kulutuspin-

alle. Voima välittyy pylvästä kahdella kierretangolla törmäyselementeille, jotka puristuvat sillankantta vasten kasaan hävittäen energiaa. Sisään lovetuilla kiinnikkeillä ei myöskään tarvita erillisiä suisteparruja suojaamaan liitospultteja.



KUVA 23. Liimapuusillan kaideliitoksen mahdollisia vaurioita (Rail systems for timber decks, 1958).

Liimapuukannella ja – palkeilla rakennetuilla silloilla pitää ottaa liitoksissa huomioon liimapuun liimaukerrosten suunnat, kuvassa 23 on esitetty mahdollisia vauriotapoja kaideliitosten välittämistä voimista. Itse sillan rakenteet eivät saisi vaurioitua onnettomuudessa vaan kaide on uhrautuva osa.

Törmäysvaimennin voi olla mikä tahansa pitkäikäinen materiaali tai kappale, joka käytetty puristuessaan hyvin lineaarisesti ja sillä on suuri muodonmuutoskyky kuten esimerkiksi kumi tai alumiininen hunajakkeno. Alumiinihunajakkeno on hyvin käytetty rakenne törmäysvaimentimena tierakenteissa ja ajoneuvoissa keveyden ja hyvien muodonmuutosominaisuuksien takia. Jos kennon puristavana voimana on puolet 140x270 GL32h –poikkileikkauksen taulukon 16 F_{max} voimasta, niin kennoksi voisi sopia Plascoren CrushLite PACL-XR1-6.1-1/8-15-P-5056. Kyseisen kennon puristuskestävyys on 3,8 MPa, joten poikkileikkausala olisi noin 100x100 mm² ja puristuminen alkaisi 38 kN:in kuormasta.

Kennot tyypillisesti puristuvat kasaan noin 70 % pituusmitastaan eli kennon ollessa 200 mm pitkä se puristuu kasaan 140 mm. Tällä matkalla kahden kennon muodonmuutokseen kuluisi noin 10 640 joulea, mikä yksistään riittäisi hävittämään kineettisen energian vaakakomponentin 900 kg henkilöauton 20 asteen törmäyskulmalla kaiteeseen nopeudesta

50 km/h. CrushLite -kennojen tiedot ovat liitteessä 2. Törmäysvaimentimen lujuus vaikuttaa suoraan törmäystestien kiihtyvyyssindeksiin; liian lujalla kennolla tulee liian korkeita kiihtyvyyssarvoja. On myös vaarana, että kenno on liian heikko ja kaidepylväisiin iskee liian suuri kuormapiikki törmäyksestä. Suuri kuormapiikki myös nostaa kiihtyvyyssindeksin arvoa ja voi hajottaa kaiteen rakenteita.

Liitoksessa on kaksi kierretankoa/-pulttia välittämässä törmäyksen voimia törmäysvaimentimelle. Pultit mitoitetaan, niin että ne eivät murru ennen kaidepylvästä. Yhdelle pultille kohdistuu siis puolet kaidepylväälle kohdistuvasta vaakavoimasta, joka muodostuu joko leikkauskapasiteetin suuruudesta tai voimasta joka aiheuttaa taivutuskapasiteetin suuruisen momentin.

Vedetty pultti:

$$N_{pl,Rd} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot 0,78 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (17.)$$

missä

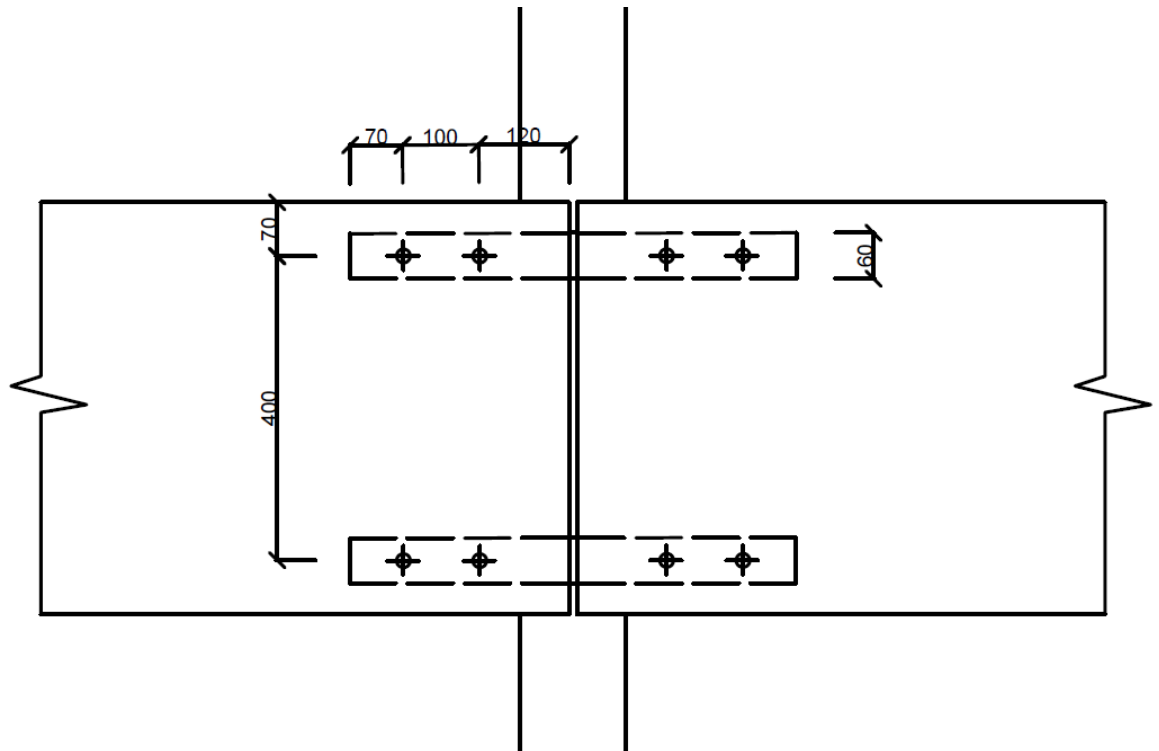
r	on pultin säde
f_y	on pultin myötöraja
γ_{M0}	on materiaalin osavarmuusluku

Vedetylle pulttiliitokselle puurakenteessa pitää olla aluslevy, jonka paksuus on vähintään $0,3d$ ja halkaisija $3d$. Puun leimapainekestävyys ja teräslevyn taivutuskestävyys tarkastellaan jokaiselle pultilta seuraavasta kahdesta pienemmälle pinta-alalle $12t$ tai $4d$, missä d on pultin halkaisija ja t teräslevyn paksuus. Aluslevyn alla leimapainelujuutena voidaan käyttää arvoa $3 \cdot f_{c,90,k}$. (Pulttiliitosten mitoitus, Metsä Wood 2012). Sillankannen leimapainekestävyyttä ja veto-/puristuskestävyyttä ei ole tutkittu tässä työssä.

Siltajohteen liitos kaidepylväeseen ja jatkoksien liitoksien tulee olla vetoa kestäviä sekä niissä pitää olla varaa sillan ja kaiteen pituussuuntaiselle liikkeelle jonka lämpötilan ja kosteuden muutokset aiheuttavat. Johteet ovat myös riskialttein osa lävistämään ajoneuvoja, joten etenkin jatkosten liitoksia on aihetta suunnitella huolella.

Siltajohde liitetään jatkoskohdissa pylväeseen neljällä teräslevyllä, joista kaksi on upotettuna puuhun syiden pituussuuntaisesti ja kaksi on johteen takana hitsattuna kaiteen

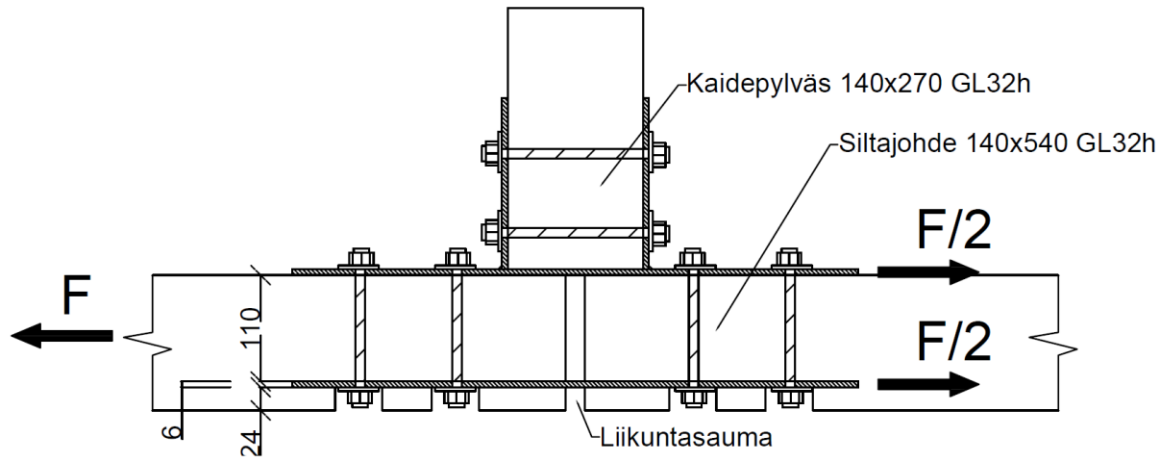
lataan tai yhteen U-profiiliin, joka kiinnittyy kaidepylvääseen. Teräslevyjen reiät ovat soikeita, jotta kaiteella on muodonmuutos varaa. Puuhun tehtävät reiät ovat 2 mm pultin halkaisijaa suuremmat ja reiän alussa on kolous aluslevylle sekä pultin kannalle. Pultit kiristetään riittävään momenttiin, jotta liitokseen syntyy kitkaa ja se siirtää kuormaa myös ennen teräslevyjen liikevaran loppumista. Pulttien reunaetäisyydet ovat taulukossa 18. Liitoksen kapasiteettia on yksinkertaista kasvattaa lisäämällä tai leventämällä teräslevyjä sekä kiinnityspultteja.



KUVA 24. Esimerkki siltajohdeiden jatkosliitoksesta kaidepylvääseen

Kohdissa joissa siltajohdetta ei tarvitse jatkaa käytetään samantyylistä liitosta, mutta halkaisijaltaan pienempiä pultteja eikä pituussuuntaisia muodonmuutoksia lämpötilasta ja kosteudesta tarvitse huomioida.

Pulttiliitosten suunnittelu pätee liitoksiin, joissa käytetään pultteja joiden suurin halkaisija on alle 24 mm ja lujuusluokka 8.8.



KUVA 25. Esimerkki siltajohteiden jatkosliitoksesta kaidepylvääseen

Kuvassa 25 on esitetty liimapuiseen siltajohteeseen kolotut teräslevyt ja levyjen väliin jäävän ehjän puun leveys. Teräslevyjen ulkopuolelle jäävän osan pinta-ala puusta pitää vähentää johteen vetokapasiteetista.

TAULUKKO 18. Pulttien minimivälit ja –reunaetäisyydet (Metsä Wood 2012).

PULTTIEN LIITINVÄLIT SEKÄ REUNA- JA PÄÄTYETÄISYYDET	KULMA	SAHATAVARAN JA LIIMAPUUN VÄHIMMÄISARVOT
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4 d^1)$
a_{3t}	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7 d; 80 \text{ mm})$
a_{3c}	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha) d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4 d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha) d$
a_{4t}	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max((2 + 2 \sin \alpha) d; 3 d)$
a_{4c}	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 d$

1) Lohkeamismurto tulee tarkastaa myös puuosien välisissä liitoksissa, jos $a_2 < 5d$.

Tässä liitoksessa pulteilla pitää olla leikkauskapasiteettia kestämaan johteessa vaikuttava veto. Puujohteiden massiivisissa poikkileikkauksissa on vetokapasiteetissa hyvin varmuutta, joten ei ole mielekästä mitoittaa liitosta sen mukaan. Tässä esimerkissä lasketaan vain neljän pultin kestävyys, jotta saadaan kuva siitä kuinka paljon liitokselle voidaan voimia mitoittaa.

Kestävyyden mitoitusarvo RIL 205-1-2009 2.4.3:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M}, \quad (18.)$$

missä

k_{mod} on kerroin, jolla otetaan huomioon kosteuden määrä ja kuorman kesto

R_k on kestävyyden ominaiskapasiteetti

γ_M on materiaalin osavarmuusluku

Kestävyyden mitoitusarvon kaava pätee puuliitoksissa oleviin liittimiin kuten pultteihin, ruuveihin ja nauloihin.

2-leikkeinen pulttiliitos RIL 205-1-2009 8.5.1:

$$R_k = \min; \left(0,5 \cdot f_h \cdot t \cdot d; 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}; 3 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d} \right), \quad (19.)$$

$$f_h = \min; (f_{h,1,k}; f_{h,2,k}; f_{h,s,k}), \quad (20.)$$

$$M_y = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (21.)$$

missä

f_h on teräslevyn puristuskestävyys kuorman suunnassa

t on teräslevyjen välissä olevan puun paksuus

d on pultin halkaisija

M_y on pultin momentin myötöraja

Teräslevyn vetokestävyys tutkitaan levyn ehjältä ja rei'itetyltä osuudelta, levyn vetokestävyys tulee olla suurempi kuin pulttien leikkauskapasiteetti:

$$N_{t,Rd} = \min; (N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}), \quad (22.)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (23.)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (24.)$$

missä

$N_{pl,Rd}$	on bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo
$N_{u,Rd}$	on nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo reikien kohdalla
A	on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala
f_y	on teräksen myötöraja
A_{net}	on nettopoikkileikkauksen pinta-ala
f_u	on teräksen murtoraja
γ_M	on materiaalin osavarmuusluku
γ_{M2}	on materiaalin osavarmuusluku

Lohkeamismurto RIL 205-1-2009 8.4.2S:

$$F_{bt,k} = L_{net,t} \cdot t_1 \cdot k_{bt} \cdot f_{t,0,k}, \quad (25.)$$

$$L_{net,t} = (n_2 - 1) \cdot (a_2 - D) \quad (26.)$$

missä

$L_{net,t}$	on tehollinen liitinrivin matka
t_1	on pultin tunkeuma
k_{bt}	on 1,5 liimapuulle
$f_{t,0,k}$	on liimapuun ominaisvetokestävyys syiden suunnassa
n_2	on liitinrivien määrä puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa
a_2	on liitinrivien välinen etäisyys puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa
D	on reiän halkaisija

Tälle liitokselle ei tarkastella palalohkeamista, koska suunnitellussa liitoksessa pultit ulottuvat koko puun paksuuden mitan verran eikä palalohkeamista voi tapahtua. Johteen liitosten teräslevyt tarkastellaan tässä työssä vain vetokestävyyden osalta ja liitoksen pulteilta leikkauskestävyys.

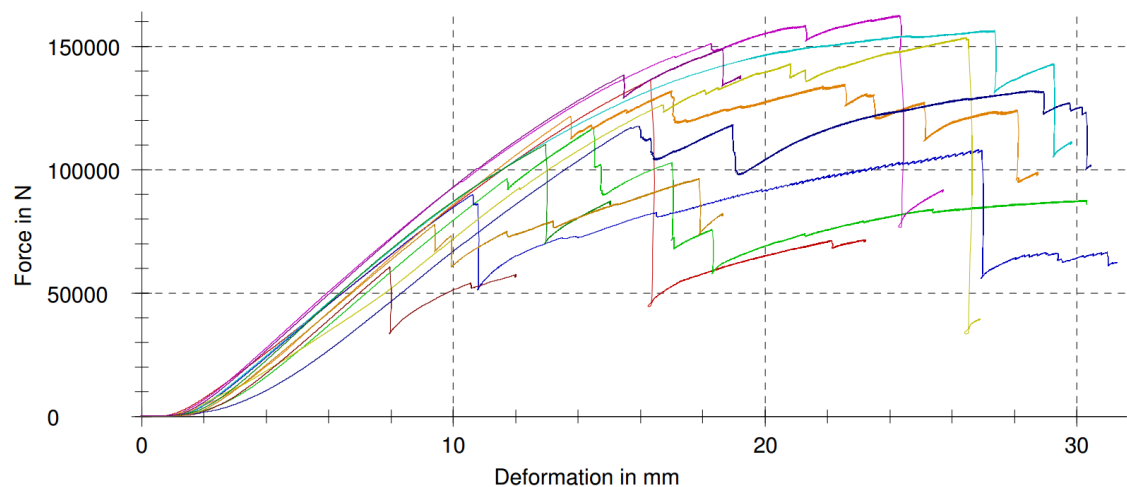
Esimerkkikaiteen mukaisilla pulteilla saataisiin siltajohteen jatkosliitokselle vetokapasiteettia noin 176 kN neljällä M16 pultilla, mikä on alle puolet teräslevyjen 338 kN:in vetokapasiteetista, mutta ylittää vaaditun tason 80 kN.

6 POHDINTA

6.1 Puun plastinen käyttäytyminen

Terästä ja puuta materiaaleina on jo hankala verrata keskenänsä, koska teräs on hyvin isotrooppinen ja tasalaatuinen materiaali ja puu taas ortotrooppinen materiaali, jossa esiintyy paljon vikaisuutta ja hajontaa lujuuksissa.

Puun lujuuteen vaikuttaa myös niin kutsuttu volyyymiefekti. Volyymiefektillä tarkoitetaan ilmiötä, joka vähentää puun veto- ja taivutuslujuutta poikkileikkauksen koon kasvaessa, vaikka suurempi poikkileikkaus kuitenkin kasvattaa kokonaiskapasiteetteja. Korkeammalla poikkileikkauksella ja pidemmällä kappaleella esiintyy suurempi määrä puun vikoja kuten oksia ja hartsitaskuja, joilla on suuri vaikutus puun vetolujuuteen, mutta ei niinkään puristuslujuuteen. Virheettömän puun vetolujuus on luokkaa 90 – 100 N/mm², kun taas Eurokoodin ilmoittama 5-persentiilin ominaislujuus on suuruusluokassa 20 – 25 N/mm². (Maurice Brunner.)

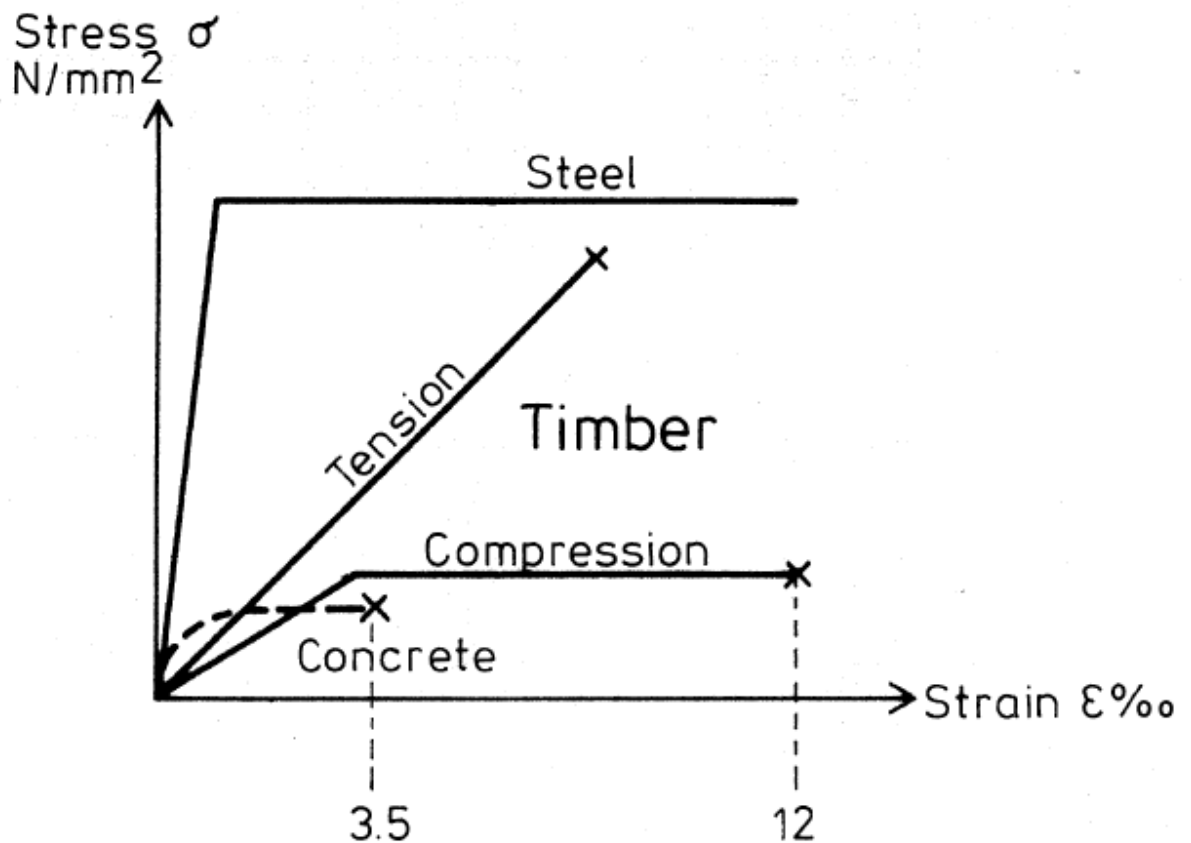


KUVA 26. Tampereen ammattikorkeakoululla koestettujen 90x270 GL32c liimapuu-palkkien koestustuloksia, kuormitettu kahdesta pisteestä.

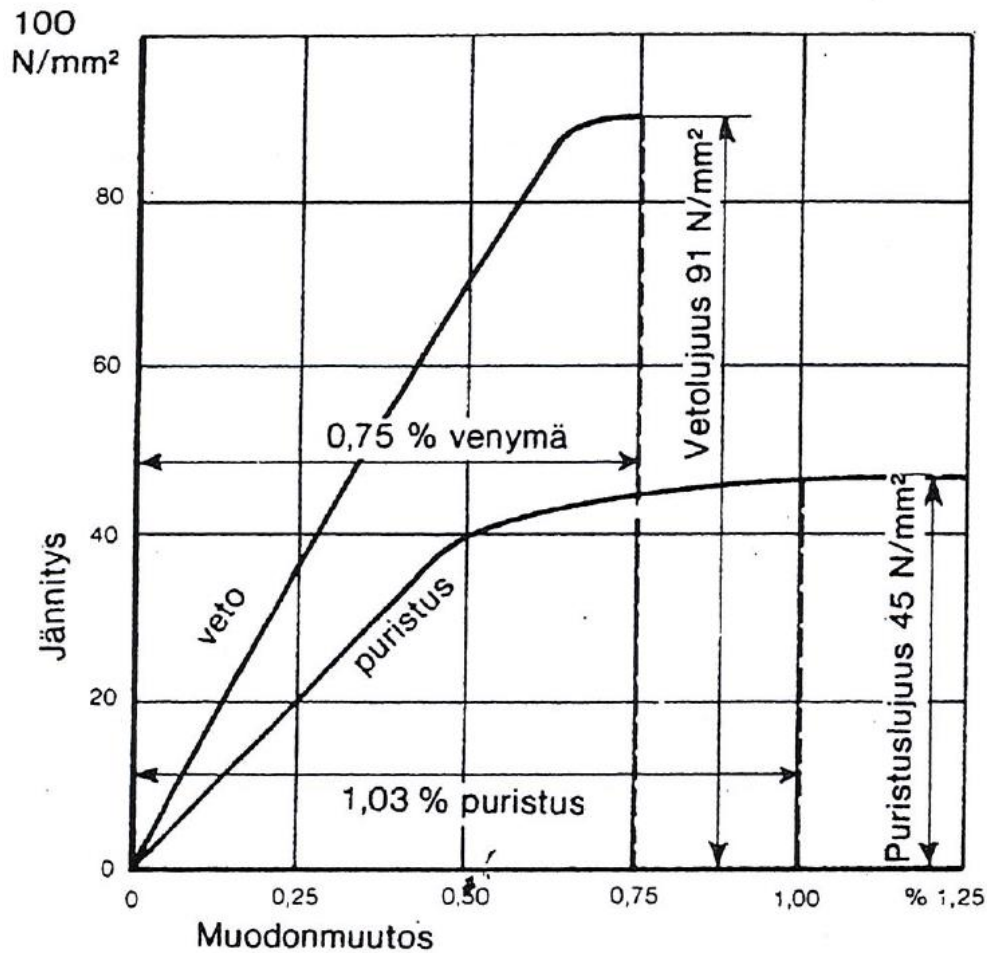
Eurokoodi ottaa puun plastisoitumisen taivutuksessa osittain huomioon standardissa EN-SFS 1995-1-1 ilmoitetulla erillisellä taivutuslujuudella ($f_{m,k}$). Teräksen plastisoitumisella taas saadaan karkeasti 1,5 – kertaisia lujuuksia kimmoiseen lujuuteen verrattuna suora-kaidepoikkileikkauksilla. Leikkauslujuudessa on myös valtava ero; teräs kestää leikkausjännitystä useita kymmeniä kertoja enemmän kuin puu teräslaadusta riippuen. Puun lu-

juudet ja murtumistavat vaihtelevat joka suuntaan, kun taas teräs on hyvin sitkeä ja murtuu johdonmukaisesti lähes jokaisella kuormitustavalla eikä lujuuksissa ole suuria vaihteluita. (Maurice Brunner.) Eri materiaalien murtokäyttäytymistä kuvaavat kuvaajat löytyvät kuvista 27 sekä 28.

Puristusmurto on puulla usein sitkeä, mutta veto- ja leikkausmurto hauras. Leikkausmurtossa puupalkki halkeaa pituussuunnassa. Halkeilun jälkeen osat toimivat kuten kaksi tai useampi erillistä palkkia. Halkeilua tapahtuu niin pitkään, että se murtuu lopulta taivutuksesta. Kuvassa 26 on tästä esimerkki koetuloksena; leikkausmurtion jälkeen puun lujuus sahaa edestakaisin, koska jännityksen jakaantuvat uudelleen leikkausmurtion jälkeen osien kesken. Kokeet eivät liittyneet tähän opinnäytetyöhön, niiden tarkoitus oli selvittää leikkaushalkeilleen liimapuupalkin vahvistusmenetelmiä. Kokeista sai kuitenkin hyvän käsityksen siitä, miten liimapuinen palkki käyttäytyy murtuessaan.



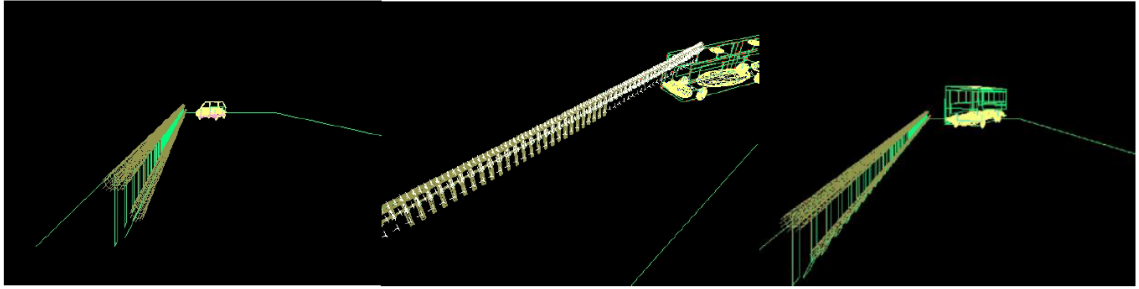
KUVA 27. Periaatteellisia kuvaajia teräksen, betonin ja puun käyttäytymisestä kuormitettuna (Maurice Brunner).



KUVA 28. Puun muodonmuutokset veto- ja puristuskokeessa.

6.2 Puukaiteiden toiminta

Luotettavien törmäyssimulointimenetelmien kehittäminen puukaidesuunnitteluun voisi viedä puukaiteiden laajempaa käyttöönottoa merkittävästi eteenpäin, jolloin kynnyksen testattua puisia kaiderakenteita olisi matalampi. Norjan liikenneviranomaisten tilaamassa tutkimuksessa sillankaiteesta (Force Technology, 2008), jolla on teräksiset kaidepylväät ja puujohteet, simuloitiin puun käyttäytymistä. Puujohteiden toiminta varmennettiin laboratoriotesteillä; johteet hävittivät murtoon mennessä noin 4300 joulea energiaa ja taipuivat yli 170 mm. Kuten teräksellä, puun suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat plastisella alueella, mikä toistaiseksi puulle huomioidaan Eurokoodissa suppeasti. Koko kaiderakenne läpäisi simulaatiossa vaatimukset H2 –törmäysluokkaan TB11 ja TB51 testeillä. Suurimmat kiihtyvyydet matkustajille pysyivät noin 10 g:n tasolla, mikä on vielä hyvin turvallinen taso. Kuvan 29 kuvankaappaus törmäyssimulaatiosta ei liity Force Technologyn työhön vaan Hollannissa tutkittuun puiseen tiekaiteeseen.



KUVA 29. Kuvankaappaus Hollannin puutiekaiteen dynaamisista simuloinneista MADDYMO –ohjelmalla (van de Kuilen, J. W. G.).

Nykyinen perusta törmäyskestävien sillankaiteiden suunnittelussa on liittää sillankanteen jäykästi kaidepylväs ja johteet, jotka hävittävät kaiken törmäysenergian. On myös mahdollista sijoittaa törmäysvaimentimia sillan ja kaiteiden liitoksiin sekä kaideosien välisiin liitoksiin, jolloin kaiteilta saadaan helpommin ennakoitavaa käyttäytymistä törmäystilanteessa ja pienempiä kiihtyvyyssarvoja. Hollannissa käytössä oleva puinen tiekaide on hyvä esimerkki innovatiivisesta törmäysvaimentimen käytöstä.

6.3 Kehitysehdotuksia

Tässä työssä laskettuja teräs- ja puurakenneosia vertaillen käy ilmi, että puu on käyttökelpoinen materiaali myös sillankaiteisiin, joiden pitää toimia turvakaiteena törmäystilanteessa. Suurimmat syyt siihen miksi puuta ei juuri käytetä löytyvät oletettavasti riittävän tahtotilan ja puun materiaalitietouden puutteesta sekä hankkeen suurista alkukustannuksista. On myös mahdollista, että kaiteessa käytettävänä puulajina pitäisi käyttää jotain muuta kuin suomalaista mäntyä ja kuusta kuten Hollannin tiekaiteessa oli päädytty käyttämään ulkomaisia kovia puulajeja. Toki tässä työssä jää kaiteiden kokonaistoiminta selvittämättä eikä pelkästään rakenneosien kimmoisella vertailulla voida esittää, että puukaide on aivan varmasti täysin toimiva. Kokonaisuuteen vaikuttaa muutenkin koko kaiteen yhteistoiminta sekä myös ajoneuvojen muodonmuutokset törmäystilanteessa. Nykyaikaiset autot on lähes poikkeuksetta varusteltu törmäystä vaimentavilla rakenteilla.

Liikenneviraston kaiteita koskevissa määräyksissä vaaditaan vain kapasiteetteja, jotka ovat sinänsä huonoja vertailuarvoja rakenteelle jonka osilta riittävä dynaaminen toiminta

on avainasemassa. Tässäkin työssä esitetyt törmäysenergia arvot voisivat tulla näiden kapasiteettien tilalle tai rinnalle. Törmäyskestävien kaiteiden muunteluun on muutenkin huomattavasti korkeammat kapasiteettivaatimukset kuin taajamanopeuksille, joiden vaaditut arvot ovat hyvinkin matalia. Kapasiteetti vaatimuksina törmäyskestäville kaiteille on muun muassa 350 kN leikkauskapasiteetti, 400 kN vetokapasiteetti sekä 14 kNm taivutuskapasiteetti. Molemmat ääripäät ovat ehkä hieman epärealistisia ja kaidesuunnittelu hyötyisi määräyksien uusimisesta. Tosin turvallisuudelle tärkeiden osien kannalta ylimittaus ei aina ole haitaksi.

LÄHTEET

Brunner, M. On The Plastic Design of Timber Beams with A Complex Cross-Section.

Force Technology, 2008. H2 simulation of a bridge guardrail with wood rails installed on a wood deck.

Norwegian Public Roads Administration, 2008.

Harju, T. taitorakenneyksikkö, 2016. Opinnäytetyö puisista sillankaiteista, sähköposti-viesti tomi.harju@liikennevirasto.fi. Luettu 4.4.2016.

Järvinen, V. 2004. Development of Vehicle Parapets with Safe Impact Performance for Bridges. Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja.

Laura Heinänen 2014, Suomalaisen puusiltarakentamisen mahdollisuudet ja haasteet.

Manual N101E: Vehicle Restraint Systems and Roadside Areas, 2011.
Norwegian Public Roads Administration, Norja 2014.

Nordic Innovation 1:2002 Nordic wood –special.

Pulttiliitosten mitoitus, KERTO-käsikirja, Metsä Wood.

Puuinfo, Puusillat. Luettu 4.4.2016.

<http://www.puuinfo.fi/puutieto/puusillat>

RIL 205-1-2009, 2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Rakennusinsinööriliitto, Helsinki.

SFS-EN 1317-2, 24.1.2011. Road restraint systems. Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets.

SFS-EN 1317-5, 29.10.2012. Kaiteet ja törmäysvaimentimet. Osa 5: Tuotevaatimukset, kestävyys ja vaatimustenmukaisuuden arviointi

SFS-EN 1993-1-1, 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

SFS-EN 1995-1-1, 2014. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Siltojen kaiteet 2012. Liikenneviraston ohjeita 25/2012
Liikennevirasto, Helsinki 2012

Tertu Equipments, T40 Bridge Parapet. Luettu 15.3.2016.

<http://www.tertu.com/en/roads/safe-itineraries-guardrails-protections/t40-bp-guardrails/>

Tiekaiteiden suunnittelu 2013, Liikenneviraston ohjeita 27/2013.
Liikennevirasto, Helsinki 2013.

Rail Systems for Timber Decks, 1958.

van de Kuilen, J. W. G. The first full timber guardrail for highways, Erste Leitplanke aus Vollholz für Straßenklasse Autobahn.

Vehicular Parapet Design, Chapter 9. Hong Kong.

LIITTEET

Liite 1. Rakenneosien ja liitosten laskenta

1 (9)

TAULUKKO 11. GL32h liimapuun lujuusarvoja, yksikkö N/mm²

E	G	$f_{v,k}$	$f_{m,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{v,d}$	$f_{m,d}$	$f_{c,0,d}$	$f_{t,d}$
13 700	850	3,8	32	29	3,3	22,5	3,42	28,8	26,1	20,25

Laskentalujuus:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4.)$$

Laskentaleikkauslujuus:

$$f_{v,d} = 0,9 \frac{3,8}{1,0} = 3,42 \text{ N/mm}^2$$

Laskentataivutuslujuus:

$$f_{m,d} = 0,9 \frac{32}{1,0} = 28,9 \text{ N/mm}^2$$

Laskentapuristuslujuus syysuunnassa:

$$f_{c,0,d} = 0,9 \frac{29}{1,0} = 26,1 \text{ N/mm}^2$$

Laskentavetolujuus syysuunnassa:

$$f_{t,0,d} = 0,9 \frac{22,5}{1,0} = 20,25 \text{ N/mm}^2$$

Liite 1. Rakenneosien ja liitosten laskenta

2 (9)

Alustavat dimensiot:

$$h = \sqrt[3]{\frac{EI_v}{\frac{E \cdot 12}{b}}} \quad (5.)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{90 \text{ kNm}^2}{\frac{13\,800 \text{ N/mm}^2 \cdot 12}{140 \text{ mm}}}} = 82 \text{ mm} \quad (5.)$$

Jäyhyysmomentti:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (6.)$$

Jäyhyysmomentti 140x80:

$$I = \frac{140 \cdot 80^3}{12} = 5\,973\,333,33 \text{ mm}^3$$

Jäyhyysmomentti 140x180:

$$I = \frac{140 \cdot 180^3}{12} = 68\,040\,000 \text{ mm}^3$$

Jäyhyysmomentti 140x270:

$$I = \frac{140 \cdot 270^3}{12} = 229\,635\,000 \text{ mm}^3$$

Teräspoikkileikkausten jäyhyysmomentit on hyvin pitkälti taulukoitu.

Leikkauskapasiteetti:

$$V_{Rd} = \frac{f_{v,d} \cdot h \cdot b_{eff}}{1,5} \quad (7.)$$

Leikkauskapasiteetti 140x80 GL32h:

$$V_{Rd} = \frac{3,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 80 \text{ mm} \cdot 140 \text{ mm}}{1,5} = 25,50 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti 140x180 GL32h:

$$V_{Rd} = \frac{3,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 180 \text{ mm} \cdot 140 \text{ mm}}{1,5} = 57,50 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti 140x270 GL32h:

$$V_{Rd} = \frac{3,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 270 \text{ mm} \cdot 140 \text{ mm}}{1,5} = 86,20 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti 140x540 GL32h:

$$V_{Rd} = \frac{3,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 540 \text{ mm} \cdot 140 \text{ mm}}{1,5} = 172,4 \text{ kN}$$

Taivutuskapasiteetti:

$$M_{C,Rd} = f_{m,d} \cdot W \quad (8.)$$

Taivutuskapasiteetti vahvemmassa suunnassa 140x80 GL32h:

$$M_{C,y,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 149\,333,33 \text{ mm}^4 = 4,30 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti vahvemmassa suunnassa 140x180 GL32h:

$$M_{C,y,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 756\,000 \text{ mm}^4 = 21,80 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti vahvemmassa suunnassa 140x270 GL32h:

$$M_{C,y,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 1\,701\,000 \text{ mm}^4 = 49,0 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti vahvemmassa suunnassa 140x270 GL32h:

$$M_{C,y,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 6\,804\,000 \text{ mm}^4 = 196,0 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti heikommassa suunnassa 140x80 GL32h:

$$M_{C,x,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 261\,333,33 \text{ mm}^4 = 7,50 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti heikommassa suunnassa 140x180 GL32h:

$$M_{C,x,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 588\,000 \text{ mm}^4 = 16,90 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti heikommassa suunnassa 140x270 GL32h:

$$M_{C,x,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 882\,000 \text{ mm}^4 = 25,40 \text{ kNm}$$

Taivutuskapasiteetti heikommassa suunnassa 140x270 GL32h:

$$M_{C,x,Rd} = 28,8 \text{ N/mm}^2 \cdot 1\,764\,000 \text{ mm}^4 = 50,80 \text{ kNm}$$

Vetokapasiteetti:

$$N_{t,Rd} = f_{t,0,d} \cdot b \cdot h \quad (9.)$$

Vetokapasiteetti 140x270 GL32h:

$$N_{t,Rd} = 20,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 140 \text{ mm} \cdot 270 \text{ mm} = 765,50 \text{ kN}$$

Vetokapasiteetti 140x540 GL32h:

$$N_{t,Rd} = 20,25 \text{ N/mm}^2 \cdot 140 \text{ mm} \cdot 540 \text{ mm} = 1530,90 \text{ kN}$$

Vetokapasiteetti S355 P88,9x4:

$$N_{t,Rd} = 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 1067 \text{ mm}^2 = 378,80 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_M} \quad (10.)$$

Leikkauskapasiteetti S235 50x60:

$$V_{pl,Rd} = \frac{50 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm} (235 \text{ N/mm}^2/\sqrt{3})}{1,0} = 407 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti S355 80x100x5:

$$V_{pl,Rd} = \frac{909 \text{ mm}^2 (355 \text{ N/mm}^2/\sqrt{3})}{1,0} = 186,30 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti S355 P88,9x4:

$$V_{pl,Rd} = \frac{679,30 \text{ mm}^2 (355 \text{ N/mm}^2/\sqrt{3})}{1,0} = 139,20 \text{ kN}$$

Leikkauskapasiteetti S355 HEA 100:

$$V_{pl,Rd} = \frac{756 \text{ mm}^2 (355 \text{ N/mm}^2/\sqrt{3})}{1,0} = 154,90 \text{ kN}$$

Valssaamalla valmistetun suorakaiteen muotoisen rakenneputken leikkauspinta-ala:

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} \quad (11.)$$

Leikkauspinta-ala 80x100x5:

$$A_v = \frac{1636 \text{ mm}^2 \cdot 100 \text{ mm}}{(80 + 100 \text{ mm})} = 909 \text{ mm}^2$$

Pyöreälle rakenneputkelle:

$$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi} \quad (12.)$$

Leikkauspinta-ala P88,9x4:

$$A_v = \frac{2 \cdot 1067 \text{ mm}^2}{\pi} = 679,30 \text{ mm}^2$$

Kimmoinen taivutuskapasiteetti teräkselle:

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_M}, \quad (13.)$$

Kimmoinen taivutuskapasiteetti 50x60 S235 molempiin suuntiin:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{30\,000 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 7,10 \text{ kNm}$$

$$M_{el,x,Rd} = \frac{25\,000 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 5,90 \text{ kNm}$$

Kimmoinen taivutuskapasiteetti 100x80x5 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{45\,190 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 17,0 \text{ kNm}$$

$$M_{el,x,Rd} = \frac{39\,900 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 14,0 \text{ kNm}$$

Liite 1. Rakenneosien ja liitosten laskenta

6(9)

Kimmainen taivutuskapasiteetti P88,9x4 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{el,Rd} = \frac{21\,670 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 7,70 \text{ kNm}$$

Kimmainen taivutuskapasiteetti HEA 100 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{72\,760 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 25,80 \text{ kNm}$$

$$M_{el,x,Rd} = \frac{26\,760 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 9,5 \text{ kNm}$$

Plastinen taivutuskapasiteetti teräkselle:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_M}, \quad (14.)$$

Plastinen taivutuskapasiteetti 50x60 S235 molempiin suuntiin:

$$M_{pl,Rd} = \frac{45\,000 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 10,60 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{37\,500 \text{ mm}^3 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 8,80 \text{ kNm}$$

Plastinen taivutuskapasiteetti 100x80x5 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{pl,Rd} = \frac{55\,090 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 19,60 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{47\,240 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 16,80 \text{ kNm}$$

Plastinen taivutuskapasiteetti P88,9x4 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{pl,Rd} = \frac{28\,850 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 10,20 \text{ kNm}$$

Plastinen taivutuskapasiteetti HEA 100 S355 molempiin suuntiin:

$$M_{pl,Rd} = \frac{83\,010 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 29,50 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{41\,140 \text{ mm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 14,60 \text{ kNm}$$

Ulokepalkin taipuma kimmoisalla alueella:

$$f = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (15.)$$

Laskujen määrän takia vain esimerkit puusta ja teräksestä esitettyinä:

140x270 GL32h:

$$f = \frac{81\,700 \text{ N} \cdot 600^3 \text{ mm}}{3 \cdot 13\,800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 229\,635\,000 \text{ mm}^4} = 1,87 \text{ mm}$$

50x60 S235:

$$f = \frac{17\,700 \text{ N} \cdot 600^3 \text{ mm}}{3 \cdot 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 900\,000 \text{ mm}^4} = 6,74 \text{ mm}$$

Vedetty pultti:

$$N_{pl,Rd} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot 0,78 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (17.)$$

Vetokestävyys M12 8.8:

$$N_{pl,Rd} = \frac{\pi \cdot 6^2 \text{ mm} \cdot 0,78 \cdot 640 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 56,50 \text{ kN}$$

Kestävyuden mitoitusarvo RIL 205-1-2009 2.4.3:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (18.)$$

2-leikkeinen pulttiliitos RIL 205-1-2009 8.5.1:

$$R_k = \min; \left(0,5 \cdot f_h \cdot t \cdot d; 2 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d}; 3 \cdot \sqrt{M_y \cdot f_h \cdot d} \right) \quad (19.)$$

$$f_h = \min; (f_{h,1,k}; f_{h,2,k}; f_{h,s,k}), \quad (20.)$$

$$M_y = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (21.)$$

M16 8.8 pultti:

$$R_k = \min; \left(\begin{array}{l} 0,5 \cdot 29 \frac{\text{N}^2}{\text{mm}} \cdot 110 \text{ mm} \cdot 16 \text{ mm}; \\ 2 \cdot \sqrt{324\,282,30 \text{ Nmm} \cdot 29 \frac{\text{N}^2}{\text{mm}} \cdot 16 \text{ mm};} \\ 3 \cdot \sqrt{324\,282,30 \text{ Nmm} \cdot 29 \frac{\text{N}^2}{\text{mm}_h} \cdot 16 \text{ mm}} \end{array} \right) = 24\,533 \text{ N}$$

$$R_{d,M16} = 0,9 \frac{24\,533 \text{ N}}{1,0} = 22\,078 \text{ N}$$

Teräslevyn vetokestävyys:

$$N_{t,Rd} = \min; (N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}), \quad (22.)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (23.)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (24.)$$

Liite 1. Rakenneosien ja liitosten laskenta

9(9)

Teräslevy 60x6x510 S235:

$$N_{pl,Rd} = \frac{360 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 84,60 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot 344 \text{ mm}^2 \cdot 360 \text{ N/mm}^2}{1,25} = 89,30 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \min; (N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}) = 84,60 \text{ kN}$$

Lohkeamismurto RIL 205-1-2009 8.4.2S:

$$F_{bt,k} = L_{net,t} \cdot t_1 \cdot k_{bt} \cdot f_{t,0,k} \quad (25.)$$

$$L_{net,t} = (n_2 - 1) \cdot (a_2 - D) \quad (26.)$$

Lohkeamismurto 140x540 GL32h –johteessa:

$$F_{bt,k} = 382 \text{ mm} \cdot 110 \text{ mm} \cdot 1,5 \cdot 22,5 \text{ N/mm}^2 = 1418,20 \text{ kN}$$

$$L_{net,t} = (2 - 1) \cdot (400 \text{ mm} - 16 \text{ mm}) = 382 \text{ mm}$$



Lightweight, Constant Force Energy Absorber

Plascore CrushLite™ is a lightweight aluminum honeycomb core material which is certified to specific crush strengths for energy absorption applications. CrushLite™ yields at a constant force providing reliable and consistent energy absorption in almost any environment.

Available with or without precrush in a wide range of sheet sizes, cut to size, or machined to complex shapes. CrushLite™ can be used as-is, or easily integrated into many applications requiring uni-axial deformable energy absorption.

Features

- Predictable energy absorption properties
- High crush strength-to-weight ratio
- Efficient constant force crush curve
- Wide range of strengths available
- Crush stroke in excess of 70%
- Excellent moisture and corrosion resistance
- Elevated use temperatures

Applications

Aerospace – Improves crashworthiness protection in seating, or acts as a single event shock absorber for impact protection without adding significant weight.

Calibration – Drives the deceleration pulse required to calibrate crash test dummies. Certified for consistent test results.

Defense – Serves as both a structural and a crushable member providing dual benefits for support and blast mitigation in areas such as doors, floors, seats, and storage areas for tactical vehicles.

Dynamic Testing – Configure sled test decelerators quickly by varying the cross section of the crushable impact area to change the G load of the shock pulse.

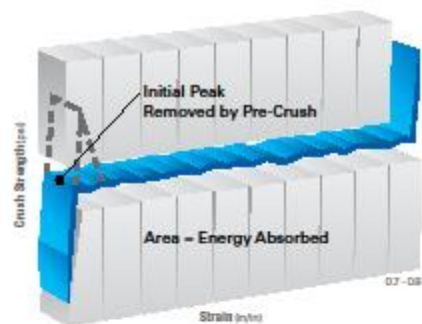
Industrial Safety – Provides reliable drop protection that doesn't require service or maintenance. Limits loads to prevent equipment failure or injury.

Shipping Protection – Protects sensitive shipping contents such as nuclear materials or delicate equipment. Precise crush strength and high service temperatures facilitate use in many environments with minimal impact on the shipping weight.

Transportation – Attenuates impact in Automotive and Rail applications where lightweight, high-performance energy absorption is critical for safety.



CrushLite™ absorbs energy by crushing under load

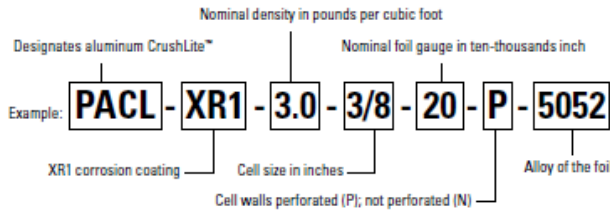


Constant force vs. displacement curve provides efficient lightweight energy absorption unique to aluminum honeycomb

PLASCORE®

CrushLite™ is specified as follows:

Trade Name - Corrosion Coating - Density - Cell Size - Foil Gauge - Perforation - Alloy



Availability:


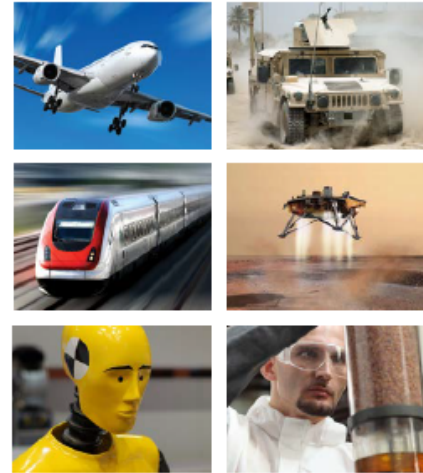
CrushLite™ aluminum honeycomb is available in untrimmed sheets, cut to size, machined, or die cut. Precrushing, load certification, and other operations are available upon request.

- Cell Sizes: 1/8" - 1"
- Densities: 0.6 pcf – 8.1 pcf
- Sheet "Ribbon" (L): 48" typical maximum
- Sheet "Transverse" (W): 96" typical maximum
- Sheet "Thickness" (T): up to 32" maximum

NOTE: Maximum sheet size, thickness, and precrush may be limited on certain core types. Contact a Plascore Representative to determine availability.

Plascore Honeycomb Designation				Crush Properties			
Nominal Density lbs/ft ³	Cell Size (Inch)	Foil Gauge (Inch)	Available in Perforated	Foil Alloy	Crush Strength ¹ (psi)	Standard Crush Tolerance (+/- psi)	Minimum Stroke ² (%)
0.6	3/4	.0007	+	5052	7.5	2.5	70
1.0	1	.002	+	3003	10	2	70
1.4	1	.003	+	3003	25	5	70
1.0	3/8	.0007	+	5052	25	5	70
1.0	3/8	.0007	+	5056	35	5	70
1.6	3/8	.001	+	5052	45	4.5	70
1.8	3/4	.003	+	3003	45	4.5	70
1.6	1/4	.0007	+	5056	50	5	70
2.0	3/16	.0007	+	5052	75	7.5	70
2.3	3/8	.0015	+	5052	80	8	70
2.3	1/4	.001	+	5052	90	9	70
2.3	1/4	.001	+	5056	100	10	70
3.0	3/8	.002	+	5052	120	12	70
3.6	3/8	.003	+	3003	120	12	70
3.1	1/8	.0007	+	5052	130	13	70
3.4	1/4	.0015	+	5052	140	14	70
3.1	1/8	.0007	+	5056	170	17	70
3.7	3/8	.0025		5052	180	18	70
4.2	3/8	.003		5052	210	21	70
4.3	1/4	.002	+	5052	230	23	70
5.2	1/4	.003	+	3003	245	24.5	70
4.5	1/8	.001	+	5052	275	27.5	70
4.5	1/8	.001	+	5056	320	32	70
5.2	1/4	.0025		5052	330	33	70
5.4	3/8	.004		5052	350	35	70
5.7	3/16	.002	+	5052	380	38	70
6.0	1/4	.003		5052	420	42	70
5.7	3/16	.002	+	5056	440	44	70
6.1	1/8	.0015	+	5052	450	45	70
6.1	1/8	.0015	+	5056	535	53.5	70
8.1	1/8	.002	+	5052	700	70	70
8.1	1/8	FC	+	5052	750	75	70

¹ Crush Strength
² Minimum Stroke
Tested per ASTM D7336

Corporate Headquarters

Plascore Incorporated

615 N. Fairview St.
Zeeland, MI 49454-0170
USA

Phone (616) 772-1220
Toll Free (800) 630-9257
Fax (616) 772-1289

Web www.plascore.com
Email sales@plascore.com

Europe

Plascore GmbH&CoKG

Feldborn 6
D-55444 Waldlaubersheim
Germany

Phone +49(0) 6707-9143 0
Fax +49(0) 6707-9143 40

Web www.plascore.de
Email sales.europe@plascore.com



Plascore, Inc., employs a quality management system that is AS/EN/ISO 9100, ISO 9001:2008 and ISO 14001:2004 certified.

IMPORTANT NOTICE: The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. **PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.** Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties. © 2015 Plascore, Inc. All Rights Reserved. v12.16.15

