

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2018

Erik Wihervuori

# KEVYIDEN SANDWICH- ELEMENTTIEN MITOITUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK / YAMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2018 | 65 sivua, 45 liitesivua

Erik Wihervuori

## KEVYIDEN SANDWICH-ELEMENTTIEN MITOITUS

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on esitellä kevyiden metalliohutlevys sandwich-elementtien mitoituksessa käytettäviä keinoja, sekä tehdä niiden pohjalta moniaukkoisen rakenteen Excel-laskentapohja. Työn aihe tuli Turun Pelti ja Eristys Oy:n tarpeesta moniaukkoisen sandwich-elementin mitoitus pohjalle.

Opinnäytetyöhön on kerätty SFS-EN 14509 ja ECCS:n ohjeita suunnitteluperusteista sekä paneeleissa käytetyistä materiaaleista ja testauksista. Euroopan teräsrakentamisen yhdistyksen tarkoitus on edistää standardisointia ja tutkimusta rakentamisessa. Standardi SFS-EN 14509 määrittää tehdasvalmisteisten metalliohutlevys sandwich-elementtien vaatimukset. Standardi perustuu ECCS:n julkaisemiin suunnitteluohjeisiin.

Työssä käsitellään elementtien materiaaleja ja miten ne vaikuttavat kestävyys, sekä elementtirakenteiden kuormitustapauksia ja suunnittelussa käytettäviä laskentamenetelmiä. Pintakerroksen- ja ydinmateriaalin ominaisuudet sekä niitä yhdistävän liimauksen lujuus vaikuttavat elementin mekaaniseen kestävyys.

Työhön on koottu kaikki kevyiden sandwich-elementtien suunnittelussa tarvittavat kaavat ja laskentamenetelmät. Työn lopussa on laskentaesimerkkejä ulkoseinän ja katon mitoitukseseen yksi- ja moniaukkoisena rakenteena.

### ASIASANAT:

rakennesuunnittelu, sandwich-elementti, PVP-elementti, moniaukkoinen rakenne, kevytrakennetekniikka

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil engineering

2018 | 65 pages, 45 pages in appendices

Erik Wihervuori

## DIMENSIONING LIGHTWEIGHT SANDWICH PANELS

The aim of this thesis was to present the methods used in design of lightweight metal faced sandwich panels, and on this basis to make an Excel based calculation table for continuous structure. The subject of the thesis was commissioned by Turun Pelti and Eristys Oy and their need for an excel based calculation table for continuous sandwich panel.

The thesis was compiled in accordance with SFS-EN 14509 and ECCS guidelines on design criteria, as well as materials and tests used in panels. The purpose of the European steel building association is to promote standardization and research in construction. The standard SFS-EN 14509 specifies the requirements for prefabricated sandwich panels. The standard is based on the design guidelines published by the ECCS.

The work deals with the materials of the elements and how they affect the durability of the panel, as well as the load cases of the structural elements and the calculation methods used in the design. The properties of the surface layer and the core material and the strength of the bonding between them affect the mechanical resistance of the element.

All the formulas and calculation methods necessary for the design of lightweight sandwich elements were compiled to this work. At the end of the work, there are design examples for dimensioning the outer wall and the roof as a single and continuous structure.

### KEYWORDS:

structural design, sandwich element, multi-span structure, lightweight construction

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET</b>	<b>9</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>10</b>
<b>2 ELEMENTTIEN KÄYTTÖKOHTEET</b>	<b>12</b>
2.1 Julkisivut	12
2.2 Väliseinät	16
2.3 Katot	17
<b>3 ELEMENTIN OMINAISUUDET JA MATERIAALIT</b>	<b>18</b>
3.1 Pintakerrokset	20
3.1.1 Teräs	20
3.1.2 Pinnoite	21
3.1.3 Ruostumaton teräs	21
3.1.4 Alumiini	21
3.1.5 Kupari	21
3.2 Ydinmateriaali	22
3.3 Liimat	22
<b>4 MEKAANINEN KESTÄVYYS</b>	<b>23</b>
4.1 Murtumismallit	24
4.2 Tukireaktiokestävyys	26
4.3 Taivutusmomentin ja tukivoiman yhteisvaikutus	27
4.4 Leikkautuminen	29
<b>5 SUUNNITTELUMENETELMÄT</b>	<b>31</b>
5.1 Yleistä	31
5.2 Rasitukset	32
5.3 Kuormat ja yhdistely	33
5.3.1 Säännöt	33
5.3.2 Yhdistelykertoimet	35
5.4 Osavarmuusluvut	36
5.5 Materiaalikertoimet	37
5.6 Rasituksien laskenta	38
5.6.1 Jännitysresultantit	39
5.6.2 Jännitys jakauma	40



5.7 Jännitykset	41
5.7.1 Vetojännitys	41
5.7.2 Taivutusjännitys	41
5.7.3 Leikkausjännitys	43
5.7.4 Puristusjännitys	44
5.8 Virumisluku	46
5.9 Liukukerroin	46
5.10 Kiinnikkeet	47
5.11 Aukot	50
<b>6 STATIIKKA</b>	<b>52</b>
6.1 Tasaiset jännevälit	54
6.1.1 Yksiaukkoisille	54
6.1.2 Kaksiaukkoisille	55
6.1.3 Kolmiaukkoisille	57
6.1.4 Profiloidulle pintalevyille.	59
6.2 Eripituiset jännevälit	61
<b>7 LASKENTAPOHJA</b>	<b>63</b>
<b>8 POHDINTA</b>	<b>64</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>66</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Yksiaukkoisen seinäelementin mitoitus.
- Liite 2. Kaksiaukkoisen seinäelementin mitoitus (kimmoteoria).
- Liite 3. Kaksiaukkoisen seinäelementin mitoitus (plastisuusteoria).
- Liite 4. Kaksiaukkoisen kattoelementin mitoitus (plastisuusteoria).
- Liite 5. Laskentaohjelman ulkoasu.

## KAAVAT

Kaava 1. Teräksisen pintalevyn suunnittelupaksuus.	23
Kaava 2. Taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus.	29
Kaava 3. Murtorajatilan ehto.	31
Kaava 4. Käyttörajatilan ehto.	31
Kaava 5. Rasitusten vaikutusten suunnittelu-arvo.	31
Kaava 6. Kestävyyden suunnittelu-arvo murtorajatilassa.	31

Kaava 7. Kuormien yhdistelysäntö murtorajatilassa.	34
Kaava 8. Harvinainen yhdistelmä käyttörajatilassa.	35
Kaava 9. Tavallinen yhdistelmä käyttörajatilassa.	35
Kaava 10. Lommahdusjännitys sileäpintaisille paneeleille.	42
Kaava 11. Lommahdusjännitys kevyesti kuvioidulle paneelille.	42
Kaava 12. Taivutusjännitys.	43
Kaava 13. Taivutusjännitys profiloidun pintalevyn yläpinnassa.	43
Kaava 14. Taivutusjännitys profiloidun pintalevyn alapinnassa.	43
Kaava 15. Leikkausjännitys sileäpintaisilla tai kevyesti profiloiduilla elementeillä.	44
Kaava 16. Leikkausjännitys profiloiduilla elementeillä.	44
Kaava 17. Päätytukireaktiokestävyys.	45
Kaava 18. Välitukireaktiokestävyys.	45
Kaava 19. Liukukertoimen alennettu arvo.	46
Kaava 20. Läpivetokestävyys poraruuville.	49
Kaava 21. Reunapuristuskestävyys.	49
Kaava 22. Läpivetokestävyys poraruuville (ECCS).	49
Kaava 23. Yksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.	54
Kaava 24. Yksiaukkoisen rakenteen momentti kentässä.	54
Kaava 25. Yksiaukkoisen rakenteen maksimitaipuma kentässä.	54
Kaava 26. Yksiaukkoisen rakenteen taipuma lämpötilaerosta.	55
Kaava 27. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.	55
Kaava 28. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla.	55
Kaava 29. Kaksiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituella.	55
Kaava 30. Kaksiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti kentässä.	55
Kaava 31. Kaksiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti välituella.	55
Kaava 32. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuen kohdalla lämpötilaerosta.	56
Kaava 33. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla lämpötilaerosta.	56
Kaava 34. Kaksiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituen kohdalla lämpötilaerosta.	56
Kaava 35. Kaksiaukkoisen rakenteen momentti kentässä lämpötilaerosta.	56
Kaava 36. Kaksiaukkoisen rakenteen momentti välituella lämpötilaerosta.	56
Kaava 37. Kaksiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä.	56
Kaava 38. Kaksiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä lämpötilaerosta.	57
Kaava 39. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.	57
Kaava 40. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla.	57
Kaava 41. Kolmiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituella.	57
Kaava 42. Kolmiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti kentässä.	57
Kaava 43. Kolmiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti välituella.	57
Kaava 44. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuen kohdalla lämpötilaerosta.	58
Kaava 45. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla lämpötilaerosta.	58
Kaava 46. Kolmiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituen kohdalla lämpötilaerosta.	58
Kaava 47. Kolmiaukkoisen rakenteen momentti kentässä lämpötilaerosta.	58
Kaava 48. Kolmiaukkoisen rakenteen momentti välituella lämpötilaerosta.	58
Kaava 49. Kolmiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä.	58
Kaava 50. Kolmiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä lämpötilaeroista.	59
Kaava 51. Sandwich-elementin taivutusjäykkyys.	59
Kaava 52. Pintakerroksen taivutusmomentti $MF1$ kentässä.	59
Kaava 53. Pintakerroksen taivutusmomentti $MF1$ kentässä lämpötilaeroista.	59
Kaava 54. sandwich-osan taivutusmomentti $MS$ kentässä.	60
Kaava 55. Pintakerroksen taivutusmomentti $MS$ kentässä lämpötilaeroista.	60
Kaava 56. Profiloidun elementin taipuma.	60
Kaava 57. Profiloidun elementin taipuma lämpötilaeroista.	60
Kaava 58. Beta-kerroin lämpötilakuormalle.	60
Kaava 59. Beta-kerroin tasaiselle kuormalle.	60
Kaava 60. Kolmen momentin yhtälö.	61
Kaava 61. Päätepisteen rotaatio tasaiselle kuormalle.	61

Kaava 62. Eripituisten jännevälien momentti keskituella.	62
Kaava 63. Leikkausvoiman yhtälö.	62
Kaava 64. Leikkausvoiman 0-kohta.	62

## KUVAT

Kuva 1. TPE Spirit Panel-elementin jännevälikäyrästä.	12
Kuva 2. Julkisivun elementit.	13
Kuva 3. TPE Spirit vakiodetalji D-10.	14
Kuva 4. TPE Spirit vakiodetalji D-20.	15
Kuva 5. TPE Spirit vakiodetalji D-30.	16
Kuva 6. Sileä tai kevyesti profiloitu poikkileikkaus.	18
Kuva 7. Profiloitu poikkileikkaus.	19
Kuva 8. Leikkautuminen.	24
Kuva 9. Puristuminen.	24
Kuva 10. Lommahtaminen.	25
Kuva 11. Paneelin lommahdustesti.	25
Kuva 12. Tukipainejakautuminen murtorajatilassa.	26
Kuva 13. Puristusjännitys jakauma.	27
Kuva 14. Paikallinen taivutusmomentti.	28
Kuva 15. Taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus.	28
Kuva 16. Paneelin leikkautuminen.	30
Kuva 17. Sileäpintaisen elementin jännitysresultantit.	39
Kuva 18. Profiloitujen elementtien jännitysresultantit.	40
Kuva 19. Sileä tai kevyesti profiloitujen sandwich-elementtien jännitys jakauma.	40
Kuva 20. Profiloitujen sandwich-elementtien jännitys jakauma.	41
Kuva 21. Vetojännitys.	41
Kuva 22. Pintalevyn lommahtaminen.	42
Kuva 23. Leikkausjännitys.	44
Kuva 24. Tukireaktio.	45
Kuva 25. TPE Spirit detalji D23.	47
Kuva 26. Ruuvien läpileikkautuminen.	48
Kuva 27. Kuormien jakaantuminen aukon läheisyydessä.	51
Kuva 28. Tukireaktiot tuulenpaineesta.	52
Kuva 29. Momenttikuvio tuulenpaineesta.	52
Kuva 30. Leikkausvoimakuvio tuulenpaineesta.	53
Kuva 31. Tukireaktiot talviajan kaareutumisesta.	53
Kuva 32. Talviajan kaareutumisesta aiheutuva momenttikuvio.	53

## TAULUKOT

Taulukko 1. Elementtien mittatoleranssit.	20
Taulukko 2. Rasiusten suunnittelu arvot murtorajatilassa.	33
Taulukko 3. Rasiusten suunnittelu arvot käyttörajoissa.	35
Taulukko 4. Yhdistelykertoimet.	36

Taulukko 5. SFS-EN 1990 yhdistelykertoimet.	36
Taulukko 6. Kuormien osavarmuusluvut.	36
Taulukko 7. Materiaalikertoimet.	37
Taulukko 8. Osavarmuuskerroin leikkaukselle.	38
Taulukko 9. Osavarmuuskerroin lommahdukselle.	38

# KÄYTETYT LYHENTEET

ECCS	Euroopan teräsrakentamisen yhdistys European Convention for Constructional Steelwork
TPE	Turun Pelti ja Eristys
CEN	Euroopan standardisoinnin komitea Comité Européen de Normalisation
TC	Tekninen komitea Technical committee
SC	Teräsvalu Steel castings
PVP	Pelti-villa-pelti
VTT	Valtion teknillinen tutkimuslaitos
PVP	Pelti-villa-pelti

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on kevyiden sandwich-elementtien mitoituksen perusteet. Mitoituksen lähtökohtana ovat aina tuotekohtaiset testit elementin mekaaniselle kestävyydelle. Työssä esitellään myös laskentamenetelmiä paneelin kestävyuden laskentaan ilman testimenetelmiä, joilla pääsee alkuun elementtien mitoituksessa. Tavoitteena on esitellä käytössä olevia laskentamenetelmiä elementtien mitoitukseen SFS-EN 14509 standardin mukaan ja lopullinen tavoite on tuottaa moniaukkoiselle elementille laskentapohja, joka olisi yksinkertainen ja helppo käyttää. Tähän on myös kerätty menetelmiä, joita ei ole esitetty standardissa, kuten Paavo Hassisen ja Lassi Martikaisen kehittämä menetelmä tukireaktion ja momentin yhteisvaikutukseen keskituella. Työn toimeksiantajana on Turun Pelti ja Eristys Oy ja esimerkkilaskelmina on TPE Spirit Oy:n pelti-villa-peltielementti.

Kevyiden sandwich-elementtien mitoitus ja testaus ovat kehittyvä ala. Nykyinen SFS-EN 14509 on muuttumassa vuoden 2019 puolivälissä kahteen osaan. Toinen on kantaville ja toinen ei-kantaville. Tulevaisuudessa suunnitteilla on yhtenäinen eurokoodi EN 1993-7 kevyiden sandwich-elementtien suunnitteluun (CEN/TC128/SC11). Rakennustuoteteollisuuden toimialaan kuuluva standardisoinnin suomen seurantaryhmä (CEN/TC128/SC11) käsittelee metalliohutlevys sandwich-elementtien testauksen ja suunnittelun standardisointia. Vaikka tämä opinnäytetyö on tehty vanhan muuttuvan standardin mukaan, laskentamenetelmät eivät muutu. Joitain osavarmuuskertoimia vaihtuu ja uuteen standardiin on lisätty elementtien kiinnityksien testaus asiaa.

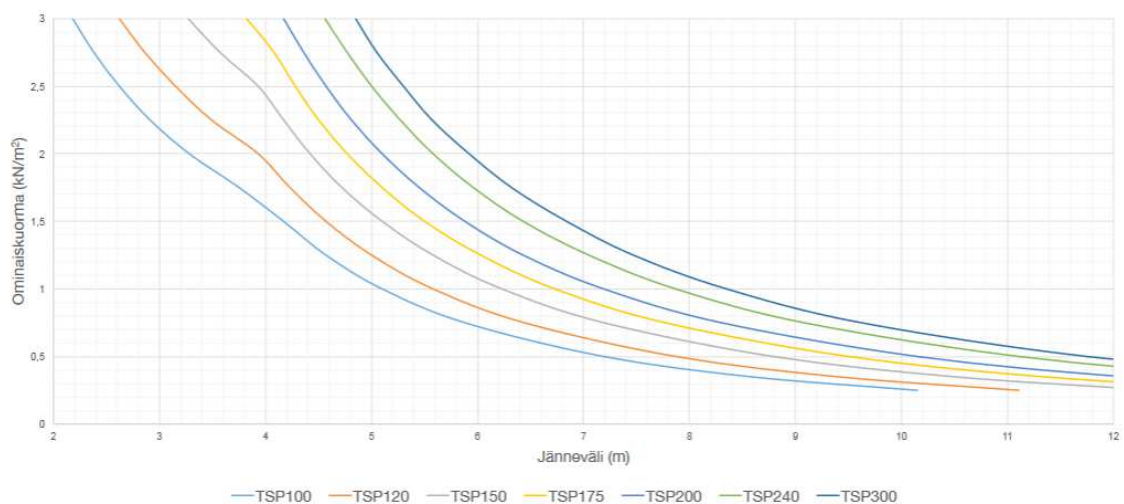
Työ on pääsääntöisesti mitoituksen teoriaa ja miten sandwich-elementin kestävyys määräytyy, sekä miten kestävyys voidaan todentaa laskemalla. Aluksi on esitelty lyhyesti yleisimpiä käyttökohteita elementille, jonka jälkeen on kerrottu, miten elementin mekaaninen kestävyys määräytyy. Suunnitteluperusteissa on esitetty käytössä olevat laskentasäännöt elementille. Standardi SFS-EN 14509 noudattaa pääsääntöisesti SFS-EN 1990: Rakenteiden suunnitteluperusteet standardia laskentaan perustuvissa yhdistelyissä, mutta joitain osavarmuuskertoimia ja käyttörajatilassa olevia yhdistelyjä on muutettu sopivaksi sandwich-elementeille. Työn viimeisessä luvussa on hahmoteltu lukijalle miten eri kuormituksista johtuvat rasitukset syntyvät. Lähteinä on ollut myös ECCS:n laatimia ohjeita elementtien suunnitteluun, joiden pohjalta standardi on laadittu.

Työssä henkisenä tukena on ollut Paavo Hassinen insinööritoimisto Pontek Oy:stä ja Turun Pelti ja Eristys Oy:stä Anttoni Ahtiainen. Hassinen on ollut mukana sandwich-elementtien kehittämisessä ja suunnitteluohjeiden laatimisessa. Molemmat henkilöt kuuluvat rakennustuoteteollisuuden standardisoinnin seurantaryhmän tekniseen komiteaan CEN/TC128/SC1.

## 2 ELEMENTTIEN KÄYTTÖKOHTEET

### 2.1 Julkisivut

Monen isomman kohteen, kuten teollisuusrakennuksen, julkisivu tehdään PVP-elementistä. Elementti on nopea asentaa ja ohuemmillakin elementin paksuuksilla päästään pitkiin jänneväleihin. Elementtien pituudet ovat 910–12 000 mm. Kuvassa 1 on esitetty TPE Spirit paneelin kuormituskäyrästä. Käyrä on laskettu tasaisesti jakautuneelle tuuli-kuormalle ja elementin kestävyyttä pienennetty materiaalille ominaisella kertoimella. Mitoitus on tehty 1-aukkoiselle rakenteelle.



Kuva 1. TPE Spirit Panel-elementin jännevälikäyrästä (TPE Sirit Panel. 2018, 6).

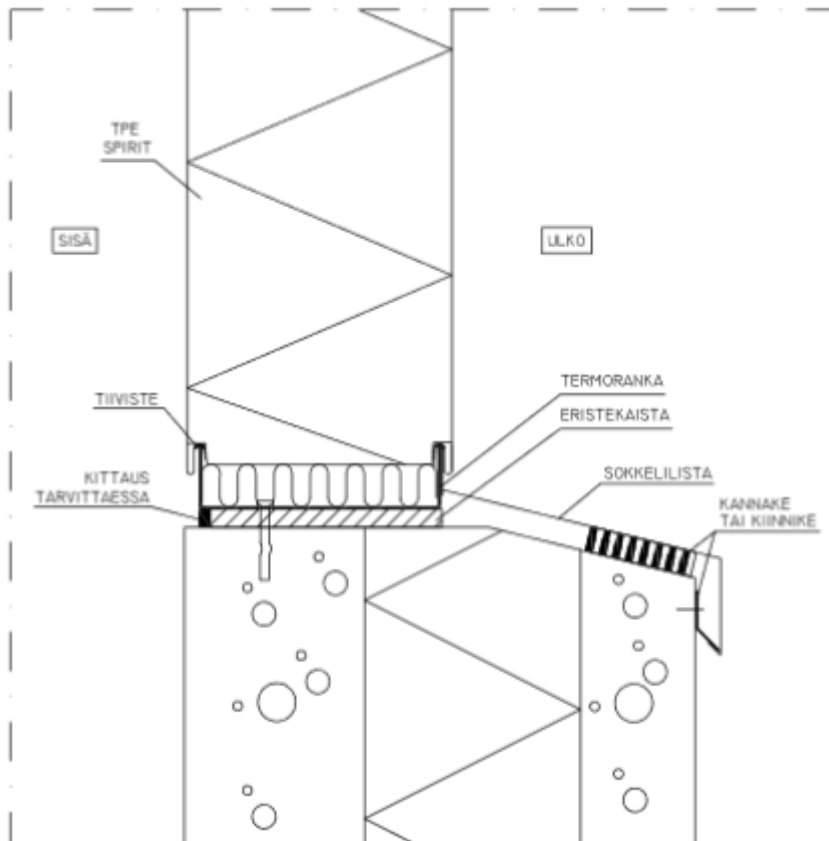
Elementtien pintapuolen pelti on 0,4–0,8 mm paksua ohutlevyä. Ulkopuolen pelti pinnoitetaan Suomessa PVDF-pinnoitteella (polyvinyyliideenifluoridi) hyvien sääolosuhteiden ja UV-säteilyn kestävyuden vuoksi. Sisäpuolelle riittää PE-pinnoite (polyesteri). Pinnoitteita, pintapeltejä ja kuviointia voidaan käyttökohteen vaativuuden mukaan muuttaa. Paneeli on siisti ja näyttävä julkisivuelementti. Esimerkkinä kuvassa 2 näkyvä Turun Pelti ja Eristys Oy:n vuoden 2016 Tukholman projekti, Gångaren.





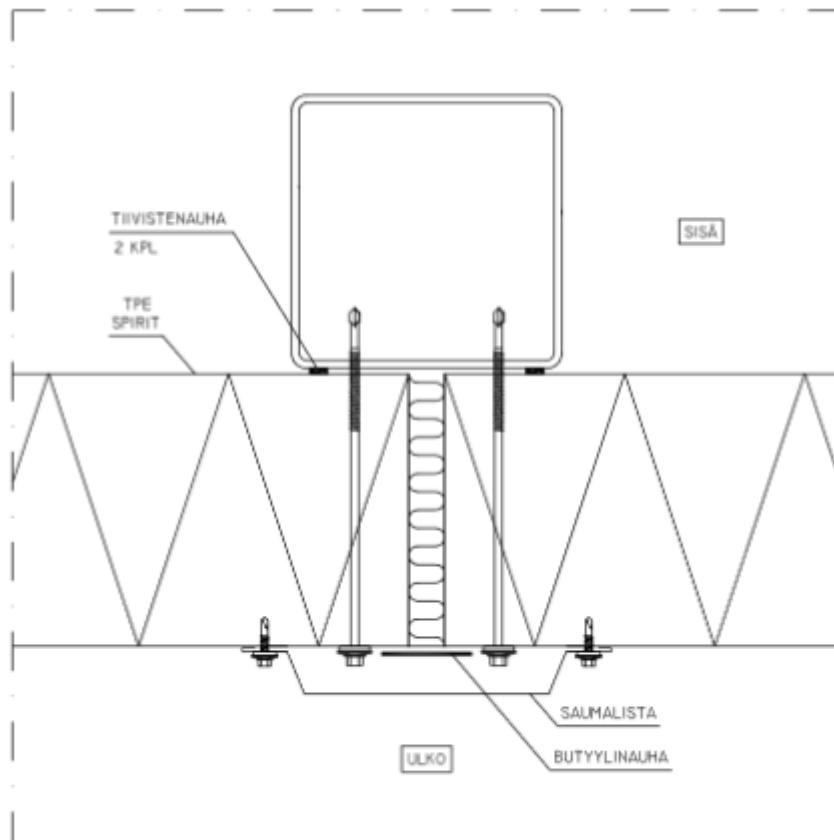
Kuva 2. Julkisivun elementit.

Julkisivuelementit tulevat kantavan sokkelin päälle, johon asennetaan ensiksi kapillaarikatko ja tämän päälle U-termoranka. Termoranka on suunniteltu kiinnittämään elementti sokkeliin, ja sen ylöspäin kantatut osat menevät naaraspontteihin. Joissain tapauksissa joudutaan asentamaan ulkopuolinen U-ranka, kuten elementin pystyasennuksessa. Kuvassa 3 on TPE Spirit paneelin asennus sokkelin päälle termorangalla.



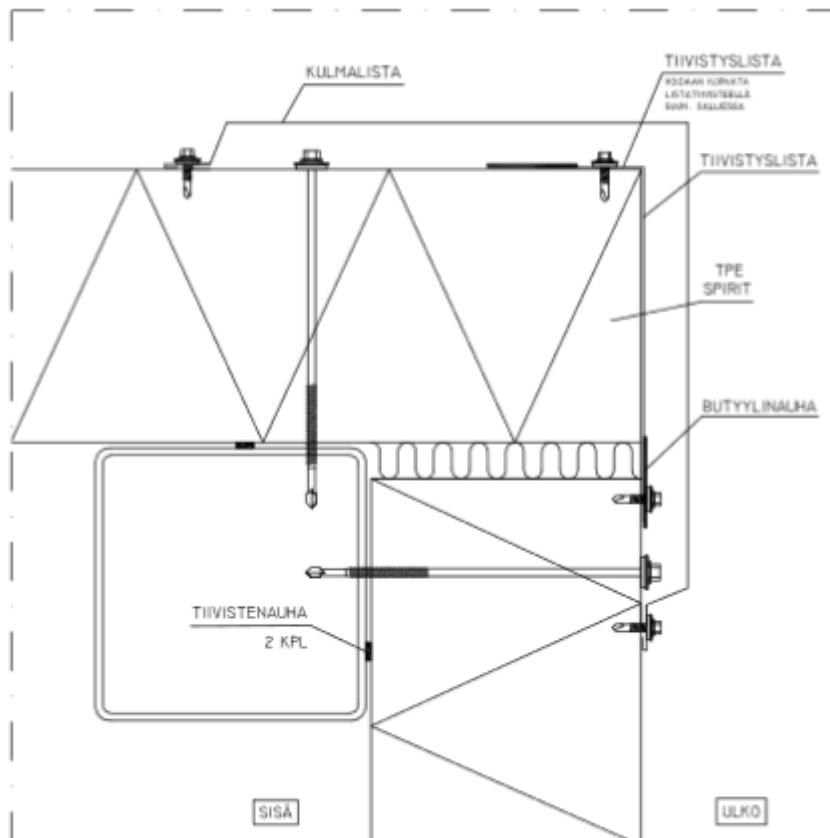
Kuva 3. TPE Spirit vakiodetalji D-10.

Tehtaalla asennetaan elementin sisäpuolen ponttiin kumitiiviste. Tiivisteellä saadaan rakenne vesihöyryä läpäisemättömäksi. Työmaalla asennetaan lisäksi tukipinnan ja paneelin väliin tiivistenuuha. Päätysaumoihin jätetään 20–30 mm:n rako, joka täytetään villalla ja lopuksi rako tiivistetään butyyliiteipillä. Päälle asennetaan peitelista. Elementit voidaan asentaa teräs, puu ja betonirunkoon. Tukipinnan leveys tulee olla aina vähintään 50 mm. Kuvassa 4 on esitetty vakiodetalji teräspilarin kohdalla.



Kuva 4. TPE Spirit vakiodetalji D-20.

Rakennuksen nurkat tehdään samalla periaatteella. Kuvassa 5 on esimerkkidetelji nurkan kiinnityksestä.



Kuva 5. TPE Spirit vakiodetalji D-30.

## 2.2 Väliseinät

Väliseinien yleisimpiä käyttökohteita ovat kevyet ei-kantavat seinät ja IV-kammioiden seinät. Paneeliin on helppo tehdä reikiä IV-laitteita varten. Väliseinien kuormitus koostuu pääsääntöisesti paine-eroista ja mahdollisista IV-laitteista. Suuremmat reiät ja aukot vaativat tukirungon. Aukkojen laskennasta on lisää luvussa 5.11. Myös rakennuksen sisälle tehtävien kylmätilojen seiniä tehdään sandwich-elementeistä sen hyvän lämmöneristävyyden ja helpon asennuksen vuoksi. Kylmätiloissa on syytä tarkastella sisä- ja ulkopinnan välille syntyvää lämpötilaeroa, joka aiheuttaa pysyviä rasituksia jatkuvissa seinärakenteissa.

### 2.3 Katot

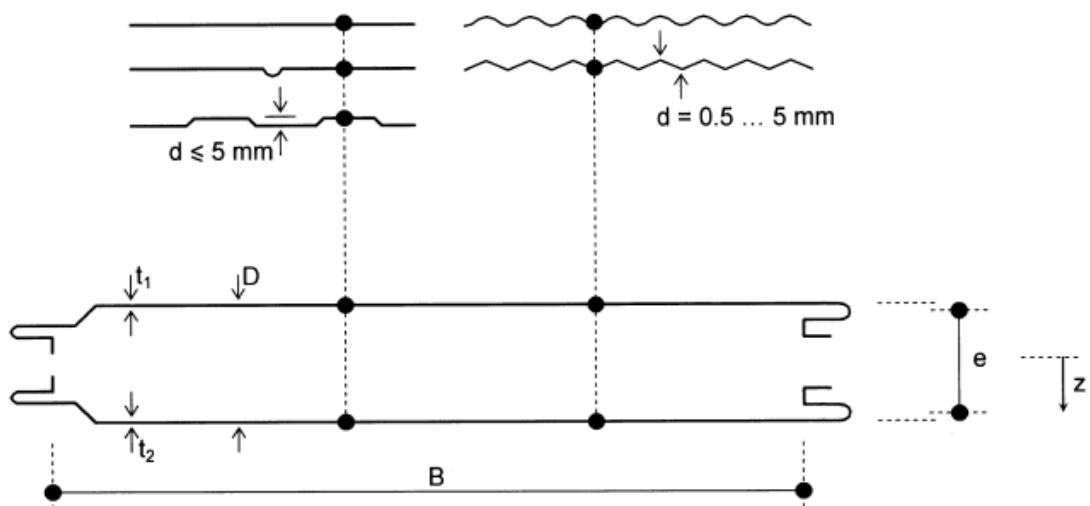
PVP-elementtejä voidaan käyttää katoissa sellaisenaan tai niiden päälle asennetaan lisäksi erillinen eristysrakenne. Katoissa käytetään vahvasti profiloituja paneeleja, mutta nykyään käyttö on harvinaisempaa. Voimakkaasti profiloitu pintakerros kantaa muotolevynä suuren osan sandwich-elementtiin kohdistuvasta kuormasta, jolloin sandwich-rakenteelle jää vain osa kuormasta. Pitkäaikaisessa kuormituksessa ydinkerroksen virumasta johtuva lujuuden muutos jää profiloituilla elementeillä vähäisemmäksi (P. Hassinen henkilökohtainen tiedonanto 8.4.2019). Aikaisemmin ajateltiin vahvasti profiloitun elementin olevan olennainen pitkäaikaisten kuormien vaikutuksille. Uusimman tiedon mukaan voidaan laskea jännitykset ja taipumat sisältäen viruman, jolloin ydinmateriaali siirtää kuormaa pintalevyille (Davies 2001, 7). Nykyään sileäpintaisten tai kevyesti profiloitujen sandwich-elementtien käyttö katoissa on yleistynyt.

Katoissa rakenne tehdään yleisesti moniaukkoisena, jolloin pitää tarkistaa elementin kestävyys keskituella. Kattopaneelin päälle tulee kuormaa myös katolla kävellessä. Huoltoreitit pitää määrittää ja paneeli suojataan kuormaa jakavalla levyllä. Lisäksi elementin pontit on hyvä ruuvata toisiinsa kiinni, jotta saadaan paneeli ottamaan kuormaa vastaan myös poikittaissuunnassa. Elementeistä voidaan tehdä myös ripustettuja alakattoja.

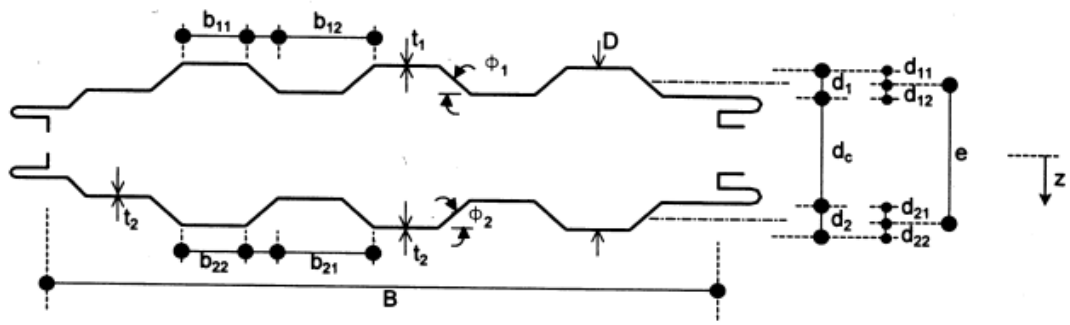
### 3 ELEMENTIN OMINAISUUDET JA MATERIAALIT

Sandwich-elementtien ominaisuudet riippuvat ydinkerroksen ja ydin- ja pintakerroksia yhdistävästä liimauksen ominaisuuksista ja valmistustavasta. Jokainen sandwich-elementtituote on yksilö. Näistä syistä jokaisen sandwich-elementin ja sen ydinkerroksen ominaisuudet pitää tutkia kyseisen tuotteen avulla kokeellisesti (P. Hassinen henkilökohtainen tiedonanto 8.4.2019).

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty standardisoidut mittojen esitystavat elementille. Elementti voidaan kuvan 6 mukaan katsoa sileäksi tai kevyesti profiloituksi, kun ehdot täyttyvät (SFS-EN 14509, 115).



Kuva 6. Sileä tai kevyesti profiloitu poikkileikkaus (SFS-EN 14509, 115).



Kuva 7. Profiloitu poikkileikkaus (SFS-EN 14509, 115).

PVP-elementti on komposiittirakenne, jossa ydinmateriaalina käytetään kivivillaa. Ohuet pintalevyt liimataan ydinmateriaaliin. SFS-EN 14509 on standardisoitu tehdasvalmisteiset metalliohutlevysandwich-elementit ja niissä käytettävät materiaalit. Elementin valmistajan tulee ilmoittaa kummankin pintakerroksen metallilaji ja paksuus toleranssijärjestelmän mukaan (SFS-EN 14509, 12). Taulukossa 1 on esitetty elementtien mittatoleranssit.

Taulukko 1. Elementtien mittatoleranssit (SFS-EN 14509, 19).

Mitta	Toleranssi (suurin sallittu)	Mittausmenetelmä
Elementin paksuus <sup>a</sup>	$D \leq 100$ mm $\pm 2$ mm $D > 100$ mm $\pm 2$ %	D.2.1
Poikkeama tasomaisuudesta (mitatun pituuden $L$ mukaan)	Kun $L = 200$ mm - Poikkeama tasomaisuudesta 0,6 mm Kun $L = 400$ mm - Poikkeama tasomaisuudesta 1,0 mm Kun $L > 700$ mm - Poikkeama tasomaisuudesta 1,5 mm	D.2.2
Metalliprofiilin korkeus (paimun harjat) (mm)	$5 < h \leq 50$ mm $\pm 1$ mm $50 < h \leq 100$ mm $\pm 2,5$ mm	D.2.3
Jäykisteiden ja kevyen profiilinnin syvyys	$d_s \leq 1$ mm $\pm 30$ % $d_s$ :stä $1 \text{ mm} < d_s \leq 3$ mm $\pm 0,3$ mm $3 \text{ mm} < d_s \leq 5$ mm $\pm 10$ % $d_s$ :stä	D.2.4
Elementin pituus	$L \leq 3$ m $\pm 5$ mm $L > 3$ m $\pm 10$ mm	D.2.5
Elementin hyötyleveys	$w \pm 2$ mm	D.2.6
Poikkeama suorakulmaisuudesta	$0,006 \times w$ (nimellishyötyleveys)	D.2.7
Poikkeama suoruudesta (pituussuuntaan)	1 mm metriä kohti, korkeintaan 5 mm	D.2.8
Kaareutuminen	2 mm pituuden metriä kohti, korkeintaan 20 mm 8,5 mm leveyden metriä kohti sileäpintaisille tai kevyesti profiloituille elementeille: $h \leq 10$ mm 10 mm leveyden metriä kohti profileille: $h > 10$ mm	D.2.9
Profiilin paimujako ( $p$ )	Jos $h \leq 50$ mm $p: \pm 2$ mm Jos $h > 50$ mm $p: \pm 3$ mm	D.2.10
Paimun harjojen leveys ( $b_1$ ) ja paimun pohjien leveys ( $b_2$ )	$b_1$ $\pm 1$ mm $b_2$ $\pm 2$ mm	D.2.11

<sup>a</sup> Elementtien, joissa on profiloitunut pintakerrokset, paksuuden laskentaa varten ks. kuva D.1.

### 3.1 Pintakerrokset

Yleisin käytetty pintamateriaali on ohut 0,4–0,8 mm kylmävalssattu teräslevy. Pintamateriaalina ohuet kylmämuovattut teräslevyt ovat nopea vaihtoehto tehdasvalmistuksessa.

#### 3.1.1 Teräs

Teräslevyt ovat sinkittyjä jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä SFS-EN 10346 kohdan 7 mukaan. Myötörajan tulee olla vähintään 220 N/mm<sup>2</sup> (SFS-EN 14509, 12). Sinkityksen paksuus riippuu maantieteellisistä ja ilmasto-olosuhteista standardin SFS-EN 10346 mukaan (SFS EN-508-1, 14). Vakio arvo on 275 g/m<sup>2</sup> (TPE Sirit Panel 2018, 3).

Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitettujen ohutlevyterästen mittatoleranssit määräytyvät standardin SFS-EN 10143 kohdan 6 mukaan.



### 3.1.2 Pinnoite

Pinnoitteena käytetään yleisimmin PVDF- ja PE-pinnoitteita. Ulkotilojen rasituksille joutuvat rakenteet suojataan PVDF-pinnalla hyvien sääolosuhteiden ja UV-säteilyn kestävyden vuoksi. Sisäpuolelle yleensä riittää PE-pinta. Orgaanisilla aineksilla pinnoitettujen ohutlevyterästen kohdalla noudatetaan SFS-EN 10169 standardia.

### 3.1.3 Ruostumaton teräs

Teräksen myötörajan tulee olla vähintään  $220 \text{ N/mm}^2$ . Ruostumattomien terästen ominaisuuksien ja kemiallisen koostumuksen kohdalla noudatetaan standardia SFS-EN 10088-1. Kaikki standardissa luetellut ruostumattomat teräkset eivät sovellu käytettäväksi sandwich-elementeille kaikissa kohteissa. Katteissa käytettävien terästen kohdalla noudatetaan standardia SFS-EN 508-3 (SFS EN 14509, 13).

Ruostumattomien terästen muoto- ja mittatoleranssien kohdalla noudatetaan standardia SFS-EN ISO 9445-1.

### 3.1.4 Alumiini

Myötörajan suunnitteluarvo tulee olla vähintään  $140 \text{ N/mm}^2$ . Alumiinin koostumuksen, ominaisuuksien ja kovuuden tulee olla standardien SFS-EN 485-2 tai SFS-EN 1396 mukaisia (SFS-EN 14509, 13).

Pinnoittaminen orgaanisilla aineilla tulee täyttää standardin SFS-EN 1396 vaatimukset (SFS-EN 14509, 13).

Mittatoleranssi standardien SFS-EN 485-4 tai SFS-EN 1396 mukaan (SFS-EN 14509, 13).

### 3.1.5 Kupari

Kuparin myötörajan suunnitteluarvon tulee olla vähintään  $180 \text{ N/mm}^2$ . Koostumuksen, kovuuden ja paksuuksien kohdalla noudatetaan standardia SFS-EN 1172. Kuitenkin

vain kuparilajit R240 ja R290 täyttävät suunnittelun myötörajan  $180 \text{ N/mm}^2$  (SFS-EN 14509, 13).

### 3.2 Ydinmateriaali

Ydinkerrosmateriaalina käytetään kivivillaa, jonka kuitusuunnat on optimoitu. Kuitujen suunta on kohtisuorassa pintapeltejä vasten, jolla päästään pitkiin jänneväleihin. Eristevilloille ei löydy standardisoituja lujuuden arvoja, vaan käytetään valmistajan ilmoittamia arvoja. Ydinmateriaaleina käytetään myös polyuretaania (PUR) ja pursotettua polystyreeniä (EPS).

### 3.3 Liimat

1- ja 2-komponentti polyuretaaniliimat ovat yleisimmin käytettyjä liimoja. Erilaisia liimoja voidaan käyttää tapauskohtaisesti, jos halutaan lisätä esimerkiksi palonkestoa. Liimaa on yleensä  $200\text{-}350 \text{ g/m}^2$  molemmin puolin (Davies 2001, 40). Liimauksella on tärkeä merkitys rakenteen kestävyuden kannalta.

Liimojen tulee täyttää standardin SFS EN 14509 kohdat 5.2.1.6 ja 5.2.3.1 testattaessa elementin vetolujuutta ja vetolujuuden alenemista vanhenemisen seurauksena.

## 4 MEKAANINEN KESTÄVYYS

Sandwich-elementtien kestävyys määräytyy ydinmateriaalin, ulkopinnan ja niitä pitävän liiman yhteisvaikutuksesta. Sandwich-elementti voi murtua usealla eri tavalla. Niihin vaikuttavat tukien leveys, jänneväli ja elementin paksuus.

Elementtien mitoituksen suunnittelussa käytettävät arvot saadaan testitulosten perusteella. Testit ovat standardisoituja SFS-EN 14509 mukaan. Mekaanisista ominaisuuksista määritetään keskiarvo ja ominaisarvo standardin ISO 12491 mukaan, jolloin tuote saa CE-merkinnän. Tehdas tekee myös omia laadunvalvontatestauksia SFS-EN 14509 kohdan 6.3 mukaan.

Vaikka kuormituskokeilla saadaan selville paneelin kestävyys, kokeet on tehty tietyille jännevälille ja kuormitusjärjestelyille. Kaikkien kuormitustapausten ja maksimikuormien selvittämiseksi jouduttaisiin tekemään monia kokeita. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää matemaattisia malleja eri murtumistapausten laskentaan (Davies 2001, 227).

Paneelien mitat saattavat vaihdella tietyn toleranssin sisällä, joka vaikuttaa laskentaan. Kaikki laskennassa käytettävät kriittiset mitat, kuten pintalevyn paksuus ja elementin kokonaispaksuus, vaikuttavat statiikkaan ja kestävyysasteeseen. Elementtiä mitoittaessa tulisi aina käyttää mittoja, jotka antavat huonoimman kestävyysasteen (Davies 2001, 229).

Pintalevyn paksuudella on merkittävä vaikutus taivutuskestävyysasteeseen. Teräksisen pintalevyn suunnittelupaksuus lasketaan kaavalla 1 (SFS-EN 14509, 132).

$$t_d = t_{nom} - t_{zinc} - 0,5t_{tol}$$

Kaava 1. Teräksisen pintalevyn suunnittelupaksuus.

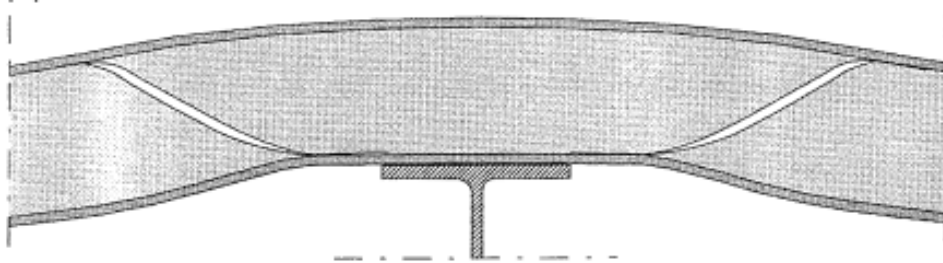
$$t_{nom} = \text{teräksisen pintalevyn nimellispaksuus}$$

$$t_{zinc} = \text{sinkkikerroksen paksuus}$$

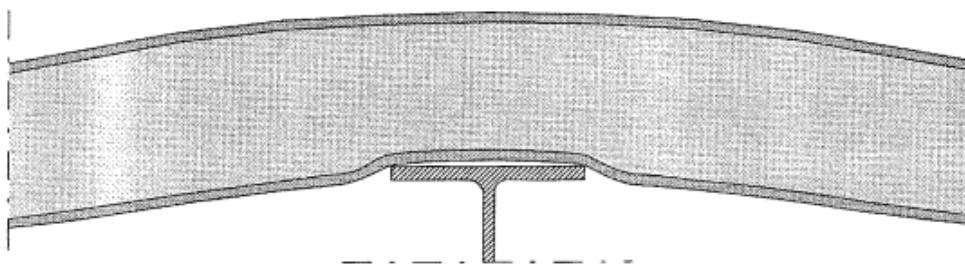
$$t_{tol} = \text{toleranssi}$$

#### 4.1 Murtumismallit

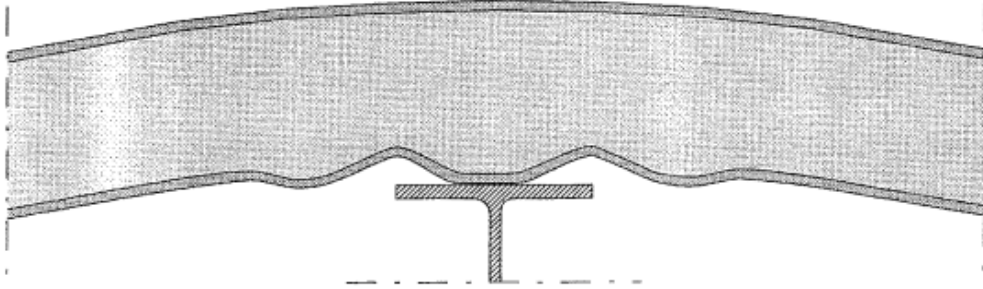
Kolme eri murtumismallia mitoittaa sandwich-elementin. Yksiaukkoisilla rakenteilla päätytuella elementin mitoittaa ydinkerroksen puristus- ja leikkauslujuus. Jännemitan keskivälissä taivutusmomentin huippualueella mitoittavaksi tulevat ydin- ja pintakerroksen mekaaniset ominaisuudet, joka esitetään lommahduslujuutena. Moniaukkoisilla rakenteilla mitoittavaksi voi tulla kaikkien kolmen yhteisvaikutus keskituella (Davies 2001, 238). Alla olevissa kuvissa on esitetty leikkaus- ja puristumurtuminen keskituella sekä pintakerroksen lommahtaminen.



Kuva 8. Leikkautuminen (Lightweight Sandwich Construction, 238).



Kuva 9. Puristuminen (Lightweight Sandwich Construction, 238).



Kuva 10. Lommahtaminen (Lightweight Sandwich Construction, 238).

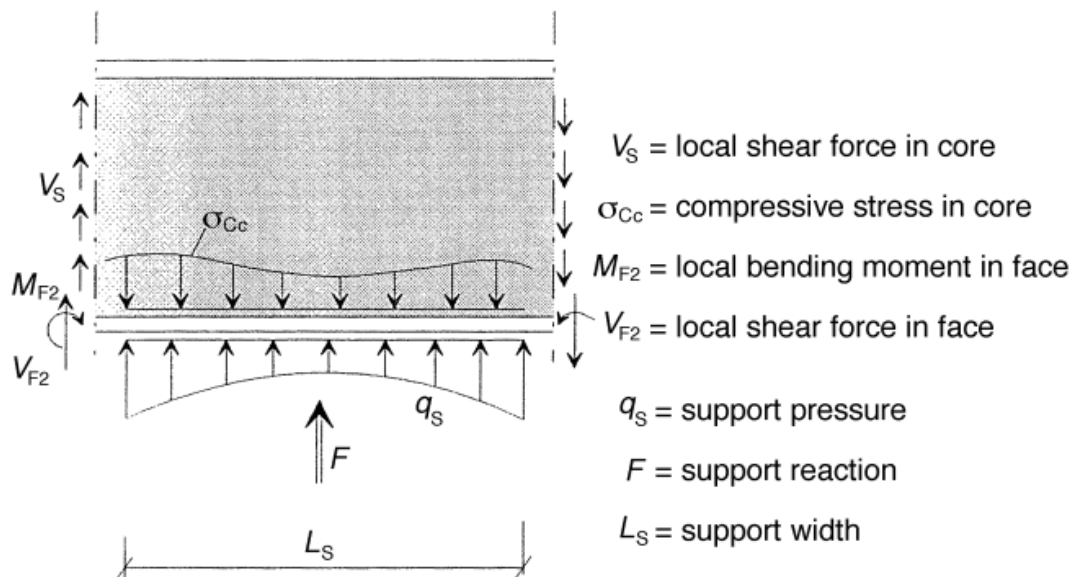
Lommahduslujuus, leikkauslujuus sekä liukukerroin saadaan testattua 1-aukkoisella testimenetelmällä SFS-EN 14509 liitteen A mukaan. Kuvassa 11 on esitetty TPE Spirit Oy:n tehtaan sisäisen laadunvalvonnan lommahduskoe alipainelaatikossa. Ilmatiiviiseen laatikkoon tuotetaan alipaine ja päädyissä olevat anturit mittaavat tukireaktiovoiman. Keskellä allasta on anturit taipuman mittaamista varten.



Kuva 11. Paneelin lommahdustesti.

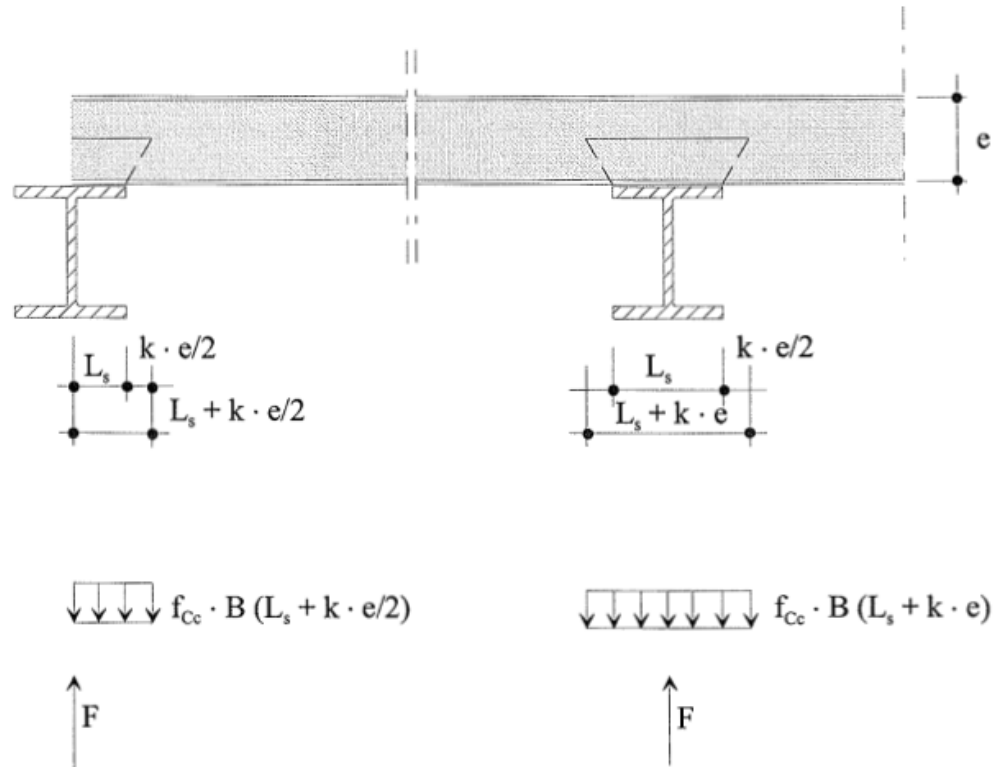
## 4.2 Tukireaktiokestävyys

Tukipaineen jakautuminen riippuu palkin laipan elastisuudesta, jota vasten elementti on puristettuna. Jäykillä tuen materiaaleilla puristusjännitys ei ole tasaisesti jakautunut koko tukipinnan leveydeltä vaan puristus kohdistuu reunoille ja voidaan olettaa kahtena viivakuormana. Kapeammille tuille ja joustavimmille materiaaleille syntyy keskelle yksittäinen viivakuorma. Nämä oletukset pätevät käyttörajatilassa. Murtorajatilassa juuri ennen paikallista murtoa tukipaineen jakautuma muuttuu. Paineen jakautumisesta aiheutuu paikallista taivutusmomenttia ja leikkausvoimaa (Davies 2001, 238.) Kuvassa 12 on esitetty tukipaineen jakautuminen murtorajatilassa.



Kuva 12. Tukipainejakautuminen murtorajatilassa (Lightweight Sandwich Construction, 239).

Tukireaktiokestävyys lasketaan suunnilleen ottaen mukaan huomioon paneelin taivutusjäykkyys ja elastisuus. Puristettua aluetta kasvatetaan hajonnan vaikutuksella paneelin paksuuden suuntaan. Hajonnan kulma voidaan määrittää testeillä tai olettaa  $27^\circ$ . Puristetun ydinmateriaalin leveys on tällöin keskituella  $L_S + 2\left(\frac{e}{2}\right)$  ja päätytuella  $L_S + \left(\frac{e}{2}\right)$  (Davies 2001, 239.) Standardi ehdottaa mineraalivillalle jakaumakerrointa 0, mikäli tätä ei ole testeillä määritetty (SFS-EN 14509, 122). Kuvassa 13 on esitetty puristusjännityksen jakautuminen elementin keskelle.

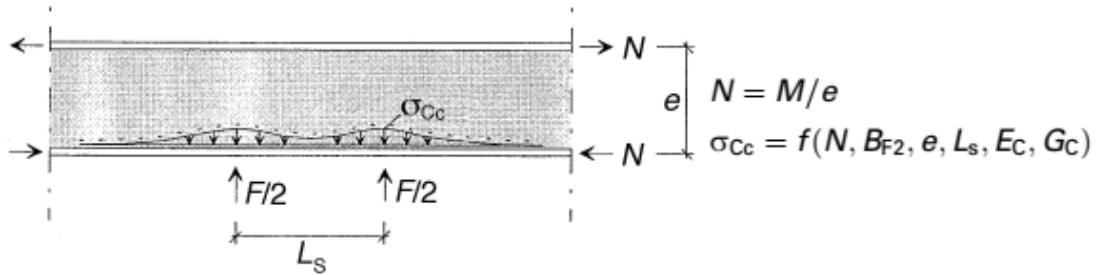


Kuva 13. Puristusjännitys jakauma (European recommendations for sandwich panels, Part 1: Design, 54).

Tämä laskentamalli on yksinkertaistettu eikä sisällä momentin ja puristuksen yhteisvaikutusta.

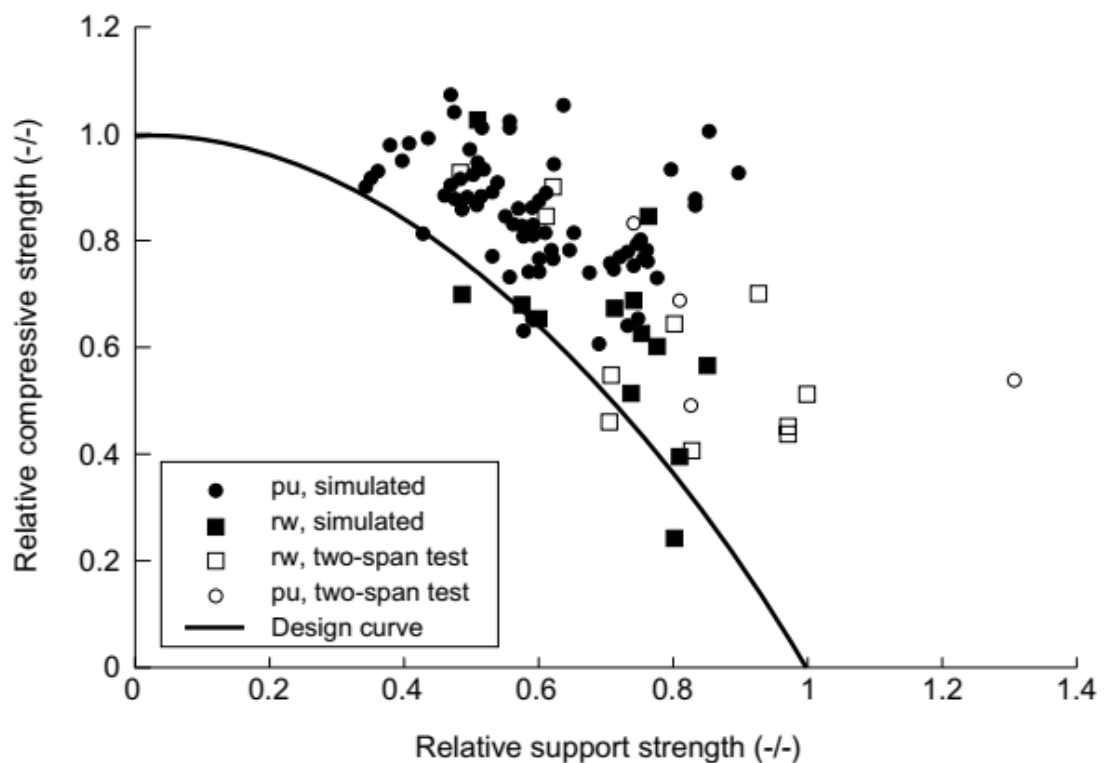
#### 4.3 Taivutusmomentin ja tukivoiman yhteisvaikutus

Moniaukkoisella elementillä pitää ottaa huomioon taivutusmomentin ja tukivoiman yhteisvaikutus keskituella. Taivutusmomentti aiheuttaa paikallisen puristuksen elementin pintaan. Tukivoima vaikuttaa samaan aikaan ja pienentää elementin lommahduslujuutta. Kuvassa 14 on esitetty vaikuttavien voimien jakautuminen.



Kuva 14. Paikallinen taivutusmomentti (Lightweight Sandwich Construction, 240).

Näiden voimien yhteisvaikutuksen laskentaan ei ole täysin varmaa laskentamallia, koska ydinmateriaalin ominaisuudet voivat vaihdella suuresti. Suositeltavaa on määrittää tukireaktiokestävyys keskituella testeillä SFS-EN 14509 kohdan A.7 mukaan (SFS-EN 14509, 60). Yhteisvaikutusta ovat tutkineet Paavo Hassinen & Lassi Martikainen Teknillisessä korkeakoulussa vuosina 1994-1995. Näistä koetuloksista on johdettu kuvassa 15 esitetty kaavio. Alhaalla on tuella vaikuttavan voiman ja tukireaktiokestävyyden suhde ja vasemmalla on taivutusmomentin ja lommahduslujuuden suhde.



Kuva 15. Taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus (Lightweight Sandwich Construction, 245).



Alla koetuloksista yhdessä teoreettisen mallin kanssa johdettu mitoituslauseke.

$$\frac{F}{F_R} - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{F2}}{\sigma_{cr}}} = 0$$

Kaava 2. Taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus.

$F$  = vaikuttava voima välituella

$F_R$  = tukireaktiokestävyys

$\sigma_{F2}$  = taivutusjännitys

$\sigma_{cr}$  = lommahduslujuus

#### 4.4 Leikkautuminen

Sandwichpaneelin leikkausmurtuminen on haurasmurtuma, jolloin elementti joutuu välittömästi murtorajatilaan ilman plastista muodonmuutoskykyä. Käytettäessä plastisuusteorian mukaista mitoitusta on syytä tarkastella ensiksi, onko leikkausjännitys mahdollisesti määräävä. Paneelin leikkauskestävyyteen on olemassa teoreettisia laskentakaa-voja kirjassa ”*Lightweight Sandwich Construction*” kohdassa 10.2.4, joilla voidaan arvioida leikkauskestävyyttä. Elementin leikkauslujuus tulee määritellä SFS-EN 14509 kohdan A.3 mukaan. Kuvassa 16 on esitetty TPE Spirit 150 elementin leikkautuminen VTT:en testissä.



Kuva 16. Paneelin leikkautuminen.

## 5 SUUNNITTELUMENETELMÄT

### 5.1 Yleistä

Rasitusten suunnitteluarvot tulee laskea alla olevien kaavojen mukaan ja verrata niitä kestävyuden suunnitteluarvoihin (SFS-EN 14509, 118.)

Murtorajatilassa tulee täyttyä alla oleva ehto.

$$E_{ULS,d} \leq R_d$$

Kaava 3. Murtorajatilan ehto.

Käyttörajatilassa tulee täyttyä alla oleva ehto.

$$E_{SLS,d} \leq C_d$$

Kaava 4. Käyttörajatilan ehto.

$$E_d = \sum Y_f \psi S_{ki}$$

Kaava 5. Rasitusten vaikutusten suunnitteluarvo.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Kaava 6. Kestävyuden suunnitteluarvo murtorajatilassa.

$C_d$  = käyttörajatilan kriteerin suunnitteluarvo

$S_{ki}$  = rasituksen ominaisarvo

$\gamma_f$  = kuorman osavarmuusluku

$\psi$  = yhdistelykerroin

$Y_M$  = materiaalin osavarmuusluku

$R_k$  = kestävyuden laskettu tai kokeellisesti määritetty ominaisarvo

## 5.2 Rasitukset

Rasitukset jaetaan pysyviin ja muuttuviin. Sandwich-elementille tulee myös lämpötilaeroista johtuvaa rasitusta, joka aiheuttaa momenttia pintamateriaalin kutistuessa toiselta puolen ja kasvaen toiselta.

Pysyviä rasituksia ovat

- oma paino
- kaikki pysyvät osat ja laitteet, jotka ovat kiinni elementissä
- lämpötilaerosta aiheutuva pitkäaikainen kuorma, esimerkiksi kylmävaraston seinäelementit.

Muuttuvia rasituksia ovat

- lumi
- muut muuttuvat kuormat kuten kävely elementin päällä
- tuulikuormat
- työnaikaiset kuormat
- muodonmuutokset lämpötilaeroista.

Lämpötilaerot ulkotiloissa määritetään kansallisen spesifikaation mukaan. Mikäli arvoja ei ole mainittu käytetään minimiarvoja leveysasteesta, korkeudesta merenpinnasta ja etäisyydestä merestä määräytyvää neljää arvoa talviolosuhteissa.  $T_1 = \min(0\text{ °C}, 10\text{ °C}, -20\text{ °C}, -30\text{ °C})$ . Suomessa on laskennassa yleisesti käytetty  $-30\text{ °C}$ . Kattoelementin, jonka päällä on lunta, ulkopinnan lämpötilaksi määritetään  $0\text{ °C}$  (SFS-EN 14509, 119.)

Kesäajan ulkopinnan lämpötila määräytyy pinnan heijastavuuden ja värin mukaan. Värit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään.

- 1 hyvin vaaleat värit, jossa heijastusaste  $R_G$  on 75-90,  $T_1 = +55\text{ °C}$

- 2 vaaleat värit, jossa heijastusaste  $R_G$  on 40-74,  $T_1 = +65\text{ °C}$
- 3 tummat värit, jossa heijastusaste  $R_G$  on 8-39,  $T_1 = +80\text{ °C}$ .

$R_G$  on heijastusasteluku verrattuna magnesiumoksidiin, jonka heijastusasteluku on 100 % (SFS-EN 14509, 119.) Pinnan todellinen lämpötila voidaan määrittää myös tapauskohtaisesti, mikäli vaaditaan tarkempia arvoja.

Sisälämpötila tulisi määrittää käyttökohteen mukaan. Esimerkiksi kylmätilat ja teollisuuskohteet, jolloin suunnittelijan tai käyttäjän tulisi ilmoittaa todellinen lämpötila (SFS-EN 14509, 119.) Jos lämpötiloja ei ole mainittu erikseen voidaan käyttää alla olevia arvoja.

- $T_2 = +25\text{ °C}$ , kesällä
- $T_2 = +20\text{ °C}$ , talvella.

### 5.3 Kuormat ja yhdistely

Sandwich-elementtiä mitoitettaessa käytetään standardin SFS-EN 1990 mukaisia yhdistelyjä. Materiaalin ja osavarmuuslukujen osalta käytetään sandwich-elementeille suunniteltuja arvoja. Näissä suunnitteluarvoissa on korostettu elementin taipumusta lämpötilaeroista johtuviin jännityksiin. Myös ydinmateriaalin vaihtelevat ominaisuudet on otettu huomioon (SFS-EN 14509, 122).

#### 5.3.1 Säännöt

Murtorajatilassa kuorman osavarmuusluvuilla ja yhteisvaikutuskertoimilla kerrotut ominaisarvot lasketaan yhteen jokaiselle kuormitustapaukselle erikseen taulukon 2 mukaan (SFS-EN 14509, 122).

Taulukko 2. Rasitusten suunnitteluarvot murtorajatilassa.

Pysyvät rasitukset $G_d$ (oma paino, jne.)	Muuttuvat rasitukset $Q_d$	
	Määrävä ominaisarvon perusteella	Muut ja niiden yhdistelyarvo
$\gamma_G \times G_k$	$\gamma_{Q1} \times Q_{k1}$	$\gamma_{Qi} \times \psi_{0i} \times Q_{ki}$

$$S_d = Y_G G_k + Y_{Q1} Q_{k1} + \sum Y_{Qi} \psi_{oi} Q_{ki}$$

Kaava 7. Kuormien yhdistelysääntö murtorajatilassa.

$G_k$  = pysyvän rasituksen ominaisarvo

$Q_{k1}$  = määräävän muuttuvan rasituksen ominaisarvo

$Q_{ki}$  = ei määräävän muuttuvan rasituksen ominaisarvo

$Y_G$  = pysyvän rasituksen osavarmuusluku

$Y_{Qi}$  = muuttuvan rasituksen osavarmuusluku

$\psi_{oi}$  = muuttuvan rasituksen yhdistelykerroin

Käyttötilarajassa varmistetaan elementin toiminta kuormien vaikutusten alaisena, sekä tarkistetaan elementin kestävyys. Käyttörajatila mitoittaa yleensä elementin, jolloin taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus keskituella tulee määrääväksi. Taipuma harvemmin mitoittaa elementtiä. Taipumarajoiksi voidaan valita katoilla lyhytaikaisen kuormituksen tapauksessa jänneväli/200 ja pitkäaikaisen kuormituksen tapauksessa jänneväli/100. Pysyvään kuormitukseen otetaan huomioon viruma. Seinille taipumarajaksi voidaan käyttää jänneväli/100 (SFS-EN 14509, 124). Elementin toiminnallisuus pitää tarkastella tapauskohtaisesti esimerkiksi, jos taipuma on standardin rajoissa, mutta tilassa on jokin este taipumalle. Pitkillä jänneväleillä taipuma voi olla standardin rajoissa, mutta näkyä ei-toivottuna pullistumana.

Taulukossa 3 on esitetty rasitusten suunnitteluarvot käyttörajatilassa. Kuormien osavarmuuslukuina käytetään arvoa 1,0 ellei toisin mainita. Tavallista yhdistelmää käytetään taipumatarkasteluun ja harvinaista käytetään tarkistettaessa, ettei elementissä ole näkyviä vaurioita, kuten taivutusjännityksestä keskituella (SFS-EN 14509, 124.)

Taulukko 3. Rasitusten suunnitteluarvot käyttörajatilassa.

Yhdistelmä	Pysyvät rasitukset $G_d$	Muuttuvat rasitukset $Q_d$	
		Määräävä	Muut
Ominainen (harvinainen)	$G_k$	$Q_{k1}$	$\psi_{0i} \times Q_{ki}$
Tavallinen	$G_k$	$\psi_{11} \times Q_{k1}$	$\psi_{0i} \times \psi_{1i} \times Q_{ki}$

$$S_d = \Sigma G_k + Q_{k1} + \Sigma \psi_{0i} Q_{ki}$$

Kaava 8. Harvinainen yhdistelmä käyttörajatilassa.

$$S_d = \Sigma G_k + \psi_{11} Q_{k1} + \Sigma \psi_{0i} + \psi_{1i} Q_{ki}$$

Kaava 9. Tavallinen yhdistelmä käyttörajatilassa.

$\psi_{0i}$  = muuttuvan rasituksen yhdistelykerroin ominaisyhdistelmissä

$\psi_{11}$  = määräävän muuttuvan rasituksen  $Q_{k1}$  yhdistelykerroin

$\psi_{1i}$  = muiden rasitusten yhdistelykerroin

### 5.3.2 Yhdistelykertoimet

Taulukossa 4 käytetään yhdistelykertoimia, ellei ole toisin mainittu. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää taulukon 5 SFS-EN 1990 mukaisia arvoja, mikäli näin on ilmoitettu sandwich-elementtejä koskevan kansallisen lainsäädännön vaatimuksissa. Lämpötilan yhdistelykerrointa ei saa poistaa, vaikka sitä ei olisi ilmoitettu (SFS-EN 14509, 125.)

Taulukko 4. Yhdistelykertoimet (SFS-EN 14509, 125).

Yhdistelykertoimet	Kertoimet		
	Lumi	Tuuli	Lämpötila
$\psi_0$	0,6	0,6	0,6 / 1,0 <sup>a</sup>
$\psi_1$	0,75 / 1,0 <sup>b</sup>	0,75 / 1,0 <sup>b</sup>	1,0

<sup>a</sup> Kerrointa  $\psi_0 = 1,0$  käytetään, jos talvella vallitseva lämpötila  $T_1 = 0$  °C yhdistetään lumikuorman vaikutukseen.

<sup>b</sup> Kerrointa  $\psi_1 = 0,75$  käytetään lumi- ja tuulikuorman vaikutukselle, jos yhdistelmä sisältää kahden tai useamman muuttuvan rasituksen vaikutukset. Kerrointa  $\psi_1 = 1,0$  lumi- ja tuulikuorman vaikutukselle käytetään, jos yhdistelmässä on vain yksittäinen rasitusvaikutus edustaan muuttuvia rasituksia ja se aiheutuu pelkästään lumi- tai tuulikuormasta.

Taulukon E.6 arvot tulisi ottaa huomioon yhdessä taulukon E.8 arvojen kanssa.

Taulukko 5. SFS-EN 1990 yhdistelykertoimet (SFS-EN 14509, 125).

Yhdistelykertoimet	Kertoimet		
	Lumi	Tuuli	Lämpötila
$\psi_0$	0,5 tai 0,7 <sup>a</sup>	0,6	0,6
$\psi_1$	0,2 tai 0,5 <sup>a</sup>	0,2	0,5

<sup>a</sup> Lumikuorman vaikutusta kuvaavia korkeampia yhdistelykertoimien arvoja käytetään Suomessa, Islannissa, Norjassa ja Ruotsissa (ks. standardi EN 1991-1-3) ja muissa CEN:n jäsenvaltioissa kohteissa, jotka ovat yli 1000 metrin korkeudella merenpinnasta.

#### 5.4 Osavarmuusluvut

Taulukossa 6 on esitetty kuormien osavarmuusluvut.

Taulukko 6. Kuormien osavarmuusluvut (SFS-EN 14509, 125).

Rasitukset	Rajatila	
	Murtorajatila	Käyttörajatila
Pysyvä rasitukset $G$	1,35 (1,00)	1,00
Muuttuvat rasitukset	1,50	1,00
Lämpötilarasitukset	1,50 <sup>a</sup>	1,00
Viruman vaikutukset	1,00	1,00

<sup>a</sup> Lämpötilarasitusta koskeva kuorman osavarmuusluku voidaan korvata luvulla 1,35, kun elementin käyttömaan lainsäädännön vaatimukset edellyttävät niin.



## 5.5 Materiaalikertoimet

Materiaalikertoimina tulisi pääsääntöisesti käyttää tuotteelle testauksessa saatuja kertoimia. Taulukon 7 nimellisarvot ovat testattuja arvoja suhteellisen yhdenmukaisille tuotteille. Näitä arvoja käytettäessä saatetaan saada epävarmalla puolella olevia arvoja (SFS-EN 14509, 127).

Taulukko 7. Materiaalikertoimet (SFS-EN 14509, 127).

Ominaisuus, jolle arvoa $\gamma_M$ käytetään	Rajatila	
	Murtorajatila	Käyttörajatila
Metallisen pintakerroksen myötääminen	1,1	1,0
Metallisen pintakerroksen lommahdus kentässä ( $v \leq 0,09$ )	1,25	1,1
Metallisen pintakerroksen lommahdus välituen kohdalla (yhteisvaikutus tukireaktion kanssa)	1,25 <sup>a</sup>	1,1
Ydinkerroksen leikkautuminen ( $v \leq 0,16$ )	1,5	1,1
Profiloidun pintakerroksen leikkausmurtuminen	1,1	1,0
Ydinkerroksen puristusmurtuminen ( $v \leq 0,13$ )	1,4	1,1
Profiloidun pintakerroksen tukireaktiokestävyys	1,1	1,0
Kiinnikkeen murtuminen	1,33 <sup>b</sup>	1,0 <sup>b</sup>
Elementin murtuminen kiinnityskohdassa	1,33 <sup>b</sup>	1,0 <sup>b</sup>
<sup>a</sup> Materiaalin osavarmuuslukua lommahdukselle murtorajatilassa tarvitaan, jos suunnittelu perustuu kimmoteoriaan tai jos nollasta poikkeavaa taivutuskestävyyttä välitukien kohdalla hyödynnetään plastisuusteoriaan perustuvassa suunnittelussa. <sup>b</sup> Jos kiinnikkeen lujuuden ominaisarvo ei perustu riittävään lukumäärään testejä, jotta voidaan määrittää tilastollisesti luotettava arvo, tulee käyttää korkeampia materiaalien osavarmuuslukuja.		

Taulukossa 8 on esitetty TSP-S elementin kokeellisesti saatu leikkauslujuuden hajonta- ja ominaisarvo, materiaalin osavarmuuskerroin murto- ja käyttörajatilassa sekä liukukerroin. Taulukossa 9 on esitetty TSP-S elementin kokeellisesti saatu pintakerroksen puristuslujuuden hajonta- ja ominaisarvo, materiaalin osavarmuuskerroin murto- ja käyttörajatilassa.

Taulukko 8. Osavarmuuskerroin leikkaukselle.

Panel	variance (logarithmic st. deviation)	Characteristic shear strength $f_{cv}$	Ultimate limit state $\gamma_M$	Serviceability limit state $\gamma_M$	Shear modulus  G
		<i>kPa</i>			<i>MPa</i>
<b>100 mm panels</b>	0.0216	<b>75.8</b>	<b>1.10</b>	<b>1.02</b>	<b>4.91</b>
<b>150 mm panels</b>	0.0518	<b>62.6</b>	<b>1.17</b>	<b>1.04</b>	<b>4.56</b>
<b>240 mm panels</b>	0.0250	<b>60.2</b>	<b>1.11</b>	<b>1.02</b>	<b>4.41</b>
<b>All panels</b>	0.1002	<b>58.9</b>	<b>1.30</b>	<b>1.08</b>	<b>4.63</b>

Taulukko 9. Osavarmuuskerroin lommahdukselle.

Panel compressed face	variance (logarithmic st. deviation)	Characteristic wrinkling strength $\sigma_w$	Ultimate limit state $\gamma_M$	Serviceability limit state $\gamma_M$
		<i>MPa</i>		
<b>100 mm panels upper face</b>	0.0544	<b>113.7</b>	<b>1.18</b>	<b>1.04</b>
<b>100 mm panels lower face</b>	0.0547	<b>119.4</b>	<b>1.18</b>	<b>1.04</b>
<b>150 mm panels upper face</b>	0.0552	<b>117.0</b>	<b>1.18</b>	<b>1.04</b>
<b>150 mm panels lower face</b>	0.0787	<b>107.7</b>	<b>1.24</b>	<b>1.06</b>
<b>240 mm panels upper face</b>	0.0361	<b>118.1</b>	<b>1.13</b>	<b>1.03</b>
<b>240 mm panels lower face</b>	0.0588	<b>118.9</b>	<b>1.19</b>	<b>1.05</b>
<b>all panels upper face</b>	0.0493	<b>119.5</b>	<b>1.17</b>	<b>1.04</b>
<b>all panels lower face</b>	0.0617	<b>121.7</b>	<b>1.20</b>	<b>1.05</b>

Testatut arvot antavat TSP-S elementille paremmat arvot, mitä SFS-EN 14509 ominaisarvot.

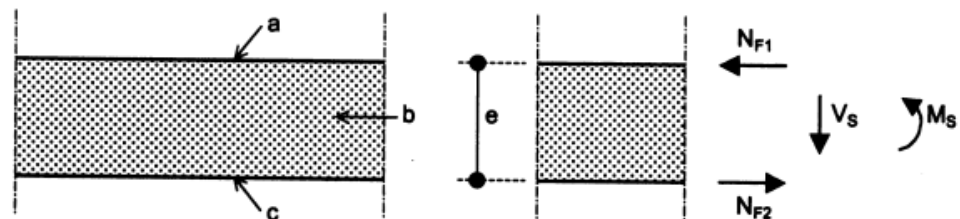
## 5.6 Rasituksien laskenta

Rasituksien laskentaan voidaan käyttää kahta eri menetelmää. Plastisuusteoria ja kimmoiteoria. Plastisuusteorian mukainen tarkastelu soveltuu vain murtorajatilatarkasteluun ja ehtona on, että taivutusjännitys välituen kohdalla on määräävä (SFS-EN 14509, 127). Plastisuusteoriaa sovellettaessa voidaan moniaukkoisen rakenteen jakaa vapaisiin

niveliin olettaen, että kaikkien tukien momenttikapasiteetti on nolla. Kun taivutusmomentti keskituella on määräävä, syntyy elementtiin nivel ja jatkuva elementti voidaan laskea 1-aukkoisena. Diplomi-insinööri Paavo Hassisen mukaan (henkilökohtainen tiedonanto 12.02.2019) jos leikkausjännitys tulee määrääväksi, niveltä ei ehdi syntyä ja elementti saattaa joutua heti murtorajatilaan. Tällä menetelmällä saadaan myös kestävämpiä tuloksia verrattuna kimmoteorialla laskettuun. Jos leikkausjännitys tulee määrääväksi, joudutaan elementti mitoittamaan kokonaan kimmoteorian mukaisella laskennalla. Laskentalitteissa on esitetty plastisuusteorian mukainen ja kimmoteorian mukainen mitoitus. Kaksiaukkoisilla rakenteilla on monia eri murtumismalleja riippuen lämpötilasta ja kohtisuorasta kuormasta.

### 5.6.1 Jännitysresultantit

Kuvassa 17 on esitetty sileänpintaisen tai kevyesti profiloidun sandwich-elementin jännitysresultantit.



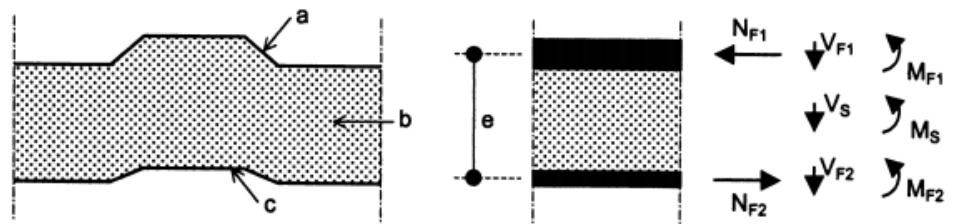
#### Selite

- a pintakerros 1
- b ydinkerros
- c pintakerros 2

Kuva 17. Sileänpintaisen elementin jännitysresultantit (SFS-EN 14509, 129).

Ohutkuorisella tai kevyesti profiloidulla elementillä pintakerrosten taivutusjäykkyyttä  $B_F$  ei tarvitse ottaa huomioon, koska niiden vaikutus jännitysjakautumiin ja taipumiin on pieni.

Kuvassa 18 on esitetty profiloidun sandwich-elementin jännitysresultantit.

**Selite**

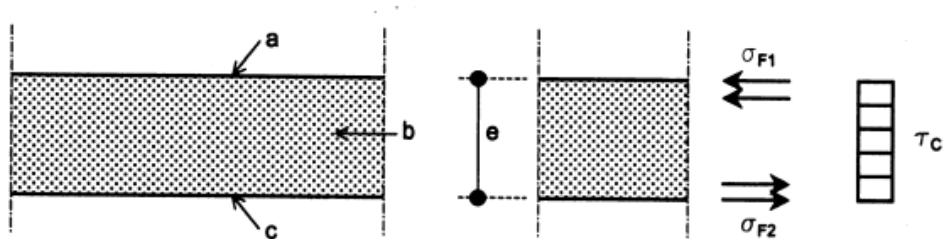
- a pintakerros 1
- b ydinkerros
- c pintakerros 2

Kuva 18. Profiloitun elementin jännitysresultantit (SFS-EN 14509, 129).

Profiloitun pintalevyn taivutusjäykkyys  $B_F$  pitää ottaa huomioon laskennassa, jolloin pintalevyille lasketaan taivutusjäykkyys erikseen.

### 5.6.2 Jännitysjauma

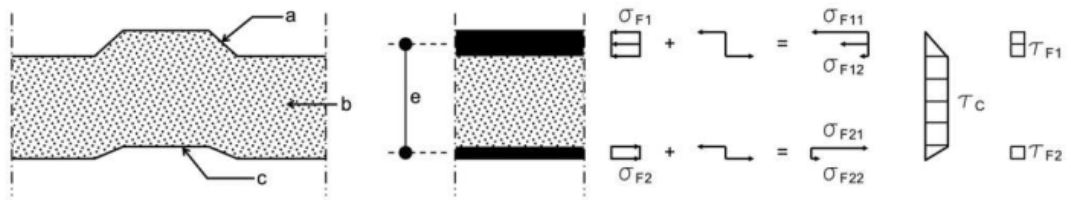
Kuvassa 19 on esitetty sileämpintaisen tai kevyesti profiloitun sandwich-elementin jännitysjauma.

**Selite**

- a pintakerros 1
- b ydinkerros
- c pintakerros 2

Kuva 19. Sileä tai kevyesti profiloitun sandwich-elementin jännitysjauma (SFS-EN 14509, 129).

Kuvassa 20 on esitetty profiloitun sandwich-elementin jännitysjauma.



**Selite**

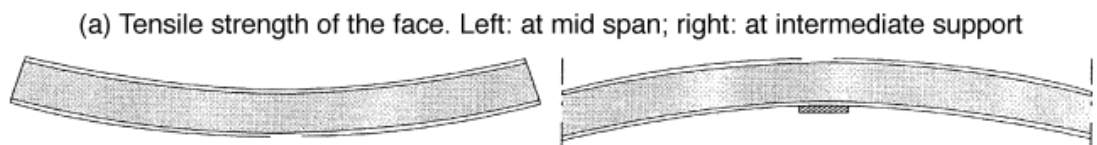
- a pintakerros 1
- b ydinkerros
- c pintakerros 2

Kuva 20. Profiloitun sandwich-elementin jännitysjaakauma (SFS-EN 14509, 129).

## 5.7 Jännitykset

### 5.7.1 Vetojännitys

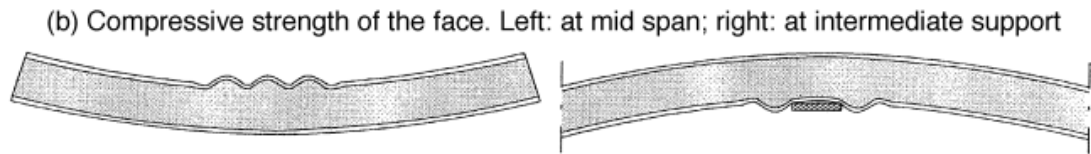
Vetojännitys harvoin tulee mitoittavaksi suureksi, koska teräsohuttelevyn vetokestävyys on tyypillisesti korkea. Kuvassa 21 on esitetty tilanteet vetojännitykselle. Vasemmalla jännevälin keskellä ja oikealla keskituella.



Kuva 21. Vetojännitys (Lightweight Sandwich Construction, 231).

### 5.7.2 Taivutusjännitys

Taivutuskestävyys määräytyy pinnan myötäämisenä tai useimmiten levyn lommahtamisena. Liimaus peittää puristusjännityksen huippualueella ja levy pääsee irti ydinmateriaalista ja rypistyy. Elementin taivutuskestävyys esitetäänkin aina lommahduslujuutena. Kuvassa 22 on esitetty pintalevyn lommahtaminen.



Kuva 22. Pintalevyn lommahtaminen (Lightweight Sandwich Construction, 231).

Lommahdusjännitys voidaan laskea sileäpintaisille paneeleille kaavalla 10 (Hassinen & Martikainen 1994, 14).

$$\sigma_{cr,1} = \beta(E_C G_C E_F)^{1/3}$$

Kaava 10. Lommahdusjännitys sileäpintaisille paneeleille.

$$\beta = 0,65$$

$$E_C = \frac{E_{Ct} E_{Cc}}{2}$$

$E_{Ct}$  = ydinmateriaalin kimmokerroin vedolle

$E_{Cc}$  = ydinmateriaalin kimmokerroin puristukselle

$E_F$  = kimmokerroin pintalevyllä

$G_C$  = liukokerroin ydinmateriaalille

Lommahdusjännitys kevyesti profiloiduille paneeleille voidaan laskea kaavalla 11 (Hassinen & Martikainen 1994, 15).

$$\sigma_{cr,1} = \frac{0,95}{A_F} (E_C G_C B_F)^{1/3}$$

Kaava 11. Lommahdusjännitys kevyesti kuvioidulle paneelille.

$A_F$  = pintalevyn poikkileikkaus – ala per tehollinen leveys

$B_F$  = pintalevyn taivutusjäykkyys per tehollinen leveys

Taivutusjännitykset asianmukaisen rakenneanalyysin jälkeen lasketaan kaavoista 12-14 (SFS-EN 14509, 130).

$$\sigma_{F1} = -\frac{M_S}{eA_{F1}} \quad \sigma_{F2} = \frac{M_S}{eA_{F2}}$$

Kaava 12. Taivutusjännitys.

$$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} - \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{11} \quad \sigma_{F12} = \sigma_{F1} + \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{12}$$

Kaava 13. Taivutusjännitys profiloitun pintalevyn yläpinnassa.

$$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} - \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{21} \quad \sigma_{F22} = \sigma_{F2} + \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{22}$$

Kaava 14. Taivutusjännitys profiloitun pintalevyn alapinnassa.

$A_{F1}$  ja  $A_{F2}$  = pintalevyn poikkileikkaus – ala per tehollinen leveys

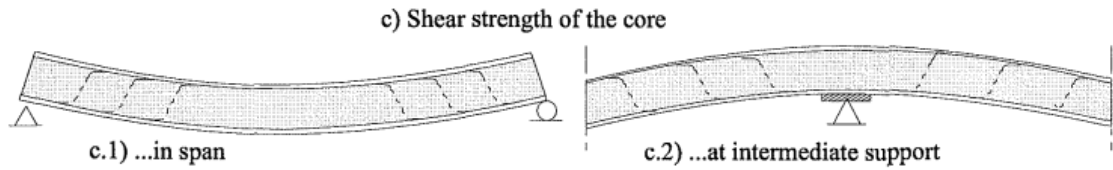
$I_{F1}$  ja  $I_{F2}$  = pintalevyn jäyhyysmomentti

$e$  = pintakerrosten painopisteiden etäisyys, kuvat 6 – 7

$d$  = profiloitun pintalevyn keskiö etäisyys, kuvat 6 – 7

### 5.7.3 Leikkausjännitys

Leikkausjännitys saattaa sandwich-elementeillä tulla määrääväksi varsinkin moniaukkoisilla rakenteilla. Kuvassa 23 on esitetty leikkausjännitys.



Kuva 23. Leikkausjännitys (European Recommendations for Sandwich Panels: Part 1: Design, 18).

Leikkausjännitykset asianmukaisen rakenneanalyysin jälkeen lasketaan kaavoista 15 ja 16 (SFS-EN 14509, 130).

$$\tau_c = \frac{V_S}{eB}$$

Kaava 15. Leikkausjännitys sileäpintaisilla tai kevyesti profiloituilla elementeillä.

$$\tau_{F1} = \frac{V_{F1}}{n_1 S_{W1} t_1} \qquad \tau_{F2} = \frac{V_{F2}}{n_2 S_{W2} t_2}$$

Kaava 16. Leikkausjännitys profiloituilla elementeillä.

$S_{W1}$  ja  $S_{W2}$  = profiloitujen pintakerrosten uumien pituuksia

$n_1$  ja  $n_2$  = profiloitujen pintakerrosten uumien lukumäärä

$B$  = elementin leveys, kuvat 6 – 7

$e$  = pintakerrosten painopisteiden etäisyys, kuvat 6 – 7

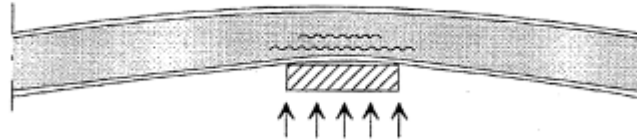
#### 5.7.4 Puristusjännitys

Tukireaktioista johtuva puristusjännitys pitää tarkastella päätytuella ja keskituella jatkuvilla rakenteilla. Sandwich-elementeillä puristus tulee mitoittavaksi lyhyemmillä jänneväleillä tai kapeilla tukipinnoilla. Yksiaukkoisen sandwich-elementin laskennassa oletetaan elementin pystyvän kiertymään vapaasti tuella ilman estettä. Jännevälin pituutena käytetään tukien keskilinjojen etäisyyksiä (SFS-EN 14509, 132). Tukireaktiokestävyys



määritetään testeillä tai kaavoilla 17 ja 18 (SFS-EN 14509, 122). Mikäli päätytuen ylitys on suurempi kuin  $0,6e$ , päätytuki voidaan käsitellä välitukena (SFS-EN 14509, 122.) Kuvassa 24 on esitetty tukireaktio keskituella.

(d) Strength of the face and core on the support



Kuva 24. Tukireaktio (Lightweight Sandwich Construction, 231).

$$F_{R1} = B(L_S + 0,5 * k * e) f_{Cc} / \gamma_M$$

Kaava 17. Päätytukireaktiokestävyys.

$$F_{R2} = B(L_S + k * e) f_{Cc} / \gamma_M$$

Kaava 18. Välitukireaktiokestävyys.

$B$  = elementin hyötyleveys

$L_S$  = tuen leveys

$f_{Cc}$  = testausten mukainen puristuslujuuden arvo

$k$  = jakaumaparametri

$e$  = pintakerrosten painopisteiden etäisyys, kuvat 6 – 7

$\gamma_M$  = osavarmuuskerroin puristukselle

k määritetään testeillä kohdan A.15.5 SFS-EN 14509 mukaan. Standardissa mineraalivillasta valmistetuille elementeille suositellaan arvoa 0.

### 5.8 Virumisluku

Virumisluku määritetään standardin SFS-EN 14509 A.6 kohdan mukaan testeillä. Laskennassa voidaan vaihtoehtoisesti käyttää arvoa 1,5 kun  $t = 2000$  h ja 4,0, kun  $t = 100\ 000$  h (SFS-EN 14509, 133). Virumisluku tulee määrittää testein kaikille elementeille, joita käytetään kattoon tai sisäkattoon ja jotka on suunniteltu kantamaan pitkäaikaisia tai pysyviä kuormia esimerkiksi lumi ja oma paino (SFS-EN 14509, 15.) Viruman vaikutusten laskennassa on syytä huomioida, että vaikutusten osavarmuuskerroin on 1,0 murtorajatilassa ja käyttörajatilassa. Viruma aiheuttaa jäykkyyden muutoksen elementissä, jolloin jännitykset muuttuvat. Viruman aiheuttamat jännitykset lasketaan jatkuvilla rakenteilla jännityksen muutoksina ja yhdistetään lopulliseen tulokseen. Yksiaukkoisilla rakenteilla viruma huomioidaan vain taipuman laskennassa.

### 5.9 Liukukerroin

Liukukerroin määritetään SFS-EN 14509 liitteen A mukaisten testien perusteella. Mineraalivillan liukukerroin vaihtelee  $2-20$  N/mm<sup>2</sup> välillä riippuen kuitujen asennosta (Davies 2001, 38).

Kun elementtiin kohdistuu pitkäaikaisia pysyviä kuormia, syntyy kivivillassa leikkausvirumaa. Ydinkerroksen liukukerointa pienennetään lumikuorman kohdalla 2000 tuntia kestävä kuormituksen mukaan ja pysyvien kuormien, kuten oman painon kohdalla, 100 000 tuntia kestävä kuormituksen mukaan (SFS-EN 14509, 133).

$$G_{ct} = \frac{G_C}{1 + \varphi_t}$$

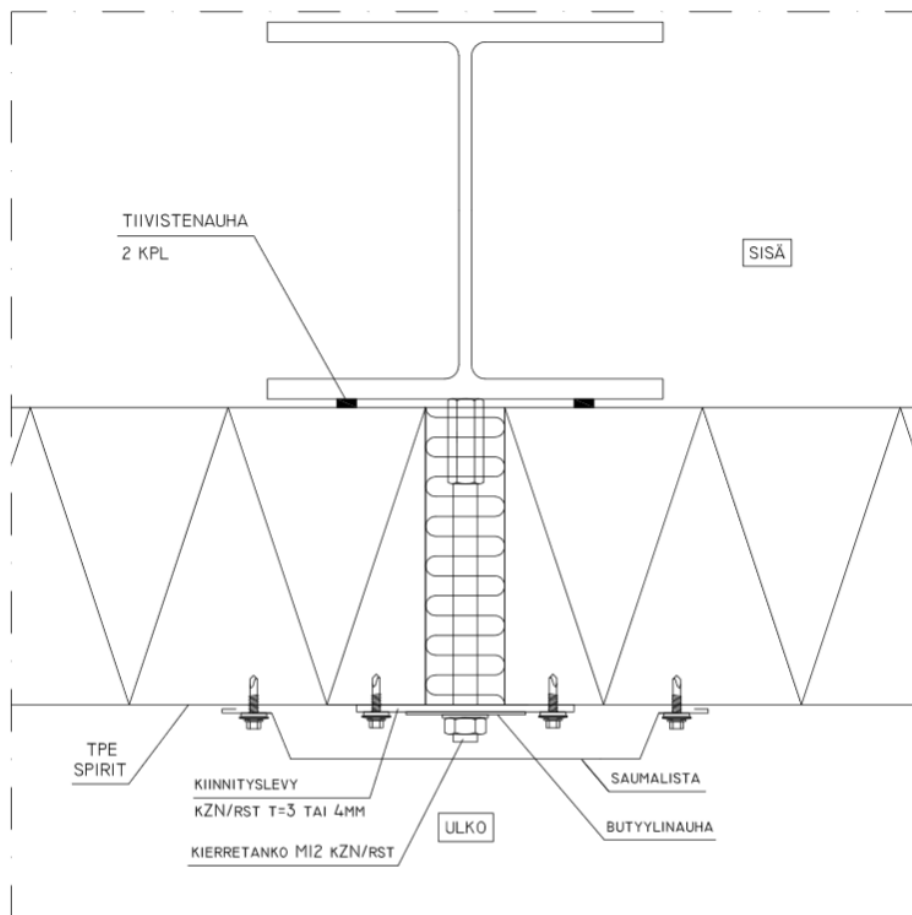
Kaava 19. Liukukertoimen alennettu arvo.

$\varphi_t$  = virumisluku

$G_C$  = testien mukainen liukukerroin

## 5.10 Kiinnikkeet

Ohuiden sandwich-elementtien kiinnikkeinä käytetään itseporautuvia ruuveja teräkseen ja betonissa betoniruuveja tai lyötäviä spike-kiinnikkeitä. Kohteissa, joissa teräspilarin seinämäpaksuus on liian suuri käytettäväksi itseporautuvia ruuveja, voidaan käyttää erillistä kiinnityslevyä. Kiinnitys tapahtuu kierretangolla ja mutterilla, joka hitsataan pilariin. Betonissa käytetään lyöntiankkuria. Levy toimii myös kuormaa jakavana, jolloin kiinnityskohtien määrää voidaan pienentää. Elementtejä voidaan kiinnittää teräkseen, betoniin ja puuhun. Kuvassa 25 on esitetty levykiinnikkeen periaate.



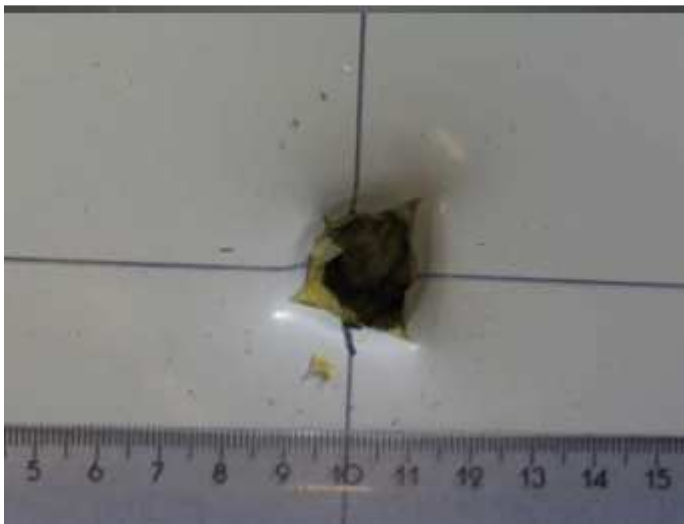
Kuva 25. TPE Spirit detajli D23.

SFS-EN 14509 standardissa on ohjeita elementtien testauksesta ja suunnittelusta tehdasvalmisteisille tuotteille. Kiinnikkeistä ei ole vielä nykyisessä versiossa olemassa

mainintaa, mutta tulevassa SFS-EN 14509-2 standardissa on kiinnikkeiden testauksesta ja suunnittelusta ohjeita. Myös ECCS:n uudessa julkaisussa sandwich-paneelien kiinnikkeiden suunnitteluun "*Preliminary European Recommendations for the Testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels*" on ohjeita kiinnikkeiden testauksesta ja suunnittelusta.

Kiinnitysten kuormitus tapahtuu suurilta osin vetovoimasta, joka syntyy tuulikuorman imun vaikutuksesta, sekä kaksiaukkoisilla rakenteilla myös lämpötilan vaihteluista. Kiinnikkeisiin kohdistuu leikkausvoimaa pintalevyn lämpölaajenemisen johdosta, sekä päällekkäisten elementtien painosta ja kaikista laitteista, joita on pysyvästi kiinnitetty paneeliin (Hassinen & Misiek 2009, 264).

Elementin kiinnityksen mitoittaa yleisimmin läpileikkautuminen elementistä, paitsi betoniin lyötävät spike-kiinnikkeet, joilla on heikko ulosvetokestävyys. Poraruuvien, jonka paksuus on 6,3 mm ruuvattuna 5 mm teräkseen ulosvetokestävyudeksi saadaan noin 10 kN, kun taas ohutlevystä läpileikkautuminen on noin 1,3-2 kN (SFS-EN 1993-1-3, 64). Kuvassa 24 on esitetty läpileikkautuminen elementistä.



Kuva 26. Ruuvien läpileikkautuminen (Hassinen & Misiek, 2009).

Elementtiä mitoittaessa tuulikuormalle on syytä muistaa, että rakennuksen nurkissa imukuorma on aina suurimmillaan.

”SFS-EN 1993-1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille” on esitetty itsekiinnittyville ruuveille kestävyden laskentaan kaavoja, joita voi käyttää elementtiruuvien läpivetokestävyden laskentaan (SFS-EN 1993-1-3, 64). Standardissa osavarmuuslukuna  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

$$F_{P,Rd} = 0,5d_w t f_u / \gamma_{M2}$$

Kaava 20. Läpivetokestävyys poraruuille.

$$F_{b,Rd} = \alpha d t f_u / \gamma_{M2}$$

Kaava 21. Reunapuristuskestävyys.

$d_w$  = aluslaatan tai kiinnittimen pään halkaisija

$t$  = levyn paksuus

$f_u$  = levyn murtolujuus

$d$  = kiinnittimen nimellinen halkaisija

$$\alpha = 3,2 \sqrt{\frac{t}{d}}$$

ECSS:n julkaisussa ”*Preliminary European Recommendations for Sandwich panels. Part 1. Design*” on kiinnikkeiden suunnitteluun annettu laskentakaavoja. Alla kaava läpileikkautumiselle.

$$F_{P,Rd} = 0,55d_w t f_u / \gamma_M$$

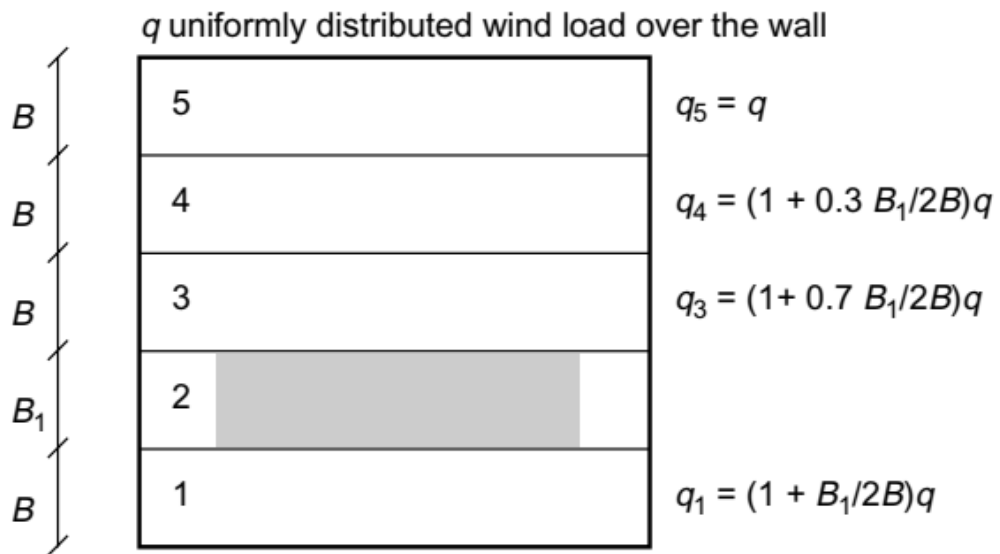
Kaava 22. Läpivetokestävyys poraruuille (ECSS).

Läpivetokestävyys ruuville kaavan 22 mukaan on hiukan parempi mitä pelkässä ohutlevyssä. Osavarmuuskertoimena sandwich-elementtien kiinnikkeille  $\gamma_M = 1,33$ . Kuitenkin suositeltavaa olisi määrittää testeillä tuotekohtaisesti kiinnikkeille kestävyys. Moniaukkoisilla rakenteilla keskituella vaikuttavalle momentille ja vetovoimalle ei ole kiinnikkeiden laskentaan varmaa menetelmää, jolloin elementin lommahtaminen kiinnikkeiden kohdalla tulee mitoittavaksi.

### 5.11 Aukot

Elementtiin joudutaan lähes kaikissa tapauksissa tekemään aukkoja ikkunoita, ovia ja luukkuja varten. Mikäli aukko ylittää puolet elementin leveydestä on suositeltava käyttää tukikehikkoa, johon elementti voidaan kiinnittää. Joissain tapauksissa joudutaan tekemään aukkoja ilman tukikehikkoa, jolloin elementtien kestävyys joudutaan tarkastelemaan aukkojen läheisyydessä.

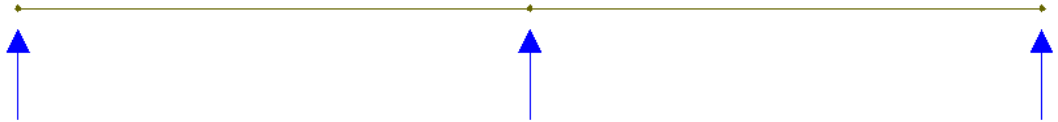
Aukot heikentävät elementin taivutus-, vääntö- ja leikkausjäykkyyttä. Tästä jäykkyyden muutoksesta johtuen osa kuormasta siirtyy paneelin pituussuuntaisia pontteja pitkin viereisille paneeleille (Davies, 293.) Elementin jäykkyyden laskemiseen ja kuormien jakautumiseen on olemassa eri menetelmiä, joita on esitetty kirjassa ”*Lightweight Sandwich Construction*” kohdassa 12.4. Käytännön suunnittelussa voidaan käyttää Paroc Panel Systemsin menetelmää, jossa aukon viereiset paneelit ottavat vastaan 70 % paneelin kuormasta ja seuraavat ottavat 30 %. Elementeille, joissa ydinmateriaalina on kivivilla, tämä menetelmä on osoittautunut toimivaksi (Davies, 296). Kuvassa 27 on esitetty Parocin menetelmän periaate.



Kuva 27. Kuormien jakaantuminen aukon läheisyydessä (Lightweight Sandwich Construction, 296).

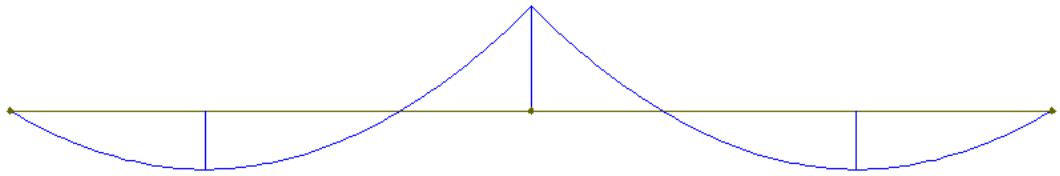
## 6 STATIIKKA

Tuulenpaineen tasainen kuorma aiheuttaa kuvan 28 mukaiset tukireaktiot ja puristusjännityksen tuilla.



Kuva 28. Tukireaktiot tuulenpaineesta.

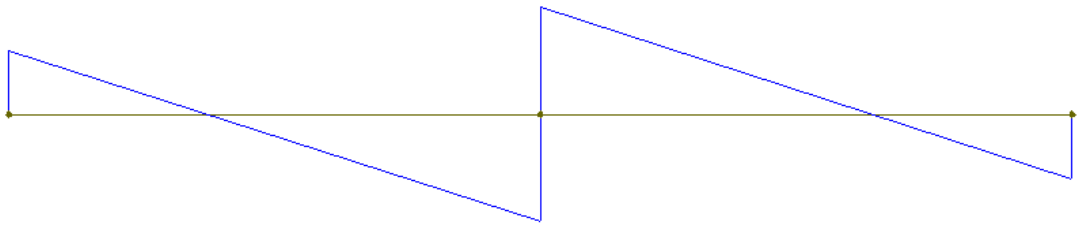
Tuulenpaineesta syntyy alla olevan kuvan mukainen momenttikuvio, jossa tuella elementin sisäpinta on puristettuna.



Kuva 29. Momenttikuvio tuulenpaineesta.

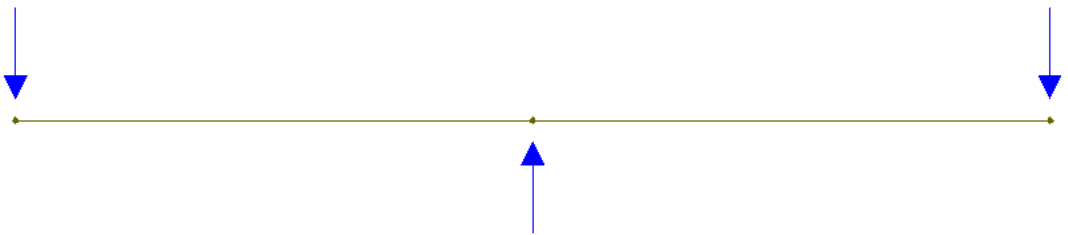
Kuvassa 30 on esitetty tuulenpaineesta johtuva leikkausvoimakuvio.





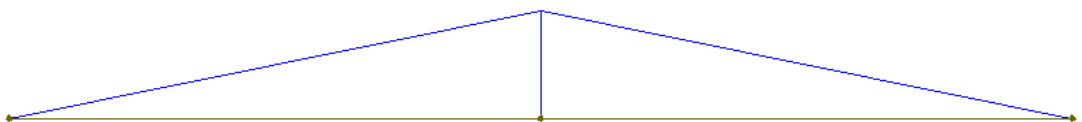
Kuva 30. Leikkausvoimakuvio tuulenpaineesta.

Lämpötilan muutoksesta johtuvat reaktiot ovat eri merkkiset päissä, mitä keskituella. Elementti pyrkii kaareutumaan lämpimämpään suuntaan ja syntyy pakkovoimatila (P. Hassinen henkilökohtainen tiedonanto 4.2.2019). Kuvassa 31 on esitetty talviajan kaareutumisesta johtuvat tukireaktiot.



Kuva 31. Tukireaktiot talviajan kaareutumisesta.

Tästä pakkovoimatilasta syntyy momentti, joka aiheuttaa keskituella suurimman momentin ja elementin sisäpinta on puristettuna. Kuvassa 32 on esitetty talviajan kaareutumisesta aiheutuva momenttikuvio.



Kuva 32. Talviajan kaareutumisesta aiheutuva momenttikuvio.

Talviajan kaareutumisesta aiheutuu päissä kiinnikkeille vetovoimaa, joka pitää ottaa huomioon mitoituksessa. Tuulen imu ja kesäajan kaareutuminen aiheuttavat vastakaissuuntaiset voimat. Näille voimille tehdään kuormitusyhdistelyt SFS-EN 14509 mukaan. Laskentaliitteissä on esitetty eri kuormitustapausten yhdistelyjä.

## 6.1 Tasaiset jännevälit

SFS-EN 14509 standardissa on esitetty mitoitus 1–3 aukkoisille tasaisen jännevälin elementeille laskentakaavat. Alla olevat kaavat pätevät vain niille kaksi- ja kolmeaukkoisille sileäpintaisille tai kevyesti profiloituille elementeille, joiden jännevälit ovat samansuuruiset (kuva 6).

### 6.1.1 Yksiaukkoisille

$$V = \frac{qL}{2}$$

Kaava 23. Yksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.

$$M = \frac{qL^2}{8}$$

Kaava 24. Yksiaukkoisen rakenteen momentti kentässä.

$$w = \frac{5qL^4}{384B_s} 2k$$

Kaava 25. Yksiaukkoisen rakenteen maksimitaipuma kentässä.

$$w = \frac{\theta L^2}{8}$$

Kaava 26. Yksiaukkoisen rakenteen taipuma lämpötilaerosta.

### 6.1.2 Kaksiaukkoisille

$$V = \frac{qL}{2} \left(1 - \frac{1}{4(1+k)}\right)$$

Kaava 27. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.

$$V = \frac{qL}{2} \left(1 + \frac{1}{4(1+k)}\right)$$

Kaava 28. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla.

$$F = qL \left(1 + \frac{1}{4(1+k)}\right)$$

Kaava 29. Kaksiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituella.

$$M = \frac{qL^2}{8} \left(1 - \frac{1}{4(1+k)}\right)^2$$

Kaava 30. Kaksiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti kentässä.

$$M = -\frac{qL^2}{8} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 31. Kaksiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti välituella.

$$V = -\frac{3B_s\theta}{2L} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 32. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuen kohdalla lämpötilaerosta.

$$V = \frac{3B_s\theta}{2L} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 33. Kaksiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla lämpötilaerosta.

$$F = \frac{3B_s\theta}{L} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 34. Kaksiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituen kohdalla lämpötilaerosta.

$$M = -\frac{3B_s\theta}{4} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 35. Kaksiaukkoisen rakenteen momentti kentässä lämpötilaerosta.

$$M = -\frac{3B_s\theta}{2} \frac{1}{1+k}$$

Kaava 36. Kaksiaukkoisen rakenteen momentti välituella lämpötilaerosta.

$$w = \frac{qL^4}{48B_s} \frac{0,26 + 2,6k + 2k^2}{1+k}$$

Kaava 37. Kaksiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä.

$$w = \frac{\theta L^2}{32} \frac{1 + 4k}{1 + k}$$

Kaava 38. Kaksiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä lämpötilaerosta.

### 6.1.3 Kolmiaukkoisille

$$V = \frac{qL}{2} \left(1 - \frac{1}{5 + 2k}\right)$$

Kaava 39. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuella.

$$V = \frac{qL}{2} \left(1 + \frac{1}{5 + 2k}\right)$$

Kaava 40. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla.

$$F = qL \left(1 + \frac{1}{2(5 + 2k)}\right)$$

Kaava 41. Kolmiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituella.

$$M = \frac{qL^2}{8} \left(1 - \frac{1}{5 + 2k}\right)^2$$

Kaava 42. Kolmiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti kentässä.

$$M = -\frac{qL^2}{10 + 4k}$$

Kaava 43. Kolmiaukkoisen rakenteen taivutusmomentti välituella.

$$V = -\frac{6B_s\theta}{L} \frac{1}{5 + 2k}$$

Kaava 44. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima päätytuen kohdalla lämpötilaerosta.

$$V = \frac{6B_s\theta}{L} \frac{1}{5 + 2k}$$

Kaava 45. Kolmiaukkoisen rakenteen leikkausvoima välituen kohdalla lämpötilaerosta.

$$F = \frac{6B_s\theta}{L} \frac{1}{5 + 2k}$$

Kaava 46. Kolmiaukkoisen rakenteen tukireaktio välituen kohdalla lämpötilaerosta.

$$M = -3B_s\theta \frac{1}{5 + 2k}$$

Kaava 47. Kolmiaukkoisen rakenteen momentti kentässä lämpötilaerosta.

$$M = -6B_s\theta \frac{1}{5 + 2k}$$

Kaava 48. Kolmiaukkoisen rakenteen momentti välituella lämpötilaerosta.

$$w = \frac{qL^4}{24B_s} \frac{0,83 + 5,6k + 2k^2}{5 + 2k}$$

Kaava 49. Kolmiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä.

$$w = -\frac{\theta L^2}{4} \frac{1,06 + k}{5 + 2k}$$

Kaava 50. Kolmiaukkoisen rakenteen taipuma kentässä lämpötilaeroista.

$$B_S = \frac{E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2} e^2}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2}}$$

Kaava 51. Sandwich-elementin taivutusjäykkyys.

$E_{F1}$  ja  $E_{F2}$  = pintalevyjen kimmokertoimia

$A_{F1}$  ja  $A_{F2}$  = pintalevyjen poikkileikkaus – ala/m

$B_S$  supistuu muotoon  $B_S = 0,5 E_F t_F e^2$ , jos elementin pintalevyt ovat samanlaisia ja tasaisia (Hassinen 2003, 489.)

6.1.4 Profiloidulle pintalevyille.

Profiloidun elementin statiikka yksiaukkoiselle rakenteelle voidaan laskea alla olevilla kaavoilla (SFS-EN 14509, 136).

$$M_{F1} = \frac{gL^2}{8} \beta$$

Kaava 52. Pintakerroksen taivutusmomentti  $M_{F1}$  kentässä.

$$M_{F1} = -B_{F1} \theta (1 - \beta)$$

Kaava 53. Pintakerroksen taivutusmomentti  $M_{F1}$  kentässä lämpötilaeroista.

$$M_S = \frac{gL^2}{8}(1 - \beta)$$

Kaava 54. sandwich-osan taivutusmomentti  $M_S$  kentässä.

$$M_S = B_{F1}\theta(1 - \beta)$$

Kaava 55. Pintakerroksen taivutusmomentti  $M_S$  kentässä lämpötilaeroista.

$$w = \frac{5qL^4}{384B_S} 2k(1 - \beta)$$

Kaava 56. Profiloidun elementin taipuma.

$$w = \frac{\theta L^2}{8}(1 - \beta)$$

Kaava 57. Profiloidun elementin taipuma lämpötilaeroista.

$$\beta = \frac{B_{F1}}{B_{F1} + \frac{B_S}{1 + 2,67k}}$$

Kaava 58. Beta-kerroin lämpötilakuormalle.

$$\beta = \frac{B_{F1}}{B_{F1} + \frac{B_S}{1 + 3,2k}}$$

Kaava 59. Beta-kerroin tasaiselle kuormalle.



$$k = \frac{3 * B_S}{L^2 * G_c * A_c}$$

$A_c$  = ydinkerroksen poikkileikkaus – ala/m

$G_c$  = liukukerroin

## 6.2 Eripituiset jännevälit

Standardin SFS-EN 14509 mukaiset kaavat pätevät vain tasaisen jännevälän tapauksille. Mikäli halutaan tarkastella tapauksia, jossa jännevälit ovat eripituisia voidaan käyttää laskentaohjelmia eri tapauksien selvittämiseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää staattisesti epämääräisten rakenteiden laskentamenetelmiä. Nämä käsinlaskutavat ovat työläitä, kun kuormat vaihtelevat. Elementtien laskennassa, jossa lähtökohtaisesti on vain tasaista kuormaa, saadaan käsin laskettua rasitukset kohtalaisen helposti. Jatkuvan palkin tapauksessa, jossa kuormituksen on tasainen yhtä suuri kuorma, saadaan laskettua momentti keskituella kolmen momentin yhtälöllä. Taivutusjäykkyyden ollessa palkille saman suuruinen koko matkan yhtälö helpottuu. Seuraavassa on esitetty kolmen momentin yhtälö (Salmi & Kuula, 220).

$$L_{12}M_{12} + 2(L_{12} + L_{23})M_{23} + L_{23}M_{34} = 6EI(\alpha_{21} - \alpha_{23})$$

Kaava 60. Kolmen momentin yhtälö.

Kaksiaukkoisen palkin jännevälit voidaan ilmoittaa 1-2 ja 2-3. Numeroiden suunta ilmoittaa mihin suuntaan tarkastellaan. Kaavassa  $L_{12}$  kuvaa ensimmäisen jännevälän mittaa ja  $L_{23}$  toisen ja samoin momenttien  $M_{12}$ ,  $M_{23}$ . Staattisessa mallissa päiden momentit ovat 0 ja ainoat momentit ovat kentissä ja tuella momentti  $M_{34}$ . Päätepisteiden rotaatiot  $\alpha_{21}$  ja  $\alpha_{23}$  nivelellisesti tuetulle palkille on esitetty kaavassa 61 (Salmi & Kuula, 220).

$$\alpha = \frac{qL^3}{24EI}$$

Kaava 61. Päätepisteen rotaatio tasaiselle kuormalle.

Kolmen momentin yhtälö saadaan näillä tiedoilla sievennettyä muotoon.

$$M_{34} = \frac{1}{8} \left( q \frac{L_{12}^3 + L_{23}^3}{L_{12} + L_{23}} \right)$$

Kaava 62. Eripituisten jännevälien momentti keskituella.

Leikkausvoimat saadaan kaavasta 63 (Salmi & Kuula, 218).

$$V = \frac{-(M_{ik} - M_{ki})}{L} + Q_{ik}$$

Kaava 63. Leikkausvoiman yhtälö.

$$Q_{ik} = \frac{qL}{2}, \text{ nivelellisesti tuetulle palkille, jossa vaikuttaa tasainen kuorma}$$

Momentin arvot kentissä voidaan ratkaista statiikan lauseilla, kun tiedetään tukireaktiot. Leikkausvoima vaihtaa merkkiä momentin maksimikohdassa. Momentin maksimiarvon määrittämiseksi pitää ratkaista leikkausvoiman 0-kohta kaavalla 64 (Salmi & Kuula, 43).

$$V(x) = -V + qx = 0$$

Kaava 64. Leikkausvoiman 0-kohta.

Kolmen momentin yhtälöä ei sellaisenaan voi käyttää sandwich-elementeille. Yhtälöön pitää ottaa huomioon ydinkerroksen leikkausmuodonmuutos samoin kuin SFS-EN 14509 taulukon E.10.1 mukaisissa kaavoissa. Tässä työssä jätän laskentapohjasta pois eripituiset jännevälit. Päivitän ohjelmaa myöhemmin jatkaessani työskentelyä sandwich-paneelien suunnittelussa.

## 7 LASKENTAPOHJA

Liitteessä 5 on esitetty laskentapohjan ulkoasu. Ohjelma on tehty todella helppokäyttöiseksi. Ylhäältä laskeudutaan alas ja syötetään arvot alasetoalikoisiin. Kun kursori vietään valikon kohdalle, tulee ohjeistus mitä arvoja syötetään. Ensimmäiseksi valitaan Elementtityyppi. Ohjelma muuttaa elementin lujustietoja tyyppin mukaan. Seuraavaksi valitaan käyttökohde. Vaihtoehtoina ovat katto ja seinä. Katon tapauksessa ohjelma laskee vain lumikuorman, omanpainon ja talviajan lämpötilaeron. Katolla oletetaan lumikuorman ollessa päällä 0 C°. Omapaino päivittyy automaattisesti valitessa elementin paksuus. Väriyhmän valinta vaikuttaa eniten seinän tapauksessa, jolloin lämpötilan vaihtelut aiheuttavat pakkovoimia.

Jos halutaan tarkastella kattoa ilman lumikuormaa, voidaan käyttää seinävaihtoehtoa. Seuraavaksi valitaan jänneväliden määrä ja pituus. Oikealla puolella on kiinnikkeiden määrä. Kiinnikkeiden alasetoalikoissa on mahdollisuus valita kiinnike teräkselle, puulle ja betonille. Viimeisenä syötetään luonnonkuorma, joka on tuuli tai lumi. Valikossa tulee ohjeistus, joka neuvoo syöttämään oikean kuorman. Katon tapauksessa ohjelma päivittää elementistä poispäin olevan kuorman nolaksi. Ohjelma ilmoittaa suurimmat jännitykset ja käyttöasteet jännityksien oikealla puolen. Väri on vihreä, jos käyttöaste ei ylitä. Alimmaisena on ilmoitus vihreällä, jos elementti on kelvollinen kohteeseen valituilla kuormilla.

## 8 POHDINTA

Kevyiden metalliohutlevys sandwich-elementtien mitoitus pitää tehdä tarkkaan. Plasti-  
suusteorian mukaisella mitoituksella päästään pidempiin jänneväleihin moniaukkoisissa  
rakenteissa, mutta leikkausjännitys nousee helposti määrääväksi, joka on tärkeä huo-  
mioida. Plastisessa mitoituksessa on myös huomattava esteettinen näkökanta, kun ele-  
mentti murtuu keskituella, ydinmateriaali pehmenee murtokohdasta. Tuen kohdalla pu-  
ristuneen elementin tasaisessa pinnassa saattaa näkyä heijastus, varsinkin ulkopin-  
nassa kiinnikkeiden kohdalla. Asiakkaalle toimitettaessa paneelia pitäisi varmistaa  
myös esteettinen näkökanta. Jänneväli pienenee huomattavasti laskettaessa kimmo-  
teorian mukaisella mitoituksella, mutta sillä voidaan taata elementin pysyminen täysin  
ehjänä. Jänneväliä pienennettäessä joudutaan tukien määrää kasvattamaan, jolloin  
kustannukset kasvavat.

Standardin mukaiset osavarmuuskertoimet saattavat antaa liian varmallalla puolella ole-  
via arvoja. Kevyiden sandwich-elementtien mitoitus ei ole varmaa ilman testituloksia,  
koska kivivillan ominaisuudet saattavat vaihdella paljon. TPE Spirit-elementillä on hyvät  
kestävyyden arvot ja myös sen ansiosta voidaan määrittää testeistä sille ominaiset  
osavarmuuskertoimet.

Elementit tehdään yksiaukkoisena rakenteena tarkoituksella, koska moniaukkoisen ra-  
kenne on staattisesti epämääräinen. Monilla materiaaleilla saadaan rakenteista kestä-  
vämpiä moniaukkoisina. Sandwich-elementeillä staattisesti epämääräinen rakenne on  
heikompi ratkaisu, koska se muodostuu heikosta ydinmateriaalista ja muodonmuutok-  
sille alttiista ohuesta pintamateriaalista. Sandwich-elementin taipumus muodonmuutok-  
sista johtuville pakkovoimille kasvattaa taivutusmomenttia ja tukireaktiota keskituella.  
Taivutusmomentin ja tukireaktion yhteisvaikutus keskituella heikentää rakennetta huo-  
mattavasti. Yksiaukkoisella rakenteella saatetaan päästä pidempiin jänneväleihin ke-  
vyillä sandwich-elementeillä. Rakenteesta poistetaan pakkovoimatilat ja elementti pää-  
see kiertymään vapaasti tuella. Riippuen käyttökohteesta suunnittelijan kannattaa arvi-  
oida, onko järkevä käyttää moniaukkoista rakennetta ja saadaanko siitä jotain hyötyä  
esimerkiksi asennuksen helpottuessa.

ECCS:n mukainen tukireaktiokestävyyden kaava antaa elementille paremman puristus-  
kestävyyden. Jakaumakertoimen arvoa muuttamalla elementin puristuskestävyys

muuttuu huomattavasti. Paineen jakautuminen elementin ydinmateriaalissa tulisi määrittää testeillä, jotta saataisi totuudenmukainen puristuskestävyys.

## LÄHTEET

- Davies, J.M. 2001. Lightweight sandwich construction: Blackwell Science on behalf of CIB Commission W56 and ECCS Working Group TWG 7.9.
- ECCS. 2000. European Recommendations for Sandwich Panels: Part 1 Design: ECCS /CIB Report-CIB Publication Number 257:23.
- ECCS. 1991. Preliminary European Recommendations for Sandwich Panels: Part 1: Design: ECCS Publication No. 66
- ECCS. 2009. Preliminary European Recommendations for the Testing and Design of Fastenings for Sandwich Panels: ECCS/CIB Report-CIB Publication Number 127.
- Hassinen, P & Martikainen, L. 1994. Load bearing capacity of continuous sandwich panels. Helsinki: University of Technology.
- Hassinen, P. 2003. Metalliohutlevys sandwich-elementtien suunnittelu: Rakentajain kalenteri.
- Hassinen, P. & Misiek, T. 2009. Fixings of sandwich panels in building applications. Conference paper: ECCS TC7.9 and CIB W056
- SFS-EN 14509. 2014. Itsekantavat metalliohutlevypintaist eristävät sandwich elementit. Tuotestandardi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 1993-1-3+AC. 2006. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 10143. 2007. Jatkuvatoinisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Mitta- ja muototoleranssit. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 10346. 2015. Jatkuvatoinisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 10169+AC. 2012. Orgaanisilla aineilla pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.
- Salmi, T. & Kuula, K. 2012. Rakenteiden mekaniikka. Tampere: Pressus.

TPE Sirit Panel. 2018. Tuotetieto: Turun Pelti ja Eristys Oy.

# Yksiaukkoisen seinäelementin mitoitus

## 1-AUKKOISEN PELTI-VILLA-PELTI SEINÄELEMENTIN MITOITUS

Elementti TSP150-S, sileä pinta

$$L := 6.4 \text{ m}$$

$$d_{nom} := 150 \text{ mm}$$

$$d_{tol} := 0.02$$

$$d := d_{nom} \cdot (1 - d_{tol}) = 147 \text{ mm}$$

$$B := 1200 \text{ mm}$$

$$L_s := 90 \text{ mm}$$

$$t_{nom,1} := 0.6 \text{ mm}$$

$$t_{nom,2} := 0.5 \text{ mm}$$

$$t_{tol} := 0.07 \text{ mm}$$

$$t_{zinc} := 0.04 \text{ mm}$$

$$t_{d1} := t_{nom,1} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.525 \text{ mm}$$

$$t_{d2} := t_{nom,2} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.425 \text{ mm}$$

$$e := d - 0.5 \cdot (t_{nom,1} + t_{nom,2}) = 146.45 \text{ mm}$$

$$d_C := d - (t_{nom,1} + t_{nom,2}) = 145.9 \text{ mm}$$

### Kuormien osavarmuuskertoimet

$$\gamma_w := 1.5$$

### Materiaalin osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{Mv} := 1.3$$

$$\gamma_{Mc} := 1.33$$

$$\gamma_{Mw} := 1.2$$

$$\gamma_{Mt} := 1.1$$

Jänneväli

Elementin ilmoitettu paksuus

Elementin paksuuden toleranssi

Elementin laskenta paksuus

Elementin leveys

Tukipinnan leveys

Ulkopinnan paksuus

Sisäpinnan paksuus

Levyn paksuuden toleranssi EN 10143 mukaan

Sinkkikerroksen paksuus

Suunnittelupaksuus ulkopinnalle

Suunnittelupaksuus sisäpinnalle

Pintalevyjen painopisteiden etäisyys

Ydinmateriaalin paksuus

Kerroin tuulikuormalle

Kerroin leikkausvoimalle (testeistä)

Kerroin puristukselle

Kerroin lommahdukselle (testeistä)

Kerroin pintalevyn myötäämiselle



Materiaaliominaisuudet

Arvot Turun Pelti ja Eristys Spirit, TSP-S elementille

$$G_C := 3.1 \text{ MPa}$$

Liukkerroin

$$f_{Cv} := 0.059 \text{ MPa}$$

Leikkauslujuus

$$f_{Cc} := 0.067 \text{ MPa}$$

Puristuslujuus

$$\sigma_w := 119.5 \text{ MPa}$$

Lomahduslujuus

$$f_{ty} := 280 \text{ MPa}$$

Pintalevyn myötölujuus

$$E_s := 210000 \text{ MPa}$$

Teräksen kimmokerroin

$$E_{F1} := E_s \quad E_{F2} := E_s$$

$$\alpha_s := 0.000012 \cdot \frac{1}{\text{deg}}$$

Lämpölaajenemiskerroin teräkselle

$$\alpha_{F1} := \alpha_s \quad \alpha_{F2} := \alpha_s$$

$$A_{F1} := t_{d1} = 525 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Ulkopinnan poikkileikkaus-ala

$$A_{F2} := t_{d2} = 425 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sisäpinnan poikkileikkaus-ala

$$A_C := d_C = (1.459 \cdot 10^5) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Ydinmateriaalin poikkileikkaus-ala

$$B_S := \frac{(E_{F1} \cdot A_{F1} \cdot E_{F2} \cdot A_{F2})}{E_{F1} \cdot A_{F1} + E_{F2} \cdot A_{F2}} \cdot e^2 = (1.0578 \cdot 10^9) \frac{\text{kN} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Taivutusjäykkyys

$$k := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_C \cdot L^2} = 0.1713$$

Leikkauserroin

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Kuormat

$$q_k := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorman ominaisarvo

$$q_{k2} := -0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorman imu ominaisarvo

$$T_{1w} := -30 \text{ deg}$$

Talviajan ulkopuolen lämpötila

$$T_{1s} := 65 \text{ deg}$$

Kesäajan ulkopuolen lämpötila, väriyhmän mukaan

$$T_{2w} := 20 \text{ deg}$$

Talviajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{2s} := 25 \text{ deg}$$

Kesäajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{\Delta w} := T_{1w} - T_{2w} = -50 \text{ deg}$$

Talviajan lämpötilaero

$$T_{\Delta s} := T_{1s} - T_{2s} = 40 \text{ deg}$$

Kesäajan lämpötilaero

$$M_s := \frac{(q_k \cdot L^2)}{8} = 4.096 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti tuulikuormasta

$$M_{s2} := \frac{(q_{k2} \cdot L^2)}{8} = -4.096 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti tuulikuormasta (imu)

$$V := \frac{(q_k \cdot L)}{2} = 2.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima

$$V_2 := \frac{(q_{k2} \cdot L)}{2} = -2.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima (imu)

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

MURTORAJATILA

$$\sigma_{F1} := \frac{\gamma_w \cdot M_s}{e \cdot A_{F1}} = 79.9103 \text{ MPa}$$

Suunnittelu puristusjännitys ulkopinnassa

$$\frac{\sigma_{F1}}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.8024$$

Käyttöaste puristukselle ulkopinnassa

$$\sigma_{F2} := \frac{\gamma_w \cdot M_s}{e \cdot A_{F2}} = 98.7127 \text{ MPa}$$

Suunnittelu vetojännitys sisäpinnassa

$$\frac{\sigma_{F2}}{\frac{f_{ty}}{\gamma_{Mt}}} = 0.3878$$

Käyttöaste vedolle sisäpinnassa

$$\tau_C := \frac{(\gamma_w \cdot V)}{e} = 0.0262 \text{ MPa}$$

Suunnittelu leikkausjännitys

$$\frac{\tau_C}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv}}} = 0.5777$$

Käyttöaste leikkaukselle

$$\sigma_{Cc} := \frac{(\gamma_w \cdot V)}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.0322 \text{ MPa}$$

Suunnittelu puristusjännitys tuella

$$\frac{\sigma_{Cc}}{\frac{f_{Cc}}{\gamma_{Mc}}} = 0.639$$

Puristusjännityksen käyttöaste

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

MURTORAJATILA (imu)

$$\sigma_{F2.2} := -\frac{\gamma_w \cdot M_{s2}}{e \cdot A_{F2}} = 98.7127 \text{ MPa}$$

Suunnittelu puristusjännitys sisäpinnassa

$$\frac{\sigma_{F2.2}}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.9913$$

Käyttöaste puristukselle sisäpinnassa

$$\sigma_{F1.2} := -\frac{\gamma_w \cdot M_{s2}}{e \cdot A_{F1}} = 79.9103 \text{ MPa}$$

Suunnittelu vetojännitys ulkopinnassa

$$\frac{\sigma_{F1.2}}{\frac{f_{ty}}{\gamma_{Mt}}} = 0.3139$$

Käyttöaste vedolle ulkopinnassa

$$\tau_{C2} := -\frac{(\gamma_w \cdot V_2)}{e} = 0.0262 \text{ MPa}$$

Suunnittelu leikkausjännitys

$$\frac{\tau_{C2}}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv}}} = 0.5777$$

Käyttöaste leikkaukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Kiinnikkeiden mitoitus

6.3 mm elementtiruuvi 19 mm aluslevyllä läpi paneelista

$$n := 4$$

Ruuvien määrä per sivu

$$\gamma_{MF} := 1.33$$

Varmuuskerroin kiinnikkeille

$$d_w := 19 \text{ mm}$$

Aluslevyn halkaisija

$$t_{d1} = 0.525 \text{ mm}$$

Pintalevyn suunnittelupaksuus

$$f_u := 360 \text{ MPa}$$

Levyn murtolujuus

$$F_{p.Rd} := \frac{(0.55 \cdot d_w \cdot t_{d1} \cdot f_u)}{\gamma_{MF}} = 1.485 \text{ kN}$$

Läpivetokestävyys ruuville

$$\frac{(\gamma_w \cdot V_2 \cdot B)}{n \cdot F_{p.Rd}} = 0.7758$$

Käyttöaste kiinnitykselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KÄYTTÖRAJATILA

$$\psi_{0w} := 0.6 \quad \psi_{1w} := 0.75$$

Yhdistelykertoimet tuulelle

$$\psi_{0T} := 0.6 \quad \psi_{1T} := 1$$

Yhdistelykertoimet lämpötilalle

$$\theta_w := -\frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta w})}{e} = (4.097 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus talviajan lämpötilaerosta

$$\theta_s := -\frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta s})}{e} = -3.2776 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus kesäajan lämpötilaerosta

$$f_{\theta w} := \frac{(\theta_w \cdot L^2)}{8} = 20.9764 \text{ mm}$$

Taipuma lämpötilaerosta talvella

$$f_{\theta s} := \frac{(\theta_s \cdot L^2)}{8} = -16.7812 \text{ mm}$$

Taipuma lämpötilaerosta kesällä

$$f := \frac{5}{384} \cdot \frac{(q_k \cdot L^4)}{B_S} \cdot \left(1 + \frac{16}{5} \cdot k\right) = 25.5767 \text{ mm}$$

Taipuma tuulikuormasta

$$f_2 := \frac{5}{384} \cdot \frac{(q_{k2} \cdot L^4)}{B_S} \cdot \left(1 + \frac{16}{5} \cdot k\right) = -25.5767 \text{ mm}$$

Taipuma tuulikuormasta (imu)

$$f_w := \max(\psi_{1w} \cdot f + \psi_{0T} \cdot f_{\theta w}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta w} + \psi_{0w} \cdot f) = 36.3225 \text{ mm}$$

$$f_s := \max(\psi_{1w} \cdot f_2 + \psi_{0T} \cdot f_{\theta s}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta s} + \psi_{0w} \cdot f_2) = -29.2512 \text{ mm}$$

$$\frac{f_w}{\frac{L}{100}} = 0.5675$$

Käyttöaste taipumalle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## Kaksiaukkoisen seinäelementin mitoitus (kimmoteoria)

### 2-AUKKOISEN PELTI-VILLA-PELTI SEINÄELEMENTIN MITOITUS (Kimmoteoria)

Elementti TSP150-S, sileä pinta

$$L := 2.63 \text{ m}$$

$$d_{nom} := 150 \text{ mm}$$

$$d_{tol} := 0.02$$

$$d := d_{nom} \cdot (1 - d_{tol}) = 147 \text{ mm}$$

$$B := 1200 \text{ mm}$$

$$L_s := 90 \text{ mm}$$

$$L_{s2} := 200 \text{ mm}$$

$$t_{nom.1} := 0.6 \text{ mm}$$

$$t_{nom.2} := 0.5 \text{ mm}$$

$$t_{tol} := 0.07 \text{ mm}$$

$$t_{zinc} := 0.04 \text{ mm}$$

$$t_{d1} := t_{nom.1} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.525 \text{ mm}$$

$$t_{d2} := t_{nom.2} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.425 \text{ mm}$$

$$e := d - 0.5 \cdot (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 146.45 \text{ mm}$$

$$d_C := d - (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 145.9 \text{ mm}$$

### Kuormien osavarmuuskertoimet

$$\gamma := 1.5$$

### Materiaalin osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{Mv} := 1.3$$

$$\gamma_{Mc} := 1.33$$

$$\gamma_{Mw} := 1.2$$

$$\gamma_{Mt} := 1.1$$

Jänneväli

Elementin ilmoitettu paksuus

Elementin paksuuden toleranssi

Elementin laskenta paksuus

Elementin leveys

Tukipinnan leveys päädyssä

Tukipinnan leveys keskellä

Ulkopinnan paksuus

Sisäpinnan paksuus

Levyn paksuuden toleranssi EN 10143 mukaan

Sinkkikerroksen paksuus

Suunnittelupaksuus ulkopinnalle

Suunnittelupaksuus sisäpinnalle

Pintalevyjen painopisteiden etäisyys

Ydinmateriaalin paksuus

Kerroin muuttuvalle kuormalle

Kerroin leikkausvoimalle (testeistä)

Kerroin puristukselle

Kerroin lommahdukselle (testeistä)

Kerroin pintalevyn myötäämiselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

<u>Materiaaliominaisuudet</u>	Arvot Turun Pelti ja Eristys Spirit, TSP-S elementille
$G_C := 4.6 \text{ MPa}$	Liukukerroin
$f_{Cv} := 0.059 \text{ MPa}$	Leikkauslujuus
$f_{Cc} := 0.067 \text{ MPa}$	Puristuslujuus
$\sigma_w := 119.5 \text{ MPa}$	Lommahduslujuus
$f_{ty} := 280 \text{ MPa}$	Pintalevyn myötölujuus
$E_C := 11 \text{ MPa}$	Ytimen keskimääräinen kimmokerroin
$E_s := 210000 \text{ MPa}$	Teräksen kimmokerroin
$E_{F1} := E_s \quad E_{F2} := E_s$	
$\alpha_s := 0.000012 \cdot \frac{1}{\text{deg}}$	Lämpölaajenemiskerroin teräkselle
$\alpha_{F1} := \alpha_s \quad \alpha_{F2} := \alpha_s$	
$A_{F1} := t_{d1} = 525 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ulkopinnan poikkileikkaus-ala
$A_{F2} := t_{d2} = 425 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Sisäpinnan poikkileikkaus-ala
$A_C := d_C = (1.459 \cdot 10^5) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ydinmateriaalin poikkileikkaus-ala
$B_S := \frac{(E_{F1} \cdot A_{F1} \cdot E_{F2} \cdot A_{F2})}{E_{F1} \cdot A_{F1} + E_{F2} \cdot A_{F2}} \cdot e^2 = (1.058 \cdot 10^{12}) \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Taivutusjäykkyys
$k := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_C \cdot L^2} = 0.684$	Leikkauskerroin

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



KUORMAT

$$q_k := 0.8 \frac{kN}{m^2}$$

Tuulikuorman ominaisarvo

$$q_{k2} := -0.8 \frac{kN}{m^2}$$

Tuulikuorman imu ominaisarvo

$$T_{1,w} := -30 \text{ deg}$$

Talviajan ulkopuolen lämpötila

$$T_{1,s} := 65 \text{ deg}$$

Kesäajan ulkopuolen lämpötila, väriryhmän mukaan

$$T_{2,w} := 20 \text{ deg}$$

Talviajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{2,s} := 25 \text{ deg}$$

Kesäajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{\Delta w} := T_{2,w} - T_{1,w} = 50 \text{ deg}$$

Talviajan lämpötilaero

$$T_{\Delta s} := T_{1,s} - T_{2,s} = 40 \text{ deg}$$

Kesäajan lämpötilaero

$$M_{tuuli.kenttä} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = 0.502 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Momentti kentässä

$$M_{tuuli.keskituki} := -\frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = -0.411 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Momentti keskituella

$$V_{tuuli.pääty} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 0.896 \frac{kN}{m}$$

Leikkausvoima päätytuella

$$V_{tuuli.keskituki} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 1.208 \frac{kN}{m}$$

Leikkausvoima keskituella

$$F_{tuuli.keskituki} := q_k \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 2.416 \frac{kN}{m}$$

Tukireaktio keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$M_{imu.kenttä} := \frac{q_{k2} \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = -0.502 \frac{kN \cdot m}{m}$	Momentti kentässä (imu)
$M_{imu.keskituki} := \frac{q_{k2} \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = 0.411 \frac{kN \cdot m}{m}$	Momentti keskituella (imu)
$V_{imu.pääty} := \frac{q_{k2} \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -0.896 \frac{kN}{m}$	Leikkausvoima päätytuella (imu)
$V_{imu.keskituki} := \frac{q_{k2} \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -1.208 \frac{kN}{m}$	Leikkausvoima keskituella (imu)
$F_{imu.keskituki} := q_{k2} \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -2.416 \frac{kN}{m}$	Tukireaktio keskituella (imu)

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Lämpötilasta aiheutuvat kuormat

$$\theta_w := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta w})}{e} = (4.097 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus talviajan lämpötilaerosta

$$\theta_s := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta s})}{e} = (3.278 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus kesäajan lämpötilaerosta

$$M_{\text{talvi.kenttä}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{4} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.931 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella kentässä

$$M_{\text{talvi.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2} \cdot \frac{1}{1+k} = -3.861 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella keskituella

$$M_{\text{kesä.kenttä}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{4} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.545 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta kesällä kentässä

$$M_{\text{kesä.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2} \cdot \frac{1}{1+k} = 3.089 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta kesällä keskituella

$$V_{\text{talvi.pääty}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.468 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella päädyssä

$$V_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.468 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella keskituella

$$F_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{L} \cdot \frac{1}{1+k} = 2.936 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio lämpötilaerosta talvella keskituella

$$V_{\text{kesä.pääty}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.175 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta kesällä päädyssä

$$V_{\text{kesä.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.175 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta kesällä keskituella

$$F_{\text{kesä.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{L} \cdot \frac{1}{1+k} = -2.349 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio lämpötilaerosta kesällä keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

MURTORAJATILA

$$\psi_{0w} := 0.6$$

Yhdistelykerroin tuulelle

$$\psi_{0T} := 0.6$$

Yhdistelykerroin lämpötilalle

Taivutusjännitykset

Ulkopinnassa

$$\sigma_{Fu.tuuli.kenttä} := \frac{M_{tuuli.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = 6.523 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_{Fu.imu.keskituki} := \frac{M_{imu.keskituki}}{e \cdot A_{F1}} = 5.343 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa keskituella tuulesta

$$\sigma_{Fu.kesä.kenttä} := \frac{M_{kesä.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = 20.088 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä kesällä

$$\sigma_{Fu.kesä.keskituki} := \frac{M_{kesä.keskituki}}{e \cdot A_{F1}} = 40.176 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa keskituella kesällä

Sisäpinnassa

$$\sigma_{Fs.imu.kenttä} := \frac{M_{imu.kenttä}}{e \cdot A_{F2}} = 8.058 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_{Fs.tuuli.keskituki} := \frac{M_{tuuli.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = 6.601 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella tuulesta

$$\sigma_{Fs.talvi.kenttä} := \frac{M_{talvi.kenttä}}{e \cdot A_{F2}} = 31.019 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä talvella

$$\sigma_{Fs.talvi.keskituki} := \frac{M_{talvi.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = 62.037 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella talvella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Yhdistelyt

## Kentän jännitykset

## Ulkopinta

$$\sigma_{Fku} := \max \left( \gamma \cdot \left( \sigma_{Fu.tuuli.kenttä} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Fu.kesä.kenttä} \right), \gamma \cdot \left( \psi_{0w} \cdot \sigma_{Fu.tuuli.kenttä} + \sigma_{Fu.kesä.kenttä} \right) \right) = 36.003 \text{ MPa}$$

## Sisäpinta

$$\sigma_{Fks} := \max \left( \gamma \cdot \left( \sigma_{Fs.imu.kenttä} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Fs.talvi.kenttä} \right), \gamma \cdot \left( \psi_{0w} \cdot \sigma_{Fs.imu.kenttä} + \sigma_{Fs.talvi.kenttä} \right) \right) = 53.78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Fk} := \max \left( \sigma_{Fku}, \sigma_{Fks} \right)$$

$$\frac{\sigma_{Fk}}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.54$$

Käyttöaste taivutukselle kentässä

## Keskituen jännitykset

## Ulkopinta

$$\sigma_{Ftu} := \max \left( \gamma \cdot \left( \sigma_{Fu.imu.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Fu.kesä.keskituki} \right), \gamma \cdot \left( \psi_{0w} \cdot \sigma_{Fu.imu.keskituki} + \sigma_{Fu.kesä.keskituki} \right) \right) = 65.074 \text{ MPa}$$

## Sisäpinta

$$\sigma_{Fts} := \max \left( \gamma \cdot \left( \sigma_{Fs.tuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Fs.talvi.keskituki} \right), \gamma \cdot \left( \psi_{0w} \cdot \sigma_{Fs.tuuli.keskituki} + \sigma_{Fs.talvi.keskituki} \right) \right) = 98.996 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Ft} := \max \left( \sigma_{Ftu}, \sigma_{Fts} \right) = 98.996 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{Ft}}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.994$$

Käyttöaste taivutukselle keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Leikkausjännitys

## Jännitykset päädyssä

$$\tau_{Ctuuli.pääty} := \frac{V_{tuuli.pääty}}{e} = 0.006 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta päädyssä

$$\tau_{Cwimu.pääty} := \frac{V_{imu.pääty}}{e} = -0.006 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta päädyssä (imu)

$$\tau_{Ctalvi.pääty} := \frac{V_{talvi.pääty}}{e} = -0.01 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys talvella päädyssä

$$\tau_{Ckesä.pääty} := \frac{V_{kesä.pääty}}{e} = 0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys kesällä päädyssä

## Jännitykset keskituella

$$\tau_{Ctuuli.keskituki} := \frac{V_{tuuli.keskituki}}{e} = 0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta keskituella

$$\tau_{Cwimu.keskituki} := \frac{V_{imu.keskituki}}{e} = -0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta keskituella (imu)

$$\tau_{Ctalvi.keskituki} := \frac{V_{talvi.keskituki}}{e} = 0.01 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys talvella keskituella

$$\tau_{Ckesä.keskituki} := \frac{V_{kesä.keskituki}}{e} = -0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys kesällä keskituella

## Yhdistelyt

$$\tau_{C1} := \max(\gamma \cdot (\tau_{Ctuuli.pääty} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ckesä.pääty}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Ctuuli.pääty} + \tau_{Ckesä.pääty})) = 0.018 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C2} := \min(\gamma \cdot (\tau_{Cwimu.pääty} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ctalvi.pääty}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Cwimu.pääty} + \tau_{Ctalvi.pääty})) = -0.021 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C3} := \max(\gamma \cdot (\tau_{Ctuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ctalvi.keskituki}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Ctuuli.keskituki} + \tau_{Ctalvi.keskituki})) = 0.022 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C4} := \min(\gamma \cdot (\tau_{Cwimu.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ckesä.keskituki}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Cwimu.keskituki} + \tau_{Ckesä.keskituki})) = -0.02 \text{ MPa}$$

$$\tau_C := \max(\tau_{C1}, -\tau_{C2}, \tau_{C3}, -\tau_{C4}) = 0.022 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_C}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv}}} = 0.495$$

Käyttöaste leikkaukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Puristusjännitys

Päädysä

$$\sigma_{Cctuuli.pääty} := \frac{V_{tuuli.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.008 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella tuulesta

$$\sigma_{Cckesä.pääty} := \frac{V_{kesä.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.01 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella kesällä

$$\sigma_{Ccpääty} := \max(\gamma \cdot (\sigma_{Cctuuli.pääty} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Cckesä.pääty}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{Cctuuli.pääty} + \sigma_{Cckesä.pääty})) = 0.022 \text{ MPa}$$

Keskituella

$$\sigma_{Cctuuli.keskituki} := \frac{F_{tuuli.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.009 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys keskituella tuulesta

$$\sigma_{Cctalvi.keskituki} := \frac{F_{talvi.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.011 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys keskituella talvella

$$\sigma_{Cckeskituki} := \max(\gamma \cdot (\sigma_{Cctuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Cctalvi.keskituki}), \gamma \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{Cctuuli.keskituki} + \sigma_{Cctalvi.keskituki}))$$

$$\sigma_{Cc} := \max(\sigma_{Ccpääty}, \sigma_{Cckeskituki}) = 0.025 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{Cc}}{\frac{f_{Cc}}{\gamma_{Mc}}} = 0.505$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Kiinnikkeiden mitoitus

6.3 mm elementtiruuvi 19mm aluslevyllä läpi paneelista

$$n_p := 3$$

Ruuvien määrä päädyssä

$$n_k := 5$$

Ruuvien määrä keskituella

$$\gamma_{MF} := 1.33$$

Varmuuskerroin kiinnikkeille

$$d_w := 19 \text{ mm}$$

Aluslevyn halkaisija

$$t_{d1} = 0.525 \text{ mm}$$

Pintalevyn suunnittelupaksuus

$$f_u := 360 \text{ MPa}$$

Levyn murtolujuus

$$F_{p,Rd} := \frac{(0.55 \cdot d_w \cdot t_{d1} \cdot f_u)}{\gamma_{MF}} = 1.485 \text{ kN}$$

Läpivetokestävyys ruuville

Päätetuella

$$V_{F1} := \max(\gamma \cdot (-V_{imu.pääty} - \psi_{0T} \cdot V_{talvi.pääty}), \gamma \cdot (-V_{talvi.pääty} - \psi_{0w} \cdot V_{imu.pääty})) = 3.008 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\frac{V_{F1} \cdot B}{n_p \cdot F_{p,Rd}} = 0.81$$

Käyttöaste kiinnitykselle päädyssä

Keskituella

$$V_{F2} := \max(\gamma \cdot (-F_{imu.keskituki} - \psi_{0T} \cdot F_{kesä.keskituki}), \gamma \cdot (-F_{kesä.keskituki} - \psi_{0w} \cdot F_{imu.keskituki})) = 5.739 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\frac{V_{F2} \cdot B}{n_k \cdot F_{p,Rd}} = 0.927$$

Käyttöaste kiinnitykselle keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



Käyttöasteet murtorajatilassa

$$\frac{\frac{\sigma_{Fk}}{\sigma_w}}{\gamma_{Mw}} = 0.54$$

Käyttöaste taivutukselle kentässä

$$\frac{\frac{\sigma_{Ft}}{\sigma_w}}{\gamma_{Mw}} = 0.994$$

Käyttöaste taivutukselle keskituella

$$\frac{\frac{\tau_C}{f_{Cv}}}{\gamma_{Mv}} = 0.495$$

Käyttöaste leikkaukselle

$$\frac{\frac{\sigma_{Cc}}{f_{Cc}}}{\gamma_{Mc}} = 0.505$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KÄYTTÖRAJATILA

$$\psi_{0w} := 0.6 \quad \psi_{1w} := 0.75$$

Yhdistelykertoimet tuulelle

$$\psi_{0T} := 0.6 \quad \psi_{1T} := 1$$

Yhdistelykertoimet lämpötilalle

$$f_1 := \frac{q_k \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = 1.331 \text{ mm}$$

Taipuma tuulesta

$$f_2 := \frac{q_{k2} \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = -1.331 \text{ mm}$$

Taipuma tuulesta (imu)

$$f_{\theta w} := \frac{\theta_w \cdot L^2}{32} \cdot \frac{1.1 + 4 \cdot k}{1 + k} = 2.017 \text{ mm}$$

Taipuma talvella

$$f_{\theta s} := \frac{\theta_s \cdot L^2}{32} \cdot \frac{1.1 + 4 \cdot k}{1 + k} = 1.614 \text{ mm}$$

Taipuma kesällä

$$f_w := \max(\psi_{1w} \cdot f_1 + \psi_{0T} \cdot f_{\theta w}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta w} + \psi_{0w} \cdot f_1) = 2.815 \text{ mm}$$

$$f_s := \min(\psi_{1w} \cdot f_2 + \psi_{0T} \cdot f_{\theta s}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta s} + \psi_{0w} \cdot f_2) = -0.03 \text{ mm}$$

$$f := \max(f_w, -f_s) = 2.815 \text{ mm}$$

$$\frac{f_w}{\frac{L}{100}} = 0.107$$

Käyttöaste taipumalle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## Kaksiaukkoisen seinäelementin mitoitus (plastisuusteoria)

### 2-AUKKOISEN PELTI-VILLA-PELTI SEINÄELEMENTIN MITOITUS (Plastisuusteoria)

Elementti TSP150-S, sileä pinta

$$L := 4.15 \text{ m}$$

$$d_{nom} := 150 \text{ mm}$$

$$d_{tol} := 0.02$$

$$d := d_{nom} \cdot (1 - d_{tol}) = 147 \text{ mm}$$

$$B := 1200 \text{ mm}$$

$$L_s := 90 \text{ mm}$$

$$L_{s2} := 200 \text{ mm}$$

$$t_{nom.1} := 0.6 \text{ mm}$$

$$t_{nom.2} := 0.5 \text{ mm}$$

$$t_{tol} := 0.07 \text{ mm}$$

$$t_{zinc} := 0.04 \text{ mm}$$

$$t_{d1} := t_{nom.1} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.525 \text{ mm}$$

$$t_{d2} := t_{nom.2} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.425 \text{ mm}$$

$$e := d - 0.5 \cdot (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 146.45 \text{ mm}$$

$$d_C := d - (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 145.9 \text{ mm}$$

### Kuormien osavarmuuskertoimet

$$\gamma := 1.5$$

### Materiaalin osavarmuuskertoimet

$$\gamma_{Mv} := 1.3$$

$$\gamma_{Mc} := 1.33$$

$$\gamma_{Mw} := 1.2$$

$$\gamma_{Mt} := 1.1$$

Jänneväli

Elementin ilmoitettu paksuus

Elementin paksuuden toleranssi

Elementin laskenta paksuus

Elementin leveys

Tukipinnan leveys päädyssä

Tukipinnan leveys keskellä

Ulkopinnan paksuus

Sisäpinnan paksuus

Levyn paksuuden toleranssi EN 10143 mukaan

Sinkkikerroksen paksuus

Suunnittelupaksuus ulkopinnalle

Suunnittelupaksuus sisäpinnalle

Pintalevyjen painopisteiden etäisyys

Ydinmateriaalin paksuus

Kerroin muuttuvalle kuormalle

Kerroin leikkausvoimalle (testeistä)

Kerroin puristukselle

Kerroin lommahdukselle (testeistä)

Kerroin pintalevyn myötäämiselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

<u>Materiaaliominaisuudet</u>	Arvot Turun Pelti ja Eristys Spirit, TSP-S elementille
$G_C := 4.6 \text{ MPa}$	Liukukerroin
$f_{Cv} := 0.059 \text{ MPa}$	Leikkauslujuus
$f_{Cc} := 0.067 \text{ MPa}$	Puristuslujuus
$\sigma_w := 119.5 \text{ MPa}$	Lommahduslujuus
$f_{ty} := 280 \text{ MPa}$	Pintalevyn myötölujuus
$E_C := 11 \text{ MPa}$	Ytimen keskimääräinen kimmokerroin
$E_s := 210000 \text{ MPa}$	Teräksen kimmokerroin
$E_{F1} := E_s \quad E_{F2} := E_s$	
$\alpha_s := 0.000012 \cdot \frac{1}{\text{deg}}$	Lämpölaajenemiskerroin teräkselle
$\alpha_{F1} := \alpha_s \quad \alpha_{F2} := \alpha_s$	
$A_{F1} := t_{d1} = 525 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ulkopinnan poikkileikkaus-ala
$A_{F2} := t_{d2} = 425 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Sisäpinnan poikkileikkaus-ala
$A_C := d_C = (1.459 \cdot 10^5) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ydinmateriaalin poikkileikkaus-ala
$B_S := \frac{(E_{F1} \cdot A_{F1} \cdot E_{F2} \cdot A_{F2})}{E_{F1} \cdot A_{F1} + E_{F2} \cdot A_{F2}} \cdot e^2 = (1.058 \cdot 10^{12}) \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Taivutusjäykkyys
$k := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_C \cdot L^2} = 0.275$	Leikkauskerroin

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KUORMAT

$$q_k := 0.8 \frac{kN}{m^2}$$

Tuulikuorman ominaisarvo

$$q_{k2} := -0.8 \frac{kN}{m^2}$$

Tuulikuorman imu ominaisarvo

$$T_{1,w} := -30 \text{ deg}$$

Talviajan ulkopuolen lämpötila

$$T_{1,s} := 65 \text{ deg}$$

Kesäajan ulkopuolen lämpötila, väriryhmän mukaan

$$T_{2,w} := 20 \text{ deg}$$

Talviajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{2,s} := 25 \text{ deg}$$

Kesäajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{\Delta w} := T_{2,w} - T_{1,w} = 50 \text{ deg}$$

Talviajan lämpötilaero

$$T_{\Delta s} := T_{1,s} - T_{2,s} = 40 \text{ deg}$$

Kesäajan lämpötilaero

$$M_{tuuli.kenttä} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = 1.113 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Momentti kentässä

$$M_{tuuli.keskituki} := -\frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.351 \frac{kN \cdot m}{m}$$

Momentti keskituella

$$V_{tuuli.pääty} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 1.334 \frac{kN}{m}$$

Leikkausvoima päätytuella

$$V_{tuuli.keskituki} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 1.986 \frac{kN}{m}$$

Leikkausvoima keskituella

$$F_{tuuli.keskituki} := q_k \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 3.971 \frac{kN}{m}$$

Tukireaktio keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$M_{imu.kenttä} := \frac{q_{k2} \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = -1.113 \frac{kN \cdot m}{m} \quad \text{Momentti kentässä (imu)}$$

$$M_{imu.keskituki} := \frac{q_{k2} \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.351 \frac{kN \cdot m}{m} \quad \text{Momentti keskituella (imu)}$$

$$V_{imu.pääty} := \frac{q_{k2} \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -1.334 \frac{kN}{m} \quad \text{Leikkausvoima päätytuella (imu)}$$

$$V_{imu.keskituki} := \frac{q_{k2} \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -1.986 \frac{kN}{m} \quad \text{Leikkausvoima keskituella (imu)}$$

$$F_{imu.keskituki} := q_{k2} \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = -3.971 \frac{kN}{m} \quad \text{Tukireaktio keskituella (imu)}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Lämpötilasta aiheutuvat kuormat

$$\theta_w := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta w})}{e} = (4.097 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus talviajan lämpötilaerosta

$$\theta_s := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta s})}{e} = (3.278 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus kesäajan lämpötilaerosta

$$M_{\text{talvi.kenttä}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{4} \cdot \frac{1}{1+k} = -2.55 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella kentässä

$$M_{\text{talvi.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2} \cdot \frac{1}{1+k} = -5.101 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella keskituella

$$M_{\text{kesä.kenttä}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{4} \cdot \frac{1}{1+k} = 2.04 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta kesällä kentässä

$$M_{\text{kesä.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2} \cdot \frac{1}{1+k} = 4.08 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta kesällä keskituella

$$V_{\text{talvi.pääty}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.229 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella päädyssä

$$V_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.229 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella keskituella

$$F_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{L} \cdot \frac{1}{1+k} = 2.458 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio lämpötilaerosta talvella keskituella

$$V_{\text{kesä.pääty}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = 0.983 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta kesällä päädyssä

$$V_{\text{kesä.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = -0.983 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta kesällä keskituella

$$F_{\text{kesä.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_s}{L} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.966 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio lämpötilaerosta kesällä keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KÄYTTÖRAJATILA

$$\psi_{0w} := 0.6$$

Yhdistelykerroin tuulelle

$$\psi_{0T} := 0.6$$

Yhdistelykerroin lämpötilalle

$$\gamma_{SLS} := 1.0$$

Kuorman osavarmuusluku

$$\gamma_{Mw.SLS} := 1.1$$

Materiaalin osavarmuusluku

$$\gamma_{Mv.SLS} := 1.1$$

Materiaalin osavarmuusluku

$$\gamma_{Mc.SLS} := 1.1$$

Materiaalin osavarmuusluku

Taivutusjännitykset

## Ulkopinnassa

$$\sigma_{Fu.tuuli.kenttä} := \frac{M_{tuuli.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = 14.474 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_{Fu.imu.keskituki} := \frac{M_{imu.keskituki}}{e \cdot A_{F1}} = 17.575 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa keskituella tuulesta

$$\sigma_{Fu.kesä.kenttä} := \frac{M_{kesä.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = 26.536 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä kesällä

$$\sigma_{Fu.kesä.keskituki} := \frac{M_{kesä.keskituki}}{e \cdot A_{F1}} = 53.071 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa keskituella kesällä

## Sisäpinnassa

$$\sigma_{Fs.imu.kenttä} := \frac{M_{imu.kenttä}}{e \cdot A_{F2}} = 17.88 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_{Fs.tuuli.keskituki} := \frac{M_{tuuli.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = 21.71 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella tuulesta

$$\sigma_{Fs.talvi.kenttä} := \frac{M_{talvi.kenttä}}{e \cdot A_{F2}} = 40.974 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä talvella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



$$\sigma_{F_s.talvi.keskituki} := -\frac{M_{talvi.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = 81.948 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella talvella

### Yhdistelyt

#### Keskituen jännitykset

##### Ulkopinta

$$\sigma_{F_{tu}} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{F_u.imu.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{F_u.kesä.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{F_u.imu.keskituki} + \sigma_{F_u.kesä.keskituki}))$$

##### Sisäpinta

$$\sigma_{F_{ts}} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{F_s.tuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{F_s.talvi.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{F_s.tuuli.keskituki} + \sigma_{F_s.talvi.keskituki}))$$

$$\sigma_{F_{t.SLS}} := \max(\sigma_{F_{tu}}, \sigma_{F_{ts}}) = 94.974 \text{ MPa}$$

#### Tukireaktio keskituella

$$F_{keskituki} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (F_{tuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot F_{talvi.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot F_{tuuli.keskituki} + F_{talvi.keskituki}))$$

$$F_{keskituki} = 5.446 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### Tukireaktiokestävyys

$$F_R := f_{Cc} \cdot (L_{s2} + 0.4 \cdot e) = 17.325 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Momentin ja tukireaktion yhteisvaikutus perustuen suomalaiseen malliin (Hassinen & Martikainen 1996)

$$1 + \frac{F_{keskituki}}{F_R} - \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_{F_{t.SLS}}}{\sigma_w}\right)} = 0.991$$

Käyttöaste yhteisvaikutukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Leikkausjännitys

## Jännitykset päädyssä

$$\tau_{Ctuuli.pääty} := \frac{V_{tuuli.pääty}}{e} = 0.009 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta päädyssä

$$\tau_{Cwimu.pääty} := \frac{V_{imu.pääty}}{e} = -0.009 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta päädyssä (imu)

$$\tau_{Ctalvi.pääty} := \frac{V_{talvi.pääty}}{e} = -0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys talvella päädyssä

$$\tau_{Ckesä.pääty} := \frac{V_{kesä.pääty}}{e} = 0.007 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys kesällä päädyssä

## Jännitykset keskituella

$$\tau_{Ctuuli.keskituki} := \frac{V_{tuuli.keskituki}}{e} = 0.014 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta keskituella

$$\tau_{Cwimu.keskituki} := \frac{V_{imu.keskituki}}{e} = -0.014 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta keskituella (imu)

$$\tau_{Ctalvi.keskituki} := \frac{V_{talvi.keskituki}}{e} = 0.008 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys talvella keskituella

$$\tau_{Ckesä.keskituki} := \frac{V_{kesä.keskituki}}{e} = -0.007 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys kesällä keskituella

## Yhdistelyt

$$\tau_{C1} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{Ctuuli.pääty} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ckesä.pääty}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Ctuuli.pääty} + \tau_{Ckesä.pääty})) = 0.013 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C2} := \min(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{Cwimu.pääty} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ctalvi.pääty}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Cwimu.pääty} + \tau_{Ctalvi.pääty})) = -0.014 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C3} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{Ctuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ctalvi.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Ctuuli.keskituki} + \tau_{Ctalvi.keskituki})) = 0.019 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C4} := \min(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{Cwimu.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \tau_{Ckesä.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \tau_{Cwimu.keskituki} + \tau_{Ckesä.keskituki})) = -0.018 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C.SLS} := \max(\tau_{C1}, -\tau_{C2}, \tau_{C3}, -\tau_{C4}) = 0.019 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{C.SLS}}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv.SLS}}} = 0.347$$

Käyttöaste leikkaukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Puristusjännitys

Päädyssä

$$\sigma_{Cctuuli.pääty} := \frac{V_{tuuli.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.011 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella tuulesta

$$\sigma_{Cckesä.pääty} := \frac{V_{kesä.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.008 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella kesällä

$$\sigma_{Ccpääty.SLS} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Cctuuli.pääty} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Cckesä.pääty}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{Cctuuli.pääty} + \sigma_{Cckesä.pääty})) = 0.016 \text{ MPa}$$

Keskituella

$$\sigma_{Cctuuli.keskituki} := \frac{F_{tuuli.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.015 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys keskituella tuulesta

$$\sigma_{Cctalvi.keskituki} := \frac{F_{talvi.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.01 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys keskituella talvella

$$\sigma_{Cckeskituki.SLS} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Cctuuli.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Cctalvi.keskituki}), \gamma_{SLS} \cdot (\psi_{0w} \cdot \sigma_{Cctuuli.keskituki} + \sigma_{Cctalvi.keskituki}))$$

$$\sigma_{Cc.SLS} := \max(\sigma_{Ccpääty.SLS}, \sigma_{Cckeskituki.SLS}) = 0.021 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{Cc.SLS}}{f_{Ce}} = 0.346$$

$$\gamma_{Mc.SLS}$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Kiinnikkeiden mitoitus

6.3 mm elementtiruuvi 19mm aluslevyllä läpi paneelista

$$n_p := 3$$

Ruuvien määrä päädyssä

$$n_k := 6$$

Ruuvien määrä keskituella

$$\gamma_{MF} := 1.33$$

Varmuuskerroin kiinnikkeille

$$d_w := 19 \text{ mm}$$

Aluslevyn halkaisija

$$t_{d1} = 0.525 \text{ mm}$$

Pintalevyn suunnittelupaksuus

$$f_u := 360 \text{ MPa}$$

Levyn murtolujuus

$$F_{p,Rd} := \frac{(0.55 \cdot d_w \cdot t_{d1} \cdot f_u)}{\gamma_{MF}} = 1.485 \text{ kN}$$

Läpivetokestävyys ruuville

Päättyuella

$$V_{F1} := \max(\gamma \cdot (-V_{imu.pääty} - \psi_{0T} \cdot V_{talvi.pääty}), \gamma \cdot (-V_{talvi.pääty} - \psi_{0w} \cdot V_{imu.pääty})) = 3.108 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\frac{V_{F1} \cdot B}{n_p \cdot F_{p,Rd}} = 0.837$$

Käyttöaste kiinnitykselle päädyssä

Keskituella

$$V_{F2} := \max(\gamma \cdot (-F_{imu.keskituki} - \psi_{0T} \cdot F_{kesä.keskituki}), \gamma \cdot (-F_{kesä.keskituki} - \psi_{0w} \cdot F_{imu.keskituki})) = 7.727 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\frac{V_{F2} \cdot B}{n_k \cdot F_{p,Rd}} = 1.041$$

Käyttöaste kiinnitykselle keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Taipuma

$$\psi_{0w} := 0.6 \quad \psi_{1w} := 0.75$$

Yhdistelykertoimet tuulelle

$$\psi_{0T} := 0.6 \quad \psi_{1T} := 1$$

Yhdistelykertoimet lämpötilalle

$$f_1 := \frac{q_k \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = 4.123 \text{ mm}$$

Taipuma tuulesta

$$f_2 := \frac{q_{k2} \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = -4.123 \text{ mm}$$

Taipuma tuulesta (imu)

$$f_{\theta w} := \frac{\theta_w \cdot L^2}{32} \cdot \frac{1.1 + 4 \cdot k}{1 + k} = 3.803 \text{ mm}$$

Taipuma talvella

$$f_{\theta s} := \frac{\theta_s \cdot L^2}{32} \cdot \frac{1.1 + 4 \cdot k}{1 + k} = 3.042 \text{ mm}$$

Taipuma kesällä

$$f_w := \max(\psi_{1w} \cdot f_1 + \psi_{0T} \cdot f_{\theta w}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta w} + \psi_{0w} \cdot f_1) = 6.277 \text{ mm}$$

$$f_s := \min(\psi_{1w} \cdot f_2 + \psi_{0T} \cdot f_{\theta s}, \psi_{1T} \cdot f_{\theta s} + \psi_{0w} \cdot f_2) = -1.267 \text{ mm}$$

$$f := \max(f_w, -f_s) = 6.277 \text{ mm}$$

$$\frac{f_w}{\frac{L}{100}} = 0.151$$

Käyttöaste taipumalle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

MURTORAJATILA

$$M_{tuuli} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} = 1.722 \frac{1}{m} \cdot \mathbf{kN} \cdot \mathbf{m}$$

$$M_{imu} := \frac{q_{k2} \cdot L^2}{8} = -1.722 \frac{1}{m} \cdot \mathbf{kN} \cdot \mathbf{m}$$

$$V_{tuuli} := \frac{q_k \cdot L}{2} = 1.66 \frac{\mathbf{kN}}{\mathbf{m}}$$

$$V_{imu} := \frac{q_{k2} \cdot L}{2} = -1.66 \frac{\mathbf{kN}}{\mathbf{m}}$$

## Taivutusjännitykset

$$\sigma_{Fu.tuuli} := \frac{M_{tuuli}}{e \cdot A_{F1}} = 22.4 \mathbf{MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_{Fs.imu} := -\frac{M_{imu}}{e \cdot A_{F2}} = 27.671 \mathbf{MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä tuulesta

$$\sigma_F := \max(\sigma_{Fu.tuuli}, \sigma_{Fs.imu}) = 27.671 \mathbf{MPa}$$

$$\frac{\gamma \cdot \sigma_F}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.417$$

Käyttöaste taivutukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## Leikkausjännitys

$$\tau_{Ctuuli} := \frac{V_{tuuli}}{e} = 0.011 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys tuulesta

$$\tau_{Cimu} := -\frac{V_{imu}}{e} = 0.011 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys imusta

$$\tau_C := \max(\tau_{Ctuuli}, \tau_{Cimu}) = 0.011 \text{ MPa}$$

$$\frac{\gamma \cdot \tau_C}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv}}} = 0.375$$

Käyttöaste leikkaukselle

Puristusjännitys

$$\sigma_{Cctuuli} := \frac{V_{tuuli}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.014 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella tuulesta

$$\frac{\gamma \cdot \sigma_{Cctuuli}}{\frac{f_{Cc}}{\gamma_{Mc}}} = 0.414$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

## 2-aukkoisen kattoelementin mitoitus (plastisuusteoria)

### 2-AUKKOISEN PELTI-VILLA-PELTI KATTOELEMENTIN MITOITUS (Plastisuusteoria)

Elementti TSP150-S, sileä pinta

$L := 3.3 \text{ m}$	Jänneväli
$d_{nom} := 150 \text{ mm}$	Elementin ilmoitettu paksuus
$d_{tol} := 0.02$	Elementin paksuuden toleranssi
$d := d_{nom} \cdot (1 - d_{tol}) = 147 \text{ mm}$	Elementin laskenta paksuus
$B := 1200 \text{ mm}$	Elementin leveys
$L_s := 90 \text{ mm}$	Tukipinnan leveys päädyssä
$L_{s2} := 200 \text{ mm}$	Tukipinnan leveys keskellä
$t_{nom.1} := 0.6 \text{ mm}$	Ulkopinnan paksuus
$t_{nom.2} := 0.5 \text{ mm}$	Sisäpinnan paksuus
$t_{tol} := 0.07 \text{ mm}$	Levyn paksuuden toleranssi EN 10143 mukaan
$t_{zinc} := 0.04 \text{ mm}$	Sinkkikerroksen paksuus
$t_{d1} := t_{nom.1} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.525 \text{ mm}$	Suunnittelupaksuus ulkopinnalle
$t_{d2} := t_{nom.2} - t_{zinc} - 0.5 \cdot t_{tol} = 0.425 \text{ mm}$	Suunnittelupaksuus sisäpinnalle
$e := d - 0.5 \cdot (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 146.45 \text{ mm}$	Pintalevyjen painopisteiden etäisyys
$d_C := d - (t_{nom.1} + t_{nom.2}) = 145.9 \text{ mm}$	Ydinmateriaalin paksuus

### Kuormien osavarmuuskertoimet

$\gamma_Q := 1.5$	Kerroin muuttuvalle kuormalle
$\gamma_G := 1.35$	Kerroin pysyväälle kuormalle

### Materiaalin osavarmuuskertoimet

$\gamma_{Mv} := 1.3$	Kerroin leikkausvoimalle (testeistä)
$\gamma_{Mc} := 1.33$	Kerroin puristukselle
$\gamma_{Mw} := 1.2$	Kerroin lommahdukselle (testeistä)
$\gamma_{Mt} := 1.1$	Kerroin pintalevyn myötäämiselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



<u>Materiaalimoinaisuudet</u>	Arvot Turun Pelti ja Eistys Spirit, TSP-S elementille
$G_C := 4.6 \text{ MPa}$	Liukukerroin
$f_{Cv} := 0.059 \text{ MPa}$	Leikkauslujuus
$f_{Cc} := 0.067 \text{ MPa}$	Puristuslujuus
$\sigma_w := 119.5 \text{ MPa}$	Lomahduslujuus
$f_{ty} := 280 \text{ MPa}$	Pintalevyn myötölujuus
$E_C := 11 \text{ MPa}$	Ytimen keskimääräinen kimmokerroin
$E_s := 210000 \text{ MPa}$	Teräksen kimmokerroin
$E_{F1} := E_s \quad E_{F2} := E_s$	
$\alpha_s := 0.000012 \cdot \frac{1}{\text{deg}}$	Lämpölaajenemiskerroin teräkselle
$\alpha_{F1} := \alpha_s \quad \alpha_{F2} := \alpha_s$	
$A_{F1} := t_{d1} = 525 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ulkopinnan poikkileikkaus-ala
$A_{F2} := t_{d2} = 425 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Sisäpinnan poikkileikkaus-ala
$A_C := d_C = (1.459 \cdot 10^5) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Ydinmateriaalin poikkileikkaus-ala
$B_S := \frac{(E_{F1} \cdot A_{F1} \cdot E_{F2} \cdot A_{F2})}{E_{F1} \cdot A_{F1} + E_{F2} \cdot A_{F2}} \cdot e^2 = (1.058 \cdot 10^{12}) \frac{\text{N} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Taivutusjäykkyys
$k := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_C \cdot L^2} = 0.434$	Leikkauskerroin
$\varphi_L := 4$	Pitkäaikais kuormien virumaluku
$\varphi_S := 1.5$	Lyhytaikais kuormien virumaluku

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KUORMAT

$$g_k := 0.27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Elementin omapaino

$$q_k := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Lumikuorma katolla

$$T_{1,w} := -0 \text{ deg}$$

Talviajan ulkopuolen lämpötila

$$T_{1,s} := 65 \text{ deg}$$

Kesäajan ulkopuolen lämpötila, väriryhmän mukaan

$$T_{2,w} := 20 \text{ deg}$$

Talviajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{2,s} := 25 \text{ deg}$$

Kesäajan sisäpuolen lämpötila

$$T_{\Delta w} := T_{2,w} - T_{1,w} = 20 \text{ deg}$$

Talviajan lämpötilaero

$$T_{\Delta s} := T_{1,s} - T_{2,s} = 40 \text{ deg}$$

Kesäajan lämpötilaero

$$M_{\text{lumi.kenttä}} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = 1.856 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti kentässä

$$M_{\text{lumi.keskituki}} := -\frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.898 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti keskituella

$$M_{\text{oma.kenttä}} := \frac{g_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right)^2 = 0.251 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti kentässä

$$M_{\text{oma.keskituki}} := -\frac{g_k \cdot L^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k} = -0.256 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti keskituella

$$V_{\text{lumi.pääty}} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 2.725 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima päätytuella

$$V_{\text{lumi.keskituki}} := \frac{q_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 3.875 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$F_{\text{lumi.keskituki}} := q_k \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 7.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio keskituella

$$V_{\text{oma.pääty}} := \frac{g_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 0.368 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima päätytuella

$$V_{\text{oma.keskituki}} := \frac{g_k \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 0.523 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima keskituella

$$F_{\text{oma.keskituki}} := g_k \cdot L \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot (1+k)}\right) = 1.046 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio keskituella

Lämpötilasta aiheutuvat kuormat

$$\theta_w := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta w})}{e} = (1.639 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus talviajan lämpötilaerosta

$$\theta_s := \frac{(\alpha_s \cdot T_{\Delta s})}{e} = (3.278 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{mm}}$$

Kaarevuus kesäajan lämpötilaerosta

$$M_{\text{talvi.kenttä}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{4} \cdot \frac{1}{1+k} = -0.907 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella kentässä

$$M_{\text{talvi.keskituki}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2} \cdot \frac{1}{1+k} = -1.813 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Momentti lämpötilaerosta talvella keskituella

$$V_{\text{talvi.pääty}} := -\frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = -0.549 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella päädyssä

$$V_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{2 \cdot L} \cdot \frac{1}{1+k} = 0.549 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausvoima lämpötilaerosta talvella keskituella

$$F_{\text{talvi.keskituki}} := \frac{3 \cdot B_S \cdot \theta_w}{L} \cdot \frac{1}{1+k} = 1.099 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tukireaktio lämpötilaerosta talvella keskituella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

KÄYTTÖRAJATILA

$\psi_{0w} := 0.6$	Yhdistelykerroin lumelle
$\psi_{0T} := 1$	Yhdistelykerroin lämpötilalle lumikuorman vaikuttaessa
$\gamma_{SLS} := 1.0$	Kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{Mw.SLS} := 1.1$	Materiaalin osavarmuusluku
$\gamma_{Mv.SLS} := 1.1$	Materiaalin osavarmuusluku
$\gamma_{Mc.SLS} := 1.1$	Materiaalin osavarmuusluku

Taivutusjännitykset

## Ulkopinnassa

$$\sigma_{Fu.lumi.kenttä} := -\frac{M_{lumi.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = -24.141 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä lumesta

$$\sigma_{Fu.oma.kenttä} := -\frac{M_{oma.kenttä}}{e \cdot A_{F1}} = -3.259 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä omapaino

## Sisäpinnassa

$$\sigma_{Fs.lumi.keskituki} := \frac{M_{lumi.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = -30.498 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella lumesta

$$\sigma_{Fs.oma.keskituki} := \frac{M_{oma.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = -4.117 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella lumesta

$$\sigma_{Fs.talvi.kenttä} := \frac{M_{talvi.kenttä}}{e \cdot A_{F2}} = -14.565 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa kentässä talvella

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

$$\sigma_{Fs.talvi.keskituki} := \frac{M_{talvi.keskituki}}{e \cdot A_{F2}} = -29.13 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys sisäpinnassa keskituella talvella

#### VIRUMAN VAIKUTUKSET

$$G_{CIL} := \frac{G_C}{1 + \varphi_L} = 0.92 \text{ MPa}$$

Liukukerroin pitkäaikaisille kuormille

$$G_{CIS} := \frac{G_C}{1 + \varphi_S} = 1.84 \text{ MPa}$$

Liukukerroin lyhytaikaisille kuormille

$$k_L := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_{CIL} \cdot L^2} = 2.171$$

Leikkauskerroin pitkäaikaisille

$$k_S := \frac{(3 \cdot B_S)}{A_C \cdot G_{CIS} \cdot L^2} = 1.086$$

Leikkauskerroin lyhytaikaisille

$$M_{lumi.kenttä.viruma} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1 + k_S)}\right)^2 = 2.109 \text{ kN} \cdot \frac{m}{m}$$

Momentti kentässä

$$M_{oma.kenttä.viruma} := \frac{g_k \cdot L^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \cdot (1 + k_L)}\right)^2 = 0.312 \text{ kN} \cdot \frac{m}{m}$$

Momentti kentässä

#### Taivutusjännitykset viruman kanssa

Ulkopinnassa

$$\sigma_{Fu.lumi.kenttä.viruma} := -\frac{M_{lumi.kenttä.viruma}}{e \cdot A_{F1}} = -27.429 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä lumesta

$$\sigma_{Fu.oma.kenttä.viruma} := -\frac{M_{oma.kenttä.viruma}}{e \cdot A_{F1}} = -4.056 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä omapaino

$$\Delta\sigma_{oma} := \sigma_{Fu.lumi.kenttä.viruma} - \sigma_{Fu.lumi.kenttä} = -3.288 \text{ MPa}$$

Viruman aiheuttama jännityksen muutos ulkopinnan puristukseen

$$\Delta\sigma_{lumi} := \sigma_{Fu.oma.kenttä.viruma} - \sigma_{Fu.oma.kenttä} = -0.797 \text{ MPa}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Yhdistelyt

## Keskituen jännitykset

$$\sigma_{Ft.1.SLS} := \min(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Fs.oma.keskituki} + \sigma_{Fs.lumi.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Fs.talvi.keskituki})) = -63.746 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Ft.2.SLS} := \min(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Fs.oma.keskituki} + \psi_{0w} \cdot \sigma_{Fs.lumi.keskituki} + \sigma_{Fs.talvi.keskituki})) = -51.546 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Ft.SLS} := \max(-\sigma_{Ft.1.SLS}, -\sigma_{Ft.2.SLS}) = 63.746 \text{ MPa}$$

## Kentän jännitykset

$$\sigma_{Fk.SLS} := \gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Fu.oma.kenttä} + \sigma_{Fu.lumi.kenttä}) + (\Delta\sigma_{oma} + \Delta\sigma_{lumi}) = -31.485 \text{ MPa}$$

## Tukireaktio keskituella

$$F_{keskituki.1} := \gamma_{SLS} \cdot (F_{oma.keskituki} + F_{lumi.keskituki} + \psi_{0T} \cdot F_{talvi.keskituki}) = 9.896 \frac{1}{m} \cdot \text{kN}$$

$$F_{keskituki.2} := \gamma_{SLS} \cdot (F_{oma.keskituki} + \psi_{0w} \cdot F_{lumi.keskituki} + F_{talvi.keskituki}) = 6.795 \frac{1}{m} \cdot \text{kN}$$

$$F_{keskituki} := \max(F_{keskituki.1}, F_{keskituki.2}) = 9.896 \frac{1}{m} \cdot \text{kN}$$

## Tukireaktiokestävyys

$$F_R := f_{Cc} \cdot (L_{s2} + 0.4 \cdot e) = 17.325 \frac{\text{kN}}{m}$$

Momentin ja tukireaktion yhteisvaikutus perustuen suomalaiseen malliin (Hassinen & Martikainen 1996)

$$1 + \frac{F_{keskituki}}{F_R} \cdot \frac{\gamma_{Mc.SLS}}{\gamma_{Mw.SLS}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sigma_{Ft.SLS}}{\sigma_w}} = 0.985 \quad \text{Käyttöaste yhteisvaikutukselle}$$

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Leikkausjännitys

Jännitykset päädyssä

$$\tau_{C.lumi.pääty} := \frac{V_{lumi.pääty}}{e} = 0.019 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys lumesta päädyssä

$$\tau_{C.oma.pääty} := \frac{V_{oma.pääty}}{e} = 0.003 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys omapaino päädyssä

Jännitykset keskituella

$$\tau_{C.lumi.keskituki} := \frac{V_{lumi.keskituki}}{e} = 0.026 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys lumesta keskituella

$$\tau_{C.oma.keskituki} := \frac{V_{oma.keskituki}}{e} = 0.004 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys omapaino keskituella

$$\tau_{C.talvi.keskituki} := \frac{V_{talvi.keskituki}}{e} = 0.004 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys talvella keskituella

Yhdistelyt

$$\tau_{C1} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{C.oma.pääty} + \tau_{C.lumi.pääty})) = 0.021 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C2} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{C.oma.keskituki} + \tau_{C.lumi.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \tau_{C.talvi.keskituki})) = 0.034 \text{ MPa}$$

$$\tau_{C3} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\tau_{C.oma.keskituki} + \psi_{0w} \cdot \tau_{C.lumi.keskituki} + \tau_{C.talvi.keskituki})) = 0.023 \text{ MPa}$$

$$\tau_C := \max(\tau_{C1}, \tau_{C2}, \tau_{C3}) = 0.034 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_C}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv.SLS}}} = 0.63$$

Käyttöaste leikkaukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Puristusjännitys

Päädysä

$$\sigma_{Cclumi.pääty} := \frac{V_{lumi.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.023 \text{ MPa} \quad \text{Puristusjännitys päätytuella lumesta}$$

$$\sigma_{Ccoma.pääty} := \frac{V_{oma.pääty}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.003 \text{ MPa} \quad \text{Puristusjännitys päätytuella omapaino}$$

$$\sigma_{Ccpääty.SLS} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Cclumi.pääty} + \sigma_{Ccoma.pääty})) = 0.026 \text{ MPa}$$

Keskituella

$$\sigma_{Cclumi.keskituki} := \frac{F_{lumi.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.03 \text{ MPa} \quad \text{Puristusjännitys keskituella lumesta}$$

$$\sigma_{Cctalvi.keskituki} := \frac{F_{talvi.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.004 \text{ MPa} \quad \text{Puristusjännitys keskituella talvella}$$

$$\sigma_{Ccoma.keskituki} := \frac{F_{oma.keskituki}}{L_{s2} + 0.4 \cdot e} = 0.004 \text{ MPa} \quad \text{Puristusjännitys keskituella omapaino}$$

$$\sigma_{Cc1} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Ccoma.keskituki} + \sigma_{Cclumi.keskituki} + \psi_{0T} \cdot \sigma_{Cctalvi.keskituki})) = 0.038 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Cc2} := \max(\gamma_{SLS} \cdot (\sigma_{Ccoma.keskituki} + \psi_{0w} \cdot \sigma_{Cclumi.keskituki} + \sigma_{Cctalvi.keskituki})) = 0.026 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Cc.SLS} := \max(\sigma_{Cc1}, \sigma_{Cc2}) = 0.038 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{Cc.SLS}}{f_{Ce}} = 0.628$$

$$\gamma_{Mc.SLS}$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.



Taipuma

$$\psi_{0w} := 0.6 \quad \psi_{1w} := 0.75$$

Yhdistelykertoimet lumelle

$$\psi_{0T} := 0.6 \quad \psi_{1T} := 1$$

Yhdistelykertoimet lämpötilalle

$$f_1 := \frac{q_k \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = 5.752 \text{ mm}$$

Taipuma lumesta

$$f_2 := \frac{g_k \cdot L^4}{48 \cdot B_S} \cdot \frac{0.26 + 2.6 \cdot k + 2 \cdot k^2}{1 + k} = 0.777 \text{ mm}$$

Taipuma omapaino

$$f := f_1 + f_2 = 6.528 \text{ mm}$$

$$\frac{f}{L} = 0.198$$

Käyttöaste taipumalle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

**MURTORAJATILA**

$$M_{lumi} := \frac{q_k \cdot L^2}{8} = 2.723 \frac{1}{m} \cdot \mathbf{kN} \cdot \mathbf{m}$$

$$M_{oma} := \frac{g_k \cdot L^2}{8} = 0.368 \frac{1}{m} \cdot \mathbf{kN} \cdot \mathbf{m}$$

$$V_{lumi} := \frac{q_k \cdot L}{2} = 3.3 \frac{\mathbf{kN}}{\mathbf{m}}$$

$$V_{oma} := \frac{g_k \cdot L}{2} = 0.446 \frac{\mathbf{kN}}{\mathbf{m}}$$

## Taivutusjännitykset

$$\sigma_{F.lumi} := \frac{M_{lumi}}{e \cdot A_{F1}} = 35.409 \mathbf{MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä lumesta

$$\sigma_{F.oma} := \frac{M_{oma}}{e \cdot A_{F1}} = 4.78 \mathbf{MPa}$$

Puristusjännitys ulkopinnassa kentässä omapaino

$$\sigma_F := \gamma_G \cdot \sigma_{F.oma} + \gamma_Q \cdot \sigma_{F.lumi} + (-(\Delta\sigma_{oma} + \Delta\sigma_{lumi})) = 63.653 \mathbf{MPa}$$

$$\frac{\sigma_F}{\frac{\sigma_w}{\gamma_{Mw}}} = 0.639$$

Käyttöaste taivutukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

Leikkausjännitys

$$\tau_{Clumi} := \frac{V_{lumi}}{e} = 0.023 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys lumesta

$$\tau_{Coma} := \frac{V_{oma}}{e} = 0.003 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys omapaino

$$\tau_C := \gamma_G \cdot \tau_{Coma} + \gamma_Q \cdot \tau_{Clumi} = 0.038 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_C}{\frac{f_{Cv}}{\gamma_{Mv}}} = 0.835$$

Käyttöaste leikkaukselle

Puristusjännitys

$$\sigma_{Cclumi} := \frac{V_{lumi}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.028 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella tuulesta

$$\sigma_{Ccoma} := \frac{V_{oma}}{L_s + 0.5 \cdot 0.4 \cdot e} = 0.004 \text{ MPa}$$

Puristusjännitys päätytuella tuulesta

$$\sigma_{Cc} := \gamma_G \cdot \sigma_{Ccoma} + \gamma_Q \cdot \sigma_{Cclumi} = 0.047 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{Cc}}{\frac{f_{Cc}}{\gamma_{Mc}}} = 0.924$$

Käyttöaste puristukselle

Created with PTC Mathcad Express. See [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com) for more information.

<b>TPE Spirit -elementin mitoitus</b>		Ohjelma versio 1.0 (beta)
<b>kohte</b>	Opinnäytetyö	<b>TPE TURUN PELTI JA ERISTYS OY</b>
<b>tekijä</b>	Erik Wihervuori	
<b>päivämäärä</b>	15.2.2019 revisio -	

<b>SPIRIT ELEMENTIN MITOITUS (monta jänneväliä)</b>			
<b>Elementtityypin valinta</b>		<b>Elementin lujuustiedot</b>	
	TSP RW-S	Lommahduslujuus	119,5 N/mm <sup>2</sup>
		Leikkauslujuus	0,059 N/mm <sup>2</sup>
<b>Käyttökohde</b>	Seinä	Liukukerroin ydin	4,6 N/mm <sup>2</sup>
		Puristuslujuus	0,067 N/mm <sup>2</sup>
<b>Pintalevyjen lämpötilat</b>		Pintalevyn kimmokerroin	210000 N/mm <sup>2</sup>
Väiryhmä	2	Pintalevyn paksuus ulko	0,6 mm
Lämpötilaero	40 C°	Pintalevyn paksuus sisä	0,5 mm
<b>Jännevälitiedot ja elementin paksuus</b>		<b>Tukipinta ja kiinnikkeet</b>	
Jänneväli	2 kpl 4,15 m	SFS INTEC SDT-S29-5,5*L isokantainen (teräkselle)	
Elementin paksuus	150 mm	Tukipinnan leveys päädyssä	90 mm
		Tukipinnan leveys keskituella	200 mm
		Kiinnikkeiden määrä päädyssä	3 kpl
		Kiinnikkeiden määrä keskituella	6 kpl
<b>Kuormat</b>			
Luonnonkuorma kohtisuoraan elementtiin		0,8	N/mm <sup>2</sup>
Luonnonkuorma poispäin elementistä		0,8	N/mm <sup>2</sup>
Oma paino		0,27	N/mm <sup>2</sup>
		0	
<b>Jännitykset</b>			
Suurin taivutusmomentti keskituella		5,991	kNm
Suurin taivutusmomentti kentässä		3,261	kNm
Suurin taivutusjännitys keskituella		94,271	N/mm <sup>2</sup>
Suurin taivutusjännitys kentässä		51,317	N/mm <sup>2</sup>
Suurin leikkausvoima		1,984	kN
Suurin leikkausjännitys		0,018	N/mm <sup>2</sup>
Puristusjännitys päädytuella		0,016	N/mm <sup>2</sup>
Puristusjännitys keskituella		0,021	N/mm <sup>2</sup>
<b>Murtorajatilan tarkastus</b>			KA %
Sallittu taivutusjännitys		99,583	
Taivutusjännitys kentässä		40,652	N/mm <sup>2</sup> 41 %
Sallittu leikkausjännitys		0,045	N/mm <sup>2</sup>
Suurin leikkausjännitys		0,027	N/mm <sup>2</sup> 60 %
Sallittu puristusjännitys		0,054	N/mm <sup>2</sup>
Puristusjännitys päädytuella		0,024	N/mm <sup>2</sup> 45 %
Puristusjännitys keskituella		0,021	N/mm <sup>2</sup> 39 %
Kiinnikkeet päädyssä		6577	N 57 %
Kiinnikkeet keskituella		13154	N 71 %
<b>Käyttörajatilan tarkastus</b>			
Momentin ja tukireaktion yhteisvaikutus keskituella			98 %
Sallittu taipuma L/100		41,50	mm
Laskennallinen taipuma		6,16	mm 15 %
		L/ 674	
<b>Tulokset</b>			
Taivutusrasitus		Elementti on kelvollinen valituille kuormituksille	
Leikkausrasitus		Elementti on kelvollinen valituille kuormituksille	
Taipuma		Elementti on kelvollinen valituille kuormituksille	
Puristuskestävyys tuella		Elementti on kelvollinen valituille kuormituksille	
Kiinnikkeet		Elementti on kelvollinen valituille kuormituksille	