

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

KALOTTIKENNORAKENTEIDEN VÄLISET LIITOSELEMENTIT
INTERJACENT JOINT ELEMENTS OF PERIODIC CELLULAR METAL
SANDWICH STRUCTURES

Lappeenrannassa 12.11.2013

Ville Laitinen

Ohjaaja/Teettäjä: Topi Palsa / Compusteel (Control Express Finland Oy)

Tarkastaja: DI Merja Huhtala

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	2
1 JOHDANTO	4
1.1 Tausta.....	4
1.2 Tavoitteet ja rajaukset	5
1.3 Työn rakenne	5
2 KALOTTIKENNORAKENTEET	6
2.1 Kalottikennorakenteiden ominaisuudet	6
2.2 Kalottikennorakenteiden valmistus.....	8
2.3 Kalottikennorakenteiden reunamuodot.....	10
3 OHUTLEVYJEN LIITTÄMISMENETELMÄT	13
3.1 Ruuviliitokset.....	13
3.2 Niittiliitokset	14
3.3 Puristusliitokset.....	16
3.4 Liimaliitokset.....	17
3.5 MIG/MAG-hitsaus.....	20
3.6 TIG-hitsaus	21
3.7 Laserhitsaus	22
3.8 Vastushitsaus	23
3.9 Hybridiliitokset	26
4 KALOTTIKENNORAKENTEIDEN VÄLISET LIITOKSET	28
4.1 Kalottikennorakenteiden välisten liitosten muotoilunäkökohtia	29
4.2 Kalottikennorakenteiden jatkaminen	30
4.3 Kalottikennorakenteiden jatkaminen kulmaliitoksella	33

5	ESIMERKKITAPPAUS: KALOTTIKENNORAKENTEIDEN KULMALIITOS	
	RUUVEILLA	36
5.1	Ideoitu kulmaliitosratkaisu	37
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	38
	LÄHDELUETTELO	39

1 JOHDANTO

Kennorakenteet ovat teollisuudessa yleisesti käytettyjä levyistä valmistettuja rakenne-osia. Kennorakenteet koostuvat usein kahdesta päällekkäin asetetusta levystä, jotka on kiinnitetty toisiinsa ytimien avulla. Ydin voi koostua vakioprofiileista, muotolevyistä, holkeista tai muotopainaumista. Tällä tavoin syntyvässä rakenteessa on usein sileät ulkopinnat, mutta sisään jäävä rakenne on ontelomainen. Kennorakenteiden ytimet toimivat jäykistävänä elementtinä, minkä seurauksena kenorakenteiden jäykkyys on huomattavasti parempi verrattuna saman painoiseen umpimateriaaliseen levyyn. (Kujala & Romanoff & Salminen & Varis & Vilpas, 2003, s. 7.)

1.1 Tausta

Kalottikennorakenteissa ytimenä toimivat kalottilevyihin venytysmuovautut muotopainumat, joita kutsutaan kaloteiksi. Kalottikennolevyjä voidaan valmistaa automaattisessa prosessissa levytyökeskuksessa samanaikaisesti muiden levyyn tehtävien operaatioiden (esimerkiksi lävistys ja/tai muovaus) kanssa. Tästä syystä jäävät valmistukseen kuluva aika ja resurssit pienemmäksi muihin kennorakenteisiin verrattuna. Kalottikennolevyjen valmistus rajoittuu kuitenkin alle 2mm paksuisiin levyihin, koska levytyökeskuksen painimen voima rajoittaa kalottien muovausta tätä suuremmilla ainepaksuuksilla. Kalottikennolevyt liitetään toisiinsa kalottien kärjistä niittaamalla, hitsaamalla tai liimaamalla, jolloin niistä muodostuu kalottikennorakenne. (Juutilainen, 2012, s. 28.)

Kalottikennorakenteet soveltuvat hyvin kohteisiin, joilta vaaditaan hyvää kuormankestävyyttä ja keveyttä. Kalottikennorakenteista voidaan myös valmistaa erilaisia elementtejä äänieristykseen. Kalottikennorakenteen äänieristysominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä eri välimateriaaleja, kuten hiekkaa, puukuitulevyjä tai äänieristysvilla. Kalottikennorakenteiden käyttö mahdollistaa erilaisten johtojen ja kaapelien läpiviennin, koska rakenne ei ole sisältä jatkuva, vaan kalottien välissä on tyhjää tilaa. Kalottikennorakenteiden lujuus on rajoittunut kalottikennolevyjen materiaalipaksuuksien rajoitusten (alle 2mm) seurauksena. Kalottikennorakenteiden

toiminnallisuuteen kuormitusten suhteen voidaan kuitenkin vaikuttaa kalottikennorakenteiden välissä käytettävien liitoselementtien valinnalla.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tässä kandidaatintyössä pyrittiin kokoamaan kirjallisuudesta tietoa kennorakenteiden yhteenliittämiseen käytetyistä menetelmistä ja niiden soveltuvuuksista erilaisille liitosmuodoille. Samalla verrattiin eri tavoilla yhteenliitettyjen kalottikennorakenteiden soveltuvuutta erilaisille kuormituksille, ja pohdittiin kalottikennorakenteiden välisten liitoselementtien suunnittelun näkökohtia. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on toimia liittämismenetelmien ja liitoselementtien valintaa helpottavana ohjeena suunnitellessa kalottikennorakenteiden välisiä liitoksia. Tässä kandidaatintyössä käsitellyt kalottikennorakenteiden reunamuodot sekä jatko- ja kulmaliitokset perustuvat Aki Pyykön opinnäytetyössä esitettyihin rakenneratkaisuihin. Esitetyt liittämismenetelmät valittiin käytettävyyden ja Compusteel Oy:n halussa olevan liittämiskaluston perusteella.

1.3 Työn rakenne

Kandidaatintyö on jaettu viiteen lukuun. Toisessa luvussa käsitellään kalottikennorakenteita niiden valmistuksen ja sovelluskohteiden näkökulmasta. Samalla esitetään myös tyypillisimmät kalottikennorakenteiden reunamuodot. Kolmannessa luvussa käsitellään ohutlevyjen liittämismenetelmiä. Liittämismenetelmät esitellään lyhyesti periaatteeltaan, ja niitä arvioidaan valmistettavuuden ja kestävyysperusteella, mutta myös eri liittämismenetelmien suomat edut kalottikennorakenteiden modulaarisuuden kannalta otetaan huomioon.

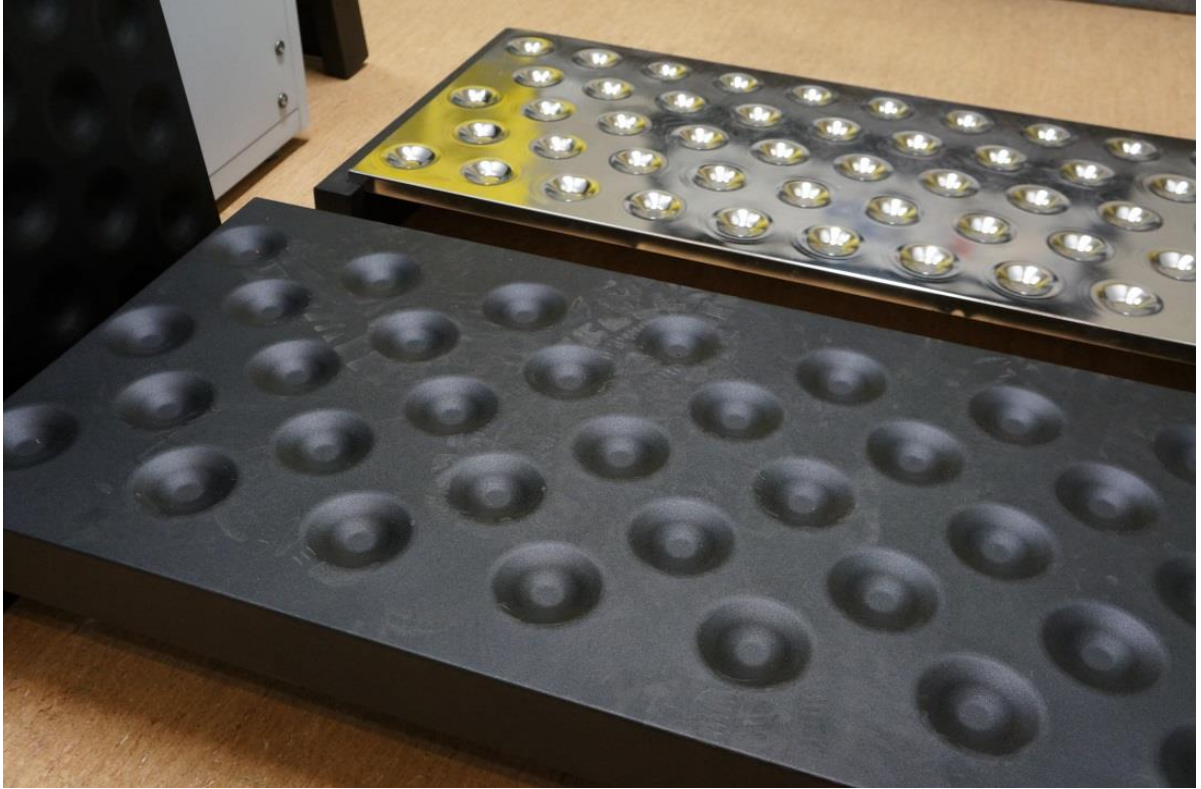
Neljännessä luvussa keskitytään kalottikennorakenteiden välisiin liitoksiin ja eritellään eri liitosmuotojen suunnittelussa huomioitavia asioita. Viidennessä luvussa käsitellään ruuviliitoksen avulla toteutettua kalottikennorakenteiden kulmaliitosta. Kuudennessa luvussa esitetään kandidaatintyön johtopäätökset erittelemällä neljännessä luvussa esitetyt ratkaisut lyhyesti ja analysoimalla niiden käytettävyyttä kalottikennorakenteiden välisten liitosten suunnittelussa.

2 KALOTTIKENNORAKENTEET

Materiaalien hinta ja erilaisten sovellusten asettamat painovaatimukset ovat johtaneet kennorakenteiden yleistymisen. Kennorakenteilla on saavutettavissa parhaimmillaan jopa 80 % painonsäästö suhteessa vastaavan tavutusjäykkyyden omaavaan umpimateriaaliseen rakenteeseen. Kennorakenteita voidaan valmistaa monista eri materiaaleista (esimerkiksi aaltopahvi on kennorakenne), mutta tyypillisin kennorakenteiden sovellus teollisuudessa on erilaiset teräksestä valmistetut kennorakenteet, joita kutsutaan teräskennolevyiksi tai teräskennolevyrakenteiksi. Teräskennorakenteet jaetaan ytimen rakenteen perusteella korrugoituytimisiin kennorakenteisiin, yksittäisillä putkipalkeilla tai profiileilla jäykistettyihin kennorakenteisiin sekä kalottikennorakenteisiin. Eri kennorakenteet on usein nimetty niiden ytimen muodon perusteella esimerkiksi C-, I-, U-, V-, X- tai Z-tyypin kennorakenteiksi. Kalottikennorakenteet poikkeavat muista kennorakenteista merkittävästi, koska ne eivät vaadi erillistä ydintä, vaan kalottikennorakenteen ytimenä toimivat kalottikennolevyihin venytysmuovattut ulokkeet eli kalotit. (Kujala et al., 2003, s. 7.)

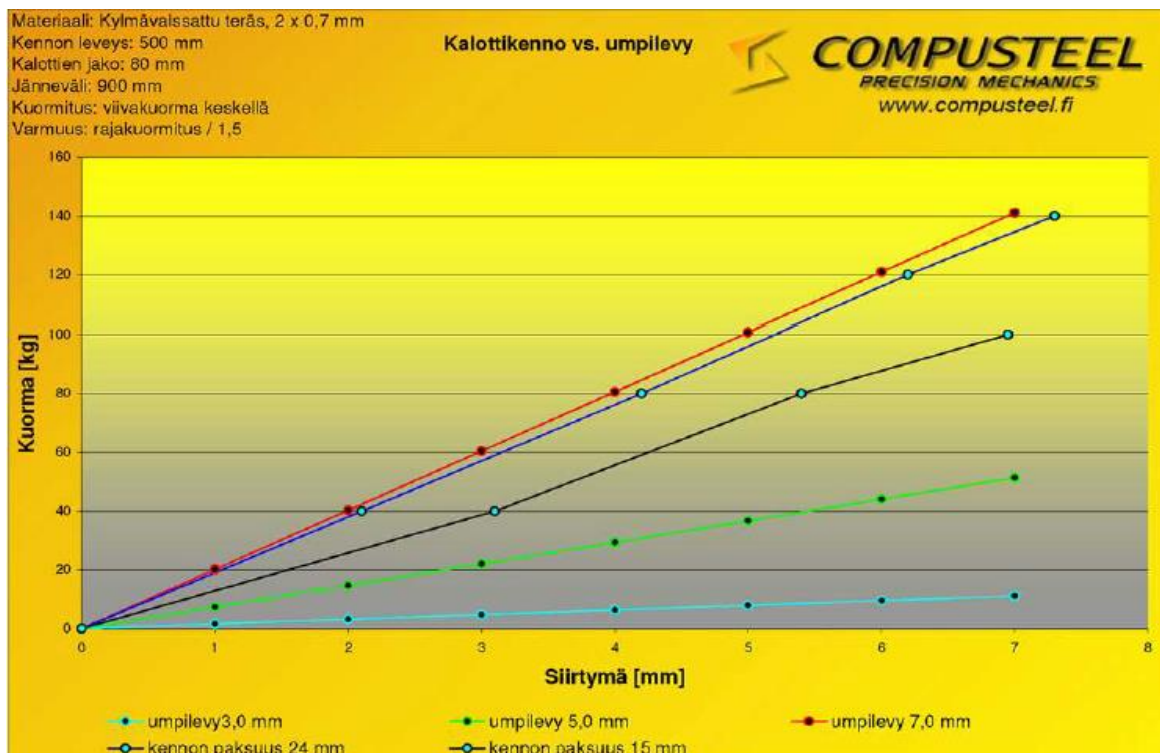
2.1 Kalottikennorakenteiden ominaisuudet

Kalottikennoja käytetään mm. julkisivupaneeleissa, kone- ja laitesuojissa, pienissä ja keskikokoisissa kone-elimissä sekä jäykisteenä värähtelyä eliminoivana elementtinä erilaisissa ohutlevyrakenteissa (Brunou, 2006, s. 13). Kalottikennorakenteet valmistetaan kahdesta tai useammasta teräslevystä, jotka liitetään yhteen niihin muovattujen kalottien kohdalta. Kalottikennorakenteet ovat painonsa ja materiaalmääräänsä nähden erittäin jykkiä. Kalottikennorakenteiden pinnat voivat olla aukotettuja tai sileitä. (Vahvuudet, 2013.) Kuvassa 1 on esitetty kaksi eri pintakäsittelyillä toteutettua kalottikennorakennetta.



Kuva 1. Kalottikennorakenteita.

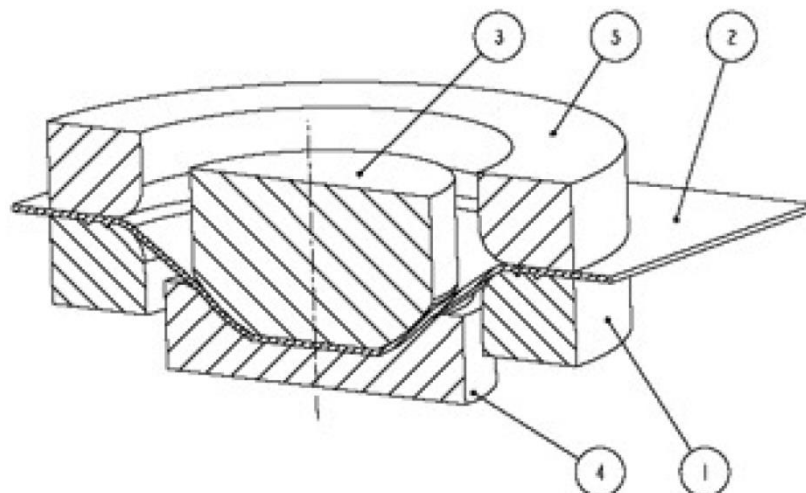
Kalottikennorakenteiden merkittävimiksi ominaisuuksiksi lasketaan niiden keveys suhteessa jäykkyyteen ja lujuuteen, niiden valmistuksessa saavutettava materiaalisäästö suhteessa umpilevyrakenteisiin, niiden modulaarisuus asentamisen suhteen sekä niiden automatisoitu tuotanto. Kalottikennorakenteiden suurimmat säästöt materiaalinkustannuksissa saavutetaan kalliita materiaaleja, kuten ruostumattomia tai haponkestäviä teräksiä, käytettäessä. Tällöin materiaalikustannukset ovat paikoin vain 30 % umpiaineesta rakennetun vastaavan rakenteen materiaalikustannuksista. Kalottikennorakenteet myös painavat keskimäärin vain 70 % vastaavan siirtymän omaavista umpimateriaalisista levyrakenteista. Kalottikennorakenteet ovat myös usein kevyempiä kuin muut kennorakenteet, koska kalottikennorakenne koostuu vain kahdesta levyosasta. (CS Cell, s. 2.) Kuvassa 2 on havainnollistettu kalottikennolevyjen ja umpilevyjen eroja jäykkyydessä.



Kuva 2. Kalottikennolevyjen jäykkyyden vertailua umpilevyyn (CS Cell, s. 2).

2.2 Kalottikennorakenteiden valmistus

Kalottien valmistus voidaan toteuttaa usealla eri menetelmällä: venytysmuovaamalla, suurpainemuovaustekniikalla tai levytyökeskuksen up-forming toiminnolla. Kalottien venytysmuovaus toteutetaan kiinnittämällä muovattava levy pidätinrenkaan ja työpöydän väliin, jonka jälkeen itse muovaus tapahtuu painamalla määrätyn muotoinen työkalu levyyn. Kalotin muoto määrittyy työkalun muodon, iskun pituuden ja pidätinrenkaan sisäpuolisen geometrian funktiona. Kalottien muovauksessa kriittiseksi tekijäksi voi muodostua mahdollinen pidätysvoiman riittämättömyydestä johtuva pidätinrenkaan ulkopuolisen materiaalin virtaaminen kalottiin, minkä seurauksena muovattava levy menettää tasomaisuutensa. Kalottien välinen etäisyys rajoittuu muovauksessa käytettävän pidätinrenkaan ulkoisten dimensioiden seurauksena. Venytysmuovaus soveltuu käytettäväksi sarjatuotannossa, jolloin kalottien muovauksessa käytetään usein nk. Matriisipuristinta, jolla muovataan yksi tai kaksi riviä yhdenaikaisesti. Vetomuovausta käytettäessä levyn pituutta ei ole rajoitettu muovaavan laitteen toimesta, vaan menetelmä soveltuu käytettäväksi pitkille levyille (esimerkiksi muovattavan levyn syöttö kelalta). Kuvassa 3 esitetyn venytysmuovaustyökalun osat: 1 ja 5 pidätinrenkaat, 3 painin, 4 vastin ja 2 muovattava levy. (Kujala et al., 2003, s. 37 ja 40.)



Kuva 3. Kalottien venytysmuovaus (Juutilainen, 2012, s. 28).

Kalotit voidaan myös muovata suurpainemuovaustekniikalla eli nestepainemuovauksella, jolloin muovautuminen perustuu hydrostaattisen paineen vaikutukseen. Nestepainemuovauksessa käytettävä neste on usein öljyä. Öljyn ja muovattavan levyn väliin on asetettu kumimatto. Nestepainemuovauksessa saavutettava muoto ja upotusten jako määräytyvät levyn alle sijoitetun työkalun tai muotin muodon ja jaon perusteella. Kun muovauksessa käytettävän öljyn paine nostetaan riittävän suureksi, muovautuu levy kumimaton välityksellä öljyn hydrostaattisen paineen seurauksena. Venytysmuovauksesta ja levytyökeskuksella toteutettavasta muovauksesta poikkeavasti säilyy levyn tasomaisuus hyvänä. Nestepainemuovauksessa käytettävä kumikalvo ei myöskään naarmuta kappaleita (Mäki-Mantila, 2001, s. 60). Tämä on seurausta öljyn hydrostaattisen paineen tasaisesta jakautumisesta muovattavan levyn pinnalle. Nestepainemuovauksessa käytettävä puristin määrää muovattavan levyn koon. Lisäksi menetelmä on harvinainen, johtuen nestepainemuovauksessa käytettävien puristimien korkea hinta. (Kujala et al., 2003, s. 40.)

Levytyökeskuksen up-forming toiminnolla valmistettujen kalottien suurin mahdollinen syvyys on 20mm, mikä on seurausta levytyökeskuksen muovaavan työkalun iskunpituudesta. Kalottien muovaus tapahtuu levytyökeskuksen alle asennetun hydraulisynterinin avulla. Hydraulisynterinin välityksellä painetaan muovattavaa levyä muovaavalla työkalulla samalla, kun levyä painetaan myös yläpuolelta vastintyökalun avulla. Levytyökeskuksessa muovatut kalotit ovat aina kupu ylöspäin suunnattuna, koska

alaspäin suuntautuneet kalotit estäisivät työstettävän levyn liikuttelun levytyökeskuksen työpöydällä (levytyökeskuksen työpöytä koostuu usein harjoista tai kuulista). (Varis, 2013.)

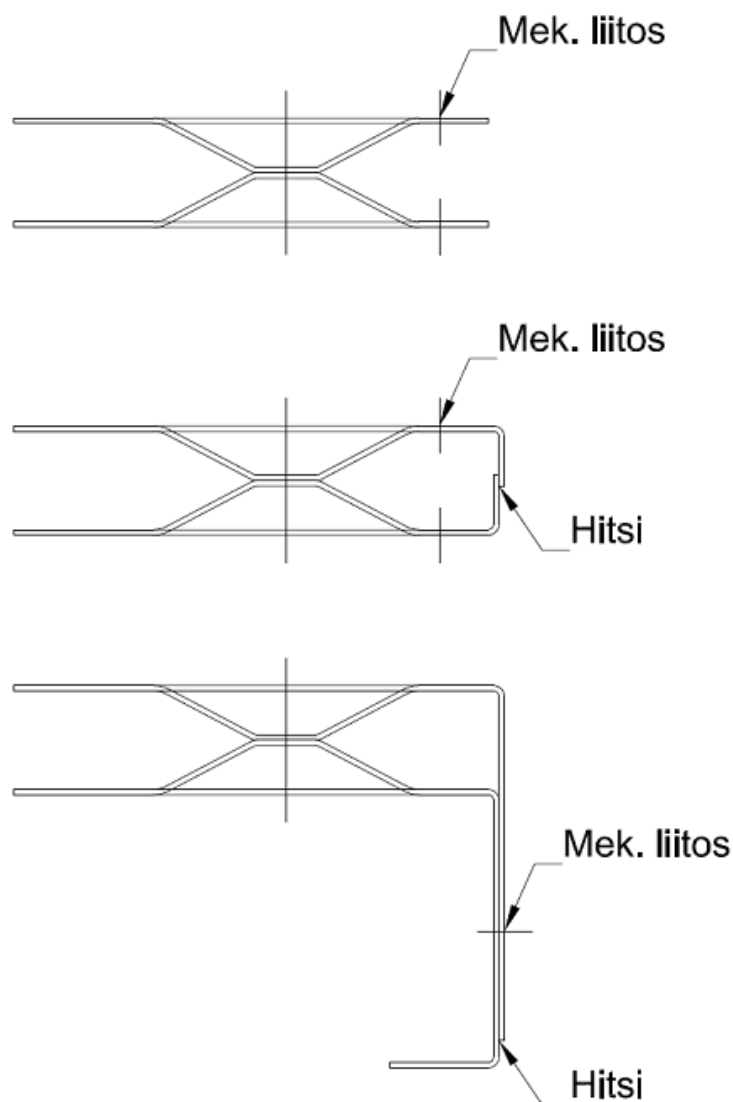
Levytyökeskuksessa kalottien valmistus levyyn voidaan toteuttaa samanaikaisesti levyn leikkaamisen, aukotuksen ja muun muovaamisen kanssa, mikä pienentää tuotantoon tarvittavien työvaiheiden ja koneiden määrää, ja siten myös kustannustehokkuutta. Kalottikennolevyjen valmistus rajoittuu kuitenkin usein alle 2mm paksuisiin levyihin, koska levytyökeskuksen painimen voima rajoittaa kalottien muovausta tätä suuremmilla ainepaksuuksilla (Juutilainen, 2012, s. 28.)

Kalottikennorakenteet voidaan liittää joko siten, että vain toisessa liitettävistä levyistä on kalotteja tai siten, että molemmissa liitettävissä levyissä on kalotteja. Jos vain toisessa levyssä on kalotteja, liittäminen tapahtuu kalottien kärjestä kalotittomaan levyyn. Mikäli molemmissa levyissä on kalotteja, liitetään levyt toisiinsa siten, että molempien levyjen kalotit ovat kärjistään kiinni toisissaan. Kalottikennolevyt voidaan liittää toisiinsa laserhitsaamalla, liimaamalla, puristusliittämällä tai vastushitsaamalla (Brunou, 2006, s. 14).

2.3 Kalottikennorakenteiden reunamuodot

Avoin kennoelementti on nimensä mukaisesti avoreunainen. Avoreunaisia kennoelementtejä ei juurikaan käytetä, johtuen avonaisen reunarakenteen hankalasta kiinnitettävyydestä ja alttiudesta pullistua kiinnityskohtien välistä mekaanisen liittämisen yhteydessä liian pientä kiinnitysväliä käytettäessä. Suljetulla reunalla varustettu kennoelementti on fyysiseltä kooltaan samansuuruinen kuin avoimella reunalla varustettu, mutta se on rakenteena jäykempi. Suljettureunaisen kennoelementin valmistamiseen tarvitaan enemmän työvaiheita, ja suljetussa rakenteessa ongelmaksi voi muodostua kosteuden tiivistyminen rakenteeseen. Rakenne on mahdollista valmistaa myös täysin ilmatiiviiksi. Laserhitsauksella rakenne on helppo valmistaa nopeasti ja kustannustehokkaasti. Laipallisella reunamuodolla varustettu kennoelementti on edellä mainittuihin reunamuotoihin verrattuna jäykin. Laipallinen rakenne mahdollistaa useiden kalottikennorakenteiden liittämisen toisiinsa ilman erillisiä välielementtejä. Rakenteen jäykkyys on myös säädettävissä helposti laipan pituutta säätelemällä. Laipallisesta

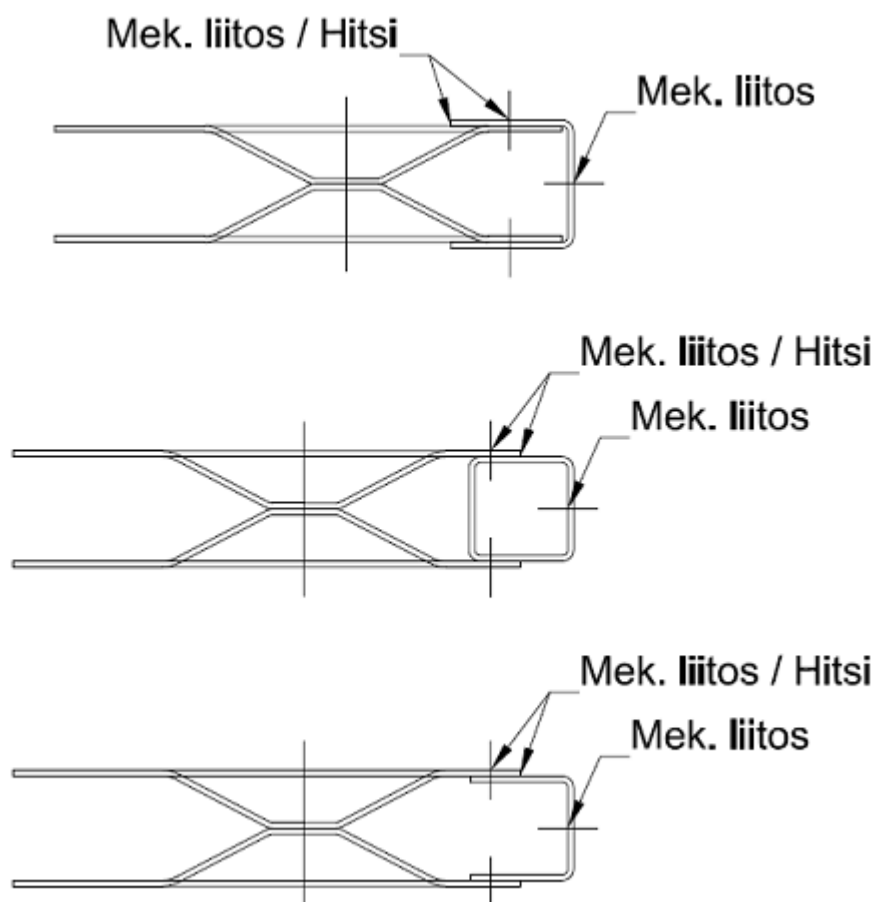
reunamuodolla toteutettu rakenne on mahdollista saada täysin tiivis esimerkiksi tiivisteen tai tiivistemassan avulla. (Pyykkö, 2006, s. 39.) Edellä mainitut kennoelementit on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Avoin kennoelementti, suljettu kennoelementti ja laippareunainen kennoelementti (Pyykkö, 2006, s. 38).

Kuvan 5 mukaisesti kalottikennoelementtien reunamuoto voidaan myös toteuttaa erillisellä vahvikkeella. Yksinkertaisimmillaan vahvike voi olla U:n muotoinen. Tällainen vahvike voidaan suunnitella liitettäväksi avoreunaisen kennoelementin sisä- tai ulkopinnalle. Erillistä ulkopuolista U-profiilia voidaan myös käyttää suljetulla reunamuodolla toteutetun

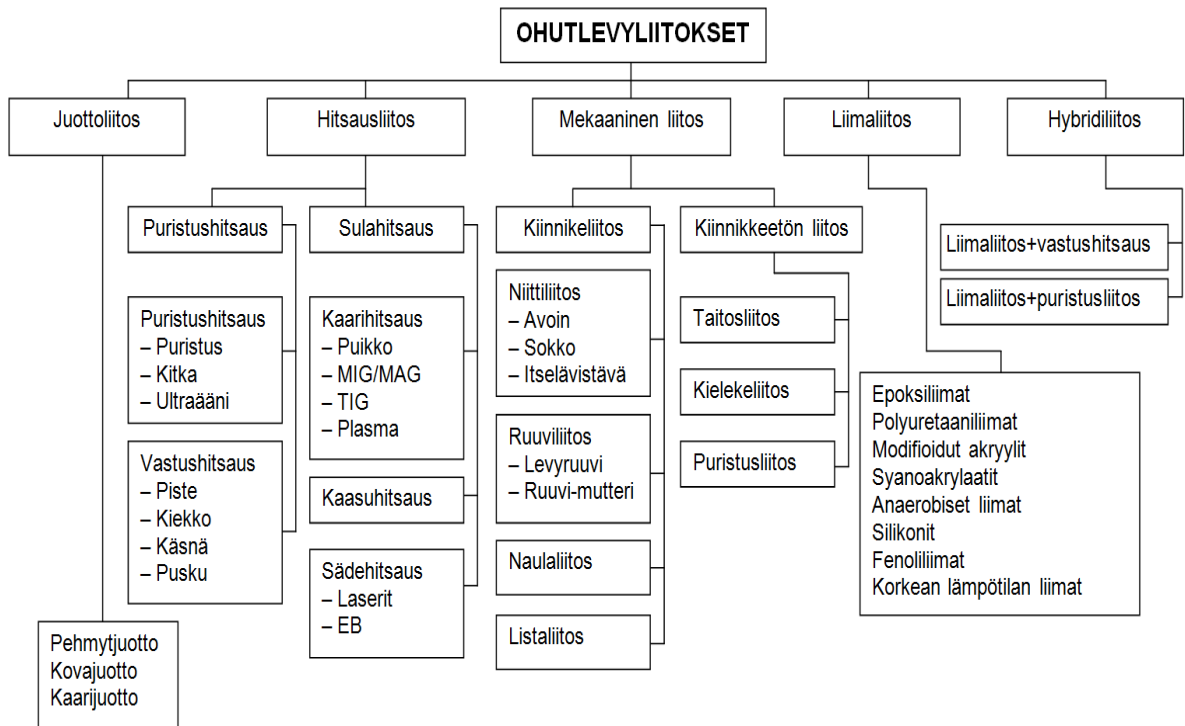
kalottikennoelementin kanssa. U-profiiliin mahdollisesti tarvittavat kiinnityselimet, kiinnitysreiät ja läpiviennit voidaan valmistaa levytyökeskuksen avulla. Avoreunaisen kennoelementin vahvistus voidaan myös toteuttaa neliöputkella. Neliöputki on kiertojäykkyydeltään U-vahviketta parempi, ja sallii suuremman kiinnitysvoiman käytön. Sisäpuolinen U-profiili ja neliöputki mahdollistavat kalottikennoelementtien jatkamisen ilman erillisiä ulkoisia jatkoelementtejä. Levytyökeskuksella valmistettavien vahvikeprofiilien pituus on rajoitettu, johtuen levytyökeskuksen ahiokoon rajoituksista. Putkiprofiileihin taas joudutaan erikseen valmistamaan mahdollisesti tarvittavat kiinnityselementit, kiinnitysreiät ja läpiviennit. (Pyykkö, 2006, s. 39–40.)



Kuva 5. Ulkopuolisella U-profiililla varustettu kennoelementti, vakioprofiililla varustettu kennoelementti ja sisäpuolisella U-profiililla varustettu kennoelementti (Pyykkö, 2006, s. 40).

3 OHUTLEVYJEN LIITTÄMISMENETELMÄT

Ohutlevyjen liittämismenetelmät on kirjallisuudessa jaettu viiteen pääryhmään: juottoliitoksiin, hitsausliitoksiin, mekaanisiin liitoksiin, liimaliitoksiin sekä hybridiliitoksiin. Tässä kappaleessa käydään läpi tyypillisimpiä ohutlevyjen liittämässä käytettyjä menetelmiä. Käsiteltävät liitosmenetelmät on valikoitu Compusteel Oy:n hallussa olevan liittämiskaluston, ja parhaiten kalottikennorakenteiden välisten liitoselementtien liittämiseen soveltuvien menetelmien perusteella. Kuvassa 6 on esitetty tyypillisimmät ohutlevyjen liittämismenetelmät.



Kuva 6. Käytetyimmät ohutlevyjen liittämismenetelmät (mukaihen: Nuutinen et al., 1999, s. 6).

3.1 Ruuviliitokset

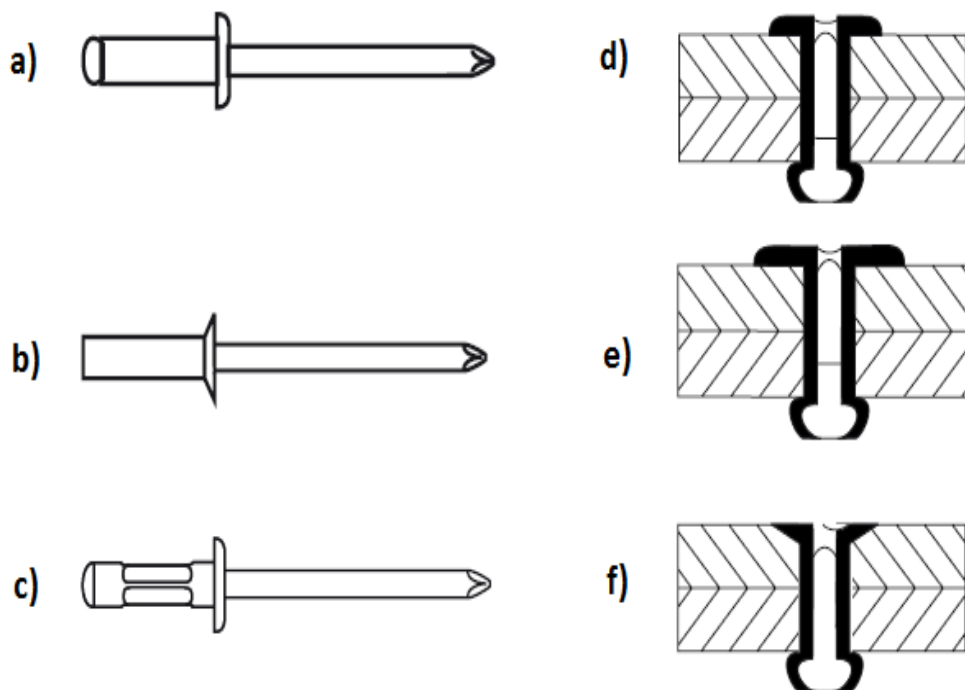
Ruuviliitoksessa liitososat kiinnittyvät toisiinsa puristamalla liitoseliminä toimivien ruuvien vaikutuksesta. Ruuviliitoksessa vaikuttava puristusvoima on seurausta ruvin pyörittämisestä aiheutuvasta aksiaaliliikkeestä. Ruuviliitokset ovat usein avattavissa, vaikka ruvin kierteissä tapahtuukin kiristuksen yhteydessä ruvin itsestään avautumisen

estäviä muodonmuutoksia. Ruuvin vaatima vastakierre voi sijaita joko liitettävässä kappaleessa tai ruuviliitoksessa saatetaan käyttää erillistä ulkopinnallaan perusmateriaaliin kiinnittyvää mutteria. Mutteria käytetään sovelluksissa, joissa perusmateriaali on ruuvin materiaalia heikompaa. Voidaan myös käyttää ruuvia, joka leikkaa itse itselleen vastakierteen paikoilleen kiertämisen yhteydessä. (Ihalainen & Aaltonen & Aromäki & Sihvonen, 1985, s. 329.)

3.2 Niittiliitokset

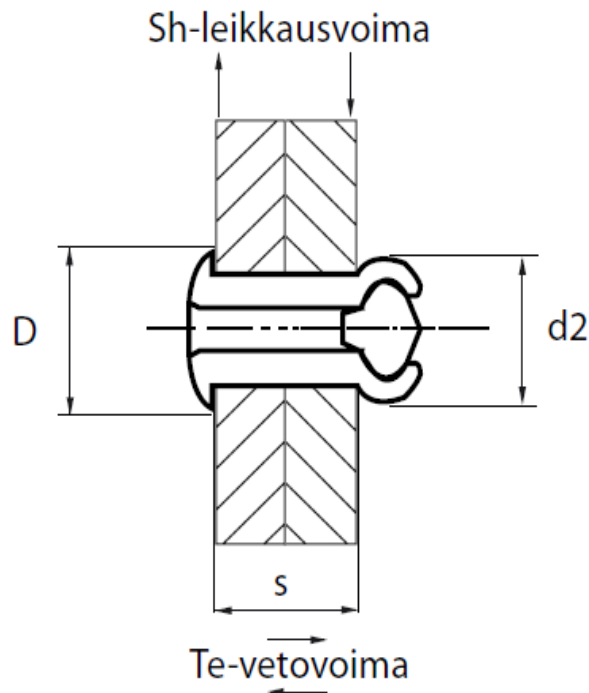
Niittiliitokset ovat ei-irrotettavia kiinteitä mekaanisia liitoksia, jotka ovat hyvin yleisesti käytössä alumiinin ja ohutlevyjen liittämässä. Niittiliitoksessa käytettävät niitit voivat olla itsemuovautuvia tai ne saattavat vaatia erillisen työkalun muovautuakseen. Sokkoniiteillä ja itselävistäville niiteillä toteutetut niittiliitokset ovat yleisimpiä. Niittiliitos voidaan toteuttaa myös kylmä- tai kuumaniittaamalla, mutta kuumaniittaus ei sovellu ohutlevyjen kanssa käytettäväksi. Niitit eivät aiheuta liitettäviin kappaleisiin lämmöstä johtuvia muodonmuutoksia, minkä takia niitit ovat hyvä liitostapa kohteisiin, joiden valmistusmateriaalit eivät ole hitsattavia. Niittiliitokset soveltuvat myös hyvin sovelluksiin, joissa ne altistuvat leikkaavalle kuormitukselle. (Nuutinen et al., 1999, s. 32.)

Tyypillisiä ohutlevyjen liittämässä käytettyjä vetoniittityyppejä ovat avoimet vetoniitit, suljetut vetoniitit sekä multi-grip niitit. Avoimia vetoniittejä käytetään sovelluksissa, joissa niille ei aseteta suuria kuormitusvaatimuksia. Avoimia vetoniittejä valmistetaan erilaisilla kantatyypeillä varustettuna. Suljetut vetoniitit soveltuvat parhaiten käytettäväksi kohteissa, joissa liitokselta vaaditaan tiiveyttä ja joissa niitin vetokaran pää ei saa irrota. Multi-grip niitillä on laaja tartunta-alue, mistä johtuen se on yleinen niittiliitoksissa, joissa niitille tarkoitettut reiät ovat vaikeasti yhteen sovitettavissa. Vetoniittejä valmistetaan pääasiassa kolmella eri kantatyypillä, jotka ovat kupukanta, laajakanta ja uppokanta. Kupukantaiset niitit soveltuvat useisiin eri käyttötarkoituksiin. Laajakantaiset niitit on tarkoitettu käytettäväksi silloin, kun liitetään pehmeää, haurasta tai ohutta materiaalia tukevaan alustaan. Laajakantaisten niittien käyttö mahdollistaa suuremman reiän käytön niitin kannan alla. Upponiitin käytöllä mahdollistetaan vetoniittien käyttö kohteissa, joissa niitin kanta ei saa olla näkyvissä. Eri vetoniittityyppejä ja kantatyyppejä on esitetty kuvassa 7. (Ferometal Oy, 2012, s. 5.)



Kuva 7. a) avoin vetoniitti, b) suljettu vetoniitti, c) multi-grip niitti, d) kupukanta, e) laajakanta sekä f) uppokanta (mukaillen: Ferrometal Oy, 2012, s. 5).

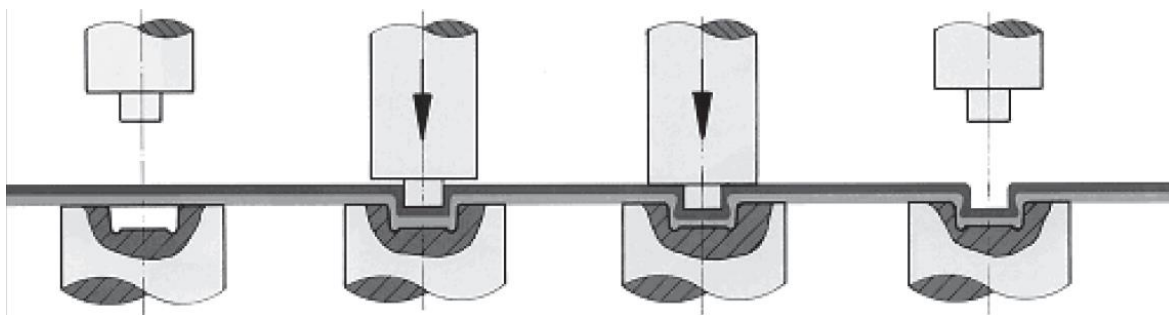
Vetoniitillä liitettäessä tulee suunnittelijan huomioida liitettävien kappaleiden materiaali ja aineenpaksuus niittiliitoksen kohdalla. Liitettäessä eripaksuisia tai lujuuksisia materiaaleja tulee heikomman/ohuemman materiaalin olla niitin kannan puolella. Niittiliitoksen lujuus riippuu liitettävien kappaleiden lujuudesta ja käytettävän vetoniitin paksuudesta. Liitoksessa käytettävän vetoniitin paksuuden tulisi olla vähintään paksumman materiaalin suuruinen. Vetoniitin paksuuden ei kuitenkaan tulisi ylittää niitin kannan alla olevan materiaalin paksuutta yli kolmenkertaisesti. Käytettävän vetoniitin pituus on yhteenlaskettujen ainepaksuuksien ja niitin halkaisijan summa. Liitosta suunnitellessa tulee huomioida galvaanisen korroosion mahdollisuus, mikäli liitoksessa käytettävien vetoniittien ja liitettävien kappaleiden materiaalit poikkeavat toisistaan. Vetoniittiliitoksen periaate on esitetty kuvassa 8. (Ferrometal Oy, 2012, s. 4.)



Kuva 8. Vetoniittiliitos. D on vetoniitin kannan halkaisija, d_2 on niitatusvetoniitin rungon laajentunut pää, ja s on puristettava ainepaksuus. (mukaillen: Ferrometal Oy, 2012, s. 7.)

3.3 Puristusliitokset

Ohutlevyjen puristusliittäminen toteutetaan pistin-tyyny-työkaluparilla, jolla yhteen liitettävät päällekkäin asetetut ohutlevyt muotolukitaan toisiinsa yhteen puristamalla. Liitettävät ohutlevyt pysyvät kiinni toisissaan puristuksen aikana tapahtuvan paikallisen muovautumisen synnyttämän muodon lukitsemana. Rakenteeltaan puristusliitos on elastinen ja väsymislujuudeltaan parempi kuin pistehitsi, johtuen hitsausmenetelmille tyypillisen lämpövaikutusalueen puuttumisesta. Tyypillisesti puristusliitoksen lujuus kuitenkin jää 35–100 % pistehitsin lujuudesta. Puristusliitettävien levyjen yhteispaksuuden yläraja on liittämiseen käytettävästä laitteesta riippuen 0,4–8mm. Puristusliitos jättää liitettäviin levyihin painauman pistimen puolelle liitosta ja nystyn tyynyn puolelle liitosta. Puristusliitoksen tuottamiseen tarvitaan voimaa vain 10–100kN, riippuen liitettävistä materiaaleista ja työkaluista. Kuvassa 9 on esitelty puristusliittämisen periaate. (Varis, 1997, s. 9.)



Kuva 9. Puristusliittämisen periaate (Varis, 1997, s. 9).

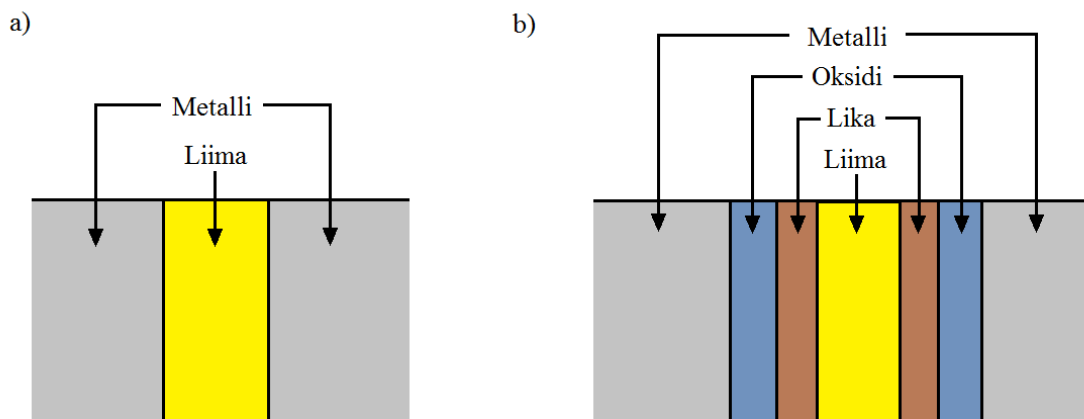
Puristusliittäminen on menetelmänä nopea, koska yhden liitospisteen tuottamiseen kuluu aikaa alle yksi sekunti. Puristusliitoksen tuottaminen ei myöskään vaadi erityisiä esivalmisteluja kuten reikien poraamista, reunan viistämistä, pinnoitteen poistoa, pintojen karhennusta tai rasvakerroksen perinpohjaista poistamista. Puristusliittämisessä ei ole tarvetta jälkityöstötoimenpiteille, koska oikein suoritettuna puristusliittäminen ei riko suojaavia pinnoitteita eikä tuota pölyä, likaa, jätteitä tai metallilastuja. Puristusliittäminen on meluton prosessi. (Varis, 1997, s. 9–10.)

Puristusliittämisen käyttäminen ohutlevyjen liittämismenetelmänä asettaa kuitenkin vaatimuksia koskien liitettävien levyjen asemaa, kokoa ja muotoa. Puristusliitos on aina periaatteeltaan päällekkäisliitos, eli liitettävien levyjen pintojen täytyy olla liitoskohdasta toisiaan vasten. Liitoskohtaan on myös päästävä käsiksi molemmilta puolilta liitosta, ja liitoskohdan ympäristössä on oltava riittävästi tilaa työkalua varten. Puristusliittäminen asettaa myös vaatimuksia liitettävien ohutlevyjen materiaalille. Puristusliitettävien materiaalien on oltava kylmänä muovattavia johtuen liittämisen aikana tapahtuvasta muokkauslujittumisesta. Puristusliitoskoneet jaetaan käsipihteihin, käsikäyttöisiin laitteisiin sekä lattialla seisoviin koneisiin. (Varis, 1997, s. 9, 11 ja 13.)

3.4 Liimaliitokset

Liimaus perustuu liitettävien kappaleiden välille liima-aineen vaikutuksesta syntyviin tartuntavoimiin eli adheesioon. Liimaliitoksen mekaaninen lujuus riippuu itse liima-aineen koheesiosta sekä liimaamalla liitetyiden kappaleiden ja liima-aineen välisestä adheesiosta. Liima-aineella on merkittävä osuus liimaliitoksen kestävyuden kannalta, ja hyvän liima-aineen tuleekin täyttää seuraavat ominaisuudet: sen on kyettävä kostuttamaan liimattavat pinnat, sen täytyy tarttua liimattaviin pintoihin riittävän hyvin ja sen sisäisen lujuuden tulee

olla siihen kohdistuviin rasituksiin suhteutettuna riittävän suuri. Liima-aineen lisäksi liimaliitoksen lujuuteen vaikuttavat liitoksen muoto ja liimattavien pintojen puhtaus. Esimerkiksi metalleja liimatessa oksidikerros voi olla haitallinen liimaliitoksen lujuutta ajatellen. Teoreettista ja todellista liimaliitosta on verrattu kuvassa 10. (Nuutinen et al., 1999, s. 57.)



Kuva 10. a) Kuviteltu tilanne metallien liimaliitoksessa. b) Todellinen tilanne esikäsittelemättömillä pinnoilla. (mukaillen: Nuutinen et al., 1999, s. 57.)

Liimat jaetaan kahteen pääryhmään: orgaanisiin ja epäorgaanisiin liimoihin. Orgaaniset liimat koostuvat joko luonnon hiilivedyistä tai synteettisistä hiilivedyistä, kun epäorgaaniset liimat perustuvat erilaisten mineraalien, keraamien tai lasimaisien aineiden (esimerkiksi metallioksidit ja silikaatit) käytölle. Konepajateollisuudessa paljon käytetyt polymeeripohjaiset liimat, joissa perushartsia on muunneltu toisella hartsilla tai elastomeerilla, ovat perusrakenteeltaan orgaanisia. Ohutlevyjen liimaliitoksissa käytettävät liimat voidaan jakaa liiman luonteen, liiman kovettumistavan tai liiman kemiallisen koostumuksen perusteella. Liiman luonteen perusteella jaotellut liimat ovat joko kerta-, kesto- tai elastomeeripohjaisia liimoja. Kovettumistavan perusteella liimat jaetaan kemiallisella reaktiolla kovettuviin, fysikaalisella reaktiolla kuivuviin sekä jähmettyviin liimoihin. Tavallisimpia ohutlevyjen liittämiseen käytettäviä liimoja ovat epoksit, polyuretaaniliimat, modifioidut akryylit, syanoakrylaatit, anaerobiset liimat, silikonit, fenoliliimat sekä korkean lämpötilan liimat. Eri liimoja on verrattu taulukossa 1. (Nuutinen et al., 1999, s. 57–59.)

Taulukko 1. Tavallisimmat metallien liimaukseen käytetyt liimat (mukaillen: Nuutinen et al., 1999, s. 58).

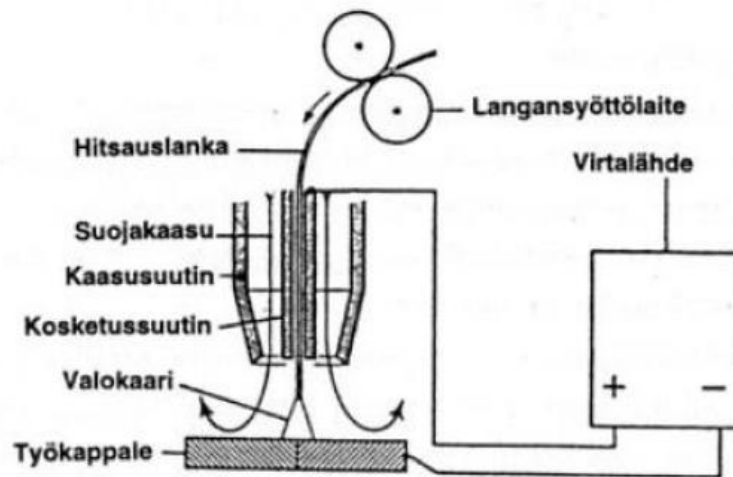
Liimatyyppi	Toimitusmuoto	Kovettuminen	Käyttösovelluksia
Epoksit	1-komponenttinen 2-komponenttinen Filmi ja nauha	Lämpö Huoneenlämpö Lämpö (+paine)	Rakenneliimaus
Polyuretaanit	1-komponenttinen 2-komponenttinen	Lämpö/kosteus Huoneenlämpö	Rakenneliimaus, esim. kerroslevytelineet
Modifioidut akryylit	2-komponenttinen	Huoneenlämpö	Rakenneliimaus
Syanoakrylaatit	1-komponenttinen	Kosteus	Pienten osien liimaus, kun halutaan erittäin nopea kuivuminen.
Anaerobiset liimat	1-komponenttinen	Hapettomuus	Lukitus, kiinnitys ja tiivistys. Rakenneliimaus vähäisempää.
Silikonit	1-komponenttinen 2-komponenttinen	Kosteus Huoneenlämpö	Tiivistys ja rakenneliimaus
Fenolit	1-komponenttinen 2-komponenttinen	Lämpö Lämpö (+paine)	Rakenneliimaus Puun liimaus
Korkean lämpötilan liimat	1-komponenttinen Filmi ja nauha	Lämpö Lämpö (+paine)	Avaruus- ja lentokoneteollisuus

Liimaliitoksen pitkäaikaiskestävyys riippuu käytetystä liima-aineesta, liitosmuodosta sekä liimaliitosta kuormittavista olosuhteista. Ulkoisten mekaanisten jännitysten lisäksi liimaliitokseen kohdistuu kosteudesta johtuvia sisäisiä jännityksiä. Etenkin suurimolekyyliset liima-aineet reagoivat kosteuteen voimakkaasti, koska pienimolekyylinen vesi tunkeutuu helposti suurimolekyylisen liima-aineen molekyylin väliin, ja siitä eteenpäin liima/metalli-rajapintaan. Liima/metalli-rajapinnassa

vesimolekyylit voivat katkaista liimaliitosta koossapitäviä adhesiivisia sidoksia, kun itse liima-aineessa vesimolekyylit aiheuttavat materiaalin turpoamista ja sen sisäisten jännitysten lisääntymistä. Erityisen voimakkaasti veden vaikutus liima-aineessa näkyy, kun liima-aineen lämpötilan toistuvasti vaihtuu °C:n molemmin puolin. Jäätymisen seurauksena liima-aineeseen diffusoituneen veden tilavuus muuttuu aiheuttaen liimaliitokseen sisäisiä jännityksiä. Lämpötilan, kosteuden ja jännitysten lisäksi liimaliitoksen pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttavat erilaiset säteilyt, kemikaalit sekä ilmansaasteet. Liimaliitoksen pitkäaikaiskestävyyttä voidaan parantaa pienentämällä siihen vaikuttavia jännityksiä. Liimaliitokseen kohdistuviin jännityksiin voidaan vaikuttaa valittavalla liitosmuodolla, valitsemalla liima, joka on liitettävää materiaalia joustavampi, pitämällä liimakerros ohuena sekä valitsemalla mahdolliset täyteaineet ja liuottimet inerteiksi. (Nuutinen et al., 1999, s. 59.)

3.5 MIG/MAG-hitsaus

MIG/MAG-hitsauksessa eli metallikaasukaarihitsauksessa hitsaustapahtuma perustuu hitsauspistoolin suuttimen kautta tasaisella nopeudella syötettävän lisäainelangan ja työkappaleen välillä suojakaasun ympäröimänä palavaan valokaareen. Sula metalli siirtyy lisäainelangan kärjestä pisaroina hitsisulaan sähkömagneettisen pinch-voiman vaikutuksesta. Suojakaasusta riippuen hitsausmenetelmää nimitetään MIG- tai MAG-hitsaukseksi. MIG-hitsauksessa käytetään reagoimatonta inerttiä suojakaasua, ja MAG-hitsauksessa käytetään hitsisulassa olevien aineiden kanssa reagoivaa aktiivista suojakaasua. Aktiivinen suojakaasu on usein argonin ja hiilidioksidin, argonin ja hapen tai argonin, hapen ja hiilidioksidin kaasuseos. Aktiivinen suojakaasu voi koostua myös pelkästään hiilidioksidista. Inertti suojakaasu on koostumukseltaan usein argonia, heliumia tai näiden kaasuseosta. Suojakaasun koostumus on suurimmilta osin riippuvainen hitsattavan perusaineen koostumuksesta. Terästen hitsaamiseen käytetään aktiivista suojakaasua ja ei-rautametallien hitsaamiseen käytetään inerttiä suojakaasua. (Lukkari, 1997, s. 159.) Perusvaatimuksena MIG/MAG-hitsattavalle materiaalille on sähkönjohtavuus, ja MIG/MAG-hitsaus onkin yleistä rautametallien lisäksi myös alumiinin, kuparin ja nikkelin hitsauksessa (ESAB, 2013a). Kuvassa 11 on esitetty MIG/MAG-hitsauksen periaate.



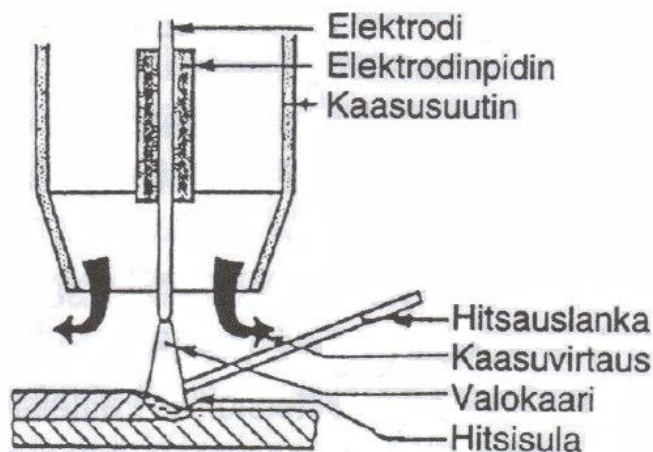
Kuva 11. MIG/MAG-hitsauksen periaate (Lukkari, 1997, s. 159).

Tyypillisesti MIG/MAG-hitsaus suoritetaan osin mekanoisoidusti, eli langansyöttö on toteutettu koneellisesti, mutta itse hitsauspistoolin kuljetus eli hitsausliike tapahtuu käsin. MIG/MAG-hitsaus voidaan myös toteuttaa mekanoisoidusti, automatisoidusti tai robotisoidusti, minkä johdosta se soveltuu erinomaisesti myös sarjatuotantoon. (Lukkari, 1997, s. 160.) MIG/MAG-hitsauksen etuja ovat helpon mekanoisoiduvuuden lisäksi myös jatkuva lisäainelanka, lisäaineen riittoisuus, tuottavuus sekä hitsausarvojen laaja säädettävyys (ESAB, 2013a).

3.6 TIG-hitsaus

TIG- eli volframi-inerttikaasuhitsauksessa valokaari palaa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välillä inertin suojakaasun ympäröimänä. TIG-hitsauksessa käytetty inertti suojakaasu, joka usein on argonia tai heliumia, suojaa hitsaustapahtuman lisäksi volframielektrodin kuumaa kärkeä hapettumiselta. Hitsisula syntyy työkappaleen perusaineen sulaessa valokaaren lämmön vaikutuksesta. TIG-hitsaus voidaan toteuttaa ilman lisäaineen tuontia hitsisulaan. Tarvittaessa lisäainetta voidaan erikseen tuoda hitsisulaan toisella kädellä. TIG-hitsauksessa käytetty lisäainelanka on usein MIG/MAG-hitsauksessa käytettyä lisäainelankaa. TIG-hitsaus on tyypillisesti käsinhitsausta vaikka se onkin helposti mekanoisoidavissa erilaisin kuljettimin ja lisäainelangan syöttölaittein. Koska TIG-hitsauksessa lämmöntuonti (valokaari) ja lisäaineen tuonti ovat erotettu toisistaan, saavutetaan TIG-hitsaukselle hyvä sulan ja tunkeuman hallinta sekä hitsausenergian säädeltävyys. Hitsausvirta voidaankin pitää

pienimmillään vain muutamissa ampeereissa, mikä on avuksi hitsattaessa pieniä ainepaksuuksia (hitsausalue alkaa noin 0,1mm ainepaksuudesta lähtien) tai suurempien ainepaksuuksien pohjapalkoja. Suurille ainepaksuuksille TIG-hitsaus ei sovellu hyvin, johtuen pienemmistä valokaaren termisestä hyötysuhteesta ja energiatiheydestä. (Lukkari, 1997, s. 249.) TIG-hitsausta käytetään ruostumattomille teräksille, alumiinille ja erikoismetalleille (ESAB, 2013b). Kuva 12 esittää TIG-hitsauksen periaatetta.



Kuva 12. TIG-hitsauksen periaate (Lukkari, 1997, s. 249).

3.7 Laserhitsaus

Laserhitsaus on liittämismenetelmänä hyvin yleinen sovelluksissa, joissa tuotantomenetelmien luotettavuudelle, tuotantolaadulle ja kustannustehokkuudelle on asetettu suuret vaatimukset. Laserhitsaus on yleinen liittämismenetelmä autoteollisuudessa sekä elektroniikan mekaniikan tuotannossa. Teollisuudessa käytetään pääasiassa kolmea eri laserhitsausmenetelmää: CO₂-laserhitsaus, Nd:YAG-laserhitsaus sekä diodilaserhitsaus. Diodilaserhitsaus on yleistynyt sen laitteiston vaatiman fyysisen tilan pienuuden, huollontarpeen vähäisyyden ja hyvän hyötysuhteen (4-5 kertaa parempi kuin muilla mainituilla laserhitsausmenetelmillä, noin 24–40%) johdosta. Lisäksi diodilaserhitsauksella on hyvä absorptio metallimateriaaleille. (Salminen, 2002, s. 18–19.)

Diodilaserissa on koottu useita pienitehoisia diodilasereita pakaksi, jonka tuottama laserenergia fokusoidaan eli kohdistetaan pieneksi pisteeksi hitsattavan työkappaleen pinnalle. Diodilaserin tuottama teho on suurimmillaan noin 1,5 kW, mutta sitä voidaan

suurentaa yhdistämällä useiden eri pakkojen säteitä keskenään. Diodilasereilla tapahtuu tehohäviötä säteen ohjauksen yhteydessä, kun ohjaimena käytetään optista kuitua. Ilman optisen kuidun käyttöä muodostuu riskiksi laserin mahdollinen rikkoutuminen törmäyksessä. Optisen kuidun lisäksi lasersädetä voi ohjata linssien ja peilien avulla. Diodilaserhitsauksessa käytetään nk. sulattavassa hitsauksessa, mistä johtuen sen hitsausnopeus on yleensä hitaampi kuin muilla mainituilla laserhitsausmenetelmillä, jotka soveltuvat paremmin nk. avaimenreikähitsauksen käytölle. Diodilaser on yleinen hitsausmenetelmä etenkin ohutlevyjen liittämässä. (Salminen, 2002, s. 18–19.)

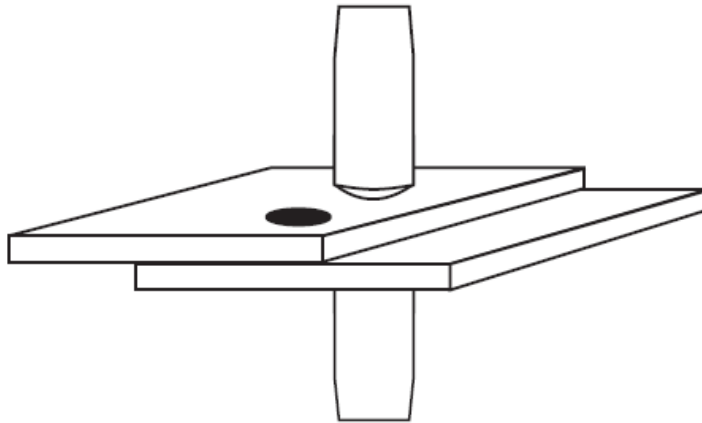
3.8 Vastushitsaus

Vastushitsauksessa tarvittava lämpö tuotetaan yhteen liitettävien työkappaleiden vastuksia hyödyntämällä johtamalla työkappaleiden läpi korkea hitsausvirta ja samalla luoden sähköä johtava kontaktipinta työkappaleita yhteen puristamalla. Hitsauksessa käytetään elektrodeja, joilla välitetään työkappaleisiin kohdistuva puristusvoima ja johdetaan hitsauksessa tarvittava hitsausvirta työkappaleiden läpi haluttua reittiä. Hitsauksen päätyttyä elektrodien tehtävänä on jäähdyttää syntynyt hitsi ympäristöineen nopeasti. Vastushitsauksessa tarvittavat työvaiheet ovat nopeita, ja yhden hitsin tuottamiseen työvaiheineen kuluukin aikaa vain noin yksi sekunti. Vastushitsaus on parhaimmillaan tavallisten ohutlevyjen liittämässä, vaikka soveltuukin erinomaisesti erilaisille metallisille rakenneaineille. (Nuutinen et al., 1999, s. 67.)

Vastuspistehitsauksen työvaiheet ovat pääosin samat menetelmästä riippumatta. Hitsaus aloitetaan puristamalla elektrodeilla työkappaleita yhteen niiden välisen kontaktivastuksen pienentämiseksi ja hitsausvirran ohjaamiseksi halutulle reitille työkappaleiden lävitse. Esipuristusajan jälkeen kytketään hitsausvirta, minkä seurauksena syntyy työkappaleiden väliin liitoskohtaan hitsisula. Kun hitsausvirta kytketään pois päältä, jatkavat elektrodit työkappaleiden puristamista jälkipuristusajan verran. Tänä aikana elektrodit jäähdyttävät syntynyttä hitsiä ympäristöineen ja hitsisula jähmettyy saavuttaen riittävän lujuuden. Jälkipuristusajan kuluttua elektrodit irrotetaan työkappaleista. (Nuutinen et al., 1999, s. 68.)

Yksittäisiä pistemäisiä hitsejä tuottava pistehitsaus on tavanomaisin vastushitsausmenetelmä. Pistehitsauksella voidaan tarkasti liittää ilman mittavia

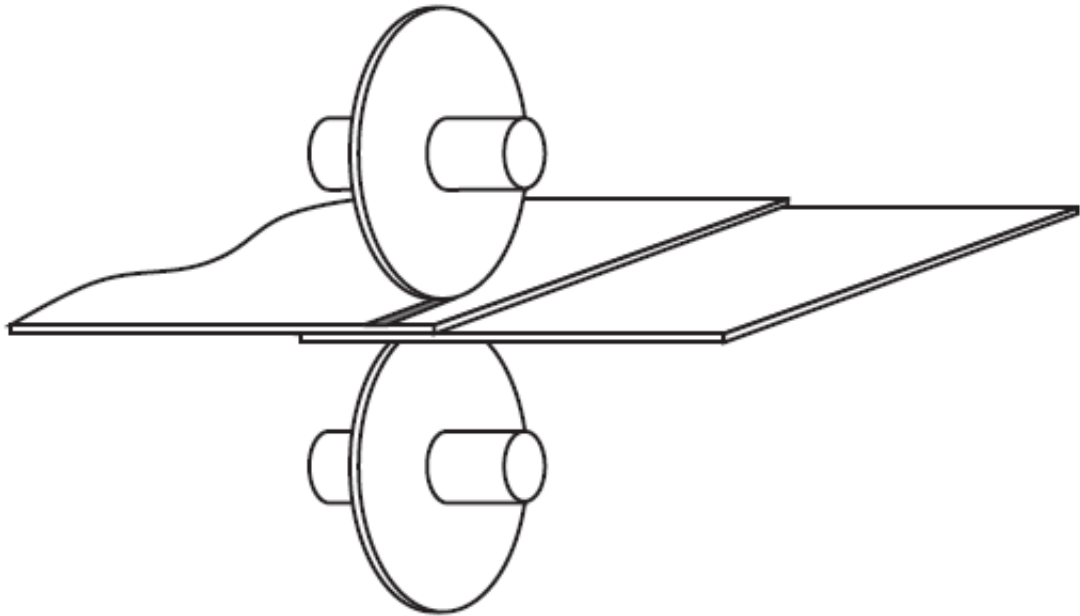
muodonmuutoksia useimpia metalleja. Myös keskenään eripaksuisten levyjen liittäminen toisiinsa on yleistä. Sarjapistehitsaukseksi nimitetyssä pistehitsausmenetelmässä hitsataan samanaikaisesti useita pistehitsejä. Hitausvirta ja puristusaine ohjataan työkappaleeseen sen molemmin puolin olevien elektrodien kautta kuvan 13 mukaisesti. Elektrodit voivat molemmat olla liikkuvia, tai toinen niistä voi olla kiinteä. Yksittäisen hitsin tuottamiseen käytettävä hitsausvirta on riippuvainen hitsattavasta materiaalista ja työkappaleen paksuudesta. Pistehitsaus on menetelmänä taloudellinen, tehokas, mittatarkka ja tuotannollisuudeltaan varma. (Nuutinen et al., 1999, s. 69.)



Kuva 13. Pistehitsaus (mukaillen: Rautaruukki Oyj, 2009, s. 4).

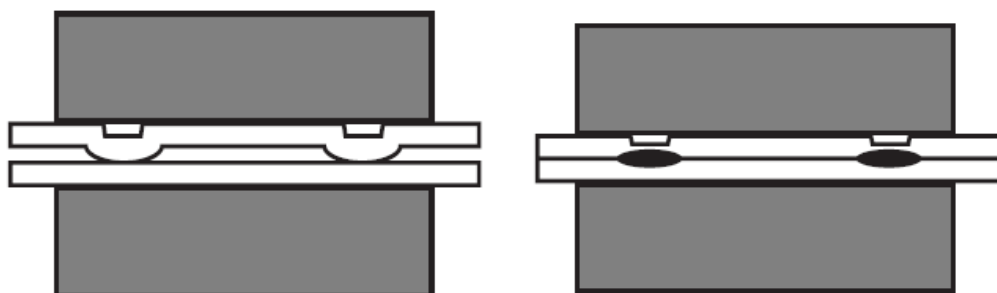
Kiekkohitsauksena elektrodeina toimivat pyörivät kiekot, jotka kuljettavat työkappaletta hitsauksen aikana siten mahdollistaen tiiviin hitsin valmistamisen (kuva 14). Elektrodit voivat olla kontaktipinnoiltaan joko kuperia tai tasaisia. Menetelmän avulla voidaan myös tuottaa yksittäisiä pistehitsejä halutun välimatkan päähän toisistaan. Tiivis hitsi on rakenteeltaan sarja limittäin olevia pistehitsejä. Kiekkohitsauksessa käytetty laitteisto on hyvin samankaltainen pistehitsauksessa käytetyn laitteiston kanssa. Kiekkohitsauksessa saavutettavan hitsin leveys on yleensä noin 80 % hitsauksessa käytetyn elektrodin otsapinnan halkaisijasta. Työkappaleen paksuus määrittää hitsauksessa käytettävän elektrodin otsapinnan leveyden. Kiekkojen ja työkappaleen kohtauskulma on tarpeen mukaan muunneltavissa, esimerkiksi hitsin luokse päästävyvyyden tai liitosmuodon niin vaatiessa. Kiekkohitsauksessa käytetään pulssitettua hitsausvirtaa lämmöntuonnin kontrolloimiseksi. Ainoastaan ohuimmat levyt hitsataan ilman pulssitusta. Virtapulssit on jaksotettu siten, että jokaista virtapulssia seuraa tauko aika. Hitsausvirrat ovat

kiekkohitsauksessa korkeampia ja niiden vaikutusajat lyhyempiä verrattuna pistehitsaukseen. (Nuutinen et al., 1999, s. 70–71.)



Kuva 14. Kiekkohitsaus (mukaiillen: Rautaruukki Oyj, 2009, s. 4).

Puristuksen ja hitsausvirran keskittäminen hitsausliitokseen toteutetaan käsnähitsauksessa työkappaleeseen ennalta valmistettujen käsnien avulla. Käsnät on valmistettu työkappaleeseen usein jo muun muovaavan työstön yhteydessä, koska niiden valmistaminen erikseen ei erikoissovelluksia lukuun ottamatta ole yleensä kannattavaa. Käsnien muoto riippuu sovelluskohteesta ja käsnä voi muodoltaan olla esimerkiksi pyöreä, rengasmainen tai pitkittäinen. Käsnän ja työkappaleen muodoista riippuen hitsauksessa käytettävät elektrodit joudutaan usein valmistamaan erikseen. Käsnähitsaus on muita vastushitsausmenetelmiä energiatehokkaampi johtuen hitsausvirran keskittymisestä käsnän kärkeen ennen hitsisulan muodostumista ja siitä seuraavasta hitsausvirran parametrialueen kasvusta. Liitettävien kappaleiden paksuuksien suuri ero ei muodostu käsnähitsauksella ongelmaksi, koska menetelmällä on mahdollista hitsata yhteen kappaleita, joiden paksuuksien suhde on jopa 6:1 tai suurempi. (Nuutinen et al., 1999, s. 69–70.) Käsnähitsauksen periaate on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Käsnehitsaus (mukaillen: Rautaruukki Oyj, 2009, s. 4).

3.9 Hybridiliitokset

Hybridiliittäminen jaetaan kahteen alaryhmään: liimaushitsaukseen sekä yhdistettyyn liimaus- ja puristusliittämiseen. Hybridiliitoksen käytöllä pyritään usein parantamaan liitoksen kantavuutta, mahdollistamaan liimanliitoksen kovettuminen kiinnitettynä (mekaaninen liitos tai hitsi toimii kiinnikkeenä) tai tiivistämään mekaaninen liitos tai hitsi liimaliitoksen avulla. Hybridiliittämisellä saavutettava liitos on neste- ja kaasutiivis. Hybridiliitoksen väsymis- ja repimislujuus ovat usein paremmat kuin pelkästään mekaanisella liitoksella, hitsillä tai liimalla toteutetun liitoksen vastaavat arvot. Liimaliitosta voidaan myös käyttää värähtelyjä vaimentavana elementtinä. Hybridiliitoksen käytöllä mahdollistetaan myös pinnoitettujen levyjen liittäminen. Hybridiliitoksissa käytettävä liima toimii galvaanista korroosiota estävänä eristeenä, mistä johtuen eri materiaalia olevien levyjen liittäminen on mahdollista. (Nuutinen et al., 1999, s. 97–98.)

Liimahitsauksessa liittäminen tapahtuu liimauksen ja vastushitsauksen avulla. Liiman levitys tapahtuu usein ennen hitsausta. Liiman levityksessä voidaan jättää liimakerrokseen aukot hitsien kohdalle, tai hitsaus voidaan toteuttaa ennen liiman kuivumista, jolloin hitsauselektrodien puristusvoima siirtää liiman pois hitsi tieltä. Hitsaus voidaan myös toteuttaa ennen liimausta, jolloin liima levitetään liitoksen reunoille, joista se kulkeutuu liitospintojen väliin lämmön ja kapillaari-ilmiön avulla. Liimaliitoksen käyttö hitsauksen yhteydessä tasoittaa jännityksen jakautumista koko liitospinta-alalle, mistä johtuen liitoksen väsymislujuus ja jäykkyys paranevat. Pelkkään liimaliitokseen verrattuna liimahitsausliitoksen hitsit parantavat liitoksen iskunkestävyyttä ja repimislujutta. Liimahitsausliitoksissa käytettäviksi liimoiksi soveltuvat parhaiten epoksi- ja polyuretaaniliimat. (Nuutinen et al., 1999, s. 97–98.)

Liimaliitoksen ja puristusliittämisen yhdistäminen mahdollistaa pinnoitettujen levyjen liittämisen. Pinnoitettuja levyjä ei usein voida hitsata, johtuen pinnoitteiden huonosta lämmönsietokyvystä. Kuten liimahitsauksessakin, toimii liimaliitos väsymislujuutta ja jäykkyyttä parantavana elementtinä, kun puristusliitos parantaa repäisykuormien kestäkykyä. Liitospinnoille levitetyn liiman voidaan antaa kovettua ennen puristusliittämistä, tai puristusliittäminen voidaan toteuttaa ennen liiman kovettumista. Liima voidaan myös levittää liitokseen kapillaari-ilmiön avulla puristusliittämisen jälkeen. Liimapuristusta käyttäessä liimalle ei ole asetettu yhtä tarkkoja vaatimuksia kuin liimahitsauksen yhteydessä on asetettu. Puristusliimauksessa voidaan käyttää pastamaista, juoksevaa tai kiinteää liimaa. Mekaanisella liitoksella voidaan parantaa pelkän liimaliitoksen pitkäaikaiskestävyyttä. (Nuutinen et al., 1999, s. 98.) Hybridiliitos voidaan myös toteuttaa liimaliitoksen ja niittauksen tai liimaliitoksen ja ruuviliitoksen kombinaatioina, mutta ruuviliitos menettää modulaarisuutensa liiman kanssa käytettynä.

4 KALOTTIKENNORAKENTEIDEN VÄLISET LIITOKSET

Liitoselementtien suunnittelu aloitetaan analysoimalla kalottikennorakenteille ja niiden välisille liitoselementeille asetettavia vaatimuksia. Rakenteelle asetettavat vaatimukset määräytyvät sen käyttökohteen, käyttöolosuhteiden ja asiakkaan toiveiden mukaisesti. Asetettujen vaatimusten perusteella rakenteelle tehdään vaatimuslista, johon merkitään rakenteelta vaaditut ominaisuudet tarkennuksineen, sekä yksittäisten ominaisuuksien tärkeysasteet suhteessa muihin esitettyihin ominaisuuksiin. Eri ominaisuuksien arvotuksella pyritään karsimaan sellaisia ominaisuuksia, jotka eivät ole rakenteen toiminnan kannalta olennaisia. Arvottaminen toimii helpottavana tekijänä tilanteissa, joissa toinen ominaisuus asettaa rakenteelle vaatimuksia, jotka poissulkevat muita ominaisuuksia tai käytettäviä ratkaisuja (Esimerkiksi tilanne, jossa rakenteelta vaaditaan mahdollisuutta purkamiseen ja uudelleen kokoamiseen → Sulkee pois kiinteiden liitosten käytön purettavien osien välisissä liitoksissa). (Ulrich & Eppinger, 1995, s. 54–55.)

Liitoselementtejä suunnitellessa huomioitavia asioita:

- Kalottikennorakenteeseen kohdistuvat kuormitukset (suunta ja suuruus)
- Kalottikennoelementtien ja liitoselementtien materiaali
- Läpivientien tarve (esimerkiksi johdot, kaapeloinnit ja putket)
- Liitoksen avattavuus (halutaanko liitoksesta kiinteä vai purettava)
- Äänieristyksen tarve (onko liitettävässä kalottikennorakenteessa käytetty jotain välimateriaalia)
- Mahdolliset liitokset muihin rakenteisiin (yksittäiset levyt, tangot, muotopalkit, jne.) tai erikoiset liitosmuodot (esimerkiksi kiinnitys kehään)
- Pitkäaikaiskestävyys vaikeissa olosuhteissa (kosteus, lämpötilan vaihtelut, orgaaninen toiminta)
- Rakenteen ja sen osien fyysinen koko ja massa
- Materiaalin pinnoitteet
- Käytettävissä olevat liittämismenetelmät

4.1 Kalottikennorakenteiden välisten liitosten muotoilunäkökohtia

Kalottikennorakenteiden välisiä liitoksia suunniteltaessa on pyrittävä välttämään kuormien kohdistumista kalvorakenteille. Kalottikennorakenteiden väliset liitoselementit toimivat tukirakenteina, ja ne on suunniteltava siten, että ne toimivat johteina kalottikennorakenteisiin kohdistuville voimille. Kalottikennorakenteisiin ja niiden välsiin liitoselementteihin mahdollisesti tulevat pitkät ja/tai hoikat rakenneosat on suunniteltava vastaanottamaan vetomaista rasitusta puristavan rasituksen sijaan. Kalottikennorakenteiden välisissä liitoksissa käytettävien liitoselementtien stabiiliutta ja jäykkyyttä voidaan parantaa käyttämällä erilaisia jäykisteitä tai suunnittelemalla liitoselementissä käytettäväksi perusrakenteen muodoksi suljettu profiili. (Matilainen & Parviainen & Havas & Hiitela & Hultin, 2011, s. 131–133.)

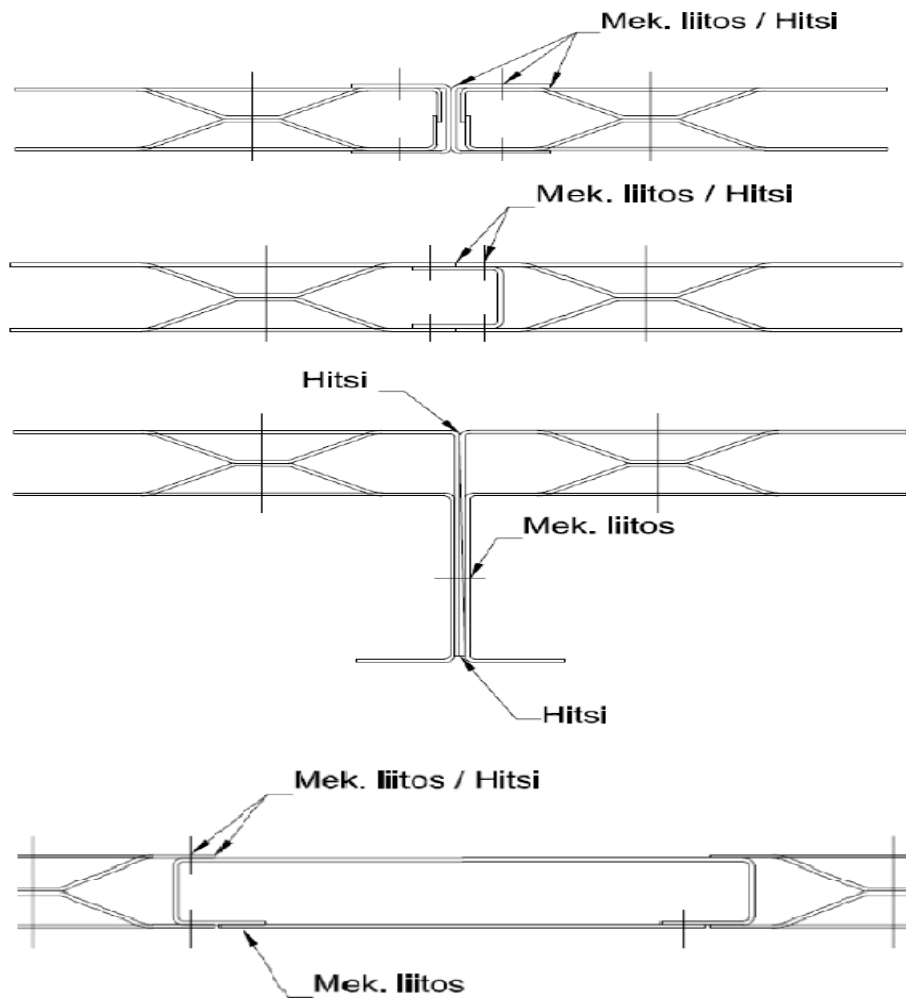
Kalottikennorakenteiden välisten liitoselementtien suunnittelussa tulisi pyrkiä vakioimaan erilaisten liitoselementtien koot ja muodot, mikä vähentää suunnitteluun kuluva aikaa (Ulrich & Eppinger, 1995, s. 135). Yhtenäisten vakiokokokoisten liitoselementtien ja niiden osien käyttö myös helpottaa valmistuksen toteuttamista, kun jokaista uutta liitoselementtiä ei tarvitse erikseen sulauttaa tuotantoon (valmistukseen käytettävien koneiden ohjelmointi ja testikappaleiden valmistus). Irrotettavien liitoselementtien käytöllä parannetaan rakenteen modulaarisuutta. Erillisiä liitoselementtejä käytettäessä rakenteen modulaarisuus voidaan säilyttää käyttämällä kalottikennoelementtien ja liitoselementtien välisissä liitoksissa avattavissa olevia liitoksia, kuten esimerkiksi ruuveja.

Eri liitoselementtien korroosionesto voidaan toteuttaa liitoselementin muotoilulla ja erillisellä korroosionestosuojauksella. Korroosionestopinnoite on yleensä maali, tai kappale voidaan korroosiosuojata pinnoittamalla se sinkillä. Maalattava tai sinkillä pinnoitettava pinta tulee puhdistaa ja esikäsitellä ennen maalauksen toteuttamista (Kinnunen & Saarinen & Tiira & Ulvinen & Väänänen, 1992, s. 166 ja 170). Liitoselementin muotoilulla pyritään vaikuttamaan pääasiassa suojapinnoituksen toteutettavuuteen, mutta myös erilaisten korroosiota edistävien muotojen karsimiseen. (Björk, 1987, s. 238–239.) Korroosiota edistävä epäedullinen muoto voi yksinkertaisimmillaan olla esimerkiksi liitoselementin ontelo, johon käyttöolosuhteissa voi alkaa kerääntymään sadevettä.

Liitoselementtien suunnittelussa tulee itse rakenteelle asetettujen vaatimusten lisäksi huomioida valmistettavuus. Liitoselementit tulee suunnitella siten, että niihin sisältyvät komponentit on mahdollista valmistaa ja, että ne on mahdollista liittää käytettävissä olevalla liittämiskalustolla. Myös tästä syystä vakioitujen osien käyttö on suositeltavaa liitoselementtien toteutuksessa. (Ulrich & Eppinger, 1995, s. 137.) Mahdollisia liittämiseen liittyviä ongelmia ovat mm. reikien sijainneista johtuvat kulmavirheet, liittämismenetelmien soveltumattomuuksista johtuvat liitosten pitämättömyydet sekä liitoksen epäonnistuminen liittämisen käytettävän koneen/työkalun dimensioiden seurauksena. Myös väärä työjärjestys voi aiheuttaa rakenteen epäonnistumisen.

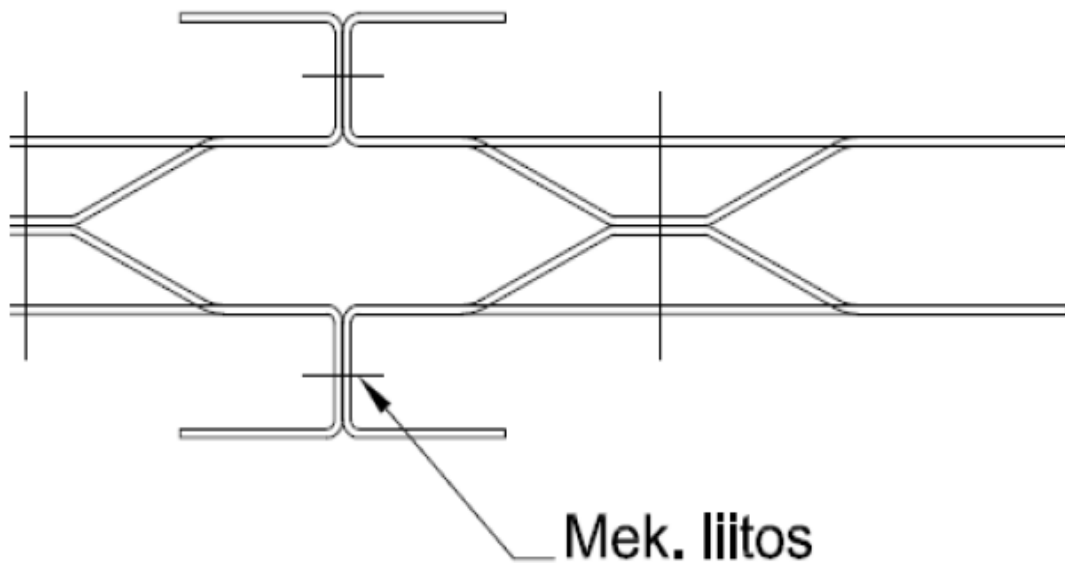
4.2 Kalottikennorakenteiden jatkaminen

Kalottikennorakenteiden jatkoliitokset voidaan toteuttaa kalottikennoelementtien omia reunamuotoja, erillisiä särmättyjä levyosia tai valmiita profiileja hyväksi käyttäen. Jatkaminen kalottikennoelementtien omia reunamuotoja tai erillisiä särmättyjä levyosia hyödyntäen mahdollistaa erilaisten läpivientien, kiinnikkeiden ja kiinnitysreikien helpon toteutuksen. Jatkoliitoselementit voidaan myös tällöin suunnitella täsmällisemmin vastaamaan niille asetettuihin vaatimuksiin modulaarisuuden ja toimintojen osalta. Jatkaminen on helppoa toteuttaa, mikäli kalottikennoelementti on varustettu esimerkiksi ulkoisella tai sisäisellä U-profiililla, tai jos kalottikennoelementin reuna on laipallinen. Kuvassa 17 esitetyt jatkoliitokset on toteutettu kalottikennoelementtien omia reunamuotoja tai erillisiä särmättyjä levyosia hyödyntäen.



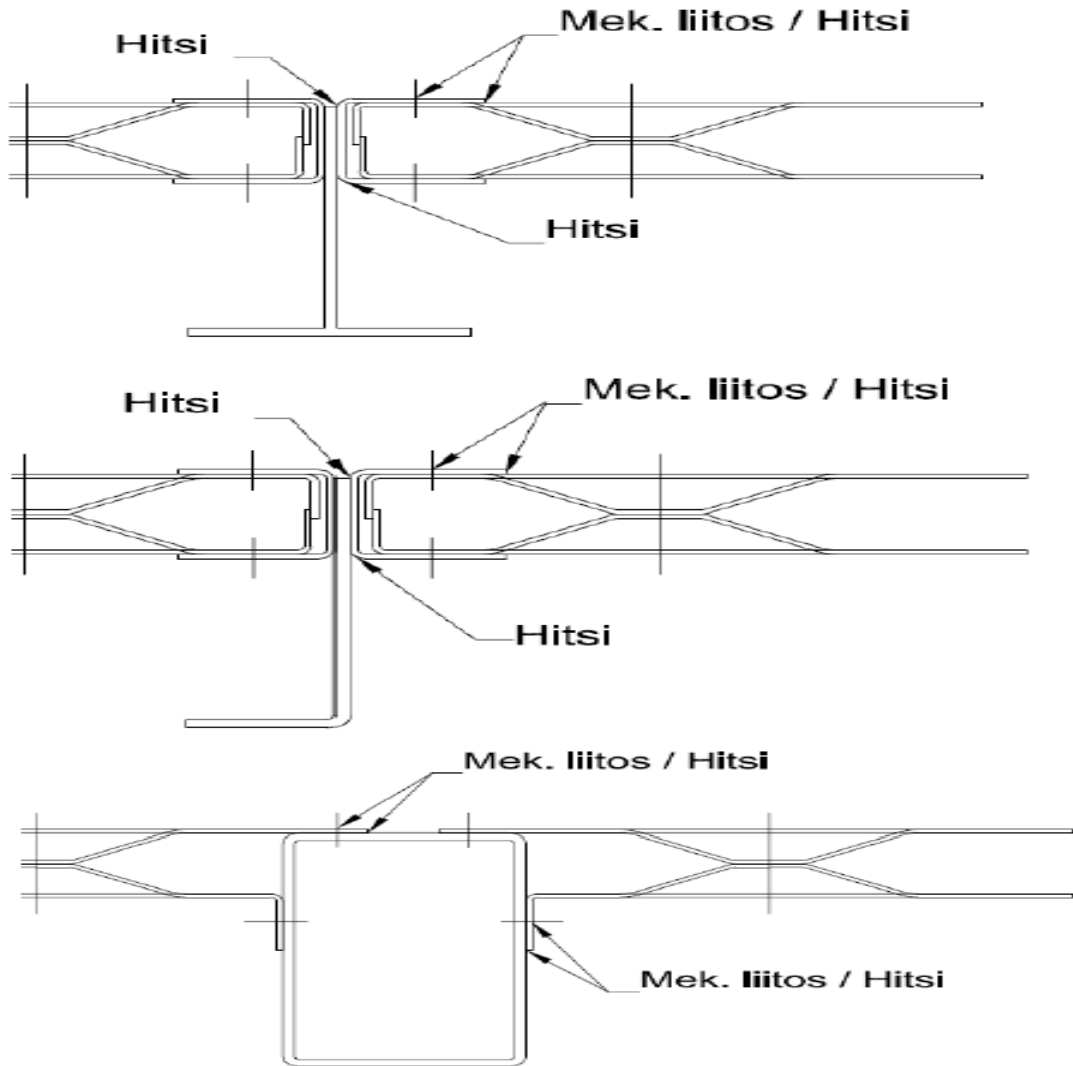
Kuva 17. Integroidulla elementillä jatkettu kalottikennorakenne, irtoelementillä jatkettu kalottikennorakenne, kiinteällä liitoksella jatkettu kalottikennorakenne sekä kaapeloinnin mahdollistava välielementti (mukaillen: Pyykkö, 2006, s. 41).

Edellä mainittu laippareunaisilla kennoelementeillä toteutettu jatkoliitos on myös toteutettavissa täysin modulaarisesti. Kuvan 18 mukaisesti kennoelementtien laipat voidaan valmistaa siten, että liitettyssä rakenteessa laipat löytyvät kalottikennoelementin molemmilta puolista. Kyseiset kennoelementit voidaan liittää toisiinsa mekaanisilla liitoksilla, minkä johdosta liitos on purettavissa helposti. Rakenne mahdollistaa myös läpivientien toteutuksen ilman aukotuksien erillistä valmistamista.



Kuva 18. Laippaliitoksella jatkettu avoreunainen kalottikennorakenne (Pyykkö, 2006, s. 43).

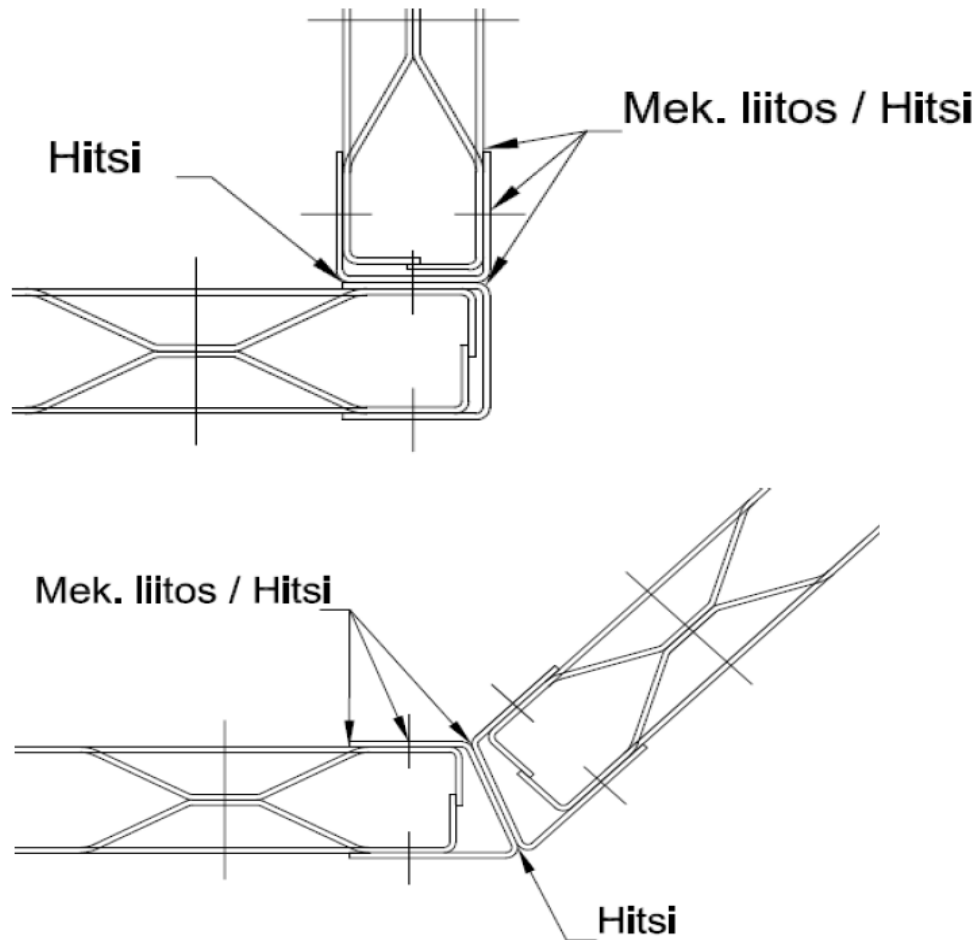
Kalottikennorakenteiden jatkaminen vakioprofiileilla tulee kyseeseen, kun liitettävissä kalottikennorakenteissa on käytetty suuria jännevälejä (Pyykkö, 2006, s. 42). Vakioprofiileja käytettäessä liitoselementin ja kalottikennoelementin välinen yhteys voidaan toteuttaa U-profiileilla, jotka ovat valmistettavissa levytyökeskuksella. U- ja vakioprofiilien välinen liitos toteutetaan hitsaamalla, mutta kalottikennoelementtien ja U-profiilien väliset liitokset voidaan myös toteuttaa mekaanisesti esimerkiksi ruuveilla, jolloin liitoksesta on mahdollista tehdä purettava. Kalottikennoelementtien omien reunamuotojen hyödyntäminen on mahdollista kuvan 19 putkipalkkiliitoksen mukaisesti. Avoreunaisen kalottikennoelementin käyttö kuitenkin rajoittaa käytettävän vakioprofiilin muotoa, koska avoin reunamuoto tarvitsee riittävän suuret kiinnityspinnat, jotta liitos olisi toteutettavissa. Läpivientien toteutus on hankalaa vakioprofiileilla jatkettuja kalottikennoelementtejä käytettäessä.



Kuva 19. T-profiililla jatkettu kalottikennorakenne, L-profiililla jatkettu kalottikennorakenne ja putkipalkilla jatkettu avoreunainen kalottikennorakenne (mukaillen: Pyykkö, 2006, s. 42–43).

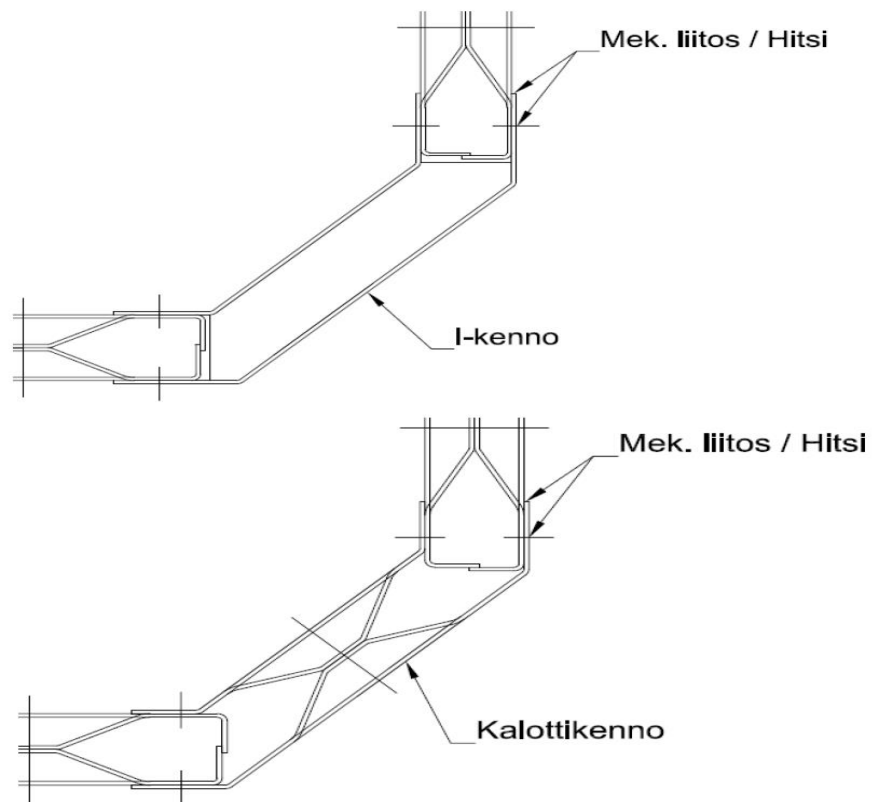
4.3 Kalottikennorakenteiden jatkaminen kulmaliitoksella

Kalottikennorakenteita voidaan liittää toisiinsa kulmaliitoselementein. Kulmaliitoselementti voi olla toteutettu yksinkertaisimmillaan kahdella yhteen liitettyllä U-profiililla. U-profiilien päätypintojen kulmat määrittävät toteutettavan kulmaliitoksen loppukulman (kuva 20). U-profiileilla toteutettavia kulmaliitoksia suunniteltaessa on tärkeää huomioida toteutettavan liitoksen kuormitussuunnat, jotta kulmaliitosta ei kuormitettaisi liian suurella voimalla liitokselle epäedullisesta suunnasta.



Kuva 20. U-profiilein kulmaan liitetyt kalottikennorakenteet ja U-profiilein 45° kulmaan liitetyt kalottikennorakenteet (mukaillen: Pyykkö, 2006, s. 44).

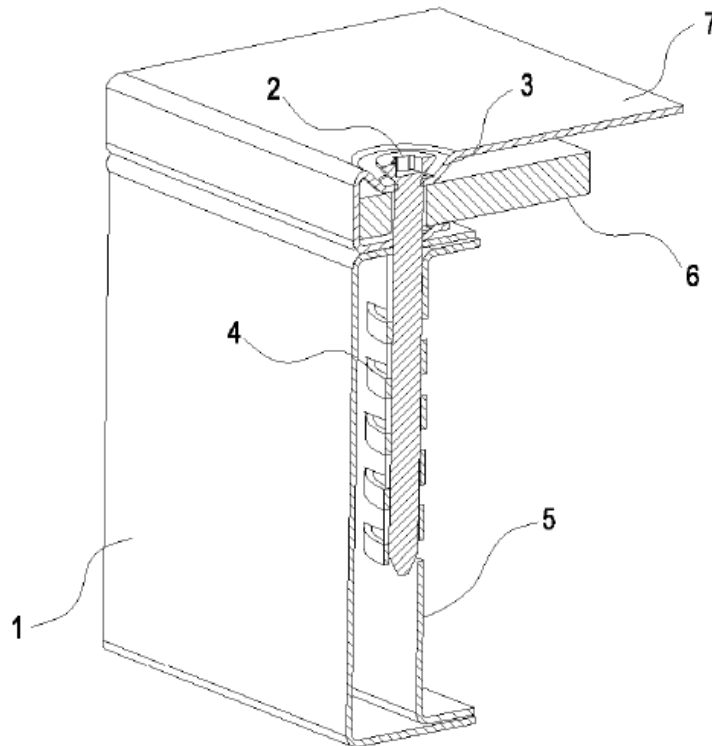
Kulmaliitoksen toteuttamiseen voidaan käyttää erillistä kennoelementtiä, jolloin kulmaliitoselementin jäykkyydestä on mahdollista saada vähintään yhtä suuri liitettävien kennoelementtien kanssa (Pyykkö, 2006, s. 45). Kalottikennorakenteiden kulmaliitoksissa käytettävät kennoelementit on järkevintä valmistaa kalottikentöjen avulla, jolloin kulmaliitoselementtien valmistus voidaan toteuttaa samalla tavalla itse kalottikennorakenteiden kanssa. Kulmaliitoksen toteutus kennoelementillä mahdollistaa läpivientien ja aukotusten toteutuksen. Liitos voidaan käytännössä toteuttaa hitsaamalla tai mekaanisella liitoksella. Mekaanisen liitoksen käytöllä voidaan mahdollistaa liitoksen purkamisen. Kuvassa 21 on havainnollistettu kalottikennoelementtien kulmaliitoksien toteutusta eri kennoelementtien avulla.



Kuva 21. Särmätyin profiilein I-kennolla toteutetulla liitoselementillä kulmaan liitetyt kalottikennorakenteet ja särmätyin profiilein kalottikennolla toteutetulla liitoselementillä kulmaan liitetyt kalottikennorakenteet (mukaillen: Pyykkö, 2006, s. 45).

5 ESIMERKKITAPAUKSEK: KALOTTIKENKORAKENTEIDEN KULMALIIKOS RUUVEILLA

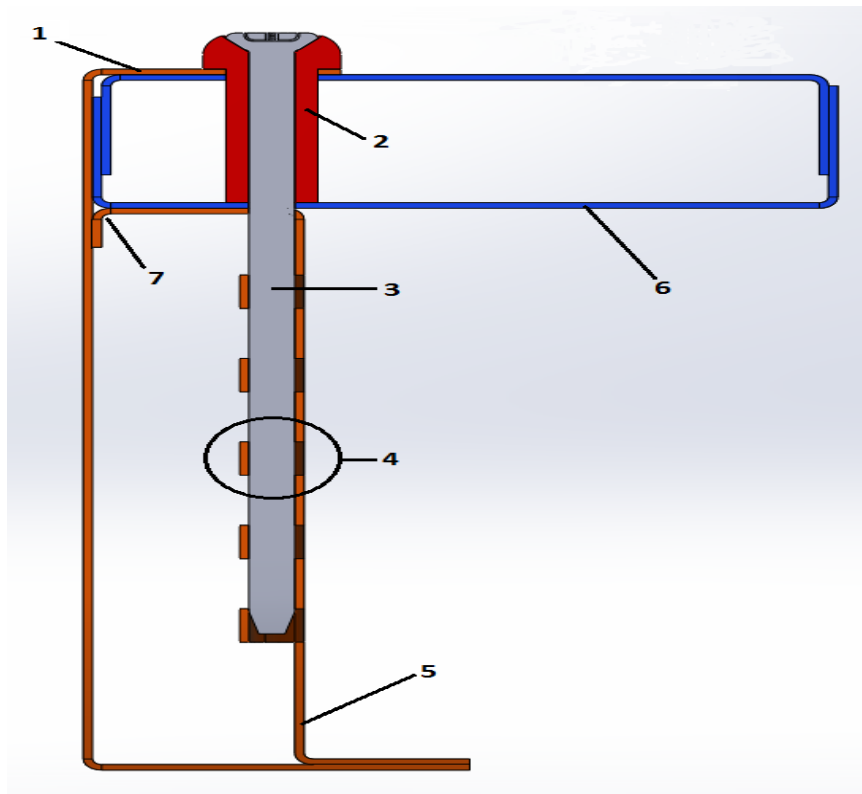
Compusteel on kehittänyt ja patentoinut kuvan 22 mukaisen kalottikennorakenteiden kulmaliitosratkaisun. Liitosratkaisun ideana on käyttää kennorakenteita liittävänä elementtinä ruuvia, joka tarttuu kierteeltään toisen kennorakenteen levymateriaaliin valmistettuihin kaarisillan muotoisiin ulosstanssiksiin. Kiinnityskaarien tehtävänä on jakaa liitokseen kohdistuvat voimat laajalle alueelle, mikä ehkäisee kennorakenteiden rakenteessa käytettyjen ohutlevyjen taipumista rasituksen vaikutuksesta. Liitoksessa joudutaan käyttämään erillistä holkkia tai välikappaletta, joka estää ruuvien kannan puoleisen kennorakenteen puristumisen kasaan ruuvia kiristettäessä. Kyseisen liitoksen koekuormituksissa on osoitettu, että neljällä ruuvilla toteutettu liitos voi kestää jopa yli 1200 kg kuormia. (Pat. FI 121760 B, 2009, s. 1.) Liitoksen ongelmaksi muodostuu kuitenkin huono kestävyys poikkivoimia kohtaan.



Kuva 22. Ruuvilla toteutettu kalottikennorakenteiden kulmaliitos (Pat. FI 121760 B, 2009, s. 7).

5.1 Ideoitu kulmaliitosratkaisu

Edellä mainitun liitostyyppin poikkivoimien sietokyvyn parantamiseksi ideoitin yhteistyössä Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkija Mika Lohtanderin kanssa kuvan 23 mukainen ratkaisu. Koska ideana oli välttää ylimääräisten liitoselementtien käyttöä, liitosratkaisussa poikkivoimien sietokykyä on pyritty parantamaan kiinnityskaarien puoleisen kennorakenteen reunamuotoa muuttamalla. Kulmaliitosratkaisussa ruuviliitos on poikkituettu ruuvin kannan alle jäävän kiinnityskaarellisen kennorakenteen osan avulla. Liitosratkaisun mahdollisia ongelmakohtia valmistuksen kannalta voivat olla kiinnityskaarien puoleiseen kennorakenteeseen valmistettava reikä, joka sijaitsee särmäyksen välittömässä yhteydessä, sekä särmä, joka mahdollistaa kiinnityskaarien puoleisen kennorakenteen kennolevyjen liittämisen toisiinsa. Kennorakenteiden kennolevyt on liitetty toisiinsa mekaanisilla liitoksilla tai hitsaamalla.



Kuva 23. Ideoidun ruuviliitoksen periaate. 1. Ruvvin kannan alle jäävä kiinnityskaarellisen kennorakenteen osa, 2. ruvvin kannan puoleisen kennorakenteen puristumisen estävä holkki, 3. liitoksessa käytetty ruuvi, 4. kiinnityskaari, 5. kiinnityskaarellinen kennorakenne, 6. ruvvin kannan puoleinen kennorakenne ja 7. kiinnityskaarien puoleisen kennorakenteen kennolevyjen liittämisen mahdollistava särmä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatintyössä perehdyttiin kalottikennorakenteisiin ja niissä käytettyihin reunamuotoihin. Tyypillisimpiä kalottikennorakenteiden reunamuotoja ovat avoimet, suljetut sekä laipalliset reunamuodot, joissa reunamuoto aikaansaadaan kalottilevyjen reunojen särmäyksellä. Reunamuoto voidaan toteuttaa myös erillisellä elementillä, kuten esimerkiksi sisä- tai ulkopuolisella U-profiililla tai neliöputkella. Lisäksi perehdyttiin yleisimpiin ohutlevyjen liittämismenetelmiin, jotka valikoitiin Compusteel Oy:n halussa olevan liittämiskaluston perusteella. Käsitellyjä liittämismenetelmiä olivat ruuvi- ja niittiliitokset, puristusliitokset, liimaliitokset, MIG/MAG- ja TIG-hitsaus, laserhitsaus, vastushitsaus sekä hybridiliittäminen. Eri menetelmiä arvioitiin niiden käytettävyyden kannalta

Työssä käsiteltiin kalottikennorakenteiden välisten liitoselementtien suunnittelua suunnitteluprosessin periaatteiden, käyttöolosuhteiden huomioon ja liitoselementtien muotoilun näkökulmista. Liitoselementtien suunnittelussa tulee pyrkiä käytettyjen rakenneosien vakiointiin. Käyttöolosuhteiden arvioinnilla on merkittävä asema käytettävien rakenneratkaisujen valinnan kannalta. Liitoselementtien rakenteella, ja niiden kiinnittämiseen käytetyillä liittämismenetelmillä on suuri vaikutus itse rakenteen toimintoihin. Liitoselementit ovat varioitavissa eri sovelluksiin asetettujen vaatimusten ja asiakkaan toiveiden mukaisesti.

Työssä esitettiin tyypillisimpiä kalottikennorakenteiden välisissä liitoksissa käytettyjä jatko- ja kulmaliitoselementtejä. Tyypillisimpiä jatkoliitoselementtejä ovat integroidulla elementillä, irtoelementillä tai kiinteällä liitoksella jatkettut kalottikennorakenteet. Jatkoliitoselementtinä voi myös toimia kaapeloinnin mahdollistava välielementti, avoreunainen laipallinen reunamuoto, T-profiili, L-profiili tai putkipalkki. Kulmaliitokset voidaan toteuttaa U-profiilein, kennorakenteisella kulmaliitoselementillä. Kulmaliitokset voidaan myös toteuttaa ruuviliitoksella ilman erillisiä ulkoisia liitoselementtejä, kuten eräässä Compusteel Oy:n patentoimassa kulmaliitosratkaisussa on tehty. Liitosratkaisun poikkivoimien sietokyvyn parantamiseksi päädyttiin sen rakennetta muuttamaan siten, että liitoksen poikkituenta toteutuu ilman erillisten ulkoisten liitoselementtien käyttöä.

LÄHDELUETTELO

Björk, T. 1987. Liitosten mitoitus. Teoksessa: Rautaruukki Oy. Kylmämuovautut profiilit. Mänttä. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 1987. S. 193-248.

Brunou, J. 2006. Kennolevyjen eri käyttömahdollisuudet. PowerPoint-esitys 3.4.2013. 22 s. Saatavissa: Compusteel Oy.

CS Cell. 2013. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon): Compusteel Oy, 2013. [viitattu 2.7.2013]. Saatavissa: <http://www.compusteel.fi/esitteet/>

ESAB. 2013a. MIG/MAG-hitsaus [verkkodokumentti]. Päivitetty 7.8.2013 [viitattu 7.8.2013]. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-mig-gmaw.cfm>

ESAB. 2013b. TIG-hitsaus [verkkodokumentti]. Päivitetty 7.8.2013 [viitattu 7.8.2013]. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-gtaw-tig.cfm>

Ferrometal Oy. 2012. Fix Master niittaustekniikka [verkkodokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). [viitattu 27.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ferrometal.ee/tuotteet/ferrometal-rivets.pdf>

Ihalainen, E. Aaltonen, K. Aromäki, M. Sihvonen, P. 1985. Valmistustekniikka. 10., muuttumaton painos. Helsinki. Otatieto. 490 s.

Juutilainen, T. 2012. Kennotekniikan sovellukset – kalottikeno. Ohutlevy. 2:2. S: 28–30.

Kinnunen, J. Saarinen, E. Tiira, S. Ulvinen, S. Väänänen, E. 1992. Teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki. Rakennustieto Oy. 184 s.

Kujala, P. Romanoff, J. Salminen, A. Varis, J. Vilpas, M. 2003. Teräksiset kerroslevyrakenteet. Helsinki. Metalliteollisuuden kustannus. 84 s. (MET, Tekninen tiedotus 1/2003.)

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus. 4., tarkistettu painos. Helsinki. Opetushallitus. 292 s.

Matilainen, J. Parviainen, M. Havas, T. Hiitelä, E. Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Tampere. Teknologiainfo Teknova Oy. 387 s.

Mäki-Mantila, J. 2001. Ohutlevyjen taivutus ja muovaus. Helsinki. Metalliteollisuuden kustannus. 64 s. (MET, Tekninen tiedotus 1/2001.)

Nuutinen, J. et al. 1999. Ohutlevyjen liittäminen. Jyväskylä. Metalliteollisuuden kustannus. 107 s. (MET, Tekninen tiedotus 7/1999.)

Pat. FI 121760 B. 2011. Ruuviliitos rakenneosan kiinnittämiseksi kennolevyyn. Compusteel Oy, Savonlinna, Suomi. (Juutilainen, T.) Hak. FI 20095969, 21.9.2009. Julk. 22.3.2011. 7 s.

Pyykkö, A. 2006. Opinnäytetyö: Kalottikennorakenteiden ominaisuudet, sovelluskohteet ja suunnittelu. 96 s.

Rautaruukki Oyj. 2009. Vastushitsausopas [verkkodokumentti]. Helsinki. [viitattu 5.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kylmavalssatut%20metalli%20ja%20maalipinnoitetut%20-%20ohjeet/Ruukki-Kylm%C3%A4valssatut-ja-metallipinnoitetut-ter%C3%A4kset-Vastushitsausopas.pdf>

Salminen, A. 2002. Diodilaserhitsaus uusi liittämismenetelmä ohutlevyille. Ohutlevy. 2:1 S: 13–22.

Ulrich, K. Eppinger, S. 1995. Product Design and Development. New York. Irwin McGraw-Hill. 289 s.

Vahvuudet. 2012. [Compusteel Oy:n www-sivuilla]. Päivitetty 3.9.2013. [viitattu 3.9.2013]. Saatavissa: <http://www.compusteel.fi/vahvuudet/>

Varis, J. 2013. Professori. LUT Kone. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. (Luento 8.10.2013). Luentomuistiinpanot kirjoittajan hallussa.

Varis, J. 1997. Ohutlevyjen puristusliittäminen. Helsinki. Metalliteollisuuden kustannus. 55 s. (MET, Tekninen tiedotus 2/1997.)