

Laskentapohja naulaliittimen mitoitukseen puulle

Naulaliittimen leikkaus- ja ulosvetokestävyyden mitoitus
yksi- ja kaksileikkeisille puuliitoksille

Björn Winberg

Opinnäytetyö, insinööri (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Raasepori 2022

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Björn Winberg

Koulutus ja paikkakunta: Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK), Raasepori

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Ohjaaja(t): Towe Andersson

Nimike: Laskentapohja naulaliittimen mitoitukseen puulle

Päivämäärä: 18.05.2022 Sivumäärä: 52

Liitteet: 1

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä on suunniteltu ja toteutettu Excel-mitoituslaskentapohja puun sekä puun ja teräksen yksi- ja kaksileikkeisten liitosten naulaliittimen mitoitukseen. Liitosten mitoitushjeina on käytetty Eurokoodi 5- ja 3-standardeja. Mitoituslaskentapohjan laatimisprosessi aloitettiin kattavalla liitin- ja materiaalitietojen sekä mitoituskavaojen keräämisellä Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Mitoituslaskentapohja on laadittu Excel-ohjelmaan pääosin Visual Basic for Application -ohjelmointimenetelmällä. Opinnäytetyössä on esitelty myös joidenkin Visual Basic for Application -ohjelmoinnilla tuotettavien graafisen käyttöliittymän ominaisuuksien ohjelmointia, esimerkiksi yhdistelmä- ja viestiruutujen.

Mitoituslaskentapohjaa koskevinä tavoitteina pidettiin selkeyttä ja helppokäyttöisyyttä ilman aiempaa syvää perehtyneisyyttä puuhun materiaalina, käyttäjän mahdollisuutta vertailla eri liittimiä keskenään samanaikaisesti sekä käyttäjän mahdollisuutta nähdä laskelmissa käytetyt laskukaavat. Laskentapohjaan on lisätty myös laskelmien kanssa vuorovaikutteisia havainnollistavia kuvia mitoitettavista liitoksista.

Laskentapohjan antamia mitoitustuloksia vertailtiin Skol ry:n P2 Naula- ja ruuviliitoksen kestävyys-laskentapohjan antamiin tuloksiin. Vertailun tulokset on esitetty opinnäytetyössä.

Laskentapohjan jatkokehitystavoitteena on laajentaa mitoitusominaisuuksia naulojen lisäksi muihin metallisiin puikkoliittimiin.

Kieli: suomi

Avainsanat: mitoituskalkulaatio, laskentapohja, puuliitos, naulaliitin, Excel

EXAMENSARBETE

Författare: Björn Winberg

Utbildning och ort: Utbildningen för byggnads- och samhällsteknik, ingenjör (YH), Raseborg

Inriktning: Projektering och byggnadskonstruktion

Handledare: Towe Andersson

Titel: Beräkningsbotten för dimensionering av spikförband för trä

Datum: 18.05.2022 Sidantal: 52

Bilagor: 1

Abstrakt

I detta examensarbete har en Excel-dimensioneringsbotten planerats och implementerats för dimensionering av spikförband för en- och tvåskärga förband av trä och stål. Eurokod 5 och 3 standarder har använts som dimensioneringsanvisningar för förbanden. Processen med att sammanställa dimensioneringsbotten började med den omfattande insamlingen av förband- och materialdata samt dimensioneringsberäkningsformler till kalkylprogrammet Excel. Dimensioneringsbotten har tagits fram för Excel huvudsakligen med hjälp av programmeringsmetoden Visual Basic for Application. Examensarbetet presenterar också programmeringen av några av de grafiska användargränssnittets funktionerna som produceras av Visual Basic för Application -programmering, såsom combo- och meddelanderutor.

Målen för dimensioneringsbotten var tydlighet och användarvänlighet utan tidigare djup kunskande inom trä som material, användarens förmåga att jämföra förbanden med varandra, samt användarens förmåga att se de beräkningsformler som används i beräkningarna. Illustrativa bilder på dimensionerade förband som också samverkar med beräkningarna har också lagts till i beräkningsbotten.

Dimensioneringsresultaten från beräkningsbotten jämfördes med resultaten från Skol rys beräkningsbotten P2 Spik och skruvförband. Resultaten av jämförelsen presenteras i examensarbetet. Målet med vidareutvecklingen av beräkningsbotten är att utöka dimensioneringsegenskaperna till andra metallförband.

Språk: finska

Nyckelord: dimensionering, beräkningsbotten, träförband, spik, Excel

BACHELOR'S THESIS

Author: Björn Winberg

Degree Programme: Construction and Civil Engineering

Specialisation: Structural Engineering

Supervisor(s): Towe Andersson

Title: Dimension Calculation Template for Nail Connectors for Wood

Date: 18.05.2022 Number of pages: 52

Appendices: 1

Abstract

In this thesis, an Excel dimension calculation template was designed and implemented for the dimensioning of nail connectors for single and double-section connections of wood and steel. Eurocode 5 and 3 standards were used as dimensioning instructions for the connections. The process of compiling the dimension calculation template began with the comprehensive collection of connector and material data as well as dimension calculation formulas into the Excel spreadsheet program. The dimension calculation template was implemented for Excel mainly by the Visual Basic for Application programming method. The thesis also introduces the programming of some graphical user interface features produced with Visual Basic for Application programming, such as combo and message boxes.

The goals for the dimension calculation template were clarity and ease of use without previous deep familiarity with wood as a material, the user's ability to compare multiple connectors with each other at the same time, and the user's ability to see the calculation formulas used in the calculations. Illustrative images of dimensioned connections that also interact with the calculations have been added to the calculation template.

The dimension results given by the calculation template were compared with the results given by Skol ry's P2 Nail and Screw Connection Durability calculation template. The results of the comparison are presented in the thesis. The goal of further development of the calculation base is to extend the dimensioning properties to other connectors in addition to nails.

Language: Finnish

Key words: dimensioning, calculation template, wood connection, nail connector, Excel

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Tavoite	3
1.2	Aiheen rajausta	4
1.3	Menetelmät	5
2	Metallisten puikkoliitinten mitoitusta	7
2.1	Puun materiaaliominaisuudet	7
2.2	Aikaluokka ja käyttöluokka	9
2.3	Lujuuden muunnoskerroin	11
2.4	Mitoitusarvo.....	13
2.5	Metalliset puikkoliittimet.....	13
2.5.1	Naulaliitokset	14
2.5.2	Myötömomentti	15
2.5.3	Reunapuristuslujuus	16
2.6	Ulosvetokestävyys	19
2.7	Eryyistäpaukset	21
2.8	Leikkausvoima.....	23
2.9	Liittimien sijoittelu	28
3	Tulokset	31
3.1	Mitoituslaskentapohja	32
3.1.1	Yhdistelmäruutujen ohjelmointi	41
3.1.2	Liitoksen graafinen esitys	43
4	Pohdinta.....	46
4.1	Tulosten validiteetti	47
4.2	Yhteenveto.....	49
5	Lähteet.....	50

Kuvaluettelo

Kuva 1. Puun poikkileikkauksen osat. (Puuinfo, 2020, s.2).	8
Kuva 2. Erilaisia nauvoja: sileitä ja profiloituja, neliskulmaisia ja pyöreitä. (Yli-Koski & Kevarinmäki, 2005, s.41).	15
Kuva 3. Teräslähtimen myötömomentti. (Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy, 2015, s. 68).	15
Kuva 4. Liitokseen vinosti vaikuttava voima. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 54).	22
Kuva 5. Kaksileikkeiseen puikkoliitokseen kohdistuvat leikkausvoimat. (Universität Karlsruhe TH)	23
Kuva 6. Yksileikkeisten puu-puu-liitosten murtumistavat. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 56).	24
Kuva 7. Kaksileikkeisten puun liitosten murtumistavat. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 56).	24
Kuva 8. Etäisyydet t_1 ja t_2 yksileikkeisessä puu-puu-liitoksessa. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 59).	26
Kuva 9. Etäisyydet t_1 ja t_2 kaksileikkeisessä puun liitoksessa. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 59).	28
Kuva 10. Erilaisia puuliitoksia: (a) yksi- tai kaksileikkeinen pilari-palkki-liitos, (b) tukipuuliitos, (c) kolminivelkehän pulttiympyräliitos, (d) A-kattotuolin kattopalkin ja kitapuun välinen liitos, (e) paarteen jatkoliitos. (Kovanen, 2014, s. 17).	29
Kuva 11. Laskentapohjan välilehdet VBE-ympäristössä. (Winberg, 2022).	32
Kuva 12. Lähtötietojen syöttönäkymä. (Winberg, 2022).	34
Kuva 13. Nauvojen lähtötietojen vertailu. (Winberg, 2022).	35
Kuva 14. Viestiruutu ilmoittaa langan vetolujuuden vähimmäisarvosta. (Winberg, 2022).	36
Kuva 15. Viestiruutuun voidaan syöttää langan vetolujuus. (Winberg, 2022).	36
Kuva 16. Viestiruutu ilmoittaa naulan vähimmäispituuden. (Winberg, 2022).	37
Kuva 17. Esimerkki naulaliittimen kattavista mitoitus tuloksista. (Winberg, 2022).	39
Kuva 18. Esimerkki naulaliittimen tiivistetyistä mitoitus tuloksista. (Winberg, 2022).	40
Kuva 19. Yhdistelmäruudut 1 ja 2. (Winberg, 2022).	41
Kuva 20. Liitoksen graafisen esityksen koordinaatit. (Winberg, 2022)	44
Kuva 21. Pistekuviolla luotu graafinen esitys liitoksesta. (Winberg, 2022).	45

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Osavarmuusluku.	9
Taulukko 2. Kuormien aikaluokat.	10
Taulukko 3. Kuormien aikaluokkien esimerkkejä.	10
Taulukko 4. Lujuuden muunnoskerroin.....	12
Taulukko 5. Teräslaadut	17
Taulukko 6. Puun reunapuristuslujuus suhteessa puun tiheyteen ja naulaliittimen halkaisijaan.	18
Taulukko 7. Liittimen reiän esiporaamisen vaikutus reunapuristuslujuuteen.....	19
Taulukko 8. Köysivaikutuksesta tulevan leikkauskestävyyden suurin mahdollinen osuus.	25
Taulukko 9. Naulaliittimen etäisyydet.....	30
Taulukko 10. Naulavälien sekä naulojen etäisyyksien selitteet ja esimerkkitulokset.....	38
Taulukko 11. Naulavälien sekä naulojen etäisyyksien esimerkkitulokset.....	38
Taulukko 12. Taulukko eri puumateriaaleista ja lujuusluokista.	42
Taulukko 13. Kulmien muunnostaulukko graafisiin esityksiin.	44
Taulukko 14. Laskentapohjien antaman leikkauskestävyyden vertailu.	47
Taulukko 15. Leikkausvoiman vertailu kahden laskentapohjan välillä.	48

Liiteluettelo

Liite 1. Laskentapohja. (3)

1 Johdanto

Rakennesuunnittelua tekevän rakennusinsinöörin työhön kuuluu olennaisesti erilaisten rakenteiden mitoittaminen standardien viitoittamien laskentaperusteiden mukaisesti. Mitoittaminen tarkoittaa rakenteiden, rakenneosien ja kiinnitysten sekä liitosten mittojen määrittelyä rakennesuunnittelijan toimesta rakennetta suunniteltaessa.

Kansallisesti täydennetyt Euroopan laajuiset standardit esittävät kantavien rakenteiden kuormituksille laskennalliset vähimmäisarvot mitoituslaskelmien pohjaksi. Ympäristöministeriön antama asetus 477/2014 kantavista rakenteista (Ympäristöministeriö, 2016, s. 8) velvoittaa rakennesuunnittelijan esittämään rakennesuunnitelmassaan kantavien rakenteiden mitoitukset näiden standardien mukaan, pois lukien pienet tai rajatut rakennushankkeet. Kantavien rakenteiden mitoituksessa otetaan vähimmäisarvojen lisäksi huomioon myös tilannekohtaiset olosuhteet esimerkiksi luonnonkuormien osalta. Suomessa eräs merkittävä luonnonkuorma on lumikuorma, jonka mahdollinen poikkeuksellinen jakautuminen on rakennesuunnittelussa huomioitava standardien viitoittaman vähimmäiskuorman lisäksi.

Yhtenäisen rakennekokonaisuuden mitoituksessa tulee kokonaisrakenteen luotettavuuden turvaamiseksi huomioida pelkkien osien ominaisuuksien lisäksi kokonaisen rakennesysteemin lujuus ja vakavuus, jotka tyypillisesti poikkeavat osiensa summasta. Myös yksityiskohtaiset kiinnitykset, liitokset ja liittimet mitoitetaan ja käytettävien rakennustuotteiden vaatimukset määritellään. Rakennesuunnitelmat sisältävät myös mitoitusarkastelut erilaisia poikkeustilanteita, kuten onnettomuus- ja palotilannemitoituksia varten.

Naulaliittimen mitoituslaskelmissa saatavat tärkeimmät tiedot ovat naulan mitoitusleikkauskestävyys, mitoitusulosvetokestävyys ja liitinten sijoitteluun liittyvät etäisyystiedot. Mitoitusleikkauskestävyys ja mitoitusulosvetokestävyys ovat liitosten kestävyyttä kuvaavia arvoja. Mitoitusleikkauskestävyys määritetään valiten liittimen kestävä suurin leikkausvoima laskemalla arvot erilaisten murtumistapojen mukaan ja valitsemalla näistä pienin kestävyysarvo. Laskelmiin vaikuttavat ominaisuudet vaihtelevat eri murtumistavoissa. Mitoitusulosvetokestävyys kuvaa liitosten kestävyyttä suhteessa

liittimeen nähden vastakkaissuuntaiseen eli ulosvetävään voimaan. Liitinten keskinäiset etäisyydet ja etäisyydet liitettävän kappaleen reunoista ja päädyistä ovat myös tarkkaan määriteltäviä koko liitoksen jäykkyyden ja kestävyuden turvaamiseksi. (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 2020, s. 28)

Eurooppalainen standardisointijärjestö CEN laatii Euroopan komission toimeksiantona Eurokoodi-suunnittelustandardeja kantaville rakenteille. Euroopan laajuiset Eurokoodit ovat korvanneet aiemmin käytössä olleet kansalliset standardit. Eurokoodeihin sisältyvät kuitenkin myös täydentävinä liitteinä erikseen kansallisella tasolla määritetyt varmuuskertoimet erilaisille kuormille.

Rakenteen mitoitus voidaan toteuttaa laskennallisesti, kokeellisesti tai tilastollisiin tarkasteluihin perustuen (Ympäristöministeriö, 2016, s. 10). Laskennallinen rakenteiden mitoittaminen voi olla aikaa vievää ja standardoiduissa mitoituksissa on usein huomattavia yhtäläisyyksiä eri tapausten välillä. Mitoituksia tehdäänkin käytännön työssä usein käyttäen apuvälineenä aiemmin laskettuja mitoituksia. Yksi vaihtoehto mitoitustyön avuksi on myös käyttää erilaisia laskentapohjia esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmissa toteutettuna.

Mitoitettavan rakenteen materiaali vaikuttaa materiaalin ominaisuuksien kautta käytettäviin mitoituslaskelmiin. Materiaalien vaihtelevien ominaisuuksien vuoksi myös samanlaisten liitosten mitoitus poikkeaa erilaisia materiaaleja käytettäessä. Omat Eurokoodi-standardit on laadittu materiaaleista betonille, teräkselle, betoniteräsyhdistelmille, puulle, alumiinille sekä erilaisille muuratuille rakenteille. Kaikille materiaaleille on laadittu lisäksi yksilölliset ohjeet myös eri liittimien ja liitosten mitoitukselle. Laaditun mitoituslaskentapohjan liitoksen päämateriaalivaihtoehtoja ovat sahatavara ja liimapuu. Liitoksen toisen materiaalin vaihtoehtoja ovat teräs ja yleisimmät käytössä olevat puumateriaalit: vaneri, kuitulevy, sahatavara, OSB-levy sekä liimapuu. Kertopuu lukeutuu yleisimmin käytettyihin puumateriaaleihin, mutta on rajattu ulos tästä laskentapohjasta työmäärän rajaamiseksi. Mitoituslaskentapohjan liittintyypeiksi on rajattu metalliliittimistä erilaiset naulatyyppit: pyöreä, neliskulmainen ja pitkittäis- tai poikittaisuritettu naula.

Puun erilaisten liitosten mitoitus suomalaisten standardien mukaisesti voidaan käytännössä tehdä kahdella tapaa. Mitoitus voidaan toteuttaa perinpohjaisesti käyttämällä Suomen standardoimisliiton kääntämää Eurokoodi 5 -standardia (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, ss. 53-81) tai nopeuttaa ja helpottaa mitoitustyötä käyttämällä Puuinfon koostamaa lyhennettyä puurakenteiden suunnitteluohjetta (Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 2020, ss. 28-39). *Puurakenteiden lyhennyssä suunnitteluohjeessa* laskukaavoja on yksinkertaistettu mitoitusprosessin nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi. Esimerkiksi rakennusinsinöörin opinnoissa Yrkeshögskolan Noviassa Puurakenteiden mitoitusta käsittelevillä kursseilla käytetään *Puurakenteiden lyhennettyä suunnitteluohjetta*. Tämän opinnäytetyön tuloksena laaditussa mitoituslaskentapohjassa standardina on käytetty Eurokoodia, mikä on tehnyt prosessista huomattavasti pidemmän ja monimutkaisemman, mutta samalla opettavaisemman.

1.1 Tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on ollut luoda Excel-laskentapohja naulaliittimien mitoitukseen erilaisille puun yksi- ja kaksileikkeisille liitoksille. Liitoksen päämateriaalivaihtoehdot ovat sahatavara ja liimapuu. Liitoksen toinen materiaali valitaan seuraavista: sahatavara, liimapuu, kuitulevy, vaneri, OSB-levy tai teräs. Opinnäytetyön laskentapohjalla mitoitettaviksi liittimiksi on valittu naulaliittimet, mutta tulevaisuudessa laskentapohjan voi kohtuullisen pienellä vaivannäöllä laajentaa kattamaan myös muut metalliset puikkoliittimet: ruuvit, pultit ja tappivaarnat. Laskentapohjan antamat naulaliittimien mitoituservot ovat 1) naulaliittimen mitoituseräkestävyys, 2) naulaliittimen ulosvetokestävyys, 3) liitokseen tarvittavien naulaliittimien tehollinen määrä sekä 4) liitinten etäisyydet toisistaan ja niiden reuna- sekä päätyetäisyydet. Tavoitteena on ollut myös perehtyä Visual Basic for Applications –ohjelmointiin (jatkossa lyhyemmin VBA) ja käyttää VBA-ohjelmoinnin työkaluja laskentapohjan laatimisprosessiin soveltuvin osin. VBA-ohjelmointia voidaan hyödyntää Microsoft 365- ohjelmien, kuten Accessin, Excelin, PowerPointin ja Wordin ohjelmointiin. (Taanila, 2013, s. 1.) VBA-ohjelmointi on käyttökelpoinen työkalu Excel-taulukkolaskentaohjelman automatisointiin ja sen ominaisuuksien kehittämiseen. Excelin ohjelmointi VBA-ohjelmilla on tehokas ja nopea tapa ongelmanratkaisuun ja erilaisten tehtävien suorittamiseen Excelissä.

Automatisointi VBA-ohjelmoinnilla on mahdollistanut Excel-laskentapohjan taustatietojen tiivistämisen ja parantanut laskentapohjan käyttäjäystävällisyyttä ja selkeyttä sen ulkonäköä. Ohjelmoinnilla tapahtuva automatisaatio nopeuttaa myös Exceliin sisältyvien laskutoimitusten suorittamista ja tekee kokonaisuudesta hallittavamman laskentapohjan käydessä kattavammaksi ja monimutkaisemmaksi (Taanila, 2013, s. 1). Ohjelmointi on tiedonkäsittelyn ja ongelmanratkaisun menetelmänä noussut alati kasvavaan merkitykseen ja avaa mahdollisuuksia yhä vaativampien tehtävien suorittamiseen ja suurempien tietomäärien hallintaan.

Eräs konkreettista ohjelmoinnin hyödyistä on ollut tarkistuslaskelmien nopeutuminen. Valmiin laskentapohjan antamia mitoitustuloksia on verrattu Suunnittelu- ja konsultointialan toimialajärjestö Skol ry:n tuottaman laskentapohjan (Skol ry, 2016) antamiin mitoitustuloksiin. Tarkistuslaskelmissa on vertailtu laskentapohjien antamia tuloksia naulaliittimen kestävyden mitoitustulosta leikkaustasoa kohti eli leikkausvoimasta $F_{v,Rd}$ vaihtelevilla puuosien halkaisijan lähtöarvoilla. Lähtöarvoina on käytetty naulaliittimen halkaisijan arvoa kahdesta kahdeksaan millimetriin yhden millimetrin tarkkuudella, puuosien mitat on pidetty vakioina. VBA-ohjelmalla tarkistuslaskelmien suorittaminen on ollut nopeampaa ja tehokkaampaa.

1.2 Aiheen rajaus

Tutkimuskysymyksen sopivan laajuuden varmistamiseksi on aihetta täytynyt tarkentaa ja rajata erilaisten puuliitosten mitoitustulosten sisällä. Työstä on rajattu pois työmäärän kohtuullisena pitämiseksi puumateriaalien osalta Kerto-puutuotteet, sillä näiden osalta laskelmat ovat olennaisesti erilaisia, kuin muiden työssä käytettyjen puumateriaalien: sahatavaran, liimapuun, OSB-levyn, vanerin ja kuitulevyn.

Alun perin laskentapohjalla oli tarkoitus kyetä mitoittamaan kokonaisia liitoksia, mutta melko nopeasti aiheeseen perehdyttyä selvisi, että kokonaisten liitosten mitoittamiseen tähtäävän laskentapohjan laatiminen itsenäisesti alusta alkaen on tälle opinnäytetyölle laajuudeltaan epärealistinen tavoite. Kokonaista liitosta mitoitettaessa muuttuvat esimerkiksi liitoksen momenttiominaisuudet monimutkaisemmiksi liitokseen vaikuttavien suureiden moninkertaistuessa liitinten määrän kasvaessa. Liitosten mitoitukseen liittyy

myös esimerkiksi liitinten sijoittelu. Kokonaisten liitosten mitoitus on yksi mahdollinen tulevaisuuden kehityssuunta laskentapohjien jatkokehityksessä ja laajentamisessa.

Yksittäisistä liittimistä laskentapohja on laadittu mitoittamaan naulaliitoksia, koska naulaliitosten mitoitus muodostaa perustan myös muiden metallisten puikkoliitinten mitoitukselle. Osa muista metallisista puikkoliittimistä mitoitetaan naulojen tavoin, joten naulojen mitoitus on luonteva lähtökohta metallisten puikkoliitinten mitoitukselle. Ruuvien, pulttien ja tappivaarujen asteittainen lisääminen laskentapohjaan on jo aloitettu ja tulee täydentämään laskentapohjaa olennaisesti. Laskentapohjalla laskettavien yksi- ja kaksileikkeisten liitosten naulaliitinten mitoitus tietojen perusteella voidaan soveltaen selvittää myös muiden liittostyyppien naulaliittimien mitoitusarvot.

1.3 Menetelmät

Laskentapohjan laatimisen alustaksi on valittu Microsoft Office 365 –ohjelmistopakettiin kuuluva taulukkolaskentaohjelma Excel. Excel-laskentapohja on ohjelmoitu suurilta osin Visual Basic Editor -ohjelmointialustalla käyttäen VBA-ohjelmointikieltä Excelin ohjelmointiin. Excelin valintaa puoltavat erinomainen saatavuus, helppokäyttöisyys ja siihen liittyvä matala lähestymiskynnys ilman erityisiä pohjatietoja. Excelin etuna on myös monikäyttöisyys VBA-ohjelmointiin yhdistettynä. Ohjelmoimalla VBA:lla Exceliä automatisoivia ja laajentavia ohjelmia, saadaan ongelmanratkaisua ja tiedonkäsittelyä olennaisesti nopeutettua. VBA on aloittelevalle ohjelmoijalle sopiva ohjelmointikieli, joka ei vaadi erityistä ennako-osaamista. Suomenkielistä oppimateriaalia VBA:n käyttöön löytyy kattavasti verkosta muun muassa korkeakoulujen verkkosivuilta, esimerkiksi Jyväskylän yliopiston (Ekonoja et al., 2005) ja Haaga-Helian sivustoilta (Taanila, 2013).

VBA:ta hyödyntämällä on aikaansaatu laskentapohjan selkeämpi ja käyttäjäystävällisempi ulkoasu. VBA-ohjelmoinnin ansiosta käyttäjä näkee laskentapohjassa kyseisessä mitoituslaskelmassa käytetyt laskukaavat ja toisaalta kaikista mahdollisista mitoituskaavoista vain ne kaavat, joita kyseisessä mitoitus tilanteessa on käytetty. Niin kutsuttuja ”*black box*” -työkaluja, joissa käyttäjä syöttää laskentatyökaluun lähtöarvot ja saa ulos pelkän vastauksen, on kritisoitu laskettavan ongelman pelkistämisestä. (Doyle, 2007, s. 1) Välivaiheiden piiloon jääminen vaikeuttaa laskettavan ongelman mekaanisen kokonaiskuvan ymmärtämistä. Tämä puolestaan voi aiheuttaa ongelmia vastauksen

oikeellisuuden arvioinnissa. Toisaalta ylimääräiset laskukaavat laskentapohjassa voivat johtaa käyttäjää harhaan ja vähentää laskentapohjan helppokäyttöisyyttä ja selkeyttä. VBA-ohjelmoinnin hyödyt korostuvat siis tilanteissa, joissa yhdelle laskentapohjalle halutaan yhdistää useita erilaisia laskureittejä ja vaihtoehtoisia laskukaavoja. Tällöin VBA:lla ohjelmoitua laskentapohjaa on merkittävästi yksinkertaisempaa käyttää, kuin perinteistä Excel-ohjelmalla luotua laskentapohjaa.

Laskentapohjan ja opinnäytetyön laatimisen perustana on käytetty Suomen standardoimisliiton suomentaman ja julkaiseman Eurokoodi 5:en lukua 8, Metalliliittimin tehdyt liitokset (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, ss. 53-81). Laskentapohjan laatimistyö on aloitettu standardin perinpohjaisella läpikäymisellä ja metalliliitosten mitoituskaavojen erittelyllä ja kirjaamisella eri Excel-välilehdille metalliliitintyypeittäin. Eri metalliliitinten mitoituksessa on myös päällekkäisyyttä, mikä on huomioitu laskentaprotokollassa. Esimerkiksi halkaisijaltaan yli kahdeksan millimetriä pitkän naulan reunapuristuslujuus mitoitetaan osin pulttien mitoitusperiaattein, jolloin liittimen ja puun syysuunnan välinen kulma huomioidaan, toisin kuin naulaliittimillä. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 59)

Laskentapohjan lähtösivulle on muodostettu yhdistelmäruutuja ja soluja erilaisten lähtöarvojen ja materiaalien valintaan ja syöttöön. Yhdistelmäruutujen eli *combo boxien* mahdolliset arvot on kerätty ja syötetty omalle välilehdelleen, jolle on kerätty myös muu mitoitukseen ja materiaaleihin sekä liittämiin liittyvä tieto. Laskentapohjan toimintojen ja kokonaisuuden yhdistäminen toimivaksi on tapahtunut Visual Basic Editor –alustalla.

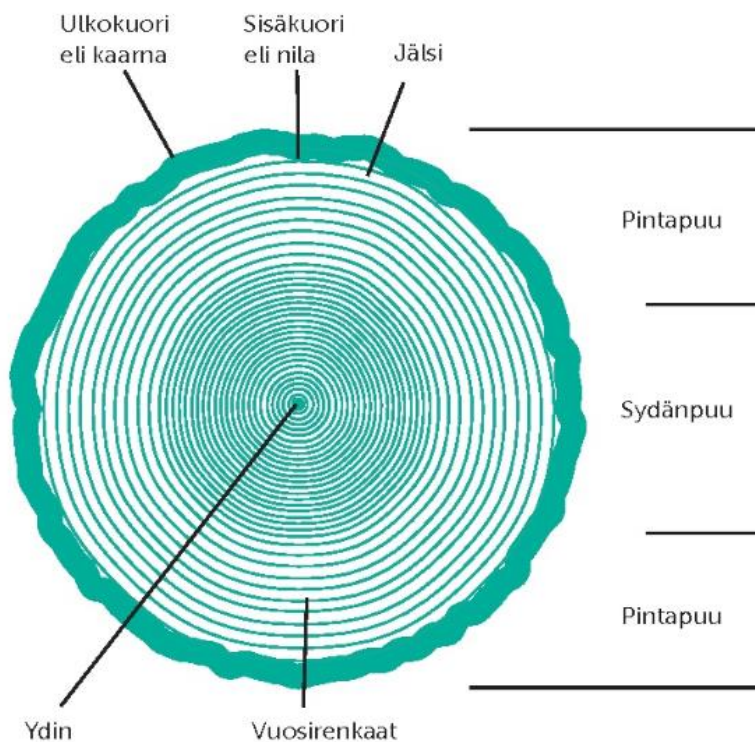
Laskentapohjan toimivuuden arvioinnissa on vertailtu laskentapohjan antamia mitoitus tuloksia Skol ry:n julkaisemaan laskentapohjaan P2 Naula- ja ruuviliitoksen kestävyys (Skol ry, 2016). Tarkistuslaskelmissa on vertailtu laskentapohjien antamia tuloksia naulaliittimeen kohdistuvasta leikkausvoimasta naulojen halkaisijan lähtöarvoilla 2, 3, 4, 5, 6, 7 ja 8 millimetriä, vakioiduilla puuosien mitoilla.

2 Metallisten puikkoliitinten mitoitus

Yksi- ja kaksileikkeisten puuliitosten naulaliittimien mitoituksessa on huomioitava useita liitettävien materiaalien ja liitinmateriaalien ominaisuuksia. Suuri osa mitoituksen teoreettisista lähtökohdista pätee naulaliittimien lisäksi myös muille metallisille puikkoliittimille, mutta tässä työssä tarkempaan tarkasteluun on rajattu naulaliitinten mitoituksen teoria. Eurokoodi 5 –standardin mitoitusohjeet pohjautuvat alun perin K. W. Johansenin puikkoliitosteoriaan, jonka mukaan puikkoliitoksen kestävyys määräytyy puun kestävydestä liittimen aiheuttamaa painetta vastaan ja liittimen kestävydestä taivutuksessa. Tärkeimpiä mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat liitettävien kappaleiden materiaaliominaisuudet, liittimen ominaisuudet sekä liittimen tunkeutumissyvyys ja etäisyys kappaleen reunoista ja muista liittimistä. Kappaleiden ominaisuudet, kuten tiheys, vaikuttavat niiden reunapuristusluujuksiin ja liitoksen aksiaaliseen ja poikittaiseen kestävyteen. (Johansen, 1949, ss. 1-15)

2.1 Puun materiaaliominaisuudet

Lyhyiden kesien takia puut kasvavat Suomessa hitaasti verrattuna maihin, joissa kasvukausi on pidempi. Seurauksena syntyvä puu on tiheämpää, suorakuituisempaa, vähempioksaista, symmetrisesti kasvavaa ja puiden rungot ovat usein suoria ja pyöreitä. (Puuinfo, 2020, s. 1) Edellä listattujen ominaisuuksiensa takia Suomessa kasvaneet puut ovat rakennusmateriaaliksi hyvin soveltuvia. Puiden kapasiteetti sitoa hiilidioksidia, noin tonnin kuutiometri puuta kohden, on vauhdittanut puiden käyttöä kestäväan rakentamiseen Suomessa myös puukerrostaloissa. (Puuinfo, 2018, s. 2). Kuvassa 1 nähdään havainnollisesti, miten kasvukauden lyhyys on vaikuttanut vuosirenkaiden tiivyyteen sekä puun symmetriseen kasvutapaan.



Kuva 1. Puun poikkileikkauksen osat. (Puuinfo, 2020, s.2).

Siltä varalta, etteivät materiaalin jäykkyys tai kestävyys täytä laskennallisia arvojaan, käytetään puurakenteiden ja puuliitosten mitoituksessa osavarmuuslukumenetelmää. Osavarmuusluvun γ_M arvoa 1,3 käytetään Eurokoodi 5 -standardin mukaisesti mitoitettaessa aina, kun mitoitetaan puun liitoksia. Taulukossa 1 nähdään liitosten osavarmuusluvun lisäksi myös eri puumateriaalien osavarmuusluvut.

Taulukko 1. Osavarmuusluku.

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara	1,3
Liimapuu	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy	1,3
Kova kuitulevy	1,3
Puolikova kuitulevy	1,3
MDF-levy	1,3
Huokoinen kuitulevy	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyt	1,25
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 25).

2.2 Aikaluokka ja käyttöluokka

Kaikkien kantavien puurakenteiden, myös puuliitosten, mitoituksessa tulee huomioida rakenteeseen kohdistuvat kuormat rakenteiden lujuutta ja jäykkyyttä laskettaessa. Rakenteeseen kohdistuvat kuormat luokitellaan aikaluokkiin kuorman vaikutusajan mukaisesti huomioiden rakenteen koko käyttöikä. Eurokoodi 5 -standardissa määritellyt kuormien aikaluokat on esitetty taulukossa 2 (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 23). Standardin kansallisessa liitteessä on esitetty esimerkit eri aikaluokkiin kuuluvista kuormista, ks. taulukko 3. Esimerkiksi rakenteen oma paino kuuluu luonnollisesti pysyvään kuorman aikaluokkaan. Suomen luonnonolosuhteissa olennainen kuorma on myös lumi, joka luokitellaan keskipitkään aikaluokkaan: 1 viikko – 6 kuukautta. (Ympäristöministeriö, 2016, s. 10).

Taulukko 2. Kuormien aikaluokat.

Kuorman aikaluokka	Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta – 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko – 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle yksi viikko
Hetkellinen	

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 23).

Taulukko 3. Kuormien aikaluokkien esimerkkejä.

Kuorman aikaluokka	Kuormitukset
Pysyvä	Oma paino Pysyvästi rakenteeseen kiinnitetyt koneet, laitteet ja kevyet väliseinät Maanpaine
Pitkäaikainen	Varastotilojen tavarakuormat (luokka E), vesisäiliökuorma
Keskipitkä	Lumi Lattioiden ja parvekkeiden hyötykuorman pintakuormat luokissa A - D Autotallien ja liikennöintialueiden hyötykuormat (luokat F ja G) Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormitukset
Lyhytaikainen	Portaiden hyötykuormat Hyötykuorman pistekuorma (Q_k) Väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat Kunnossapito- tai henkilökuorma katolla (luokka H) Ajoneuvokuormat luokassa E Kuljetusvälinekuormat Asennuskuormat
Hetkellinen	Tuuli Onnettomuuskuorma

(Ympäristöministeriö, 2016, s.10).

Toinen rakenteen ympärillä olevien olosuhteiden huomiointiin liittyvä mitoitusuure on käyttöluokka. Käyttöluokkia käytetään pääosin lujuusarvojen jaottelussa ja ympäristöolosuhteista johtuvan muodonmuutoksen laskemisessa. Käyttöluokkia on yhteensä kolme ja ne ovat nimetty numeroin 1–3. Käyttöluokka 1 merkitsee 20 °C lämpötilaa vastaavaa kosteutta ja ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden arvon 65 % ylittymistä vain muutamana viikkona vuodessa ja havupuun kosteus pysyy enimmäkseen korkeintaan arvossa 12 %. Käyttöluokka 2 eroaa luokasta 1 siten, että suhteellisen kosteuden raja-arvo on 85 % ja havupuun kosteus pysyy enimmäkseen korkeintaan arvossa 20 %. Käyttöluokka 3 on määritelty niin, että ilmasto-olosuhteet johtavat käyttöluokkaa 2 suurempiin kosteusarvoihin. Rakenteiden käyttöluokka on määriteltävä joksikin näistä kolmesta käyttöluokasta. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 23)

2.3 Lujuuden muunnoskerroin

Lujuuden muunnoskerrointa k_{mod} käytetään laskettaessa ominaisarvoista mitoitusarvoja. Lujuuden muunnoskerroin yhdistää tiedon käytettävästä materiaalista ja edellä mainituista tilannekohtaisesta aikaluokasta ja käyttöluokasta. Mitä pienemmän arvon lujuuden muunnoskerroin saa, sitä enemmän mitoittettavan liittimen kapasiteettia rajoitetaan mitoituksessa. Eri puumateriaalien lujuuden muunnoskerroimet aika- ja käyttöluokittain nähdään taulukossa 4.

Taulukko 4. Lujuuden muunnoskerroin.

Materiaali	Standardi	Käyttö luokka	Kuorman aikaluokka				
			Pysyvä kuorma	Pitkäaikainen kuorma	Keskipitkä kuorma	Lyhytaikainen kuorma	Hetkellinen kuorma
Sahatavara	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Liimapuu	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Vaneri	EN 636 A1>						
	Tyyppi EN 636-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Tyyppi EN 636-2	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Tyyppi EN 636-3 <A1	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB-lastulevy	EN 300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Muu lastulevy	EN 312 A1>						
	Tyyppi P4, tyyppi P5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	Tyyppi P5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	Tyyppi P6, tyyppi P7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	Tyyppi P7 <A1	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Kova kuitulevy	EN 622-2						
	HB.LA, HB.HLA1 tai 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	HB.HLA1 tai 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Puolikova kuitulevy	EN 622-3						
	MBH.LA1 tai 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS1 tai 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS1 tai 2	2	–	–	–	0,45	0,80
MDF-levy	EN 622-5						
	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MDF.HLS	2	–	–	–	0,45	0,80

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 28)

$$k_{\text{mod}} = \sqrt{k_{\text{mod},1} k_{\text{mod},2}}$$

(2-1)

Missä:

 $k_{\text{mod},1}$ = lujuuden muunnoskerroin materiaalille 1, ks. taulukko 4 $k_{\text{mod},2}$ = lujuuden muunnoskerroin materiaalille 2, ks. taulukko 4

2.4 Mitoitusarvo

Mitoitusarvo X_d kuvaa liittimen kapasiteettia, joka määritetään kuorman aika- ja käyttöluokkien, lujuuden muunnoskerroimen ja osavarmuusluvun perusteella. Liittimille käytettävä osavarmuusluvun γ_M arvo on aina 1,3, riippumatta liitinten materiaaleista. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 25)

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (2-2)$$

Missä:

X_d = mitoitusarvo

k_{mod} = lujuuden muunnoskerroin

X_k = kestävyysominaisuuden ominaisarvo

γ_M = osavarmuusluku

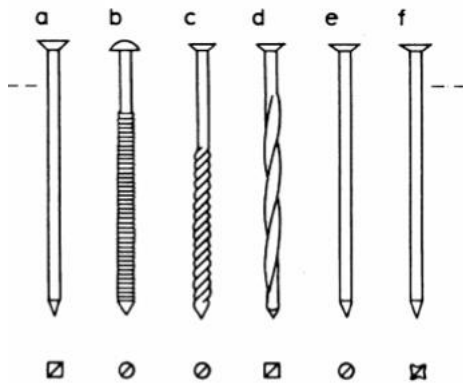
2.5 Metalliset puikkoliittimet

Metalliset puikkoliittimet ovat puurakenteissa tyypillisimmin käytettyjä mekaanisia liittimiä. Ne ovat yksinkertaisia, edullisia ja helposti toteutettavia (Kevarinmäki, Puikkoliitosteoria ja vinoruuviliitos, 2019, s. 4). Puikkoliittimiin luetaan naulat, ruuvit, pultit, tappivaarnat ja hakaset. Yleisimmin käytettyjä näistä ovat naulat. Puurakenteissa melko yleisiä puikkoliittimiä ovat myös erilaiset ruuvit, kuten kansi- ja puuruuvit. Näiden etu on nauloihin nähden parempi tartuntalujuus. Pultteja ja tappivaarnoja käytetään tyypillisimmin monileikkeisissä liitoksissa. Puikkoliittimiin kohdistuu taivutusta ja kuorman siirto puikkoliittimin aikaansaa puussa reunapuristus- ja leikkausjännityksiä (Yli-Koski & Kevarinmäki, 2005, s. 40). Puikkoliitoksilta vaaditaan lujuutta, jäykkyyttä ja sitkeyttä (Kevarinmäki, Puurakenteiden uusia liitostekniikoita, 2005, s. 5). Muita metallisia liittimiä ovat naulalevyt ja rengas-, lautas- ja hammasvaarnat.

Eurokoodin puurakenteiden puikkoliitinten vaatimuksia käsittelevässä standardissa on esitetty eri puikkoliittimille pätevät rakennustuotedirektiivin mukaiset vaatimukset valmistajille. Näiden vaatimusten täyttyminen on edellytys valmistajan oikeudelle kiinnittää rakennustuotteeseen CE-merkintä. Rakenteiden, kuten naulaliitosten, mitoitusstandardien käyttökelpoisuuden edellytys on CE-merkittyjen eli standardin täyttävien rakennustuotteiden käyttö. Nauloille on standardissa määritelty tarkat materiaaliin, muotoon, mekaaniseen lujuuteen ja jäykkyyteen sekä pitkäaikaiskestävyyteen kohdistuvat vaatimukset. Vaatimusten täyttyminen varmistetaan tyypillisimmin kokeellisesti standardin ohjeiden mukaan. Rakennustuotedirektiivin täyttävien rakennustuotteiden, kuten metallisten puikkoliitinten mitoitus pohjautuu ensisijaisesti puurakenteita käsittelevän Eurokoodin 5 osaan 1–1. Jos liitoksiin sisältyy myös teräslevyjä ja pultteja, käytetään lisäksi teräsrakenteita käsittelevää Eurokoodin 3 osaa 1–8. (SFS-EN 14592:2008+ A1:2012, ss. 1-41)

2.5.1 Naulaliitokset

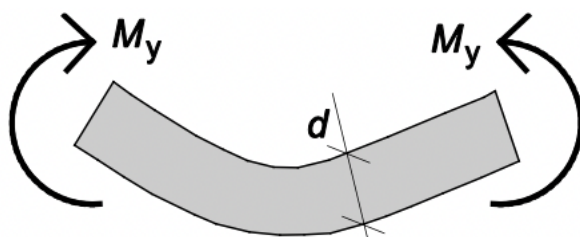
Naulaliitokset voidaan luokitella liitettävien kappaleiden perusteella puuosien välisiin, puulevyn ja puun välisiin sekä teräksen ja puun välisiin naulaliitoksiin. Naulaliitokset koostuvat liitettävistä kappaleista ja naulaliittimistä. Tavallisimpia naulatyyppejä ovat lankanaula, uppokantanaula, huopanaula, kampanaula, kierrenaula, kierrekampanaula, kellokantanaula ja ankkurinaula (Puuinfo, 2020, s. 2). Rakennuskäytössä tavallisin näistä on lankanaula. Profiloitujen naulojen käyttö naulaliitoksissa lisää liittimen vetolujuutta ja leikkausliitoksen kapasiteettia. Naulaliitoksia käytetään useimmiten suhteellisen pienten liitoksissa, kuten omakotitalojen rungoissa (Pitkäkoski, 2018, s. 3). Mitoitettaessa on huomioitava, että halkaisijaltaan yli kahdeksan millimetriä leveiden naulojen mitoituksessa käytetään pulttimitoituksen ohjeita. Tällöin reunapuristuksessa otetaan huomioon myös voiman suunta puun syihin nähden.



Kuva 2. Erilaisia nautoja: sileitä ja profiloituja, neliskulmaisia ja pyöreitä. (Yli-Koski & Kevarinmäki, 2005, s.41).

2.5.2 Myötömomentti

Naulaliitoksia laskettaessa on huomioitava myös liittimen myötömomentti, ks. kuva 3. Liittimen ominaisuutena myötölujuus vaikuttaa liittimellä tehdyn liitoksen kestävyteen. Naulan myötömomentin ominaisarvo lasketaan seuraavasti:



Kuva 3. Teräслиittimen myötömomentti. (Suomen Liimapuu yhdistys ry ja Puuinfo Oy, 2015, s. 68).

Pyöreille nautoille:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u d^{2,6} \quad (2-3)$$

Nelikulmaisille- ja uranautoille:

$$M_{y,Rk} = 0,45 f_u d^{2,6} \quad (2-4)$$

Missä:

d = naulan paksuus (mm)

f_u = langan vetolujuus (N/mm²)

2.5.3 Reunapuristuslujuus

Reunapuristuslujuus määräytyy käytettävän puun tiheydestä ja liittimen halkaisijasta. Kun liittimen reikä on esiporattu, vaikuttaa myös puun syiden suunta reunapuristuslujuuteen. Kun naulan halkaisija $d \leq 8$ mm ja materiaalina on sahatavara tai LVL, pätee reunapuristuslujuuden ominaisarvolle $f_{h,0,k}$ syysuuntaisesta voimasta kuormittuvalle liitokselle, kun liittimen reikä on esiporattu:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (2-5)$$

Kun liittimen reikää ei ole esiporattu:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad (2-6)$$

Jos naulan halkaisija $d > 8$ mm, otetaan huomioon myös voiman suunta puun syysuuntaan nähden. Reunapuristuslujuuden ominaisarvolle $f_{h,\alpha,k}$ syysuuntaan alfakulmassa kuormittuvalle liitokselle pätee tällöin:

$$f_{h,\alpha,k} = f_{h,0,k} / (k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \quad (2-7)$$

Havupuulle $k_{90} = 1,35 + 0,015 d$

LVL:ille $k_{90} = 1,30 + 0,015 d$

Lehtipuulle $k_{90} = 0,90 + 0,015 d$

ja reunapuristuslujuuden ominaisarvolle $f_{h,0,k}$ syysuuntaisesta voimasta kuormittuvalle liitokselle:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (2-8)$$

Missä:

k_{90} = kerroin, joka kuvaa eri puulajien reunapuristuslujuusominaisuutta

α = voiman kulma puusyiden nähden (°)

d = naulan halkaisija (mm)

ρ_k = puun tiheys (kg/m³)

Jos liitoksessa mitoitetaan myös teräslevy, käytetään Eurokoodi 3 -standardin osan 1–8 mitoitussääntöjä. Reunapuristuslujuuden laskukaavat teräkselle poikkeavat yllä olevista puun reunapuristuslujuuden laskukaavoista ja löytyvät kokonaisuudessaan Eurokoodi 3:sta. Taulukossa 5 on kuvattu laskentapohjassa olevat tiedot käytettävissä olevista teräslaaduista.

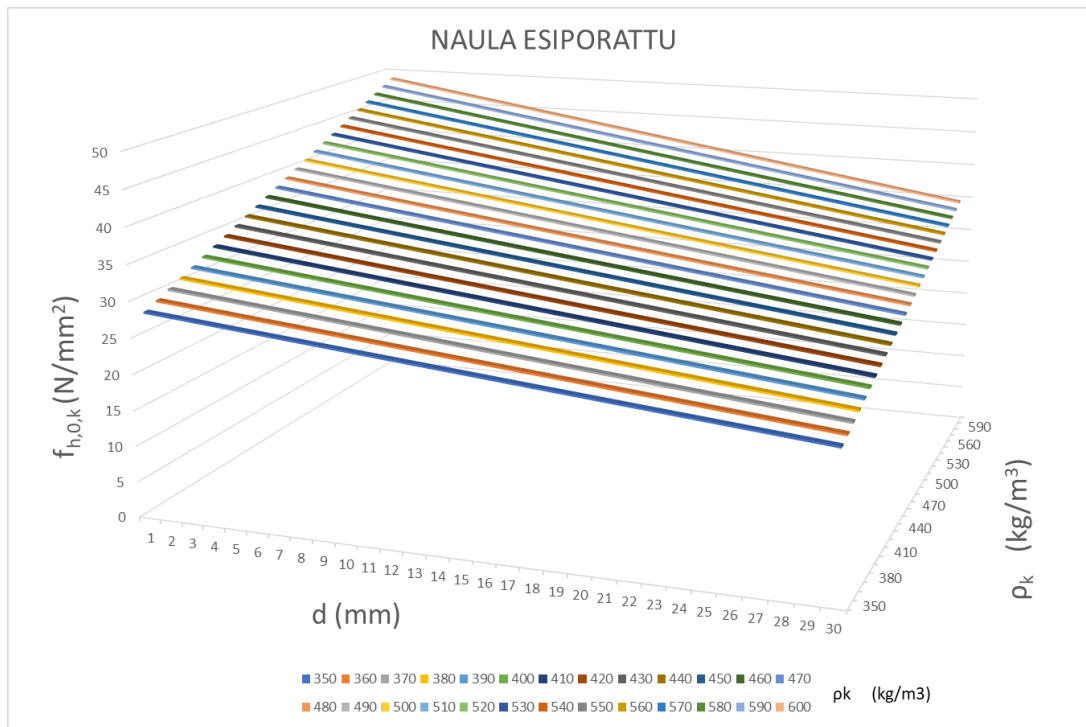
Taulukko 5. Teräslaadut .

				t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
				[N/mm ²] [N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
				f_y	f_u	f_y	f_u
Teräs S 235	Teräs		S 235	235	360	215	360
Teräs S 275	Teräs		S 275	275	430	255	410
Teräs S 355	Teräs		S 355	355	510	335	470
Teräs S 450	Teräs		S 450	440	550	410	550
Teräs S 275 N/NL	Teräs		S 275 N/NL	275	390	255	370
Teräs S 355 N/NL	Teräs		S 355 N/NL	355	490	335	470
Teräs S 420 N/NL	Teräs		S 420 N/NL	420	520	390	520
Teräs S 460 N/NL	Teräs		S 460 N/NL	460	540	430	540
Teräs S 275 M/ML	Teräs		S 275 M/ML	275	370	255	360
Teräs S 355 M/ML	Teräs		S 355 M/ML	355	470	335	450
Teräs S 420 M/ML	Teräs		S 420 M/ML	420	520	390	500
Teräs S 460 M/ML	Teräs		S 460 M/ML	460	540	430	530
Teräs S 235 W	Teräs		S 235 W	235	360	215	340
Teräs S 355 W	Teräs		S 355 W	355	510	335	490
Teräs S 460 Q/QL/QL1	Teräs		S 460 Q/QL	460	570	440	550

(Winberg, 2022).

Taulukossa 6 nähdään graafinen esitys puun reunapuristuslujuuden, tiheyden ja naulan halkaisijan suhteesta, kun kyseessä on puuosien välinen liitos, liittimen reikä on esiporattu ja kuormittava voima on syysuuntainen. Materiaalin tiheys on suoraan verrannollinen sen reunapuristuslujuuteen. Naulaliittimen halkaisija on kääntäen verrannollinen puun reunapuristuslujuuteen, mutta paksumpi liitin välittää toisaalta suuremman voiman.

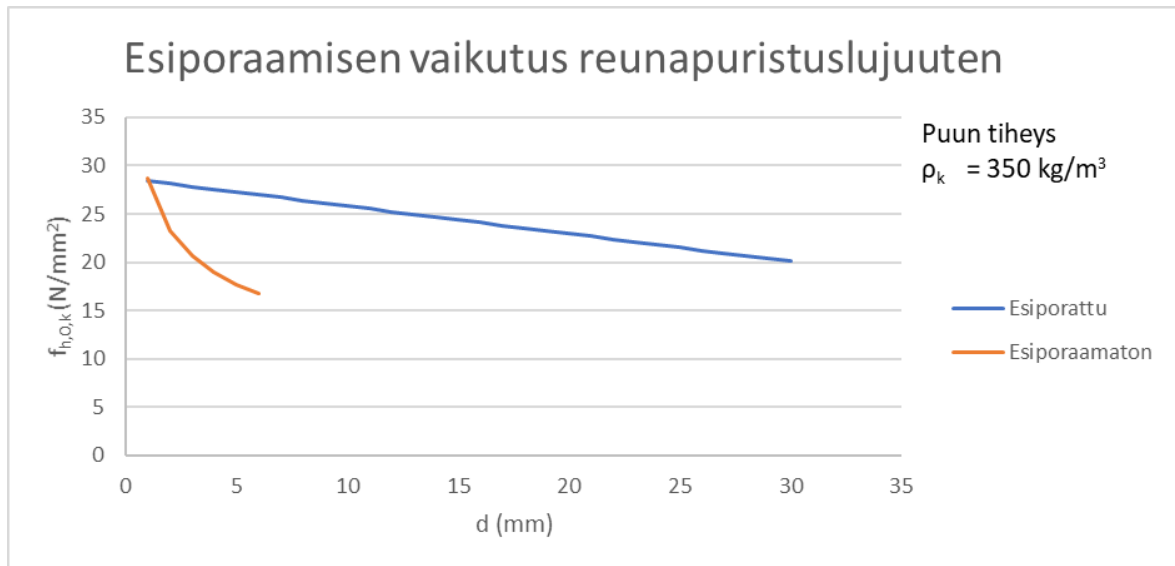
Taulukko 6. Puun reunapuristuslujuus suhteessa puun tiheyteen ja naulaliitimen halkaisijaan.



(Winberg, 2022).

Taulukossa 7 havainnollistetaan esiporatun ja ei-esiporatun reiän eroja reunapuristuslujuudessa. Halkaisijaltaan yli 6 mm paksuisten naulojen reikä tulee aina esiporata, jotta välttyttäisiin puumateriaalin halkeilulta. Reunapuristuslujuus heikkenee nopeasti esiporaamatta jätettäessä jo tätäkin pienemmillä naulan halkaisijan arvoilla.

Taulukko 7. Liittimen reiän esiporaamisen vaikutus reunapuristuslujuuteen.



(Winberg, 2022).

2.6 Ulosvetokestävyys

Pitkittäissuunnassa kuormittuvia naulaliitoksia mitoitettaessa on huomioitava myös ulosvetokestävyuden riittävyys. Pysyviä tai pitkäaikaisia pitkittäisiä kuormia kantavien naulojen on oltava profiloituja kampa- tai kierrenauloja, eikä sileitä nauloja voida käyttää. Standardin EN 14592 mukaisesti kampa- ja kierrenaulojen profiloituneen osuuden pituuden tulee olla vähintään 4,5-kertainen naulan nimellispaksuuteen nähden. Naulan kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvon $f_{ax,k}$ tulee myös olla vähintään 4,5 N/mm² puutavaran tiheyden ollessa 350 kg/m³ vakioituna vakiomassaan lämpötilassa 20 °C ja 65 % suhteellisessa kosteudessa. Ainoastaan naulan profiloituneen osan katsotaan kykenevän ottavan vastaan pitkittäissuuntaista kuormitusta, eivätkä tällaiset nailat voi olla päätypuuhun lyötyjä. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 63; SFS-EN 14592:2008+ A1:2012, ss. 1-41)

Kansallisessa liitteessä esitetään lisäksi nauiloille kertoimet, joilla huomioidaan puun kuivumisen aiheuttama tartuntalujuuden heikkeneminen. Tartuntalujuuden heikkeneminen on olennaista pituussuunnassa kuormitettujen naulaliitosten kantavuudelle. Käyttöympäristön ollessa lämmitetyissä sisätiloissa ilman suhteellisessa kosteudessa RH65 tasaannutetulla puulla kokeellisesti määritettyä naulan tartuntalujuutta pienennetään suunnittelussa sileävirtisilla nauiloilla kertoimella 0,4 ja

muilla nauloilla kertoimella 0,7. Kuitenkaan sileävirtaisia nauloja ei voida käyttää kantamaan pitkäaikaisia pituussuuntaisia kuormia. (Ympäristöministeriö, 2016, s. 13)

Ulosvetokestävyys puikkoliittimien vaatimuksia koskevan standardin EN14592 mukaisille muille kuin sileille nauloille lasketaan seuraavasti:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{cases} \quad (2-9)$$

Ja sileille nauloille seuraavasti:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{ax,k} d t + f_{head,k} d_h^2 \end{cases} \quad (2-10)$$

Sileille nauloille pätee seuraavaa, kun naulan kärjenpuoleinen tunkeuma on vähintään 12 d (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 64):

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (2-11)$$

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (2-12)$$

Missä:

$f_{ax,k}$ = kärjenpuoleisen ulosvetolujuuden ominaisarvo

$f_{head,k}$ = kannanpuoleisen läpivetolujuuden ominaisarvo

d = naulan paksuus, eli pyöreällä naulalla halkaisija ja neliskulmaisella naulalla naulan sivumitta (mm)

t_{pen} = kärjenpuoleinen tunkeuma tai kärjenpuoleisessa puussa olevan kierteisen tai kampaosan pituus, josta kärjen osuus on vähennetty (mm)

t = kannanpuoleisen puun paksuus (mm)

d_h = naulan kannan halkaisija (mm)

ρ_k = puun tiheyden ominaisarvo [kg/m^3]

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 64)

2.7 Erityistapaukset

Samanaikaisesti poikittain ja pitkittäin kuormittuville nauloille, joihin vaikuttaa naulojen pituuden suuntainen voima ja nauvoja vastaan poikittaissuuntainen voima, edellytetään lisäksi seuraava ehto:

Sileille nauloille:

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (2-13)$$

Standardin EN 14592 määrittelemille muille kuin sileille nauloille:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (2-14)$$

Missä:

$F_{ax,Rd}$ = liitoksen kestävyden mitoitusarvo pitkittäisessä kuormituksessa

$F_{v,Rd}$ = liitoksen kestävyden mitoitusarvo poikittaissuunnan kuormituksessa

Lisäksi, jos liitokseen vaikuttaa syysuuntaan nähden vinosti vaikuttava voima, tulee halkeamismahdollisuus huomioida. Kun liitokseen vaikuttaa voima syysuuntaan nähden kulmassa α , tulee syysuuntaa vastaan kohtisuorassa olevan vetovoimakomponentin F_{Ed} sin α osalta päteä seuraavaa:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (2-15)$$

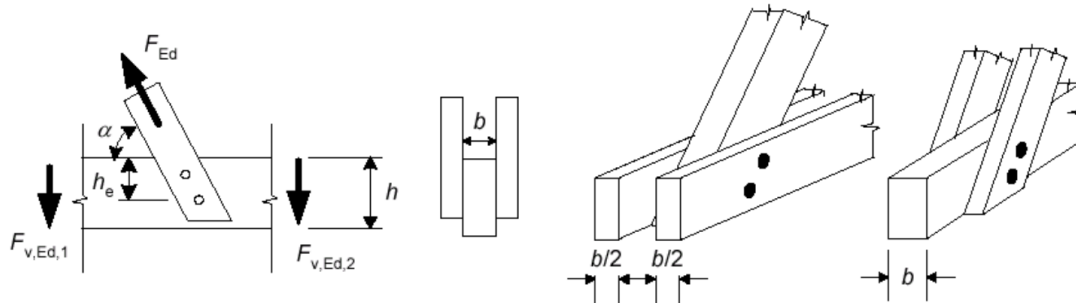
Missä:

$F_{90,Rd}$ = halkeamiskestävyden mitoitusarvo

$F_{v,Ed,1}$, $F_{v,Ed,2}$ = leikkausvoiman mitoitusarvot liitoksen kummallakin puolella

joille pätee edelleen:

$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (2-16)$$



Kuva 4. Liitokseen vinosti vaikuttava voima. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 54).

Kuvan 4 mukaisesti sijoitetuilla liittimillä käytetään havupuulle halkeamiskestävyyden ominaisarvoa $F_{90,Rk}$, jolle pätee:

$$F_{90,Rk} = 14bw \sqrt{\frac{h_c}{\left(1 - \frac{h_c}{h}\right)}} \quad (2-17)$$

Missä:

$F_{90,Rk}$ = halkeamiskestävyyden ominaisarvo (N)

h = puusauvan poikkileikkauksen korkeus (mm)

b = sauvan paksuus (mm)

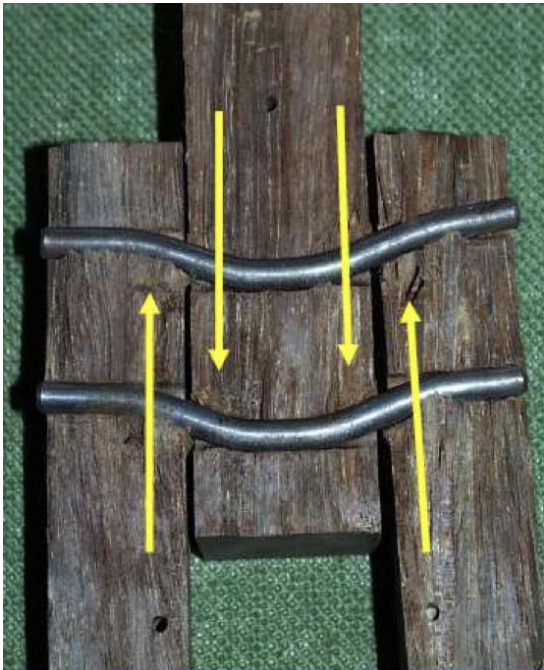
w = muunnoskerroin, jonka arvo on 1 muilla kuin naulalevyliittimillä

h_e = etäisyys kuormitetusta reunasta kauimpana olevan liittimen keskelle tai naulalevyn reunaan (mm)

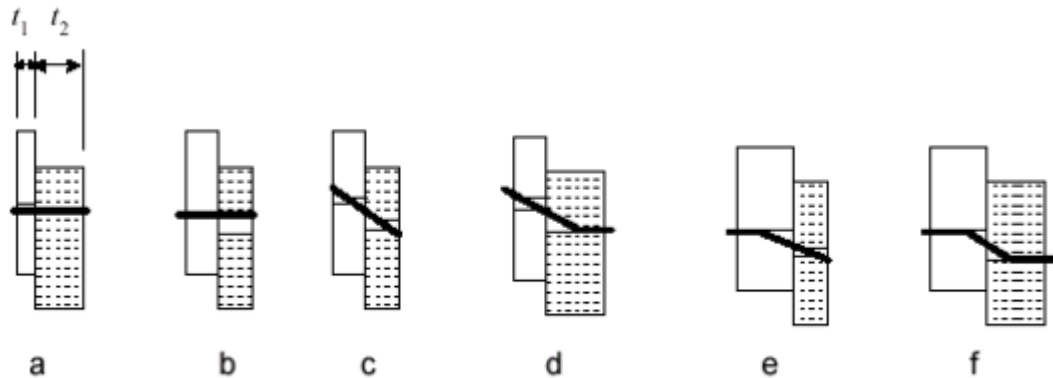
(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 54)

2.8 Leikkausvoima

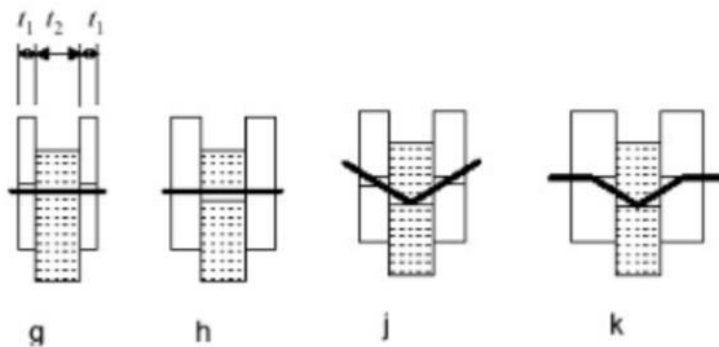
Metallisten puikkoliittimin tehtyjen liitosten leikkauskestävyyteen vaikuttavat liittimen myötö-, reunapuristus- ja ulosvetolujuudet. Kuvassa 5 voidaan nähdä kaksileikkeiseen puikkoliitokseen vaikuttavat voimat. Leikkauskestävyyden koitua riittämättömäksi, on yksi- ja kaksileikkeisillä liitoksilla erilaisia murtumistapoja, joista kaikki on otettava huomioon laskettaessa leikkauskestävyyden ominaisarvoa. Kaikille yksi- tai kaksileikkeisen liitosten murtumistavoille lasketaan leikkauskestävyyden ominaisarvo, joista pienin arvo valitaan liitoksen leikkauskestävyyden ominaisarvoksi. Yksileikkeisellä liitoksella tarkoitetaan kahden kappaleen yhdistämistä yhdellä liittimellä ja liitoksen kaksileikkeisyys taas tarkoittaa kolmen kappaleen yhdistämistä yhdellä liittimellä. Yksi- ja kaksileikkeisillä liitoksilla on erilaiset murtumistavat, jotka ovat kuvattuna yksileikkeisten liitosten osalta kuvassa 6 ja kaksileikkeisten liitosten osalta kuvassa 7.



Kuva 5. Kaksileikkeiseen puikkoliitokseen kohdistuvat leikkausvoimat. (Universität Karlsruhe TH)



Kuva 6. Yksileikkeisten puu-puu-liitosten murtumistavat. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 56).



Kuva 7. Kaksileikkeisten puun liitosten murtumistavat. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 56).

Liitoksen leikkauskestävyys koostuu pikkoliitosteorian mukaisesta kestävydestä, ulosvetokestävydestä ja köysivaikutuksesta. Köysivaikutuksen osuutta rajoitetaan liitintyyppin mukaisesti korkeintaan taulukossa 8 näkyviin osuuksiin. Tappivaarnaliitosten leikkauskestävyydessä ei huomioida köysivaikutuksesta johtuvaa leikkauskestävyyden osuutta. Teräksen ja puun välisissä liitoksissa leikkauskestävyys riippuu yksileikkeisissä liitoksissa teräslevyjen paksuudesta. Teräslevyjen paksuudelle on asetettu raja-arvot 0,5 naulan halkaisijaa d ohuelle ja 1 naulan halkaisijaa d paksulle teräslevylle. Ohuiden ja paksujen teräslevyjen leikkauskestävyyksien laskukaavat poikkeavat hieman toisistaan. Paksuudeltaan ohuen ja paksun väliin sijoittuvat teräslevyt lasketaan interpoloimalla.

Kaksileikkeisten teräslevyjen leikkauskestävyyksien laskutavat vaihtelevat riippuen siitä, onko teräslevy kaksileikkeisen liitoksen keskikomponentti, vai onko liitoksessa kaksi teräslevyä sivukappaleina. Jos teräslevyt ovat sivukappaleina, on laskutapa hieman erilainen ohuille ja paksuille levyille.

Taulukko 8. Köysivaikutuksesta tulevan leikkauskestävyyden suurin mahdollinen osuus.

Pyöreät naulat	15 %
Nelikulmaiset naulat ja uranaulat	25 %
Muut naulat	50 %
Ruuvit	100 %
Pultit	25 %
Tappivaarnat	0 %

(Winberg, 2022).

Kahden puuosan tai puulevyn ja puuosan välisten yksileikkeisten liittinten leikkauskestävyys $F_{V,Rk}$ lasketaan kaikille yksileikkeisten liitosten murtumistavoille a–f, ks. kuva 6., ja näistä pienin arvo valitaan liittimen leikkauskestävyydeksi:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(a)} \\ f_{h,2,k} t_2 d & \text{(b)} \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(c)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(d)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(e)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(f)} \end{cases} \quad \text{(2-18)}$$

Missä:

$F_{v,Rk}$ = kestävyden ominisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti

t_1 = puuosan tai levyn 1 paksuus tai tunkeuma

t_2 = puuosan tai levyn 2 paksuus tai tunkeuma

$f_{h,i,k}$ = puusauvan i reunapuristuslujuuden ominisarvo

d = liittimen halkaisija

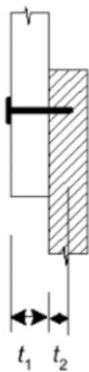
$M_{y,Rk}$ = liittimen myötömomentin ominisarvo

β = sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde

$F_{ax,Rk}$ = liittimen ulosvetokestävyden ominisarvo

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 55)

Puuosien paksuudet tai tunkeumat t_1 ja t_2 yksileikkeisessä puu-puu-liitoksessa on havainnollistettu kuvassa 8 ja kaksileikkeisessä puun liitoksessa kuvassa 9.



Kuva 8. Etäisyydet t_1 ja t_2 yksileikkeisessä puu-puu-liitoksessa. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 59).

Kolmen puuosan tai puulevyn ja puuosien välisten kaksileikkeisten liitinten leikkauskestävyys $F_{v,Rk}$ lasketaan kaksileikkeisten liitosten murtumistavoille g–k, ks. kuva 7., ja näistä pienin arvo valitaan liittimen leikkauskestävyydeksi:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases} \quad \text{(2-19)}$$

Missä:

$F_{v,Rk}$ = kestävyden ominaisarvo leikkaustasoa ja liitintä kohti

t_1 = puuosan tai levyn 1 paksuus tai tunkeuma

t_2 = puuosan tai levyn 2 paksuus tai tunkeuma

$f_{h,i,k}$ = puusauvan i reunapuristuslujuuden ominaisarvo

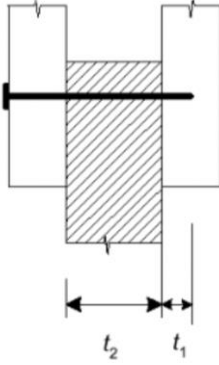
d = liittimen halkaisija

$M_{y,Rk}$ = liittimen myötömomentin ominaisarvo

β = sauvojen reunapuristuslujuuksien suhde

$F_{ax,Rk}$ = liittimen ulosvetokestävyden ominaisarvo

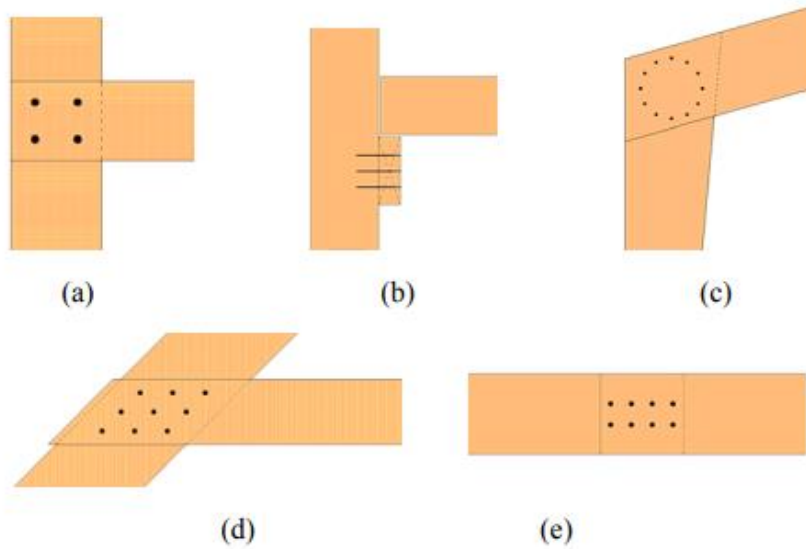
(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 55)



Kuva 9. Etäisyydet t_1 ja t_2 kaksileikkeisessä puun liitoksessa. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 59).

2.9 Liittimien sijoittelu

Mitoittamisen kannalta oleellista eri puun liitostyypeissä on liittimien kapasiteetti ja etäisyydet toisistaan sekä liitoksen kuormitus eri reunojen ja päätyjen osalta. Puuliitoksista ainoastaan joidenkin poikkiviiluja sisältävien Kerto-tuotteiden kohdalla on huomioitava, onko liitos lape- vai syrjäliitos (Eurofins Expert Services Oy, 2020, s. 20). Kuva 10 havainnollistaa, miten merkittävässä roolissa liittimien sijoittelu liitoksessa on. Kuvan 10 liitoksessa (c), kolminivelkehän pulttiympyräliitoksessa, on liittimet sijoiteltu mahdollisimman kauaksi liitoksen keskiöltä. Tällöin liittimien yhteinen jäyhyysmomentti ja sen myötä liittimien kyky ottaa vastaan kuormaa paranee. (Kovanen, 2014, ss. 25-26)



Kuva 10. Erilaisia puuliitoksia: (a) yksi- tai kaksileikkeinen pilari-palkki-liitos, (b) tukipuuliitos, (c) kolminivelkehän pulttiympyräliitos, (d) A-kattotuolin kattopalkin ja kitapuun välinen liitos, (e) paarteen jatkoliitos. (Kovanen, 2014, s. 17).

Naulojen sijoittelussa määritellyt vähimmäisetäisyydet päätyihin, reunoihin ja muihin nauloihin on määritelty taulukossa 9. Puulevyn ja puun välisten naulaliitosten naulavälien, eli naulojen välisten etäisyyksien muihin nauloihin, vähimmäisarvot saadaan kertomalla taulukon 9 arvot kertoimella 0,85. (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 62)

Taulukko 9. Naulaliittimen etäisyydet.

Väli tai etäisyys (ks. kuvaa 8.7)	Kulma α	Naulavälin tai pääty- tai reunaetäisyyden vähimmäisarvo		
		ei reikien esiporausta		reikien esiporaus
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
Naulaväli a_1 (syysuunnassa)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5 \text{ mm}$: $(5 + 5 \cos \alpha) d$ $d \geq 5 \text{ mm}$: $(5+7 \cos \alpha) d$	$(7 + 8 \cos \alpha) d$	$(4 + \cos \alpha) d$
Naulaväli a_2 (syysuuntaa vastaan kohtisuoraan)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$(3 + \sin \alpha) d$
Etäisyys $a_{3,t}$ (kuormitettuun päähän)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10+5\cos \alpha) d$	$(15 + 5\cos \alpha) d$	$(7 + 5\cos \alpha) d$
Etäisyys $a_{3,c}$ (kuormittamattomaan päähän)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$10d$	$15d$	$7d$
Etäisyys $a_{4,t}$ (kuormitettuun reunaan)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5 \text{ mm}$: $(5 + 2 \sin \alpha) d$ $d \geq 5 \text{ mm}$: $(5 + 5 \sin \alpha) d$	$d < 5 \text{ mm}$: $(7 + 2 \sin \alpha) d$ $d \geq 5 \text{ mm}$: $(7 + 5 \sin \alpha) d$	$d < 5 \text{ mm}$: $(3 + 2 \sin \alpha) d$ $d \geq 5 \text{ mm}$: $(3 + 4 \sin \alpha) d$
Etäisyys $a_{4,c}$ (kuormittamattomaan reunaan)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$3d$

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 61).

Missä:

a_1 = on naulaväli syysuuntaisessa rivissä

a_2 = on naularivien syysuuntaa vastaan kohtisuora keskinäinen etäisyys

$a_{3,c}$ = on naulan ja kuormittamattoman pään välinen etäisyys

$a_{3,t}$ = on naulan ja kuormitetun pään välinen etäisyys

$a_{4,c}$ = on naulan ja kuormittamattoman reunan välinen etäisyys

$a_{4,t}$ = on naulan ja kuormitetun reunan välinen etäisyys

α = on voiman ja syysuunnan välinen kulma.

(SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 61)

3 Tulokset

Opinnäytetyön tuloksena on laadittu VBA-ohjelmointia hyödyntäen mitoituslaskentapohja naulaliittimille yksi- ja kaksileikkeissä puuliitoksissa. Liitoksen päämateriaalina on sahatavara ja liimapuu ja liitettävänä toisena materiaalina sahatavara, liimapuu, kuitulevy, OSB-levy, vaneri tai teräs. Laskentapohjaan liittyvänä tavoitteena on ollut helppokäyttöisyys ja luotettavuus. Tavoitteena on ollut, että laskentapohjan käyttö olisi mahdollista rakennesuunnittelijalle ilman syvää osaamista puusta materiaalina ja ilman laajempaa perehtyneisyyttä Excel- tai VBA-ohjelmiin tai ohjelmointiin. Tämän tavoitteen vuoksi on laskentapohjan laatimisessa käytetty automatisointia VBA-ohjelmilla. Esimerkkiosia valmiista laskentapohjasta on opinnäytetyön liitteenä, ks. 1.

Laskentapohjan laatiminen on alkanut Eurokoodi 5:en läpikäynnillä ja naulaliittimen mitoituslaskentaprosessin osiin purkamisella. Liittimiin ja liitettäviin materiaaleihin liittyvät ominaisuudet ja mitat on kerätty ja kirjattu omille datavälilehdilleen. Solujen ja kaavojen keskinäiset yhteydet ja laskentaprotokolla on ohjelmoitu suurimmaksi osin VBE-ohjelmointiympäristössä, kuten myös käyttäjälle näkyvät ominaisuudet ja viestit. Laskentapohjaa on myös täydennetty havainnollistavilla kuvilla ja Excelissä laadituilla graafisilla esityksillä liitoksen ja liittimen ominaisuuksista.

Laskentapohjaan on pyritty kokoamaan myös mahdollisimman kattavasti tietoa eri datavälilehdille. Esimerkiksi *"Naulaliitokset"*-välilehdellä ovat kaikki naulaliittimen mitoituksessa mahdollisesti käytettävät laskukaavat nähtävissä ja käytettävissä myös erillään varsinaisesta laskentapohjasta. Tämä välilehti on käytännössä myös oma itsenäinen, manuaalisesti syötettävä laskentapohjansa ilman VBA-toimintoja, sillä kaikki mitoituslaskutoimitukset voidaan laskea myös pelkällä *"Naulaliitokset"*-välilehdellä. Tällöin käyttäjän tulee kuitenkin olla erityisen tarkkaavainen valitessaan käytettävät kaavat ja niiden järjestykset, sillä tietojen syöttö eri vaiheissa tapahtuu käsin ilman laskentapohjan valitsemaa laskentareittiä. *"Data_naula"*-välilehdelle on koottu kattavasti erilaisten naulojen ominaisuuksia ja mittoja. Myös ruuveille, kansiruuveille ja pulteille on koostettu omat datavälilehdet valmiiksi laskentapohjan myöhempää laajentamista varten.



Kuva 11. Laskentapohjan välilehdet VBE-ympäristössä. (Winberg, 2022).

3.1 Mitoituslaskentapohja

Opinnäytetyön mitoituslaskentapohja antaa mitoitusarvoja yksittäisille naulaliittimille. Yksi tärkeimmistä tavoitteista laskentapohjaan liittyen on ollut käyttäjän mahdollisuus seurata laskentapohjan käyttämää laskentareittiä. Aiemmat alan mitoituslaskentapohjat ovat usein niin kutsuttuja *“black box”* -tyyppisiä, eli käytetyt laskukaavat ovat piilossa käyttäjältä, joka syöttää lähtöarvonsa ikään kuin mustaan laatikkoon, joka palauttaa vastauksena mitoitus tulokset (Bylund, 2012, ss. 60, 66, 71, 78-80). Tällaisten laskentapohjien ongelmallisuuteen laskettavan ongelman hahmottamisen ja laskettujen tulosten oikeellisuuden arvioinnin kannalta on viitattu aiemminkin. (Kovanen, 2014, ss. 63, 107), (Doyle, 2007, ss. 1-4)

Tarvittavia lähtötietoja mitoituslaskelmille ovat:

- Liitostyyppi: yksi- tai kaksileikkeinen
- Liitoksen päämateriaali: sahatavara tai liimapuu
- Liitoksen toinen materiaali: sahatavara, liimapuu, kertopuu, OSB-levy, vaneri, kuitulevy tai teräs
- Molempien materiaalien lujuusluokka
- Molempien liitettävien kappaleiden paksuus
- Käyttöluokka
- Aikaluokka
- Naulan muoto: pyöreä tai neliskulmainen
- Naulan halkaisija
- Naulan pinta: sileä tai muu pinta
- Naulan vetolujuus
- Naulan tunkeuma
- Liittimen reiän esiporaus tai esiporaamattomuus
- Yksittäiseen naulaan kohdistuvat voimat, jos naula kuormittuu samanaikaisesti poikittain ja pitkittäin

Lähtötiedot syötetään laskentapohjan ”Lähtötiedot”-välilehdelle, ks. kuvat 12 ja 13. Kuvassa 12 näkyy osana lähtötietojen syöttönäkymää yhdistelmäruutu eli *combo box*, jossa lukee ”*Lape lapetta vastaan*”. Yhdistelmäruudussa voidaan valita vaihtoehtojen ”*Lape lapetta vastaan*” tai ”*Lape syrjää vastaan*” väliltä. Valinta on olennainen vain mitoittaessa Kerto-Q-tuotteita, koska Kerto-Q-tuotteet sisältävät poikkiviiluja. Poikkiviilut ehkäisevät sytä vastaan kohtisuoraan vaikuttavasta voimasta johtuvaa halkeamista (Eurofins Expert Services Oy, 2020, s. 20). Kerto-Q- ja muiden Kerto-tuotteiden mitoitus ei toistaiseksi sisälly mitoituslaskentapohjaan, mutta syrjä- tai lapeliitoksen valinta on sisällytetty laskentapohjaan jatkokehitysmahdollisuuksien vuoksi.

Kuvassa 12 nähdään nauhojen lähtötiedot ”Lähtötiedot”-välilehdellä. Kuten kuvassa 13 nähdään, on laskentapohjalla mahdollista laskea jopa viiden erilaisen naulan mitoituslaskelmat samanaikaisesti ja vertailla näiden naulavaihtoehtojen ominaisuuksia keskenään yhdellä välilehdellä. Lähtötiedot syötettyään käyttäjä valitsee haluamansa naulan kohdalta painikkeen ”Laske” tai kuvan 13 näkymän ulkopuolelta painikkeen ”Laske kaikki”, jolloin kaikki liittimet lasketaan samanaikaisesti. Laskentapohja esittää seuraavaksi viestiruudun muodossa joitain tarkennuksia ja ehtoja lähtötietoihin. Jos käyttäjä on syöttänyt naulalle langan vetolujuuden f_u arvon, joka on alle 600 N/mm^2 , antaa viestiruutu mahdollisuuden käyttää tätä vakioarvoa tai syöttää oman, suuremman arvon, ks. kuva 14 ja 15. Viestiruutu ilmoittaa myös tarvittavaan tunkeutumaan perustuvan naulan vähimmäispituuden, mikäli se ei täyty syötetyissä lähtötiedoissa, ks. kuva 16.

Liitinmitoituksen laskentapohja puulle Tekijä: Björn Winberg
2022 tehty opinnäytetyö

Laskelmat perustuvat SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC
Version : 2014-06-16 Rajoitus: halkaisija saa olla 1,9 - 30mm
Laskentapohja mitoittaa ainoastaan yhdelle liitimelle. Muista ottaa huomioon nef

Käyttöluokka: 2
Aikaluokka: Keskipitkä kuorma
Esiporaus: Esiporattu
Liitostyyppi: A) Yksileikkeinen liitos

Materiaali 1: Sahatavara C24
Paksuus b_1 : 10mm Korkeus h_1 : 200mm k_{mod} :0,8

Lape lapetta vastaan
Puiden välinen kulma α : 0°
Ulosvetovoima: F_{Ed} 300 N/kpl $F_{ax,Ed}$ 150 N/kpl F_{Ed} ja $F_{ax,Ed}$ voimat käytössä ainostaan ehdoille

Materiaali 2: Sahatavara C24
Paksuus b_2 : 50mm Korkeus h_2 : 200mm k_{mod} : 0,8

Liittimen vinous: Ei vinoliitos

Kuva 12. Lähtötietojen syöttönäkymä. (Winberg, 2022).

Liittimen tiedot:		Naula	Naula	Naula	Naula	Naula
Puikkoliitintyyppi:						
Halkaisija:	d	3,1 mm	3,1 mm	3,1 mm	3,1 mm	3,1 mm
Pituus:	l	70,0 mm	70,0 mm	70,0 mm	70,0 mm	70,0 mm
Vetolujuus:	f _u	600N/mm ²	600N/mm ²	600N/mm ²	600N/mm ²	600N/mm ²
Kannanpuoleinen tunnus:	t ₁	25,0 mm	25,0 mm	25,0 mm	25,0 mm	25,0 mm
Kärjenpuoleinen tunnus:	t ₂	45,0 mm	45,0 mm	45,0 mm	45,0 mm	45,0 mm
Yksittäisen liittimen mitoitussarve:		Laske	Laske	Laske	Laske	Laske
Uloskestävyys:	F _{ax,Rd}	176 N	176 N	175,8 N	175,8 N	175,8 N
Leikkausvoima:	F _{v,Rd}	561 N	561 N	561,3 N	561,3 N	561,3 N
Liittimien määrä:	kpl	10,0 kpl				
tehollinen määrä:	n _{ef} = n ^{kef}	3,7 kpl				
n _{ef} * f _{v,Rd} =	F _{v,ef,R,d}	2069,47N				
		TULOSTA LYHYT VERSIO				TULOSTA PITKÄ VERSIO

Kuva 13. Naulojen lähtötietojen vertailu. (Winberg, 2022).

Kun laskentapohjaan alkaa kertyä paljon erilaisia laskelmia, alkaa Excelin toiminta hidastua, jolloin yhden liittimen mitoituskalkelmat voivat kestää useamman sekunnin. Jos analysoidaan ja vertaillaan kerralla useamman liittimen tuloksia, voivat laskelmat kestää jopa minuutteja. Tulosten saantia on nopeutettu sammuttamalla Excelissä erilaisia tarpeettomia toimintoja, mutta edellytyksenä tälle on, että kaikki laskelmat tehdään VBA:lla.

Tarpeettomien toimintojen sammutus on ohjelmoitu tapahtuvaksi laskelmien suorittamisen ajaksi "Laske"-painiketta käytettäessä. Laskelmien suorituksen lopussa toiminnot käynnistetään uudelleen. Ensimmäiseksi soluissa tapahtuva automaattinen laskenta sammutetaan, toiseksi sammutetaan näytön päivitys laskennan ajaksi ja viimeiseksi erilaiset tapahtumat sammutetaan:

Koodiesimerkki 1. Tarpeettomien toimintojen sammutus.

Application.Calculation = xlCalculationManual

Application.ScreenUpdating = False

Application.EnableEvents = False

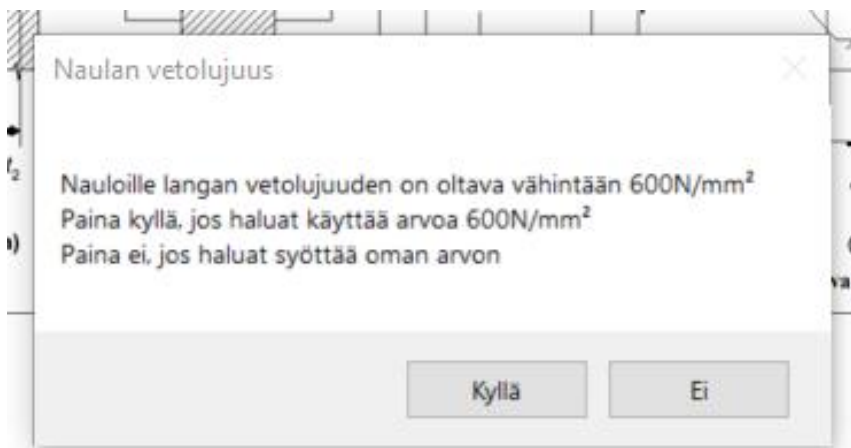
Kun kaikki laskelmat on suoritettu, käynnistyvät kaikki edellä sammutetut:

Koodiesimerkki 2. Tarpeettomien toimintojen käynnistäminen.

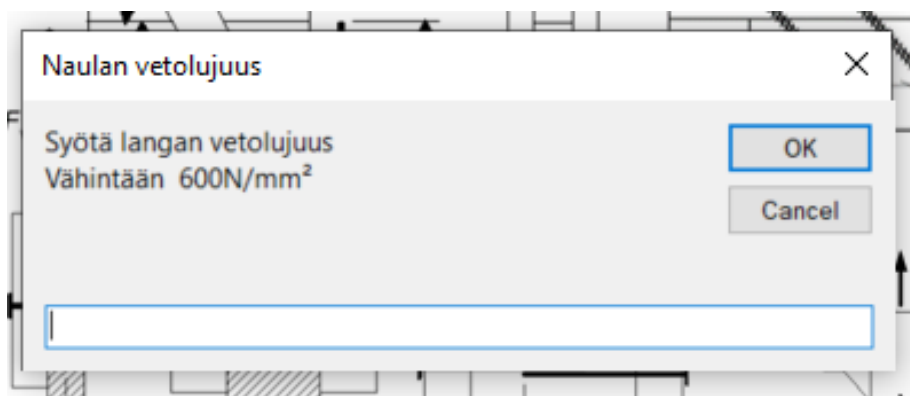
```
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

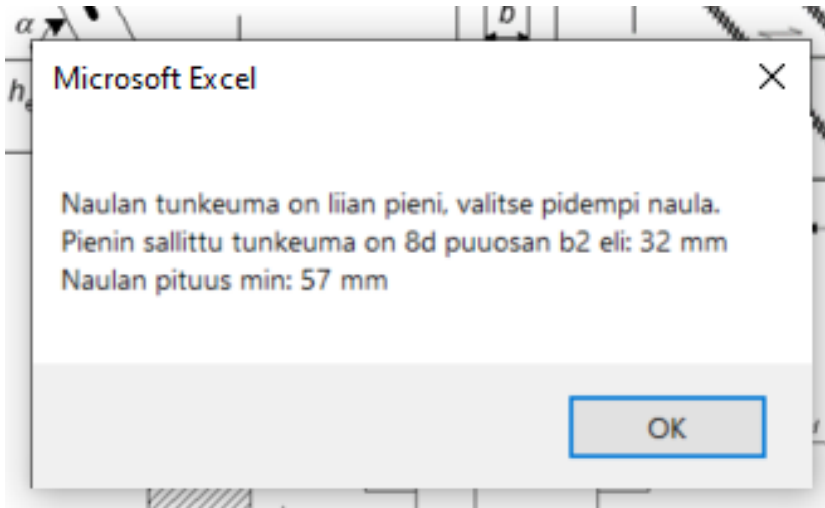
```
Application.EnableEvents = True
```



Kuva 14. Viestiruutu ilmoittaa langan vetolujuuden vähimmäisarvosta. (Winberg, 2022).



Kuva 15. Viestiruutuun voidaan syöttää langan vetolujuus. (Winberg, 2022).



Kuva 16. Viestiruutu ilmoittaa naulan vähimmäispituuden. (Winberg, 2022).

Kuvassa 12 näkyy myös graafisia esityksiä lasketun liittimen taustalla olevasta liitoksesta. Ylimmässä esityksessä kuvataan graafisesti liittimen tunkeutumissyvyys puuhun. Keskimmäinen esitys kuvaa liitosta kokonaisuudessaan ilman liittimiä. Alin esitys visualisoi koko liitosta sivusuunnasta. Kuvassa sinisenä esitetty materiaali on päämateriaali ja oranssina on esitetty liitettävä toinen materiaali. Liitostyypeistä ja niiden graafisesta kuvaamisesta on tarkempaa tietoa kappaleessa 3.1.2 *Liitoksen graafinen esitys*.

Jos liitettävien kappaleiden välinen kulma on yli 0° , täytyy ottaa huomioon myös halkeamisen mahdollisuus ja tarvitaan lisäksi leikkausvoiman mitoitusarvot. Liitoksen muoto ei periaatteessa ole tarpeellinen tieto mitoituslaskelmia varten tässä laskentapohjassa, mutta mitoitusilanteen hahmottamisen ja tulosten oikeellisuuden varmuuden kannalta lienee kannattavaa merkitä liitoksen osien mitat laskentapohjaan. Pohja pystyy myös itse laskemaan sopivan liittimen, joka täyttää kaikki kriteerit, mutta laskelmiin täytyy silti syöttää liittimen halkaisija. Liittimen pituuden laskentapohja laskee automaattisesti, mutta käyttäjä voi halutessaan vaihtaa liittimen pituuden pohjan asettaman vähimmäispituuden mukaisesti. ”Combo box”-välilehdellä käyttäjä voi syöttää myös muiden materiaalien tietoja, mikäli haluaa käyttää sellaista materiaalia, joka ei sisälly laskentapohjan materiaalivalikoimaan.

Esimerkissä naulaliittimen mitoitus tuloksista kuvassa 18 näkyvät mitoitus tulosten lisäksi olennaiset laskukaavat, pois lukien etäisyyksien laskelmat ja leikkausmitoitukselle käytetyt

kaavat, joita ei pituutensa vuoksi saatu mahtumaan sivulle. Etäisyyksiin liittyvät kaavat ovat kuitenkin helposti katsottavissa laskentapohjassa liitintyyppien omilla välilehdillä. Esimerkiksi nauiloille käytettyjen etäisyyksien selitteet ja etäisyyksien laskukaavat löytyvät ”Naulaliitokset”-sivulta, ks. taulukot 10 ja 11.

Taulukko 10. Naulavälien sekä naulojen etäisyyksien selitteet ja esimerkkitulokset.

Taulukko	8.2	d=	2
Naulavälien sekä naulojen reuna- ja päätyetäisyyksien vähimmäisarvot			
	Naulaväli a1 (syysuunnassa)		$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$
	Naulaväli a2 (syysuuntaa vastaan kohtisuoraan)		$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$
	Etäisyys a3,t (kuormitettuun päähän)		$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
	Etäisyys a3,c (kuormittamat tomaan päähän)		$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$
	Etäisyys a4,t (kuormitettuun reunaan)		$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$
	Etäisyys a4,c (kuormittamat tomaan reunaan)		$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$

(Winberg, 2022).

Taulukko 11. Naulavälien sekä naulojen etäisyyksien esimerkkitulokset.

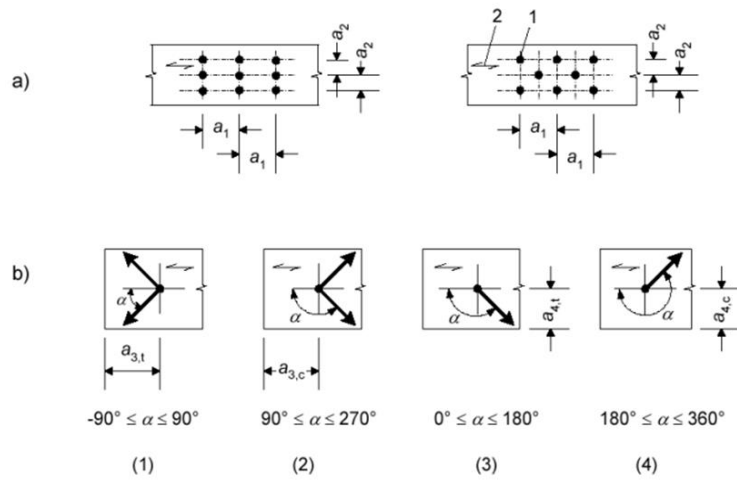
	ei reikien esiporausta				reikien esiporaus	
	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$		$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$			
a1	$d < 5 \text{ mm}: (5 + 5 \cos \alpha) d$	20,0 mm	$(7 + 8 \cos \alpha) d$	30,0 mm	$(4 + \cos \alpha) d$	10,0 mm
	$d > 5 \text{ mm}: (5 + 7 \cos \alpha) d$	24,0 mm				
a2	$5d$	10,0 mm	$7d$	14,0 mm	$(3 + \cos \alpha) d$	8,0 mm
a3,t	$(10 + 5\cos \alpha) d$	30,0 mm	$(15 + 5\cos \alpha) d$	40,0 mm	$(7 + 5\cos \alpha) d$	24,0 mm
a3,c	$10d =$	20,0 mm	$15d$	30,0 mm	$7d$	14,0 mm
a4,t	$d < 5 \text{ mm}: (5 + 2 \sin \alpha) d$	10,0 mm	$d < 5 \text{ mm}: (7 + 2 \sin \alpha) d$	14,0 mm	$d < 5 \text{ mm}: (3 + 2 \sin \alpha) d$	6,0 mm
	$d \geq 5 \text{ mm}: (5 + 5 \sin \alpha) d$	10,0 mm	$d \geq 5 \text{ mm}: (7 + 5 \sin \alpha) d$	14,0 mm	$d \geq 5 \text{ mm}: (3 + 4 \sin \alpha) d$	6,0 mm
a4,c	$5d$	10,0 mm	$7d$	14,0 mm	$3d$	6,0 mm

(Winberg, 2022).

Laskentapohjan antamat mitoitus tulokset saadaan kattavana ”Laskenta”-välilehdelle, ks. kuva 17. ”Lähtötiedot”-välilehdelle tulostuu tiivistetty versio mitoitus tuloksista, ks. kuva 18.

Naulaliitin:	Naulan muoto:	Pyöreä naula
	Naulan pinta:	Sileä naula
(8.14) Myötömomenti		
$my_{rk} = 0.3 * fu * d ^ 2.6$	my,rk	3410,46 Nmm
Reunapuristuslujuus		
$0.082 * (1 - 0.01 * d) * pk_1$	fh,1,k	27,81 N/mm ²
$0.082 * (1 - 0.01 * d) * pk_2$	fh,2,k	27,81 N/mm ²
Ulosvetolujuuden ominaisarvo		
$(20 * 10 ^ -6) * pk_2 ^ 2$	fax,k	2,45 N
Läpivetoisuuden ominaisarvo		
$70 * 10 ^ -6) * pk_2 ^ 2$	fhead,k	8,58 N
Naulojen ulosvetokestävyyden ominaisarvo		
sileä: $fax_k * d * tpen$	fax,Rk	341,78 N
$kmod * (fax_{rk} / gamma_M)$	fax,Rd	210,32 N
Ulosvetokestävyyttä rajoittava köysivaikutuksen osuus:		15 %
- Yksileikkeiset liittimet:		
$\frac{f_{h1k} t_1 d}{f_{h2k} t_2 d}$ (a)	Yksileikkeiset liittimet	
$\frac{f_{h1k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (c)	a	2155,30 N/leike
$1,05 \frac{f_{h1k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h1k} d t_1^2} - \beta} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (d)	b	3879,54 N/leike
$1,05 \frac{f_{h1k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h1k} d t_2^2} - \beta} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (e)	c	4894,46 N/leike
$1,15 \frac{\sqrt{2\beta}}{1 + \beta} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h1k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (f)	d	1475,47 N/leike
	e	2454,82 N/leike
	f	894,68 N/leike
	fv_Rk	894,68 N
	fv,Rd	550,57 N
Liitoksen kestävyden mitoitusarvo leikkaustasoa kohti		
8.3.3 Samanaikaisesti poikittain ja pitkittäin kuormittuvat naulat, edellytetään seuraavan ehdon toteutuvan		
Sileälle naulalle $(Fax,Ed/Fax,Rd) + (Fv,Ed/Fv,Rd) <_ 1$		
Fax,Ed: 50,00 N Fv,Ed: 100,00 N	Käyttöaste	41,94 %
Fax,Rd: 210,32 N Fv,Rd: 550,57 N		
Etäisyydet	Materiaali 1	Materiaali 2
Syysuunnassa	a1	15,5 mm
Syysuuntaa vastaan kohtisuoraan	a2	12,4 mm
Kuormitettuun päähän	a3,t	37,2 mm
Kuormittamat toman päähän	a3,c	21,7 mm
Kuormitettuun reunaan	a4,t	9,3 mm
Kuormittamattomaan reunaan	a4,c	9,3 mm

Kuva 17. Esimerkki naulaliittimen kattavista mitoitus tuloksista. (Winberg, 2022).



Selite:

- (1) kuormitettu pää
- (2) kuormittamaton pää
- (3) kuormitettu reuna
- (4) kuormittamaton reuna
- 1 naula
- 2 syysuunta

Kuva 8.7 Liitinvälit sekä liitinten pääty- ja reunaetäisyydet: (a) syysuuntainen liitinväli ja syysuuntaa vastaan kohtisuora liitinväli, (b) liittimien reuna- ja päätyetäisyydet

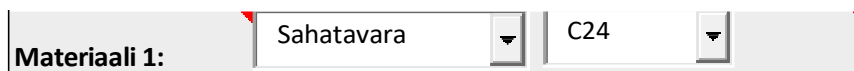
Lähde: SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC

TULOKSET:		Liitinvälien ja reuna- ja päätyetäisyyksien vähimmäisarvot					
Liitin:	(mm)	a1	a2	a3,t	a3,c	a4,t	a4,c
Materiaali 1		15,5 mm	12,4 mm	37,2 mm	21,7 mm	9,3 mm	9,3 mm
Materiaali 2		15,5 mm	12,4 mm	37,2 mm	21,7 mm	9,3 mm	9,3 mm
Uloskestävyyden mitoitusarvo		Liitin:		Naula	Pyöreä naula	kmod: 0,8	
$F_{ax,Rd}$	176 N			3,1 x 70mm	Sileä naula	Keskipitkä kuorma	
Liittimen mitoitusarvo leikkaustasoa kohti				$t_{puu} = t1 =$	25,0 mm		
				$t_{pen} = t2 =$	45,0 mm		
				$f_u =$	600N/mm ²		
$F_{v,Rd}$	561 N						

Kuva 18. Esimerkki naulaliittimen tiivistetyistä mitoitustuloksista. (Winberg, 2022).

3.1.1 Yhdistelmäruutujen ohjelmointi

Yksi VBA-ohjelmoinnin hyödyistä laskentapohjassa on mahdollisuus sisällyttää tietoa yhdistelmäruutuihin eli *combo box*eihin. Yhdistelmäruudut ovat graafisen käyttöliittymän widgettejä, joissa yhdistyvät tekstiruutu ja alavetovalikko, josta käyttäjä voi valita haluamansa arvon. Kuvan 19 esimerkissä on yhdistelmäruudussa 1 valittu materiaaliksi sahatavara ja yhdistelmäruudussa 2 lujuusluokaksi C24 useista materiaali- ja lujuusluokkavaihtoehdoista.



Kuva 19. Yhdistelmäruudut 1 ja 2. (Winberg, 2022).

Automaattisen valinnan täyttö on kuvan 19 yhdistelmäruutuihin ohjelmoitu seuraavasti:

Koodiesimerkki 3. Lujuusluokkien ohjelmoiminen yhdistelmäruutuun 2.

```
Private Sub ComboBox1_LostFocus()
```

```
Dim lähtötiedot_sheet As Worksheet
```

```
Set lähtötiedot_sheet = ThisWorkbook.Sheets("combobox")
```

```
Me.ComboBox2.Clear
```

```
For Each cell In ThisWorkbook.Sheets("combobox").Range("materiaali_puu")
```

```
    If Me.ComboBox1 = cell Then
```

```
        Me.ComboBox2.AddItem cell.Offset(0, 2)
```

```
    End If
```

```
Next cell
```

```
End Sub
```

(ExcelVbalsFun, 2014)

Yllä *ComboBox1* viittaa yhdistelmäruutuun 1, jossa valitaan materiaali 1. *ComboBox2* taas viittaa yhdistelmäruutuun 2, jossa näytetään automaattisesti sopiva lujuusluokka.

3.1.2 Liitoksen graafinen esitys

Kuvassa 16 esiintyvät syötettyjen arvojen mukaisesti muuttuvat liitosten graafiset esitykset on toteutettu Excelissä. Graafiset esitykset havainnollistavat mitoitustilannetta ja esittävät liitoksen muodon ja liittimen pituuden sekä tunkeuman. Graafiset esitykset ovat toteutettu laskemalla ensin kaikkien osien koordinaatit kolmiulotteisesti, minkä jälkeen koordinaatit on muutettu kaksiulotteisiksi Pašákin esittelemällä metodilla (Pašák, 2017, s. 2). Kolmiulotteiset koordinaattipisteet on siirretty yksinkertaisella trigonometrialla kaksiulotteiseen koordinaatistoon, jolloin on saatu aikaan illuusio kolmiulotteisesta kuvasta, ks. kuvat 33 ja 34. Trigonometriaa hyödyntäen voidaan taulukon 13 mukaisesti laskettua kolmas koordinaattipiste kaksiulotteiseen koordinaatistoon syvyysvaikutelman luomiseksi. Kuvassa 20 nähdään koonti graafisen esityksen luomiseen tarvittavista tiedoista: vasemmissa sarakkeissa kolmiulotteiset koordinaattipisteet, keskimmaisissä sarakkeissa näistä muunnetut kaksiulotteiset koordinaattipisteet ja oikealla olevissa sarakkeissa nähdään kaavoissa (3-1) – (3-8) selitetyt kertoimet sekä tarvittavien kulmien muunnokset asteista radiaaneiksi. Excel-ohjelmaan tulee kulmat aina syöttää radiaaneina.

$$\mathbf{x}' = (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{x}) + (\mathbf{q}_1 \times \mathbf{y}) + (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{z}) \quad (3-1)$$

$$\mathbf{y}' = (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{x}) + (\mathbf{q}_2 \times \mathbf{y}) + (\mathbf{r}_2 \times \mathbf{z}) \quad (3-2)$$

Missä:

$$\mathbf{p}_1 = (-\cos \beta) (\cos \gamma) \quad (3-3)$$

$$\mathbf{p}_2 = (\cos \gamma) (-\sin \beta)(-\sin \alpha) + (\sin \gamma)(\cos \alpha) \quad (3-4)$$

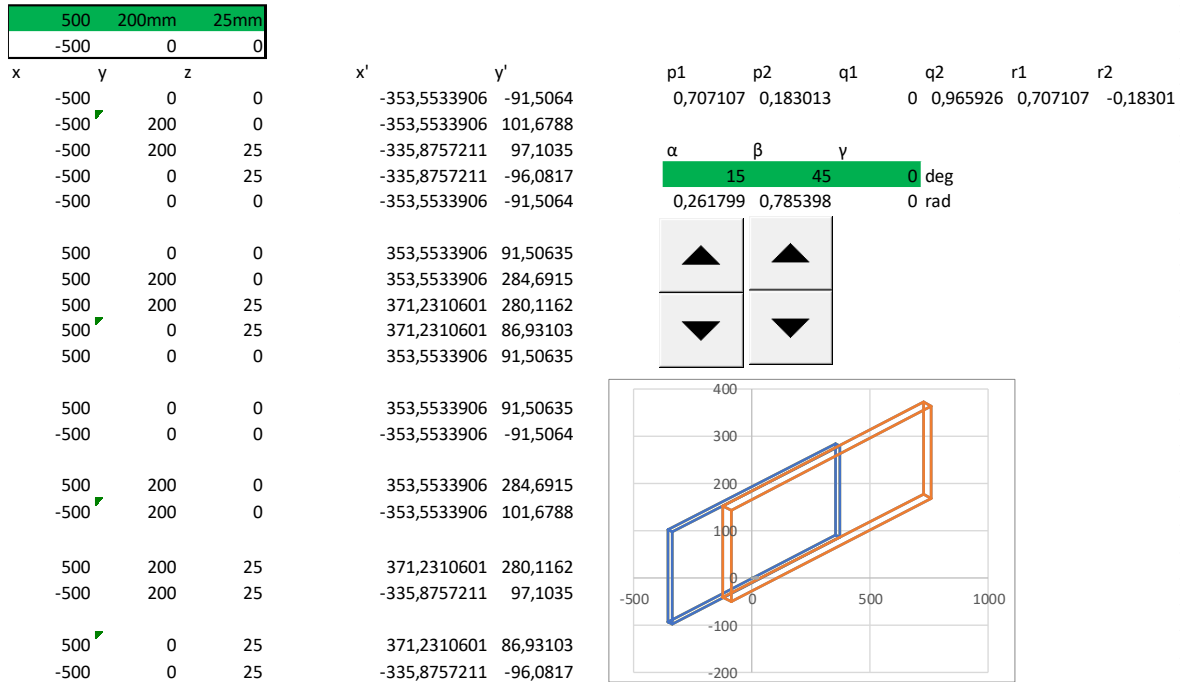
$$\mathbf{q}_1 = (\sin \gamma)(\cos \beta) \quad (3-5)$$

$$\mathbf{q}_2 = (-\sin \gamma) (-\sin \beta)(-\sin \alpha) + (\cos \gamma)(\cos \alpha) \quad (3-6)$$

$$\mathbf{r}_1 = (-\sin \beta) \quad (3-7)$$

$$\mathbf{r}_2 = (\cos \beta) (-\sin \alpha) \quad (3-8)$$

Materiaali 1



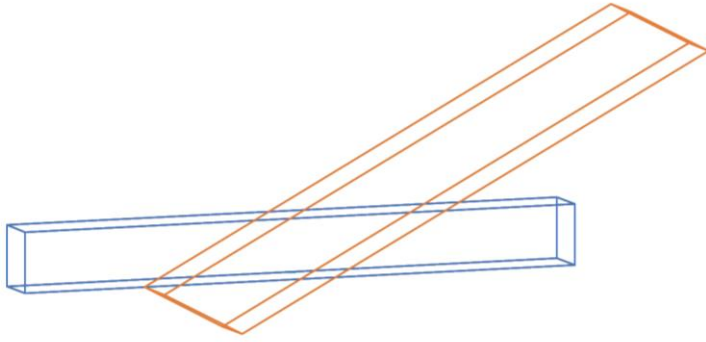
Kuva 20. Liitoksen graafisen esityksen koordinaatit. (Winberg, 2022)

Taulukko 13. Kulmien muunnostaulukko graafisiin esityksiin.

α	β	γ	
0	90	0	deg
0	1,570796	0	rad

(Winberg, 2022).

Excelissä saadut koordinaattipisteet syötetään pistekuvioon suoralla viivalla (*scatter with straight line*). Kuvan 21 esimerkissä ei ole selkeyden vuoksi kuvattu liittimiä. Laskentapohjaan sen sijaan on lisätty myös leikkauskuvia, joista näkee liittimen sijoittelun osana liitosta. Graafinen esitys on vuorovaikutteinen laskentapohjaan syötettyjen tietojen kanssa, eli esimerkiksi yksi- tai kaksileikkeisen liitoksen valinta muuttaa automaattisesti kuvassa näkyvien liitettävien osien määrää. Jatkossa laskentapohjaa voisi edelleen kehittää piirtämään liitoksen suoraan Autocadiin käyttämällä VBA-ohjelmointia.



Kuva 21. Pistekuviolla luotu graafinen esitys liitoksesta. (Winberg, 2022).

4 Pohdinta

Työn rajaamiseksi laskentapohja on rajattu käsittämään kokonaisten liitosten sijaan yksittäiset liittimet ja metallisista puikkoliittimistä pelkät naulaliittimet. Liitettävistä materiaaleista Kerto-puutuotteet on myös rajattu ulos. Tulevaisuudessa laskentapohjan voisi laajentaa kattamaan myös ruuvi-, pultti- ja tappivaarnaliittimet. Datavälilehdet kyseisille metallisille puikkoliittimille ovat jo lähes valmiina, mutta aikaa vievin osuus laskentapohjan laajentamisessa tulee olemaan liittimien yksilöllisten ehtojen ja rajoitusten läpikäynti ja asettaminen laskentapohjaan. Mitä kattavampi alue laskentatyökalulla halutaan kattaa, sitä monimutkaisempaa on laskentaprotokollan ohjelmointi ja oikeiden kaavojen valinnassa tarvitaan enemmän tarkkuutta. Laskentapohjan VBA-ohjelmointitaitojen kehittyessä myös laskentapohjan jatkokehitysmahdollisuudet laajenevat ja uusien toimintojen kehittäminen tehostuu. Laskentapohjan tulosten oikeellisuuden vahvistaminen on toteutettu vain alustavasti ja suuntaa antavasti. Ennen mahdollista käyttöä todellisissa mitoitustilanteissa, tulisi seuraavaksi laskentapohjan validiteettia testata järjestelmällisesti.

Erilaisia työkaluja mitoitukseen on kehitetty laajalti, eikä puun yksi- ja kaksileikkeisten liitosten naulaliitinten laskentapohja ole ainoa laatuaan. Kehitetty laskentapohja sisältää kuitenkin joitain vahvuuksia aiemmin tavattuihin mitoituskalorien verrattuna. Ensinnäkin laskentapohjan vahvuutena on helppokäyttöisyys ja havainnollisuus: laskelmissa käytetyt kaavat ovat käyttäjän nähtävissä ja toisaalta vain ne kaavat, joita laskelmissa on käytetty, ovat näkyvissä. VBA-ohjelmoinnilla on aikaansaatu selkeä ulkoasu muun muassa yhdistelmäruuduin, joiden alavetovalikot kommunikoivat keskenään ja ohjaavat laskentaprotokollaa. Toiseksi on tässä laskentapohjassa mahdollistettu eri liittimien samanaikainen mitoittaminen ja laskelmien vertailu samalla välilehdellä. Laskentapohjaa kehitettäessä kattamaan myös muut metalliset puikkoliittimet, voi tämä ominaisuus mahdollistaa myös eri liittimien keskinäisen vertailun ja olla alustavana apuna myös esimerkiksi eri liitinvalintojen kustannusten vertailussa.

4.1 Tulosten validiteetti

Laskentapohjan tulosten validiteetin arvioimiseksi laskentapohjan antamia mitoitustuloksia on verrattu Skol ry:n P2 Naula- ja ruuviliitoksen kestävyys-laskentapohjan antamiin tuloksiin (Skol ry, 2016). Molempiin laskentapohjiin syötettiin samat lähtötiedot, jotka pysyivät vakiona:

- Kahden kappaleen yksileikkeinen liitos, jonka molemmat kappaleet ovat 200 mm paksuja.
- Liitettävien kappaleiden materiaalina sahatavara, jonka lujuusluokka on C24.
- Liittimenä standardien mukainen sileä, pyöreä naula, jonka pituus on 400 mm.

Laskentapohjien antamat liittimen leikkauskestävyyden $F_{v,Rd}$ taulukoitiin naulan halkaisijan d kokonaisluokarvoilla välillä 2 ja 8 millimetriä. Taulukossa 14 on kuvattuna vertailulaskelmien tulokset ja taulukossa 15 on nähtävissä graafinen esitys laskutulosten vertailusta. Taulukon vasemmanpuoleisesta sarakkeesta löytyvät naulan halkaisijan d arvot ja keskimmaisestä sarakkeesta Skol ry:n laskentapohjan antamat tulokset liittimen leikkauskestävyydelle $F_{v,Rd}$.

Taulukko 14. Laskentapohjien antaman leikkauskestävyyden vertailu.

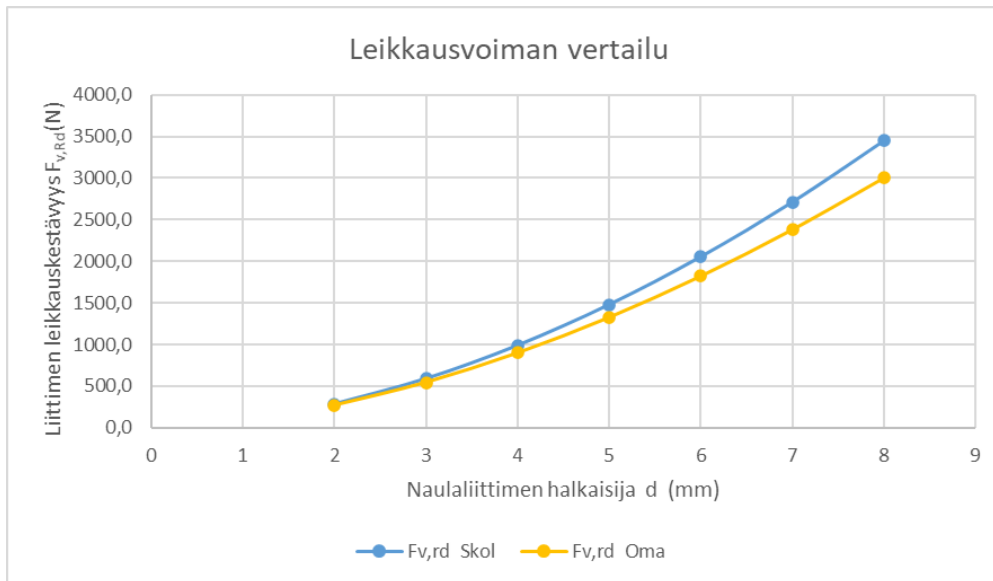
Halkaisija d (mm)	$F_{v,Rd}$ Skol (N)	$F_{v,Rd}$ Oma (N)
2	284,5	270,6
3	590,4	545,8
4	990,8	899,9
5	1480,6	1327,0
6	2055,7	1822,4
7	2713,2	2382,5
8	3450,3	3003,8

(Winberg, 2022).

Skol ry:n P2 Naula- ja ruuviliitoksen kestävyys-laskentapohja perustuu RIL 205-1-2007 Puurakenteiden suunnitteluohjeeseen, joka perustuu Eurokoodi 5 -standardiin. P2-

laskentapohjan ohjeissa on huomautettu, että laskentapohjalla voidaan laskea nauvoja, joiden halkaisijalle d pätee: $1,9 \text{ mm} \leq d \leq 8 \text{ mm}$ (Skol ry, 2016). Vertailu on siis tehty kaikilla niillä naulan halkaisijan kokonaislukuarvoilla, jotka sisältyvät P2-laskentapohjalla laskettaviin naulan halkaisijan arvoihin.

Taulukko 15. Leikkausvoiman vertailu kahden laskentapohjan välillä.



(Winberg, 2022).

P2-laskentapohjassa on käytetty osavarmuusluvun γ_M arvoa 1,4, joka on sittemmin päivitetty liitosten osalta arvoon 1,3 (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, 2014, s. 25) (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2017). Tämän opinnäytetyön laskentapohjassa käytetään päivitettyä osavarmuusluvun arvoa 1,3. Osavarmuusluvun arvon muutos vaikuttaa osin siihen, etteivät pohjien tulokset ole täysin vertailukelpoisia. P2-laskentapohjien laskukaavat myös eroavat tämän opinnäytetyön laskentapohjan kaavoista, sillä edelliset ovat peräisin standardeihin pohjautuvista tiivistetyistä suunnitteluohjeista ja jälkimmäiset pohjautuvat itse standardeihin. Tämänkään vuoksi ei laskentapohjilta voida odottaa identtisiä liittimen leikkauskestävyyden arvoja. Laskentapohjan kattava validoiminen jää jatkokehittelyn seuraavaksi askeleeksi, jossa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää esimerkiksi VBA- tai Python-ohjelmoinnin menetelmiä.

4.2 Yhteenveto

Mitoituksen apuvälineiksi on kehitetty useita erilaisia laskentatyökaluja, osa suuremmissa korkeakoulujen ja rakennesuunnittelutoimistojen hankkeissa ja osa yritysten tai opinnäytetyötä tekevien opiskelijoiden voimin. Skol ry:n Eurocode-laskentapohjahankkeessa toteutettuja Eurokoodiin pohjautuvia rakennemitoituksen laskentapohjia päivitetään edelleen, ja lukuisilla rakennesuunnittelutoimistoilla ja korkeakouluilla on hallussaan näiden pohjien käyttölisenssi.

Suuri osuus laskentapohjan laatimistyöstä on koostunut myös liitinten ja puun ominaisuuksien ja kaavojen selvittämisestä ja keräämisestä yhteen. Kaavat ja markkinoilla olevien liitinten ominaisuudet on pyritty keskittämään yhteen ja samaan laskentapohjaan, jotta käyttäjän ei tarvitsisi hakea tietoa useista lähteistä mitoituslaskelmaansa varten. Laskentapohjan materiaalivalikoiman laajentaminen on myös mahdollinen jatkokehityksen kohde.

Tämän opinnäytetyön laskentapohjan kehitystyössä on herännyt useita ideoita siitä, kuinka näitä käyttökelpoisia työkaluja voitaisiin jatkokehittää entistä hyödyllisemmiksi apuvälineiksi rakennesuunnitteluun. Käyttäjystävällisyys ja helppokäyttöisyys, selkeys ja monipuolisuus sekä mahdollisuus vertailla erilaisia liittimiä ovat laskentapohjan jatkokehittelyn keskiössä. Ohjelmoinnin menetelmät mahdollistavat myös suuren tietomäärän käsittelyn ja laskutoimitusten automatisoinnin. Yksittäisten liitinten jälkeen seuraava askel onkin myös kokonaisten liitosten laskentapohjan laatiminen. Kokonaisia liitoksia mitoitettaessa kasvaa mahdollisten laskentareittien ja huomioitavien kaavojen ja ehtojen määrä moninkertaiseksi.

5 Lähteet

- Bylund, M. (2012). *Framtagning av beräkningshjälpmedel för tvärkraftbelastade förband med förbindare av metall*. Haettu 01. 05 2022 osoitteesta <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:549802/FULLTEXT01.pdf>
- Carmen, S.;& Hans, J. B. (2017). *Timber Engineering*. KIT scientific publishing.
- Doyle, J. (2007). Spreadsheet software - an unappreciated engineering tool. *Machine Design*, 78,80,82.
- Ekonoja, A.;Lahtonen, T.;Mäntylä, J.;& Heinonen, P. (03. 02 2005). *VBA-perusteet erittäin lyhyesti*. Haettu 09. 05 2022 osoitteesta <https://appro.mit.jyu.fi/doc/tiedonhallinta/vba/>
- Eurofins Expert Services Oy. (27. 08 2020). *Sertifikaatti Nro EUFI29-20000676-C/Fl*. Haettu 26. 04 2022 osoitteesta Eurofins: <https://www.metsawood.com/global/tools/materialarchive/materialarchive/eurofins-sertifikaatti-kerto-lvl-s-beam-q-panel.pdf>
- ExcelVbalsFun. (01. 09 2014). Haettu 03. 03 2022 osoitteesta One Combobox Loads the other in Excel VBA - ExcelVbalsFun: <https://www.youtube.com/watch?v=iVzoOUw7Shk>
- Johansen, K. (01. 09 1949). *Theory of timber connections*. Haettu 20. 04 2022 osoitteesta <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bse-me-001:1949:9::18>
- Kevarinmäki, A. (2005). *Puurakenteiden uusia liitostekniikoita*. Haettu 05. 05 2022 osoitteesta http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2005/nro2/RakMek_38_2_2005_1.pdf
- Kevarinmäki, A. (18. 01 2019). *Puikkoliitosteoria ja vinoruuviliitos*. Haettu 05. 05 2022 osoitteesta https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/23_Puikkoliitosteoria-ja-vinoruuviliitos.pdf
- Kovanen, H. (20. 10 2014). Haettu 10. 03 2022 osoitteesta Mitoitusohjelman rakenne ja käyttöliittymä puurakenteiden liitoksille: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/14242>
- Lahtela, T. (2018). *Vaativien puurakenteiden suunnittely - koulutus 2018*. Haettu 30. 04 2022 osoitteesta https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/30_Puurakenteiden-palomitoitus.pdf
- Metsä Wood. (01. 06 2022). *Naulaliitosten mitoitus*. Noudettu osoitteesta Metsä Wood.
- Palma, P. (12 2016). *Fire behaviour of timber connections*. Haettu 30. 04 2022 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/340529943_Fire_behaviour_of_timber_connections/citation/download

- Pašák, M. (19. 01 2017). *How to create 3D charts and XYZ coordinates in Excel*. Haettu 19. 03 2022 osoitteesta Maclab: <https://www.maclab.sk/clanky/en-3d-graph-excel.php>
- Pitkäkös, N. (01. 01 2018). Haettu 11. 04 2022 osoitteesta Puuliitosten mekaaninen käyttäytyminen ja mitoittamisen perusteet: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25648/Pitkakoski.pdf?sequence=4>
- Puuinfo. (01. 06 2018). *Puutuotteiden ostajan opas 2018*. Haettu 01. 05 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/puutavaraoppaat/puutavaraoppaat-2/>
- Puuinfo. (23. 06 2020). *Naulausopas*. Haettu 05. 05 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/teeseitse/puun-tyosto-ja-kiinnitykset/naulausopas/>
- Puuinfo. (23. 04 2020). *Puun ominaisuudet*. Haettu 01. 05 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/>
- Puuinfo. (ei pvm). *Puurakenteiden palomitoitus*. Haettu 30. 04 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/10-Puurakenteiden-palomitoitus.pdf>
- Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje. (den 22 07 2020). Puuinfo. *Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 2*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 14592:2008+ A1:2012. (13. 08 2012). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. *Puurakenteet. Puikkoliittimet. Vaatimukset, 2*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 1993-1-8. (15. 08 2005). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. *Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC. (16. 06 2014). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. *Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN 1995-1-2 + AC. (21. 12 2004). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. *Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu osa 1-2: yleistä. puurakenteiden palomitoitus, 2*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Skol ry. (06. 10 2016). P2 Naula- ja ruuviliitoksen kestävyys.
- Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. (03 2015). *Liimapuukäsikirja Osa 3*. Haettu 05. 05 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-3.pdf>
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. (2017). *RIL 205-1-2017*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Taanila, A. (27. 09 2013). *EXCEL VBA-OHJELMOINTI*. Haettu 02. 05 2022 osoitteesta <http://myy.haaga-helia.fi/~taaak/vba/vba.pdf>

- Vanerikäsikirja, Puuinfo. (01. 07 2020). *Vanerikäsikirja*. Haettu 15. 03 2022 osoitteesta <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Vanerik%C3%A4sikirja-1.pdf>
- Yli-Koski, R.;& Kevarinmäki, A. (2005). *Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet puurakenteiden liitoksissa*. Haettu 05. 05 2022 osoitteesta <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2005/T2279.pdf>
- Ympäristöministeriö. (20. 12 2016). *Rakenteiden lujuus ja vakaus- Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet*. Haettu 28. 04 2022 osoitteesta <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127>
- Ympäristöministeriö. (20. 12 2016). *Rakenteiden lujuus ja vakaus- Puurakenteet*. Haettu 15. 03 2022 osoitteesta Ympäristöministeriö: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf/7b5d70f7-f18f-66fe-8da1-d467e39c5ffe/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf?t=1603260650690

Liite 1. Laskentapohja. (3)

Björn Winberg	Projekti:	Työnumero:	
	Suunnittelija:		
	Hyväksytty:	Kohde:	Sivumäärä: 1
	Päivämäärä: 9.5.2022	Lisätiedot:	

Liitinmitoituksen laskentapohja puulle Tekijä: Björn Winberg
2022 tehty opinnäytetyö

Laskelmat perustuvat SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC
Version : 2014-06-16 Rajoitus: halkaisija saa olla 1,9 - 30mm
Laskentapohja mitoittaa ainoastaan yhdelle liitimelle. Muista ottaa huomioon nef

Käyttöluokka: 1
Aikaluokka: Keskipitkä kuorma
Esiporaus: Esiporattu
Liitostyyppi: A) Yksileikkeinen liitos

Materiaali 1: Sahatavara C24
Paksuus b_1 : 25mm Korkeus h_1 : 200mm $k_{mod}: 0,8$

Lape lapetta vastaan
Puiden välinen kulma α : 0°
Ulosvetovoima: $F_{ax,Ed}$ 100 N/kpl $F_{ax,Ed}$ ja $F_{ax,Ed}$ voimat käytössä ainoastaan ehdoille
 F_{ed} 50 N/kpl

Materiaali 2: Sahatavara C24
Paksuus b_2 : 50mm Korkeus h_2 : 200mm
 $k_{mod}: 0,8$

Liittimen vinous: Ei vinoliitos

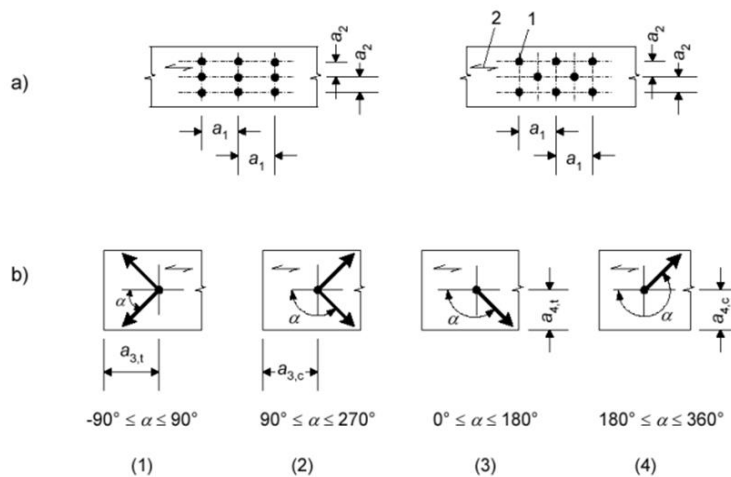
Toimii toistaiseksi ainoastaan naulaliittimien mitoitukseen

Liittimen tiedot:	Naula	Naula	Naula	Naula	Naula
Puikkoliitintyyppi:					
Halkaisija:	d	3,1 mm	3,1 mm	3,1 mm	3,1 mm
Pituus:	l	70,0 mm	70,0 mm	70,0 mm	70,0 mm
Vetolujuus:	f_u	600N/mm ²	600N/mm ²	600N/mm ²	600N/mm ²
Kannanpuoleinen tunki	t1	25,0 mm	25,0 mm	25,0 mm	25,0 mm
kärjenpuoleinen tunki	t2	45,0 mm	45,0 mm	45,0 mm	45,0 mm
Yksittäisen liittimen mitoitussarve	Laske	Laske	Laske	Laske	Laske
Uloskestävyys:	$F_{ax,Rd}$	210 N	210 N	210,3 N	210,3 N
Leikkausvoima:	$F_{v,Rd}$	551 N	551 N	550,6 N	550,6 N
Liittimien määrä:	kpl	10,0 kpl			
tehollinen määrä:	$n_{ef} = n^{kef}$	3,7 kpl			
$n_{ef} * f_{v,Rd} =$	$F_{v,ef,Rd}$	2029,94N			

TULOSTA LYHYT VERSIO

TULOSTA PITKÄ VERSIO

Björn Winberg	Projekti:		Työ num.:
	Suunnittelija:		
	Hyväksytty:	Kohde:	Sivumäärä: 2
	Päivämäärä: 9.5.2022	Lisätiedot:	

**Selite:**

- (1) kuormitettu pää
- (2) kuormittamaton pää
- (3) kuormitettu reuna
- (4) kuormittamaton reuna
- 1 naula
- 2 syysuunta

Kuva 8.7 Liitinvälit sekä liitinten pääty- ja reunaetäisyydet: (a) syysuuntainen liitinväli ja syysuuntaa vastaan kohtisuora liitinväli, (b) liittimien reuna- ja päätyetäisyydet

Lähde: SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC

TULOKSET:		Liitinvälien ja reuna- ja päätyetäisyyksien vähimmäisarvot					
Liitin:	(mm)	a1	a2	a3,t	a3,c	a4,t	a4,c
Materiaali 1		15,5 mm	12,4 mm	37,2 mm	21,7 mm	9,3 mm	9,3 mm
Materiaali 2		15,5 mm	12,4 mm	37,2 mm	21,7 mm	9,3 mm	9,3 mm
Uloskestävyyden mitoitusarvo		Liitin:		Naula	Pyöreä naula	kmod: 0,8	
$F_{ax,Rd}$	210 N			3,1 x 70mm	Sileä naula	Keskipitkä kuorma	
Liittimen mitoitusarvo leikkaustasoa kohti				$t_{puu} = t1 =$	25,0 mm		
				$t_{pen} = t2 =$	45,0 mm		
				$f_u =$	600N/mm ²		
$F_{v,Rd}$	551 N						

Björn Winberg	Projekti:		Työ num.:
	Suunnittelija:		
	Hyväksytty:	Kohde:	Sivumäärä: 3
	Päivämäärä: 9.5.2022	Lisätiedot:	

Naulaliitin:	Naulan muoto:	Pyöreä naula
	Naulan pinta:	Sileä naula
(8.14) Myötömomentti		
$my_{rk} = 0.3 * fu * d ^ 2.6$	my,rk	3410,46 Nmm
Reunapuristuslujuus		
$0.082 * (1 - 0.01 * d) * pk_1$	fh,1,k	27,81 N/mm ²
$0.082 * (1 - 0.01 * d) * pk_2$	fh,2,k	27,81 N/mm ²
Ulosvetolujuuden ominaisarvo		
$(20 * 10 ^ -6) * pk_2 ^ 2$	fax,k	2,45 N
Läpivetolujuuden ominaisarvo		
$70 * 10 ^ -6) * pk_2 ^ 2$	fhead,k	8,58 N
Naulojen ulosvetokestävyyden ominaisarvo		
sileä: $fax_k * d * t_{pen}$	fax,Rk	341,78 N
$kmod * (fax_{rk} / \gamma_M)$	fax,Rd	210,32 N
Ulosvetokestävyyttä rajoittava köysivaikutuksen osuus:		15 %
- Yksileikkeiset liittimet:		
$\frac{f_{k1,k} t_1 d}{f_{k2,k} t_2 d} \quad (a)$	Yksileikkeiset liittimet	
$\frac{f_{k1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{v,Rk}}{4} \quad (b)$	a	2155,30 N/leike
$F_{v,Rk} = \min \left\{ 1,05 \frac{f_{k1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{v,Rk}}{f_{k1,k} d t_1^2} - \beta} \right] + \frac{F_{v,Rk}}{4} \quad (c)$	b	3879,54 N/leike
$1,05 \frac{f_{k1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{v,Rk}}{f_{k1,k} d t_2^2} - \beta} \right] + \frac{F_{v,Rk}}{4} \quad (d)$	c	4894,46 N/leike
$1,15 \frac{2\beta}{1 + \beta} \sqrt{2M_{v,Rk} f_{k1,k} d} + \frac{F_{v,Rk}}{4} \quad (e)$	d	1475,47 N/leike
	e	2454,82 N/leike
	f	894,68 N/leike
	fv_Rk	894,68 N
Liitoksen kestävyyden mitoitusarvo leikkaustasoa kohti	fv,Rd	550,57 N
8.3.3 Samanaikaisesti poikittain ja pitkittäin kuormittuvat naulat, edellytetään seuraavan ehdon toteutuvan		
Sileälle naulalle $(Fax,Ed/Fax,Rd) + (Fv,Ed/Fv,Rd) <_ 1$		
Fax,Ed: 50,00 N Fv,Ed: 100,00 N	Käyttöaste	41,94 %
Fax,Rd: 210,32 N Fv,Rd: 550,57 N		
Etäisyydet	Materiaali 1	Materiaali 2
Syysuunnassa	a1	15,5 mm
Syysuuntaa vastaan kohtisuoraan	a2	12,4 mm
Kuormitettuun päähän	a3,t	37,2 mm
Kuormittamat tomaan päähän	a3,c	21,7 mm
Kuormitettuun reunaan	a4,t	9,3 mm
Kuormittamattomaan reunaan	a4,c	9,3 mm

