



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TARTU KOLLEDŽ

Säästva tehnoloogia õppetool

AUGUSTATUD PUITPRUSSIST JA PUITLAASTPLAADIST
LIITRISTLÕIKEGA PÕRANDATAALA ARVUTUSED

CALCULATIONS FOR FLOOR BEAM WITH CROSS-SECTION COMPOSED OF
PERFORATED TIMBER BEAM AND PARTICLE BOARD

Üliõpilane:

Peeter Toomik

Juhendaja:

Illimar Kalk

Tartu, 2014

Olen koostanud töö iseseisvalt.
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd,
olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja
mujalt pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 083410NAEI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: (allkiri)

Abstract of the Master's Thesis

Tallinn University of Technology Tartu College

Author: Toomik P

Place and date: Tartu, 2014

Supervisor: Kalk I

Language: Estonian

Calculations for Floor Beam With Cross-section Composed of Perforated Timber Beam and Particle Board

79 pages

15 figures

11 tables

7 appendixes

1 binding

Timber is a widely used construction material due to its good weight to strength ratio, easy tractability, and environmental compatibility. Floor beams that are constructed of gluing a particle board on to timber beams are commonly used.

This Master's thesis studies the influence of gluing a particle board on to a timber beam. Thesis also analyzes different approaches to evaluating the effects of holes in timber beams and how to take into account the carrying capacity of the particle board when evaluating the strength of a floor panel that consists of timber beam with hole and glued particle board.

The carrying capacity of the floor panel is calculated using reduced section method. In addition to bending stresses, tension stresses parallel to grain and shear stresses, tension stresses perpendicular to grain that occur in the vicinity of the hole are checked using methods described in German building standard DIN 1052:2008-12, and in AITC Technical Note 19 used in the United States of America. Limitations to the placement and geometry of the hole are also analyzed.

Gluing a particle board on to a timber beam makes the carrying capacity of the beam significantly higher compared to not gluing the particle board. The same effects are seen when the timber beam is perforated. German building standard is stricter when it comes to the limitations to the placement of the hole but DIN 1052 allows more holes when it comes to the tension stresses near the hole. The guidelines used in the US are more strict when examining tension stresses perpendicular to grain near the hole. It is important to note that guidelines described in handbooks and standards are for glued laminated timber beams, which are stronger. Drilling holes through beams should be the last resort in any case.

Key-words: hole, timber beam, particle board, tension, deflection

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. Puit ehitusmaterjalina	7
1.1. Puidu ehitus.....	7
1.2. Puidu tugevus.....	7
2. Arvutusjuhendid ja taustauuringud.....	10
2.1. Projekteerimisjuhendite ülevaade	10
2.1.1. Pingete jaotus augu ümber.....	10
2.1.2. Weibulli nõrgima lüli teooria	11
2.1.3. Ameerika Ühendriikide juhend aukudega talade arvutamiseks	12
2.1.4. Saksamaa ehitusstandard DIN 1052:2008-12	15
2.1.5. Rootsi projekteerimisjuhend aukudega talade tugevuskontrolliks	19
2.1.6. Eurokoodeks 5	22
2.2. Puuritud aukude mõju talade paindetugevusele.....	23
2.3. Nelinurksete aukudega talade tugevuskatsed.....	23
2.4. Projekteerimisjuhendite kokkuvõte	25
3. Materjal ja meetodika.....	27
3.1. Nõrgestusteta ristkülikristlõikega tala arvutus.....	27
3.2. Talast ja puitlaasplaadist koosneva nõrgestusteta liitristlõike arvutusmeetod.....	30
3.3. Auguga liitristlõike tugevuse kontrollimine	35
3.4. Aukudega liitristlõikega talade kirjeldus	36
3.5. Arvutusprogrammid.....	40
4. Tulemused ja analüüs	41
4.1. Ristkülikristlõikega puittala ja liimitud plaadiga liitristlõikega tala arvutustulemuste võrdlus.....	41
4.2. Auguga tala läbipaine	42
4.3. Aukudega tala tugevuse analüüs.....	43

4.3.1.	Saksamaa ehitusstandardis aukude asetusele esitatavate nõuete analüüs.....	43
4.3.2.	Ameerika Ühendriikide juhendis aukude asetusele esitatavate nõuete analüüs	44
4.3.3.	Painde- ja tõmbepingete analüüs erinevate üksikute aukude ning kombinatsioonide korral.....	45
KOKKUVÕTE		53
Kasutatud kirjandus		55
LISAD		57
LISA 1.	Puittalast ja puitlaastplaadist koosneva liitristlõike ning plaadita ristkülikristlõike kandevõime ja läbipainde arvutused	58
LISA 2.	Auguga talast ja plaadist koosneva liitristlõike tugevusarvutus redutseeritud ristlõike meetodil 80 mm auguga tala tsentris näitel	67
LISA 3.	Tõmbepingete kontroll vastavalt DIN 1052:2008-12 80 mm auguga tala tsentris näitel	72
LISA 4.	Tõmbepingete kontroll vastavalt Weibulli nõrgima lüli teorial põhinevale meetodile 80 mm auguga tala tsentris näitel	74
LISA 6.	80 mm läbimõõduga tala tsentris asetseva auguga tala läbipaine vastavalt programmile AxisVM 11	76
LISA 7.	Augukombinatsiooniga K-3 tala läbipaine vastavalt programmile AxisVM 11	78

SISSEJUHATUS

Puit on ehituses laialdaselt kasutust leidv ehitusmaterjal ja Eesti aladel on seda edukalt kasutatud sajandeid. Puidust on võimalik valmistada erinevaid tooteid vastupidavatest kandekonstruktsioonidest kuni iluliistudeni. Saematerjalist puitpruss on suhteliselt kerge, lihtsalt töödeldav ja ökoloogiline ehitusmaterjal.

Puidul on muude konstruktsioonimaterjalide ees mitmed eelised. Puitu on soodne toota, puiduvarud on taastuvad, sellel on suhteliselt hea kaalu ja tugevuse suhe, puit sobitub hästi keskkonda ning on esteetilise välimusega.

Magistritöö teema valik toimus koostöös Kodumaja AS-ga. Nende huvi oli uurida, kuidas mõjutab saematerjalist põrandatala külge puitlaastplaadi liimimine tala kandevõimet ja läbipainet võrreldes olukorraga, kus puitlaastplaat toetub vabalt talale. Lisaks sooviti teada, mil määral mõjutab puitlaastplaadi all olevasse talasse aukude puurimine tala kandevõimet ja läbipainet. Huvipakkuvad augud on läbimõõtudega 120, 80 ja 40 mm. Need asetsevad talas üksikuna või mitmest august koosnevate kombinatsioonidena.

Uute hoonete puhul on oluline saavutada võimalikult efektiivne ruumikasutus. Üks viis selle saavutamiseks on vähendada hoone konstruktsioonide mõõtmeid. Selle asemel, et vedada torud ja juhtmed vahelaetalade alt, on need võimalik viia läbi taladesse puuritud aukude. Sellega väheneb põrandakonstruktsiooni kõrgus ja saab suurendada ruumi kõrgust.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks on arvutada, mil määral parandab talale puitlaastplaadi liimimine tala kandevõimet ja läbipainet võrreldes olukorraga, kus puitlaastplaat ja tala ei tööta koos. Teine eesmärk on kontrollida erinevate üksikute aukudega ja aukude kombinatsioonidega puittala kandevõimet ning läbipainet. Kolmas eesmärk on pakkuda välja lahendus puitlaastplaadi mõju arvestamiseks auguga tala kandevõime ja läbipainde arvutamisel ning võrrelda väljapakutud meetodiga saadud tulemusi ilma plaadita auguga tala arvutustega.

Magistritöö on jaotatud nelja peatükki. Esimeses peatükis kirjeldatakse puidu omadusi ja materjali tugevust mõjutavaid tegureid.

Teises peatükis tutvustatakse erinevaid arvutusmeetodeid auguga tala tugevuse analüüsimiseks ja nende aluseid. Lähemalt vaadeldakse Saksamaa ehitusstandardis DIN 1052:2008-12 kirjeldatud meetodit, Rootsi liimpuidu käsiraamatus välja pakutud juhendeid ja Weibulli nõrgima lüli teoorial põhinevat arvutusviisi. Arvutusjuhendid on mõeldud kasutamiseks liimpuidust talade korral, analüüsitakse erinevate meetodite eeliseid ja puuduseid ning nende sobivust saepuidust talade arvutamiseks.

Magistritöö kolmandas peatükis kirjeldatakse ilma plaadita ristkülikristlõike ja puitlaastplaadist ning puittalast koosneva liitristlõike kandevõime ja läbipainde arvutamise aluseid. Puittala tugevusklassiga C24 laius on 45 mm, kõrgus 245 mm, sildeava 3910 mm ja talad asetsevad 600 mm sammuga. Talade peale on liimitud 22 mm paksune puitlaastplaat. Peatükis kirjeldatakse auguga liitristlõike tugevusarvutuse aluseid ja pakutakse välja võimalik lahendus puitlaastplaadi mõju arvestamiseks auguga tala kandevõimele ja analüüsitakse meetodi usaldusväärsust. Lisaks on kirjeldatud vaatluse all olevaid aukudega talade tüüpe.

Neljandas peatükis tuuakse välja arvutustulemused ja analüüsitakse neid. Ristikiudu tõmbepinged arvutatakse Saksamaa ehitusstandardis DIN 1052:2008-12 välja toodud meetodiga ja Weibulli nõrgima lüli teoorial põhineva arvutusmeetodiga. Lisaks analüüsitakse arvutustulemusi.

1. PUIT EHTUSMATERJALINA

1.1. Puidu ehitus

Ehituskonstruksioonideks kasutatakse peamiselt okaspuitu: põhiliselt pika sirge tüvega, suhteliselt väheste looduslike vigadega, küllaldase tugevuse ning levikuga kuuske ja mändi.

Puit koosneb põhiliselt lineaarse struktuuriga tugevast tselluloosist ja ruumilise struktuuriga, kuid väheste põiksidemete tõttu väikese tugevusega ligniinist. (Allikas, 1985) Tselluloos moodustab 40...50%, hemitselluloos 25...35% ja ligniin 20...30% okaspuu puidust. Vähesel määral sisaldab puit ka rasvu, vaiku jm. Puidu põhimass koosneb orgaanilistest ühenditest, mille koostisse kuulub 50% süsinikku, 43% hapnikku, 6% vesinikku ja 0,1% lämmastikku. Lisaks orgaanilistele ühenditele leidub puidu keemilises koostises tühine kogus mineraalühendeid, mis põlemisel moodustavad tuha. Eelpool loetletud algkomponendid asuvad glükoosimolekulides, mis omakorda on ühinenud pikkadeks molekulketideks, moodustades nii tselluloosi ja hemitselluloosi. (Saarman, et al., 2006)

1.2. Puidu tugevus

Konstruksioonipuidu tugevust mõjutavad enim puidu looduslikud vead, aukudest ja sisselõigetest põhjustatud pingekontsentratsioonid, niiskus, temperatuur ning mahumass. (Allikas, 1985)

Puitmaterjali tugevus on seotud niiskuse ja temperatuuriga. Vee hulga suurenemisel väheneb eriti puidu painde- ja survetugevus, vähem nihke- ja tõmbetugevus. Kõrgematel temperatuuridel on puidu tugevus väiksem. Temperatuuri tõustes suurenevad puidu deformatsioonid. Samaaegselt tekivad suurte okste juures kuivamisest põhjustatud lisapinged. (Just, 2012)

Okaspuidu mahust enam kui 95% moodustavad trahheiidid. Trahheiidid on 2...5 mm pikkused kitsad koerakud. Trahheiidid annavad puidule mehhaanilise tugevuse. (Allikas,

1985) Puit on rakkude eri suuruse ning rakuseinte orienteeritud ehituse tõttu väga anisotroopne materjal. Puidul on kolmes omavahel risti olevas suunas väga erinevad omadused. Kõige tugevam on puit jõu mõjumisel pikikiudu, radiaal- ja tangentsiaalsuundades on puit palju nõrgem. (Kretschmann, 2010)

Puit avaldab vastupanu välistele jõududele, mis püüavad muuta puidu kuju ja mõõtusi ning samaaegselt puitu ka purustada. Väliste jõudude toimest tekkivaid sisejõudusid materjalis nimetatakse pingeteks. Väliste jõudude kasvamisel materjalis pinged kasvavad seni, kuni ületavad materjali osakeste sidestustugevuse piiri ning materjal puruneb. Elastsuse piiriks nimetatakse suurimat pinget, mille katkemisel materjali mõõdud ja kuju veel taastuvad. Tugevuse piiriks nimetatakse materjali vastupanu suurust vahetult enne purunemist. Purustavaks jõuks nimetatakse jõudu, mis viib materjali purunemisele. (Saarman, et al., 2006)

Puitkonstruktsioonile rakenduva koormuse suunast sõltuvalt võivad materjalis tekkida erinevad pinged. Erinevatele pingetele on ka vastavad erinevad tugevused. Sagedasemad tugevused on tõmbe-, surve-, painde- ja nihketugevus. (Saarman, et al., 2006)

Elastsus on materjali keha võime tõmbejõudude mõjul deformeeruda, kusjuures jõudude lakkamisel taastub keha esialgne kuju. Puidu elastsus sõltub puuliigist, niiskuse sisaldusest, tihedusest ja koormuse suunast kiudude suhtes. Puidu elastsusmoodul on pikikiudu koormamise korral 7000...12000 N/mm², ristikiudu aga kõigest 200...500 N/mm². Mida suurem on materjali elastsusmoodul, seda väiksemad on tekkivad deformatsioonid. (Saarman, et al., 2006) Kui materjalile mõjuvad ainult nihkepinged, siis kasutatakse materjali jäikuse iseloomustamiseks terminit nihkeelastsusmoodul. Okaspuidu nihkeelastsusmoodul on pikikiudu 350...450 N/mm². (Kretschmann, 2010)

Defektideta puidu tõmbetugevus on teiste tugevuse liikidega võrreldes suurim pikikiudu. Vigadeta okaspuidu pikikiudu tõmbetugevus on survetugevusest peaaegu topelt suurem. Ristikiudu on see aga murdosa pikisuuna tugevusest. Tõmbetugevust mõjutab eriti puidu kaldkiulisus. Tugevat kaldkiulisust esineb alati ümber oksa. 15° kiusuuna muutumise korral langeb tõmbetugevus umbes poole võrra. (Saarman, et al., 2006) Puidu tõmbetugevus on kiudude suunas keskmiselt 100 MPa. Tõmbetugevust vähendavad

puitmaterjali looduslikud vead, mis põhjustavad ristlõikes sisemise ekstsentrilisuse ja pinge kontsentratsiooni. (Allikas, 1985)

Puidu survetugevus on pikikiudu keskmiselt 40 N/mm². Puidu looduslike vigade mõju survetugevusele on võrreldes tõmbetugevusega väiksem. (Allikas, 1985) Survetugevus on ristikiudu 5...6 korda väiksem kui pikikiudu. (Saarman, et al., 2006)

Paindetugevus on kombinatsioon tõmbe- ja survetugevusest. Kahest otsast toetatud tala koormamisel keskelt välisjõuga toimub tala ülemise pinna kokkusurumine ning alumise pinna venitamine pikemaks. Vaadates ristlõike pingediagrammi tala keskel, on näha, et diagrammi ülemise poole survepingest alumise osa tõmbepingeni läbib diagramm nulljoone umbes palgi poolel kõrgusel. Tala keskkõrgusel on neutraaltsoon, mis mõõdukate koormuste rakendamisel jääb pingevabaks. (Saarman, et al., 2006) Materjali defektid, eriti tõmbetsoonis asetsevad oksad, vähendavad painutatud elemendi tugevust. Oksaläbimõõdu puhul 1/3 elemendi küljepikkusest väheneb paindetugevus õhukeses saematerjalis 0,5...0,45 ja palkides ning prussides 0,6...0,8 standardse katsekeha tugevuseni. (Allikas, 1985)

Kui välisjõud mõjutavad keha pindasid, tekivad nihkepinged. Välised jõud nihutavad kihte teineteise suhtes paralleelselt. Puidus esinevad praod ja lõhed vähendavad oluliselt nihketugevust. Nihketugevus on oluline puitühenduste arvutamisel. Erinevate ühenduste efektiivsust võrreldakse nende kandevõime ja vajaliku kokkupuutepinna suhtega. (Saarman, et al., 2006)

Puitlaastplaadid koosnevad puitlaastudest ja liimist, mis on kõrge temperatuuri ja surve all kokku pressitud. Laastplaate toodetakse kasutamiseks tislériplaatidena, sein- ja põrandaplaadidena ning konstruktsiooniplaadidena. Puitlaastplaadid on kestuskoormuse ja niiskuse suhtes tundlikumad kui massiivpuit. Puitlaastplaadi omadused olenevad kasutatavast liimist ja laastude kujust ning orientatsioonist. (Saarman, et al., 2006)

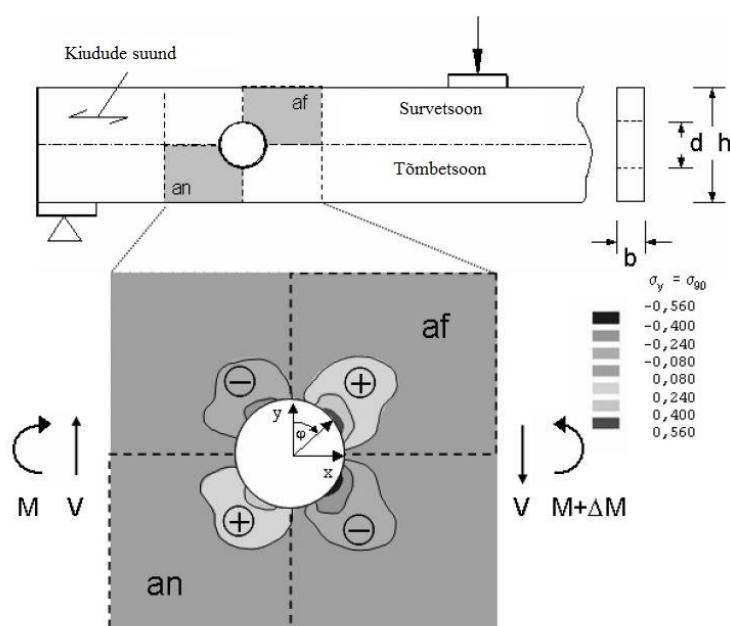
2. ARVUTUSJUHENDID JA TAUSTAURINGUD

2.1. Projekteerimisjuhendite ülevaade

Ümmarguste aukudega tala tugevuse arvutamist käsitletakse ehitusstandardites ja arvutusmeetodites väga erinevalt. Olemasolevad projekteerimisjuhendid on põhiliselt kasutamiseks liimpuidust talade korral. Järgnevalt on kirjeldatud Rootsi liimpuidu käsiraamatu kahte arvutusmeetodit, Saksamaa ehitusstandardi lähenemist auguga tala arvutamisele ja Ameerika Ühendriikides kasutusel olevas liimpuidust talade arvutamisjuhendis kirjeldatud arvutusmeetodit.

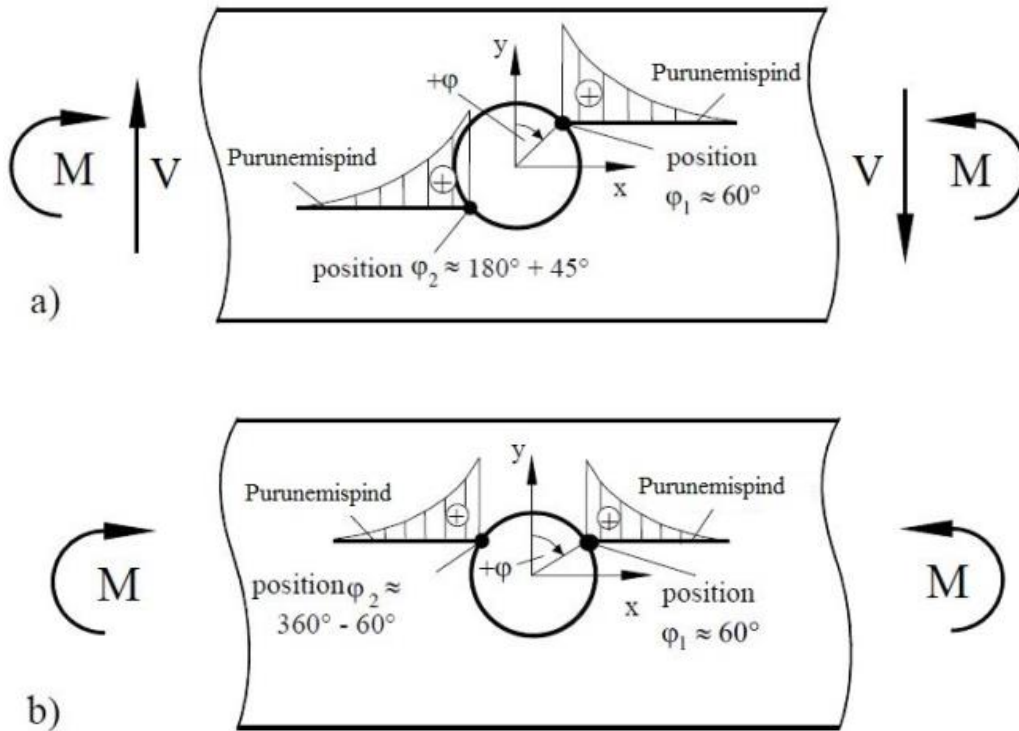
2.1.1. Pingete jaotus augu ümber

Pingete jaotus augu läheduses oleneb augu kujust, suurusest, asukohast talas ja auguga ristlõikes mõjuvatest jõududest. Auk segab normaalset pingete jaotust talas ja põhjustab peamiselt tõmbe- ja survepingeid ristikiudu. Väga suure augu korral muutub ka tavaliste paindepingete jaotus talas. Augule, mis paikneb tala piirkonnas, kus mõjuvad nihkejõud ja paindemoment, vastab joonisel 2.1 kujutatud ristikiudu tekkivate pingete jaotuse skeem. Jooniselt on näha, et tekivad kaks vastastikust ristikiudu tõmbepingetega piirkonda *af* ja *an*. Samuti tekivad ristikiudu survepingetega piirkonnad. (Aicher, et al., 2008)



Joonis 2.1. Ristikiudu pingete jaotus augu ümbruses (Aicher, et al., 2008)

Pingete jaotus augu ümbruses muutub paindemomendi ja nihkepinge suhte muutudes. Väikese suhte puhul $M/V \lesssim 10$ on pingete jaotus sarnane joonisel 2.1 või joonisel 2.2 a toodud jaotusele. Suurema suhte puhul $M/V \gtrsim 20$ on pingete jaotus sarnane joonisel 2.2 b toodud skeemile. (Aicher, et al., 2008)



Joonis 2.2. Ristikiudu tõmbepingete jaotus augu ümbruses erinevate paindemomendi ja lõikejõu suhete puhul. a) $M/V \lesssim 10$; b) $M/V \gtrsim 20$ (Aicher, et al., 2004)

2.1.2. Weibulli nõrgima lüli teooria

Weibulli nõrgima lüli teooria võimaldab tugevusarvutustes kasutada püsiseisundi tõenäosuslikku arvutusmeetodit. See tähendab, et materjali purunemise tõenäosuse teatud materjali mahu ja teatud pinge korral saab leida, kui on teada materjali tugevuse suurus ja selle jaotus. Puidu ristikiudu tugevus on seotud pingestatunud ala suurusega. Mida suurem on materjali pingestatunud ala ruumala, seda suurem on tõenäosus, et seal esineb ohtlikke defekte, mis vähendavad materjali tugevust. Antud teooria sobib puidu tugevuse arvutamiseks. Puidul on aastarõngastest, oksakohtadest ja teistest defektidest tingituna väga heterogeensed omadused. Eeldatakse, et materjal on ideaalselt habras, sest ristikiudu tõmbepingetest ja kiududega paralleelsetest nihkepingetest tingitud purunemisel on

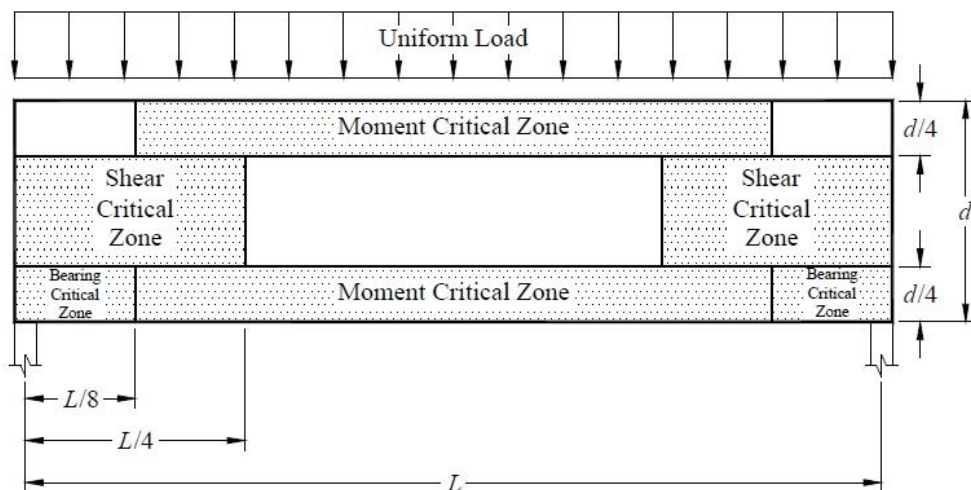
tavaliselt habras kulgemine, kuigi materjal tervikuna ei ole ideaalselt habras. Teooria tundub sobivat ristikiudu tõmbepingetest tingitud purunemise analüüsimiseks. Teooria puudus on, et seda ei saa rakendada konstruktsioonelementidele, millel esinevad praost või teravast nurgast tingitud pingsingulaarsused. Teooria põhieeldus on, et üldine purunemine esineb **siis**, kui nõrgima lüli tugevus ületatakse. (Danielsson, 2009)

2.1.3. Ameerika Ühendriikide juhend aukudega talade arvutamiseks

Juhend on välja töötatud liimpuidust talade jaoks. Sissejuhatuses märgitakse, et aukude tegemist taladesse tuleb võimalusel vältida, sest augud vähendavad tala ristlõiget, mis võtab vastu talas tekkivad pinged. Lisaks tekitavad augud pingekontsentratsioone ja tõmbepingeid ristikiudu. (AITC, 2012)

Antud juhend lubab teha horisontaalseid auke ilma tugevusarvutusteta, kui need vastavad teatud tingimustele. Puuritud augud on lubatud, kui need asuvad ühtlaselt koormatud lihttala mittekriitilistes alades (vt joonis 2.3) ning vastavad järgmistele tingimustele:

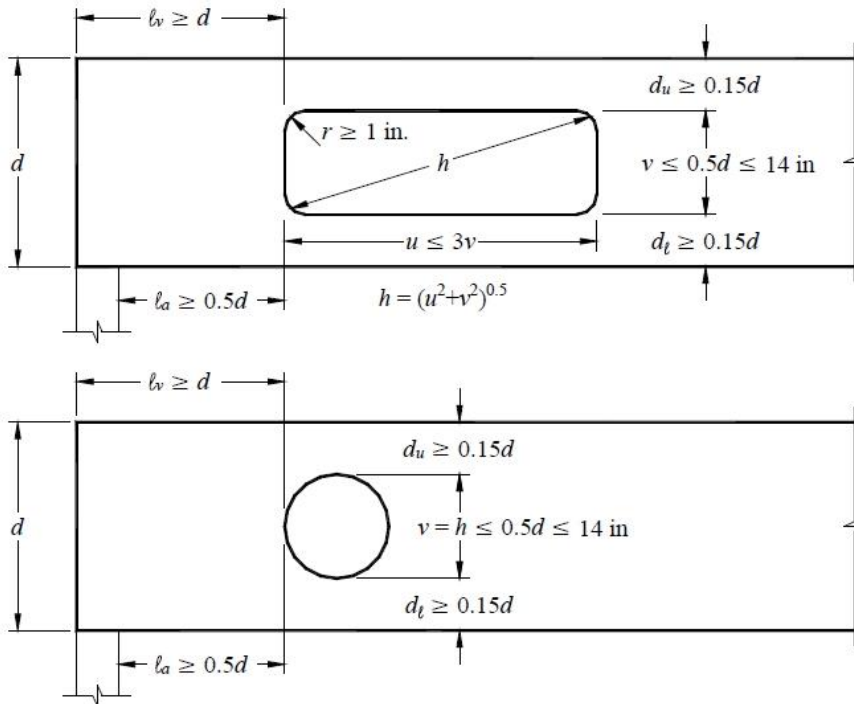
- augu serv peab olema vähemalt neljakordse augu läbimõõdu kaugusel tala üla- või alaservast ning vähemalt kaheksakordse augu läbimõõdu kaugusel tala otsast;
- augu suurus on maksimaalselt 38 mm või 1/10 tala kõrgusest;
- lubatud on üks auk 152 cm tala kohta (antud tingimus ei kehti aukude omavahelisele kaugusele);
- aukude omavaheline kaugus peab olema suurem kui kaheksakordne augu läbimõõt, kaugust arvestatakse kõrvutiolevatest aukudest suurima läbimõõduga augu läbimõõdu järgi.



Joonis 2.3. Ühtlaselt koormatud lihttala kriitilised alad. *Moment critical zone* – paindemomendist tingitud kriitiline ala; *Shear critical zone* – lõikejõust tingitud kriitiline ala; *Bearing critical zone* – toest tingitud kriitiline ala (AITC, 2012)

Suuremate ning kriitilistes alades olevate aukude mõju tala tugevusele tuleb kontrollida. Auguga tala arvutamisel tuleb eraldi kontrollida paindekandevõimet, nihkekandevõimet ja pingekontsentratsioone. Augule kehtestatud piirangud on järgmised:

- punktkoormusi augu kohal tuleb vältida;
- augud peavad olema ümmargused või kumerdatud nurkadega nelinurksed (vt joonis 2.4);
- kaugus augu servast tala sildeava servani l_a peab olema suurem või võrdne kui tala pool kõrgust $0,5d$ (vt joonis 2.4);
- kaugus augu servast tala otsani l_v peab olema suurem või võrdne kui tala kõrgus d (vt joonis 2.4);
- nelinurksete aukude nurgaraadius r peab olema suurem või võrdne kui 25,4 mm (1 toll) (vt joonis 2.4);
- augu kõrgus v peab olema väiksem või võrdne kui $0,5d$, suurus v ei tohi olla suurem kui 355,6 mm (14 tolli) (vt joonis 2.4);
- kaugus augu ülaservast tala ülaserava d_u ja kaugus augu alaservast tala alaserava d_l peab olema suurem või võrdne kui $0,15h$ (vt joonis 2.4);
- mitme augu korral peab aukudevaheline kaugus olema suurem või võrdne kui suurim suurus väärtustest 305 mm või tala kõrgus d või neljakordne augu läbimõõt.



Joonis 2.4. Augu tähistus vastavalt Ameerika Ühendriikide arvutusjuhendile (AITC, 2012)

Pingekonstruktsioonide arvutusmeetod põhineb Aicheri ja Höfflini välja töötatud Weibulli nõrgima lüli meetodil. Maksimaalne lõikejõust ja paindemomendist põhjustatud arvutuslik tõmbepinge ristikiudu augu ääres $\sigma_{t,90,d}$ peab olema väiksem kui efektiivne arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu $f_{t,90,eff,d}$. Tagatud peab olema tingimus

$$\sigma_{t,90,d} \leq f_{t,90,eff,d} \quad (2.1)$$

Ristikiudu tõmbepinge arvutatakse valemiga

$$\sigma_{t,90,d} = \sigma_{t,V,d} + \sigma_{t,M,d}, \quad (2.2)$$

kus $\sigma_{t,V,d}$ on põikjõust tingitud ristikiudu tõmbepinge,

$\sigma_{t,M,d}$ on paindemomendist tingitud ristikiudu tõmbepinge.

Põikjõust ja paindemomendist tingitud ristikiudu tõmbepinged arvutatakse vastavalt valemitega

$$\sigma_{t,V,d} = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{b * d} * \left(1,23 + 0,82 * \frac{h}{d} \right) \quad (2.3)$$

ja

$$\sigma_{t,M,d} = \frac{0,6 * M_d}{b * d^2} * \frac{h}{d'} \quad (2.4)$$

kus V_d on lõikejõud auguga ristlõikes,

M_d on paindemoment auguga ristlõikes,

b on tala laius,
 d on tala kõrgus,
 h on augu läbimõõt.

Efektiivne arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu leitakse valemiga

$$f_{t,90,eff,d} = f_{t,90,d} * k_{size} * k_{dis}, \quad (2.5)$$

kus $f_{t,90,d}$ puidu arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu,

k_{size} tala suuruse mõju arvestav tegur,

k_{dis} on pingete jaotust arvestav tegur, mille väärtus on vahemikus $k_{dis} \approx 1,6 \dots 2,0$.

Pingete jaotust arvestava teguri väärtus oleneb paindemomendi ja põikjõu suhtest. Alumine piirmäär vastab väiksele paindemomendi ja põikjõu suhtele ning ülemine piirmäär suurele suhtele. Enamike sirgete talade puhul, kus auk on pigem tala keskosas ning põikjõu väärtus nulli lähedal, sobib väärtus $k_{dis} \approx 1,8$. (Aicher, et al., 2008)

Tala suuruse mõju arvestav tegur leitakse valemiga

$$k_{size} = \left(\frac{\Omega_0}{\Omega}\right)^{0,2}, \quad (2.6)$$

kus Ω_0 on referents maht, $\Omega_0 = 0,01 \text{ mm}^3$,

Ω on tegelikult pingestatud maht, $\Omega = 0,19 * b * d^2 [\text{mm}^3]$.

Mahutegurit k_{size} kasutatakse liim- ja spoonliimpuidust talade korral. Saepuidust talade korral on tegur $k_{size} = 1$. (Eurokoodeks 5, 2009)

2.1.4. Saksamaa ehitusstandard DIN 1052:2008-12

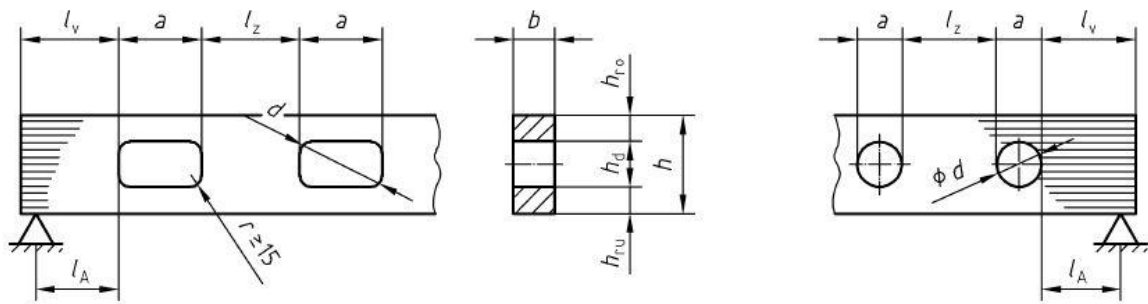
Saksamaa ehitusstandardi DIN 1052:2008-12 järgi on auk avaus, mille läbimõõt $d \geq 50 \text{ mm}$. Augu paiknemisele talas on esitatud järgmised nõudmised (vt tabel 2.1 ja joonis 2.5):

- kaugus augu servast tala otsani peab olema suurem või võrdne kui tala kõrgus h ;
- kahe augu korral peab aukudevaheline kaugus olema suurem või võrdne kui $1,5h$, kuid vähemalt 300 mm;
- kaugus augu servast tala toe keskpunktini l_A peab olema suurem või võrdne kui $h/2$;

- august üles- ja allapoole jääva puiduosa kõrgus h_{ro} ja h_{ru} peab olema suurem või võrdne kui $0,35h$;
- ristkülikulise augu pikkus a või ümmarguse augu läbimõõt peab olema väiksem või võrdne kui $0,4h$;
- augu kõrgus h_d peab olema väiksem või võrdne kui $0,15h$.

Tabel 2.1. Augu paiknemisele talas esitatavad nõuded (DIN 1052:2008-12, 2008)

$l_v \geq h$	$l_z \geq 1,5h$, kuid vähemalt 300 mm	$l_A \geq h/2$	$h_{ro(ru)} \geq 0,35h$	$a \leq 0,4h$	$h_d \leq 0,15h$
--------------	---	----------------	-------------------------	---------------	------------------



Joonis 2.5. Augu parameetrite tähistus Saksamaa ehitusstandardis (DIN 1052:2008-12, 2008)

Auke, mis vastavad ülaltoodud nõuetele, võib kasutada kasutusklassides 1 ja 2. Kasutusklass 3 jaoks peab auku tugevdama. Tõmbejõus tekkivate pingete jaotus on piltlikult kirjeldatud joonisel 2.6. Auguga ristlõikes peab olema rahuldatud järgmine tingimus:

$$\frac{F_{t,90,d}}{0,5 * l_{t,90} * b * k_{t,90} * f_{t,90,d}} \leq 1, \quad (2.7)$$

kus $F_{t,90,d}$ on resultantjõud,

$l_{t,90}$ on ristikiudu tõmbepingete pingekolmnurga eeldatav pikkus,

b on tala laius,

$k_{t,90}$ on arvutustegur,

$f_{t,90,d}$ on puidu arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu.

Pingekolmnurga eeldatav pikkus leitakse ümmarguse augu korral valemiga

$$l_{t,90} = 0,353 * h_d + 0,5 * h \quad (2.8)$$

ja ristkülikulise augu korral valemiga

$$l_{t,90} = 0,5 * (h_d + h), \quad (2.9)$$

kus h_d on augu kõrgus.

Tegur $k_{t,90}$ leitakse valemiga

$$k_{t,90} = \min\{1; (450/h)^{0,5}\}, \quad (2.10)$$

kus tala kõrgus h on millimeetrites.

Tegur $k_{t,90}$ suurendab kõrgemate kui 450 mm talade puhul auguga ristlõikes tekkivaid pingeid.

Resultantjõud $F_{t,90,d}$ koosneb kahest liidetavast – $F_{t,V,d}$, mis arvestab löikejõudu auguga ristlõikes ja $F_{t,M,d}$, mis arvestab paindemomendi suurust auguga ristlõikes. $F_{t,90,d}$ leitakse valemiga

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d} \quad (2.11)$$

Löikejõudu ja paindemomendi arvestavad osad leitakse vastavalt valemitega

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d * h_d}{4 * h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) \quad (2.12)$$

ja

$$F_{t,M,d} = 0,008 \frac{M_d}{h_r}, \quad (2.13)$$

kus V_d on löikejõud auguga ristlõikes,

M_d on paindemoment auguga ristlõikes,

h_r on tegur, mis arvestab augu paiknemist tala kõrguse suhtes.

Tegur h_r leitakse ümmarguse augu korral valemiga

$$h_r = \min\{h_{ro} + 0,15h_d; h_{ru} + 0,15h_d\} \quad (2.14)$$

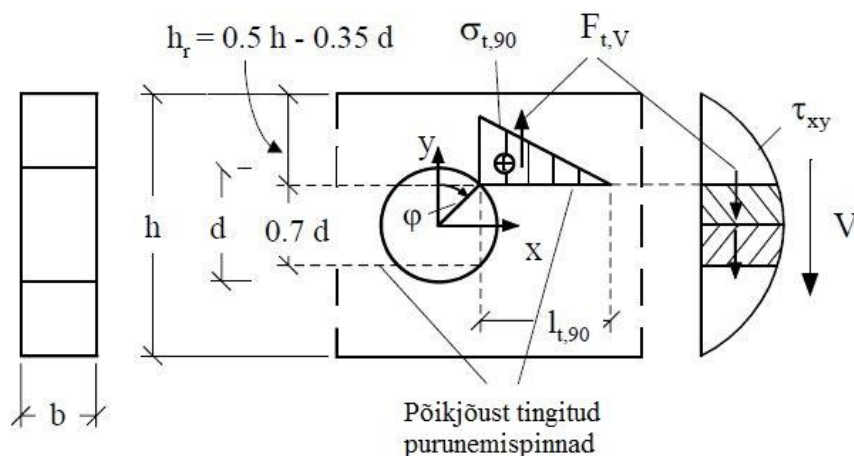
ja ristkülikulise augu korral

$$h_r = \min\{h_{ro}; h_{ru}\}, \quad (2.15)$$

kus h_{ro} on augu kohale jääv tala kõrgus,

h_{ru} augu alla jääv tala kõrgus.

Valemis 2.12 võib ümmarguste aukude korral kasutada tala kõrguse h_d asemel tala kõrgust $0,7h_d$.



Joonis 2.6. Põikjõust tingitud ristikiudu pinge jaotus augu serval vastavalt standardile DIN 1052:2008-12 (Aicher, et al., 2004)

2004. aastal välja tulnud Saksamaa ehitusstandardiga DIN 1052:2004-08 võrreldes on aukude paiknemisele talas esitatavad nõuded muutunud. Eelmises standardis olid paiknemisele esitatavad nõuded järgmised (vt tabel 2.2 ja joonis 2.5):

- kaugus augu servast tala otsani peab olema suurem või võrdne kui tala kõrgus h ;
- kahe augu korral peab aukudevaheline kaugus olema suurem või võrdne kui h , kuid vähemalt 300 mm;
- kaugus augu servast tala toe keskpunktini peab olema suurem või võrdne kui $h/2$;
- august üles- ja allapoole jääva puiduosa kõrgus h_{ro} ja h_{ru} peab olema suurem või võrdne kui $0,25h$;
- ristkülikulise augu pikkus a või ümmarguse augu läbimõõd peab olema väiksem või võrdne kui h ;
- augu kõrgus h_d peab olema väiksem või võrdne kui $0,4h$.

Tabel 2.2. Augu paiknemisele talas esitatavad nõuded (DIN 1052:2004-08, 2004)

$l_v \geq h$	$l_z \geq h$, kuid vähemalt 300 mm	$l_A \geq h/2$	$h_{ro(ru)} \geq 0,25h$	$a \leq h$	$h_d \leq 0,4h$
--------------	--	----------------	-------------------------	------------	-----------------

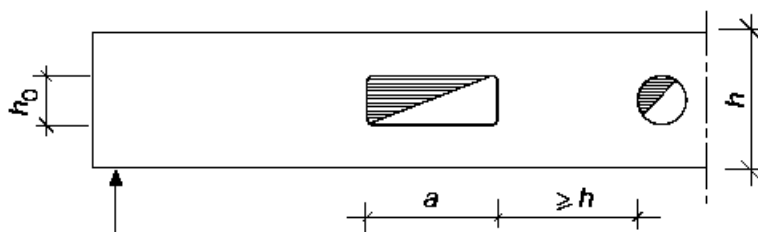
2008. aastal ilmunud Saksamaa ehitusstandardisse on arvutuste poole pealt juurde lisandunud tegur $k_{t,90}$, mis vähendab tekkivaid pingeid, kui tala on kõrgem kui 450 mm. Muus arvutuste osas on standardid samad.

Muutuste tulemuseks on karmimad nõuded aukude paiknemisele talas. Kahe augu vaheline lubatud kaugus l_z on tala kõrgusest h muutunud 1,5-kordseks tala kõrguseks. Augu kohale ja augu alla lubatud tala kõrgus $h_{ro(ru)}$ peab uue standardi järgi olema $0,25h$, mitte enam $0,35h$. Augu lubatud kõrgus h_d on muutunud $0,15h$ -st $0,4h$ -ni.

2.1.5. Rootsi projekteerimisjuhend aukudega talade tugevuskontrolliks

Rootsi *Limträhandbok* (Liimpuidu käsiraamat) ei ole Rootsi ametlik normdokument vaid juhend liimpuittalade arvutamiseks. Esitatud on kaks võimalikku meetodit aukudega liimpuittala arvutamiseks. Esimene on empiiriline lähenemine ja teine vaatleb auguga tala kui toel sisselõikega tala.

Mõlema meetodi jaoks on samad eeskirjad augu paiknemisele ja suurusele. Esmajoones tuleb võimalusel aukude tegemist talasse vältida. Kui auku vältida ei ole võimalik, tuleb auk paigutada nii, et augu tšenter asuks tala nulljoonega kohakuti. Kõikumine kuni 10% tala kõrgusest on vastuvõetav. Augu kõrgus h_o ei tohi olla suurem kui $0,5h$ ning augu pikkus a ei tohi ületada $3h_o$. Kui kaks auku on paigutatud samasse talasse, peab nendevaheline puhasvahe olema vähemalt tala kõrgus h . (vt joonis 2.7) Nelinurkse augu nurkade raadiused peavad olema vähemalt 25 mm. Tuleb kasutada meetmeid tala erinevast niiskusesisaldusest põhjustatud augu pinna pragunemise takistamiseks. (Limträhandbok, 2008)



Joonis 2.7. Augu tähistamine vastavalt Rootsi liimpuidu käsiraamatule (Limträhandbok, 2008)

Empiiriline meetod (Limträhandbok, 2008)

Empiirilise meetodi puhul vaadeldakse paindemomendi ja põikjõu mõju eraldi. Talas tekkivad nihkepinged τ ei tohi olla suuremad kui tala vähendatud nihketugevus $f_{v,red}$ auguga ristlõikes. Kontrollitakse augu kohale ja augu alla jäävat talaosa eraldi. Ei ole kirjeldatud, kuidas põikjõudu ülemise ja alumise osa vahel jagada, kuid võib eeldada, et see on proportsionaalselt jagatud. Arvutussuuruste tähistus on välja toodud joonisel 2.8. Nihketugevust vähendatakse augu kuju ja suurust arvestava teguri k_{hole} ning tala laiusest sõltuva teguri k_{vol} võrra. Tagatud peab olema tingimus

$$\tau \leq f_{v,red} \quad (2.16)$$

Nihkepinged leitakse valemiga

$$\tau = \frac{1,5 * V_i}{b * h_i}, \quad (2.17)$$

kus indeks $i = u$ või $i = l$ vastavalt ülemine või alumine,

V_i on põikjõud,

h_i augu kohale või alla jääva talaosa kõrgus.

Tala vähendatud nihketugevus leitakse valemiga

$$f_{v,red} = k_{vol} * k_{hole} * f_{v,d}, \quad (2.18)$$

kus k_{vol} ja k_{hole} on vähendustegurid,

$f_{v,d}$ on arvutuslik nihketugevus.

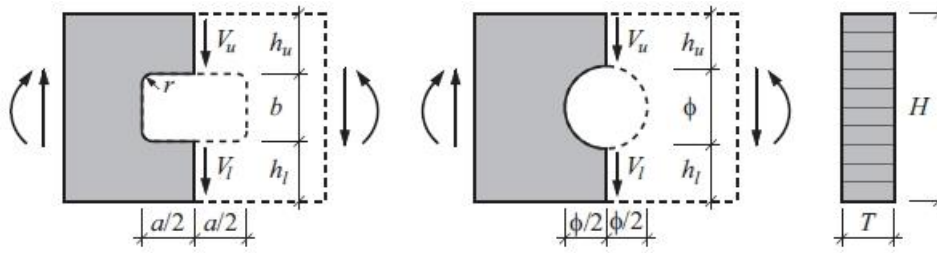
Tala laiusest sõltuv tegur k_{vol} arvutatakse valemiga

$$k_{vol} = \left(\frac{90}{b}\right)^{0.2}, \text{ kui } 90 \leq b \leq 215 \text{ mm} \quad (2.19)$$

Augu kuju ja suurust arvestav tegur k_{hole} arvutatakse valemiga

$$k_{hole} = \begin{cases} 1 - 555 \left(\frac{D}{h}\right)^3, & \text{kui } \frac{D}{h} \leq 0,1 \\ \frac{1,62}{(1,8 + D/h)^2}, & \text{kui } \frac{D}{h} > 0,1, \end{cases} \quad (2.20)$$

kus $D = \begin{cases} \sqrt{b^2 + a^2} & \text{ristkülikuline auk} \\ \emptyset & \text{ümmargune auk} \end{cases}$



Joonis 2.8. Empiirilise arvutusmeetodi suuruste tähistamine (Danielsson, 2007)

Toel sisselõikega tala analoogial põhinev arvutusmeetod (Limträhandbok, 2008)

Pingejaotus augu ümber on sarnane tala sisselõike ümber tekkiva pingejaotusega, seega võib auke arvutada analoogselt toel sisselõikega tala arvutusele. (vt joonis 2.9) Kontrollida tuleb augu kohale ja augu alla jäävat talaosa. Põikjõu suund määrab selle, milline on ülemine ja alumine osa. Tala keskeljel oleva augu korral jagatakse põikjõud ülemise ja alumise osa vahel võrdselt. Eeldatakse, et auk on tala otsapiirkonnas, kus domineerivad põikjõud ja paindemomendi mõju ei arvestata. (Danielsson, 2007) Arvutusmeetod on analoogne Eurokoodeks 5 kirjeldatud toel sisselõikega tala arvutusmeetodiga.

Tugevustingimus on eelnevalt kirjeldatud empiirilise meetodi tingimusega sama (vt valem 2.17) ja nihkepinged leitakse valemiga 2.18. Erinevus tekib nihketugevuse määramisel.

Tala vähendatud nihketugevus leitakse valemiga

$$f_{v,red} = k_{v,i} * f_{v,d}, \quad (2.21)$$

kus $k_{v,i}$ on vähendustegur.

Augu alla jääva talaosa arvutuse puhul on vähendustegur $k_{v,l} = 1,0$.

Augu kohale jääva talaosa arvutuse puhul arvutatakse vähendustegur valemiga

$$k_{v,u} = \min \left\{ \frac{1,0}{k_n \left(1 + \frac{1,1 * j^{1,5}}{\sqrt{H}} \right)}, \frac{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha - \alpha^2} + 0,8 * \frac{e}{h} * \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}{\right\}, \quad (2.22)$$

kus tala keskeljel asuva augu korral

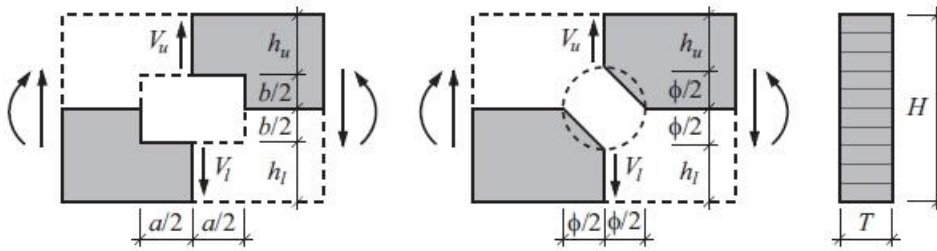
$$h = h_u + b/2,$$

$$\alpha = h_u/h,$$

$j = 1,0$ või 0 vastavalt ümmargune või ristkülikuline auk,

$e = 0$ või $\frac{\alpha}{2}$ vastavalt ümmargune või ristkülikuline auk,

k_n on tegur, mille väärtus on spoonliimpuidu korral 4,5, täispuidu korral 5 ja liimpuidu korral 6,5.



Joonis 2.9. Toel sisselõikega tala analoogial põhineva meetodi suuruste tähistus (Danielsson, 2009)

2.1.6. Eurokoodeks 5

Kehtivas Eurokoodeksis 5 ei ole juhendeid aukudega talade projekteerimiseks. 2002. aasta Eurokoodeks 5 kavandis oli eraldi peatükk aukudega liimpuittalade arvutamiseks. Arvutusmeetod vaatles aukusid analoogselt Rootsi liimpuidukäsiraamatus kirjeldatud toel sisselõikega tala arvutusmeetodiga. Augu paiknemisele ja geomeetriaile seatud piirangud olid analoogsed Saksamaa ehitusstandardis DIN 1052:2004-08 välja toodud reeglitega. (Danielsson, 2007)

Eurokoodeks 5 kavandis oli talale mõjuv lõikejõud jagatud proportsionaalselt augu kohale ja augu alla jääva talaosa vahel. Lõikejõud augu kohal arvutati valemiga

$$V_u = V * \frac{h_u}{h_u + h_l} \quad (2.23)$$

ja lõikejõud augu all arvutati valemiga

$$V_l = V * \frac{h_l}{h_u + h_l}, \quad (2.24)$$

kus h_u on augu kohale jääva ristlõike kõrgus,

h_l on augu alla jääva ristlõike kõrgus.

2.2. Puuritud aukude mõju talade paindetugevusele

Falk (2003) katsetas ebatsuugast aukudega talasid. Katsete käigus testiti 89x191 mm talasid, mille sildeava keskele olid puuritud augud. Augud paiknesid kolmel erineval kõrgusel. Talad jagati seitsmesse sarnase elastsusmooduliga gruppi, igas grupis oli 22 tala. Grupp A taladele puuriti 25,4 mm läbimõõduga auk 25,4 mm kaugusele tala ülaservast. Grupp B taladele puuriti 25,4 mm läbimõõduga auk 25,4 mm kaugusele tala alaservast. Grupp C oli kontrollgrupp, kuhu ei puuritud ühtegi auku. Grupp D taladele puuriti 25,4 mm läbimõõduga auk 6 mm kaugusele tala alaservast. Grupp E taladele puuriti 25,4 mm läbimõõduga poolringikujuline sisselõige tala alaservale. Grupp H taladele puuriti 44 mm läbimõõduga auk 25,4 mm kaugusele tala ülaservast. Grupp I taladele puuriti 44 mm läbimõõduga auk 25,4 mm kaugusele tala alaservast. Katsed viidi läbi 45,5000 kg universaalse katsemasinaga ning katsekehad koormati sümmeetriliselt kahest kohast. Kõigile katsekehadele määrati purustav jõud ning dokumenteeriti purunemisviis. (Falk, et al., 2003)

Purunemisviisid olenesid augu asukohast ning selle suurusest. Survetsoonis oleva augu (grupid A ja H) korral esines kohalik nõtkumine kõige enam augu kohal, millele järgnes purunemine tala tõmbetsoonis. Tõmbetsooni puuritud augu (grupid B, D ja I) korral algas tala purunemine enamasti august. Grupis E olnud taladel (poolringikujuline sisselõige tala allservas) toimus purunemine sisselõike juures kõigest 32% juhtudest. Kõige nõrgemad olid D grupi talad (25,4 mm auk 6 mm kaugusel tala alaservast), millest saab järeldada, et augud tõmbetsoonis vähendavad tala tugevust rohkem kui augud kaugemal tala alaservast. Üldiselt olid kõik aukudega talad kontrollgrupi taladest nõrgemad, halvimal juhul oli auguga tala tugevus vaid 70% auguta tala tugevusest. Veel leiti, et augu asukoht talas võib olla olulisem kui augu suurus. 25,4 mm läbimõõduga auk 25,4 mm kaugusel tala alaservast mõjutas tala paindetugevust sama palju kui 44 mm läbimõõduga auk samas kohas. (Falk, et al., 2003)

2.3. Nelinurksete aukudega talade tugevuskatsed

Danielsson (2008) viis Lundi Ülikoolis läbi katsed, mille käigus keskenduti nelja parameetri uurimisele: materjali tugevusklass, paindemomendi ja lõikejõu suhe, tala suuruse efekt ja augu asukoht tala kõrguse suhtes. Kokku sooritati 36 katset, mis jaotati

üheksasse seeriasse, igaihes neli katset. Kõik augud olid ümmarguste nurkadega nelinurksed, mille külje pikkus oli võrdne kolmandiku tala kõrgusega.

Tala suuruse efekti uurimiseks kasutati kahte erinevat ristlõiget, 115x180 mm ja 115x630 mm. Augu asukoha mõju uurimiseks paigutati auk kas tala tsentrisse, augu alumise servaga tala tsentrisse või augu ülemise servaga tala tsentrisse. Kasutati kahte erinevat materjali tugevusklassi - homogeenne liimpuit klassiga LS22 ja kombineeritud liimpuit klassiga LS22 ja LS15. Paindemomendi ja lõikejõu suhte uurimiseks kasutati kahte erinevat katsemeetodit. Ühel juhul mõjus augu kohal nii paindemoment kui ka lõikejõud, teisel juhul asus auk kohas, kus paindemoment oli null. Katsete käigus märgiti üles tala läbipaine, mõjuv koormus ning tala kõrvalekalle ja läbipaine augu kahes nurgas, kus toimusid purunemised. Tulemuste võrdlemiseks kasutati kolme lõikejõu suurust. Esimese lõikejõu suuruse korral tekkis silmaga nähtav pragu, teise korral laienes pragu terve tala laiusesse ja kolmanda lõikejõu suuruse juures pikenes pragu kogu tala pikkusesse. (Danielsson, et al., 2008)

Tala suurus mõjutab tala tugevust. Katsete tulemustest selgus, et tala suurendamine 3,5 korda alandas lõikejõudu, mis laiendas praod kogu tala laiusesse, umbes 30-35%. Ekstsentriliselt paigutatud auk vähendas sama lõikejõudu umbes 5-15% võrreldes taladega, kus auk oli tala tsentris. Augu juures tekkinud praod pikenesid tala otsani oli kiirem talade korral, kus auk paiknes tala ülemises osas, võrreldes taladega, kus auk paiknes tala alumises osas. Talade puhul, kus tsentriliselt paigutatud auk asetseb tala piirkonnas, kus paindemoment oli null, andsid katsed paremaid tulemusi kui katsed taladega, kus auk asetseb paindemomendi ja lõikejõuga piirkonnas. Praod tekkinud jõud olid null paindemomendiga piirkonnas keskmiselt 5-10% suuremad. Katsed näitasid veel, et kõige sagedamini tekivad praod samaaegselt nii augu ülemises kui alumises nurgas. (Danielsson, et al., 2008)

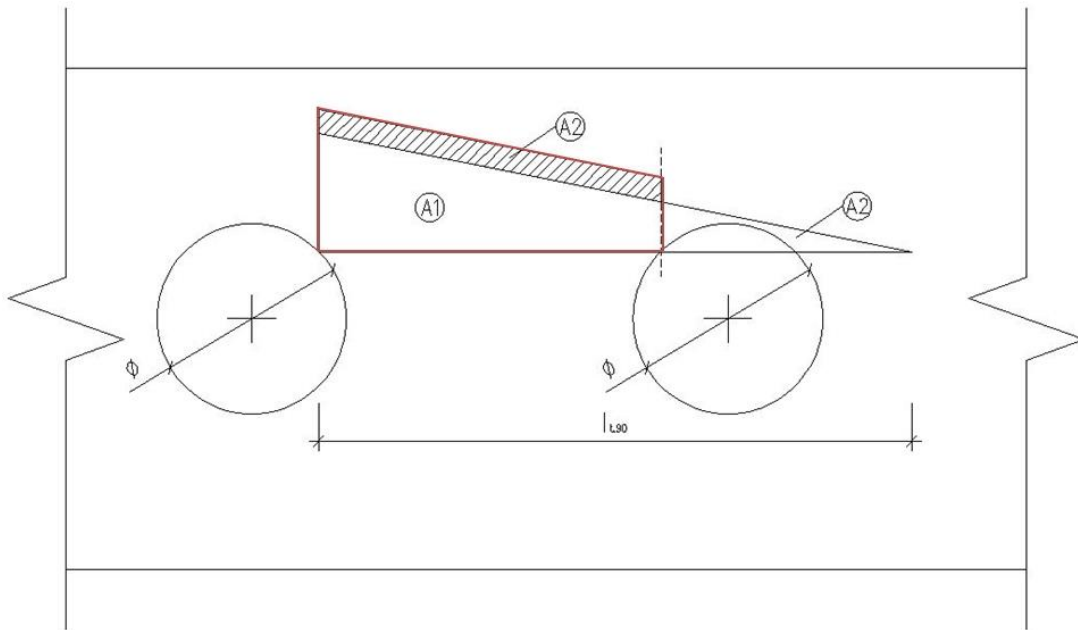
Danielsson (2008) võrdles Rootsi liimpuidu käsiraamatus kirjeldatud kahe meetodiga ja Saksamaa ehitusstandardis kirjeldatud meetoditega leitud nihkekandevõimeid erinevate katsetega saadud tulemustega. Nelinurksede aukude korral alahindavad DIN 1052 ja Rootsi liimpuidu käsiraamatu empiirilise meetodi tala nihketugevust. Ümmarguste aukude korral kattuvad eelnevate meetoditega leitud tulemused üsna hästi katsetulemustega. Rootsi liimpuidu käsiraamatus kirjeldatud teine meetod, toel sisselõikega tala analoogial põhinev, ülehindab talade tugevust ümmarguste ja nelinurksede aukude korral.

2.4. Projekteerimisjuhendite kokkuvõte

Juhendid aukudega talade arvutamiseks on väga erinevad ja põhinevad erinevatel teoreetilistel alustel. Lihtsa ja usaldusväärse arvutusmeetodi leidmine on keeruline ning seda eriti väikesemõõduliste saepuidust aukudega talade arvutamiseks. Tõdemus, et empiirilised meetodid mängivad arvutamisel suurt rolli, näitab vajadust arvutusmeetodite täiendamiseks.

Juhendites on mitmeid probleeme, miks need ei sobi väikesemõõduliste saepuidust aukudega talade arvutamiseks. Rootsi liimpuidukäsiraamatus kirjeldatud meetodid on välja töötatud liimpuidu tarvis ja arvestavad ainult lõikejõu mõju, mitte lõikejõu ning paindemomendi koosmõju. Lisaks põhineb empiiriline meetod uurimisel, kus katsetati ainult talasid laiusega 90 kuni 215 mm. Eurokoodeks 5 ei anna üldse juhendeid aukudega tala arvutamiseks. Ameerika Ühendriikides kasutusel olev Weibulli nõrgima lüli teoorial põhinev meetod on samuti mõeldud liimpuidust talade arvutamiseks.

Saksamaa ehitusstandardis kirjeldatud meetodi kasutamiseks peab aukude vahele jääma piisavalt ruumi pinge kolmnurga tekkimiseks. Kui augud paiknevad vastavalt etteantud tingimustele, jääb aukude vahele piisavalt ruumi pinge kolmnurga tekkimiseks. Juhul, kui minnakse mööda augu paiknemisele esitatud nõuetest, võib tekkida olukord, kus kõrvalolev auk katkestab pinge kolmnurga. Sellisel juhul tekib aukude vahele trapetsikujuline pingeaotus. (vt joonis 2.10) Tekkinud trapetsikujulise pingepüüri pindala on sama, mis vastava pinge kolmnurga pindala. Selle tõttu kasvavad trapetsikujulise pingepüüri otsades olevad tõmbepingete väärtused ning neid väärtusi ei ole enam üksüheselt võimalik leida. Pinge kolmnurga tekkimine on Saksamaa ehitusstandardis kirjeldatud meetodi kasutamise eelduseks.



Joonis 2.10. Pinge kolmnurgast tekkinud trapetsikujuline pingeaotus

Spetsiaalselt saepuidule mõeldud arvutusmeetodite puudumisel tuleb kasutada olemasolevaid liimpuidu omasid. Väikeste muudatustega saab Saksamaa ehitusstandardis kirjeldatud ja Ameerika Ühendriikides kasutusel olevat Weibulli nõrgima lüli teoorial põhinevat meetodit kasutada saepuidust talade pingekontsentratsioonide mõju arvutamisel. Tulemustesse peab suhtuma ettevaatusega, sest projekteerimisjuhendid märgivad kõik ära, et esmajoones tuleb taladesse aukude tegemist vältida ja seda juba liimpuidust talade korral, mis on saepuidust taladest palju tugevamad.

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Nõrgestusteta ristkülikristlõikega tala arvutus

Nõrgestusteta tavalise ristkülikristlõikega tala arvutus põhineb Ehituskonstruktori käsiraamatus välja toodud üldistel põhimõtetel. (Masso, 2012) Paindekandevõime arvutustes kontrollitakse, et arvutuslik paindetugevus ei ületaks ristlõikes tekkivaid arvutuslikke paindepingeid. Kontrollitakse, et

$$\frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.g.d}} \leq 1 \quad (3.1)$$

kus $\sigma_{m.y.d}$ on paindepinge arvutusväärtus y-telje suhtes,

$f_{m.y.g.d}$ on paindetugevuse arvutusväärtus.

Paindetugevuse arvutusväärtus leitakse valemiga

$$f_{m.y.g.d} = k_{mod.C24} * \frac{f_{m.k}}{\gamma_M}, \quad (3.2)$$

kus $k_{mod.C24}$ on saepuidu C24 koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur,

$f_{m.k}$ on saepuidu normpaindetugevus,

γ_M on saepuidu osavarutegur.

Paindepinge leitakse valemiga

$$\sigma_{m.y.d} = \frac{M_d}{W_y}, \quad (3.3)$$

kus M_d on arvutuslik paindemoment,

W_y on ristlõike vastupanumoment.

Talas tekkivad nihkepinged ei tohi ületada nihketugevust. Kehtima peab tingimus

$$\frac{\tau_d}{f_{v.d}} \leq 1, \quad (3.4)$$

kus τ_d on nihkepinge arvutusväärtus,

$f_{v.d}$ on nihketugevuse arvutusväärtus.

Nihketugevuse arvutusväärtus leitakse valemiga

$$f_{v.d} = k_{mod.c24} * \frac{f_{v.k}}{\gamma_M}, \quad (3.5)$$

kus $f_{v.k}$ on saepuidu normnihketugevus.

Nihkepinge leitakse valemiga

$$\tau_d = \frac{1,5V_d}{b_w k_{cr} h_w}, \quad (3.6)$$

kus V_d on arvutuslik löikejõud,

h_w on tala kõrgus,

b_w on tala laius,

$k_{cr} = 0,67$ (saepuidu korral) on pragunemistegur, mida kasutatakse paindeelementide nihkekandevõime kontrollimisel tala efektiivlause määramiseks. (Eurokoodeks 5, 2009)

Tala läbipaine arvutatakse hetkelise ja lõpliku olukorra puhul. Hetkeline läbipaine peab olema väiksem kui tala lubatud hetkeline läbipaine

$$\frac{w_{inst}}{w_{inst.adm}} \leq 1, \quad (3.7)$$

kus w_{inst} on tala hetkeline läbipaine,

$w_{inst.adm}$ on tala lubatud hetkeline läbipaine.

Tala hetkeline läbipaine arvutatakse valemiga

$$w_{inst} = w_{inst.G} + w_{inst.Q}, \quad (3.8)$$

kus $w_{inst.G}$ on hetkeline läbipaine alalisest koormuses,

$w_{inst.Q}$ on hetkeline läbipaine muutuvkoormusest.

Hetkelised läbipained vastavate koormuste korral arvutatakse antud konstruktsiooni korral valemitega

$$w_{inst.G} = \frac{5 * g_k * s_w * L_{ef}^4}{384 * E_{0.mean} * I_y} + \frac{M_{y.g.k}}{G_{mean} * b_w * h_w} \quad (3.9)$$

ja

$$w_{inst.Q} = \frac{5 * q_k * s_w * L_{ef}^4}{384 * E_{0.mean} * I_y} + \frac{M_{y.q.k}}{G_{mean} * b_w * h_w}, \quad (3.10)$$

kus g_k on konstruktsiooni omakaal,

q_k on konstruktsioonile mõjuv kasuskoormus,

s_w on talade samm,
 L_{ef} on tala efektiivne pikkus,
 $E_{0.mean}$ on saepuidu elastsusmooduli keskväärtus,
 I_y on ristlõike inertsimoment,
 $M_{y.g.k}$ on paindemoment omakaalust,
 $M_{y.q.k}$ on paindemoment kasuskoormusest,
 G_{mean} on nihkemooduli keskväärtus.

Lubatud hetkeline läbipaine on $\frac{l}{400}$, kus l on tala pikkus.

Tala lõplik läbipaine peab olema väiksem kui lubatud lõplik läbipaine

$$\frac{w_{fin}}{w_{fin.adm}} \leq 1 \quad (3.11)$$

Tala lõplik läbipaine arvutatakse valemiga

$$w_{fin} = w_{fin.G} + w_{fin.Q}, \quad (3.12)$$

kus $w_{fin.G}$ on lõplik läbipaine omakaalust arvestades roomedeformatsioone,

$w_{fin.Q}$ on lõplik läbipaine kasuskoormusest arvestades roomedeformatsioone.

Lõplikud läbipainded laetaladel, millele mõjub alaliskoormus ja muutuvkoormusena ainult kasuskoormus, leitakse valemitega

$$w_{fin.G} = w_{inst.G} * (1 + k_{def.w}) \quad (3.13)$$

ja

$$w_{fin.Q} = w_{inst.Q} * (1 + \psi_2 * k_{def.w}), \quad (3.14)$$

kus $k_{def.w}$ on saepuidu deformatsioonitegur,

ψ_2 on kasuskoormuse kombinatsioonitegur eluruumide jaoks.

Lubatud lõplik läbipaine on $\frac{l}{300}$, kus l on tala pikkus.

3.2. Talast ja puitlaasplaadist koosneva nõrgestusteta liitristlõike arvutusmeetod

Ristlõike arvutused põhinevad käsiraamatu „*Structural Timber Design to Eurocode 5*“ (Puitkonstruktsioonide projekteerimine vastavalt Eurokoodeksile 5) seitsmendas peatükis esitatud meetodil. Käsiraamatu peatükk käsitleb erinevatest materjalidest koosneva ristlõike arvutamist. Puitlaastplaat on puittala peale liimitud ja seega töötab ristlõige ühtse tervikuna, mis on eelduseks järgneva meetodi kasutamiseks. Liitristlõikes jagunevad pinged lineaarselt kogu kõrguse ulatuses. Erinevate elastsusmoodulitega materjalidega ristlõike analüüsimiseks tuleb kasutada redutseeritud ristlõike meetodit. Selle meetodi puhul määratakse põhimaterjal, mille elastsusmoodul võetakse aluseks, ja viimasest erineva elastsusmooduliga ristlõike osade geomeetrilised karakteristikud redutseeritakse arvestades elastsusmoodulite suhet ja standardis esitatud nõudeid. Antud juhul teisendatakse puitlaastplaat tala materjaliks, milleks on saepuit tugevusklassiga C24. Leitakse redutseeritud koguristlõike inertsimoment ja kontrollitakse vajalikud tugevustingimused. (Porteus, et al., 2007)

Ristlõike kõrgus peab jääma samaks, seega väheneb puitlaastplaadi laius. Hetkelise olukorra puhul leitakse redutseeritud ristlõike pindala valemiga:

$$A_{ef.inst} = A_w + \left(b_{ef.f} * \frac{E_{PLP.o.mean}}{E_{o.mean}} \right) * h_f, \quad (3.15)$$

kus A_w on tala pindala,

$b_{ef.f}$ on plaadi efektiivlaius,

$\frac{E_{PLP.o.mean}}{E_{o.mean}}$ on elastsusmoodulite suhe,

h_f on puitlaastplaadi kõrgus.

Lõpliku olukorra puhul leitakse redutseeritud ristlõike pindala valemiga:

$$A_{ef.fin} = A_w + \left(b_{ef.f} * \frac{E_{PLP.o.mean}}{E_{o.mean}} \right) * h_f * \frac{1 + \psi_2 * k_{def.w}}{1 + \psi_2 * k_{def.f}}, \quad (3.16)$$

kus $k_{def.f}$ on puitlaastplaadi deformatsioonitegur.

Redutseeritud ristlõikele tuleb leida ristlõike raskuskeset läbiv kesktelg x_c . Telje x_c kaugus ristlõike alumisest servast leitakse valemiga

$$x_c = \frac{Sy_1^{(1)} + Sy_1^{(2)} + \dots + Sy_1^{(n)}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}, \quad (3.17)$$

kus $Sy_1^{(n)}$ on ristlõike osa staatiline moment telje y_1 suhtes, mis läbib ristlõike alaserva (vt joonis 3.1),

A_n on ristlõike osa pindala.

Osakujunditest koosneva ristlõike telginertsimoment kesktelje x_c suhtes leitakse valemiga

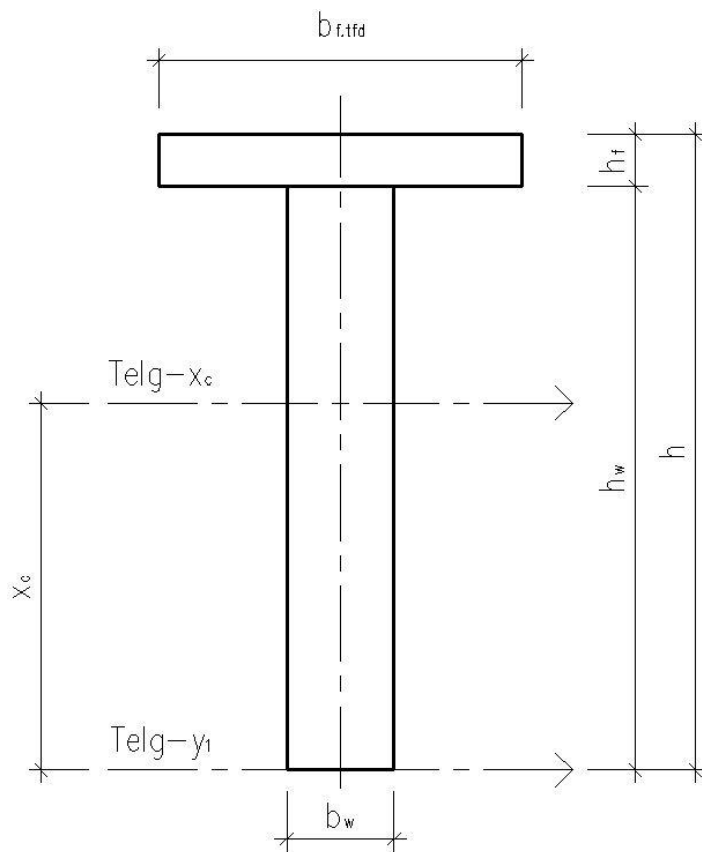
$$I_{ef} = I_{x_c}^{(1)} + I_{x_c}^{(2)} + \dots + I_{x_c}^{(n)} = I_1 + a_1^2 A_1 + I_2 + a_2^2 A_2 + \dots + I_n + a_n^2 A_n, \quad (3.18)$$

kus $I_{x_c}^{(n)}$ on ristlõike osakujundi inertsimoment x_c -telje suhtes,

I_n on osakujundi telginertsimoment enda raskuskeskme suhtes,

a_n on ristlõike osa raskuskeskme kaugus kogu ristlõike raskuskeskmest,

A_n on ristlõike osa pindala.



Joonis 3.1. Talast ja puitlaasplaadist koosneva liitristlõike geomeetriliste suuruste tähistus

Paindepingete puhul kontrollitakse, et talas ja plaadis tekkivad paindepinged ei ületaks vastavaid paindetugevusi

$$\frac{\sigma_{w.m.d}}{f_{w.m.d}} \leq 1 \quad (3.19)$$

ja

$$\frac{\sigma_{f.m.d}}{f_{PLP.m.d}} \leq 1 \quad (3.20)$$

Talas tekkivaid paindepingeid kontrollitakse hetkelises ja lõplikus olukorras. Paindepingeid kontrollitakse tala alaservas, kus need on suurimad. (vt joonis 3.1) Talas tekkivad paindepinged määratakse valemiga

$$\sigma_{m.d} = \frac{M_d}{I_{ef}} * x_c \quad (3.21)$$

Plaadis esinevad paindepinged kontrollitakse hetkelise olukorra puhul, sest plaadi materjali elastsusmoodul on väiksem kui tala materjali elastsusmoodul. Plaadi paindepingeid kontrollitakse plaadi ülaserval. (vt joonis 3.1) Paindepingete leidmiseks kasutatakse valemit

$$\sigma_{f.m.d} = \frac{M_d}{I_{ef}} * (h - x_c) * \frac{E_{PLP.0.mean}}{E_{0.mean}} \quad (3.22)$$

Tala paindetugevus ja plaadi paindetugevus leitakse valemitega

$$f_{m.d} = \frac{k_{mod.C24} * k_{sys} * k_h * f_{m.k}}{\gamma_M} \quad (3.23)$$

ja

$$f_{PLP.m.d} = \frac{k_{mod.PLP} * k_{sys} * f_{PLP.m.k}}{\gamma_{PLP.M}}, \quad (3.24)$$

kus k_{sys} on süsteemi tugevuse tegur,

k_h on tala kõrguse tegur,

$\gamma_{PLP.M}$ on puitlaastplaadi osavarutegur.

Tegur k_{sys} suurendab konstruktsioonielemendi tugevust, kui mitu süsteemi osa paiknevad võrdsete vahedega ning need on ühendatud antud juhul puitlaastplaadiga, mis võimaldab koormuste jagunemise ühtlasemalt talade vahel. Tegur k_h arvestab tala kõrgust. (Porteus, et al., 2007)

Lisaks kontrollitakse plaadis esinevaid survepingeid. Tuleb kontrollida, et survepinged ei ületaks plaadi survetugevust

$$\frac{\sigma_{f.c.d}}{f_{PLP.c.d}} \leq 1 \quad (3.25)$$

Plaadis esinevad survepinged kontrollitakse hetkelises olukorras. Plaadi survepingeid kontrollitakse plaadi raskuskeskmes. (vt joonis 3.1) Survepinged plaadis leitakse valemiga

$$\sigma_{f.c.d} = \frac{M_d}{I_{ef}} * (h - x_c - \frac{h_f}{2}) * \frac{E_{PLP.0.mean}}{E_{0.mean}} \quad (3.26)$$

Plaadi survetugevus leitakse valemiga

$$f_{PLP.c.d} = \frac{k_{mod.PLP} * k_{sys} * f_{PLP.c.k}}{\gamma_{PLP.M}}, \quad (3.27)$$

kus $f_{PLP.c.k}$ on plaadi materjali normsurvetugevus.

Tala nihketugevuse kontroll tehakse hetkelises ja lõplikus olukorras. Nihketugevuse kontrolli puhul peab olema tagatud tingimus

$$\frac{\tau_{v.d}}{f_{v.d}} \leq 1, \quad (3.28)$$

kus $\tau_{v.d}$ on talas tekkiv nihkepinge,

$f_{v.d}$ on tala nihketugevus.

Nihkepinge talas leitakse valemiga

$$\tau_{v.d} = \frac{V_d * S}{I_{ef} * b_w * k_{cr}}, \quad (3.29)$$

kus V_d on arvutuslik lõikejõud talas,

S on ristlõike staatiline moment.

Tala nihketugevus leitakse valemiga

$$f_{v.d} = \frac{k_{mod.C24} * k_{sys} * f_{v.k}}{\gamma_M}, \quad (3.30)$$

kus $f_{v.k}$ on saepuidu normnihketugevus.

Liimühenduse kontroll tehakse hetkelises ja lõplikus olukorras. Liimühenduse tugevus on tagatud, kui kehtib tingimus

$$\frac{\tau_{glue.d}}{f_{PLP.v.d}} \leq 1, \quad (3.31)$$

kus $\tau_{glue.d}$ on keskmine nihkepinge plaadis üle liimitud pinna,
 $f_{PLP.v.d}$ on plaadi nihketugevus.

Nihkepinge plaadis leitakse valemiga

$$\tau_{glue.d} = \frac{V_d * S_f}{I_{ef} * b_w}, \quad (3.32)$$

kus S_f on plaadi staatiline moment ristlõike kesktelje suhtes.

Plaadi nihketugevus leitakse valemiga

$$f_{PLP.v.d} = \frac{k_{mod.con} * k_{sys} * f_{PLP.v.k}}{\gamma_{PLP.M}}, \quad (3.33)$$

kus $k_{mod.con}$ on koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur ühenduse korral,

$f_{PLP.v.k}$ on puitlaastplaadi nihketugevus.

Modifikatsioonitegurit $k_{mod.con}$ kasutatakse juhtudel kui ühendus koosneb erinevatest materjalidest, millel on erinevad koormuse kestusest mõjutatud omadused ning see arvutatakse valemiga

$$k_{mod.con} = (k_{mod.C24} * k_{mod.PLP})^{0,5} \quad (3.34)$$

Puitlaastplaadiga tala hetkeline läbipaine arvutatakse analoogselt lihttala läbipainde arvutamisele. Valemities 3.9 ja 3.10 oleva inertsimomendi I_y asemel tuleb kasutada hetkelisele olukorrale vastavat redutseeritud ristlõike inertsimomenti. Leitud hetkeline läbipaine peab olema väiksem kui lubatud hetkeline läbipaine

Tala lõplik läbipaine arvutatakse valemiga 3.12. Alaliskoormusest ja muutuvkoormusest tingitud läbipainded leitakse vastavalt valemitega 3.13 ja 3.14. Valemities 3.13 ja 3.14 olevad hetkelised läbipainded leitakse valemitega 3.9 ja 3.10, kuid lõpliku läbipainde leidmiseks kasutatakse valemities inertsimomenti kasutuspiirseisundis $I_{SLS.ef.fin}$. Inertsimomendi leidmiseks arvutatakse tala redutseeritud ristlõike pindala kasutuspiirseisundis valemiga

$$A_{SLS.ef.fin} = A_w + \left(b_{ef.f} * \frac{E_{PLP.0.mean}}{E_{0.mean}} \right) * h_f * \frac{1 + k_{def.w}}{1 + k_{def.f}} \quad (3.35)$$

Uue kesktelje asukoht $x_{SLS.c.fin}$ ning inertsimoment $I_{SLS.ef.fin}$ arvutatakse valemitega 3.17 ja 3.18. Leitud lõplik läbipaine peab olema väiksem kui lubatud lõplik läbipaine.

3.3. Auguga liitristlõike tugevuse kontrollimine

Auguga talast ja sellele liimitud redutseeritud puitlaastplaadist koosnevas liitristlõikes kontrollitakse paindepingeid ristlõike alaservas, tõmbepingeid augu all ja nihkepingeid liimühenduses. Painde- ja tõmbepingete kontrollid tehakse lõplikus olukorras. Nihkepingete kontroll tehakse hetkelises olukorras. Paindepinged leitakse valemiga 3.21 ja tala materjali paindetugevus valemiga 3.23. Suurimad paindepinged on ristlõike alaservas. Nihkepinged liimühenduses leitakse valemiga 3.32 ja nihketugevus valemiga 3.33. Tõmbe- ja paindepingete leidmisel kasutatakse auguga ristlõikes mõjuvat arvutuslikku paindemomenti $M_{d.x}$, nihkepingete leidmisel ristlõikes mõjuvat arvutuslikku lõikejõudu $V_{d.x}$.

Suurimad tõmbepinged augu alla jääva ristlõike osas on selle osa raskuskeskmes ja arvutatakse valemiga

$$\sigma_{w.t.d} = \frac{M_{d.x}}{I_{ef}} * (x_c - h_a), \quad (3.36)$$

kus h_a on augu alla jääva tala osa kõrgus.

Tala tõmbetugevus arvutatakse valemiga

$$f_{t.0.d} = \frac{k_{mod.C24} * k_{sys} * k_{h.a} * f_{t.0.k}}{\gamma_M}, \quad (3.37)$$

kus k_{sys} on süsteemi tugevuse tegur,

$k_{h.a}$ on tala kõrguse tegur,

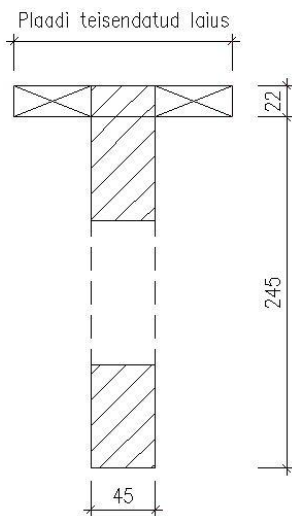
$f_{t.0.k}$ on puidu normtõmbetugevus pikikiudu,

$\gamma_{PLP.M}$ on puitlaastplaadi osavarutegur.

Tegur $k_{h.a}$ leitakse valemiga

$$k_{h.a} = \min \left\{ \left(\frac{150}{h_a} \right)^{0,2} \right. \\ \left. 1,3 \right\} \quad (3.38)$$

Augu servas tekkivaid tõmbepingeid arvutatakse vastavalt Saksamaa ehitusstandardis välja toodud meetodile ja Weibulli nõrgima lüli teorial põhinevale meetodile. Puitlaastplaadi mõju arvestamiseks liidetakse plaadi kõrgus tala kõrgusele juurde. Antud lähenemine ei võta arvesse tervet puitlaasplaati. Tala servadest kahele poole jäävate plaadi osade mõju jääb arvestamata. (vt joonis 3.2) Arvutusjuhendid on ristkülikristlõikega talade arvutamiseks ja nende modifitseerimine T-ristlõikega talale sobivaks on arvutusmeetodite valemite tuletuskäikude puudumisel keeruline. Antud lähenemine on tagavara kasuks, see tähendab, et tegelikkuses on plaadi kandevõimet suurendav mõju ilmselt suurem.



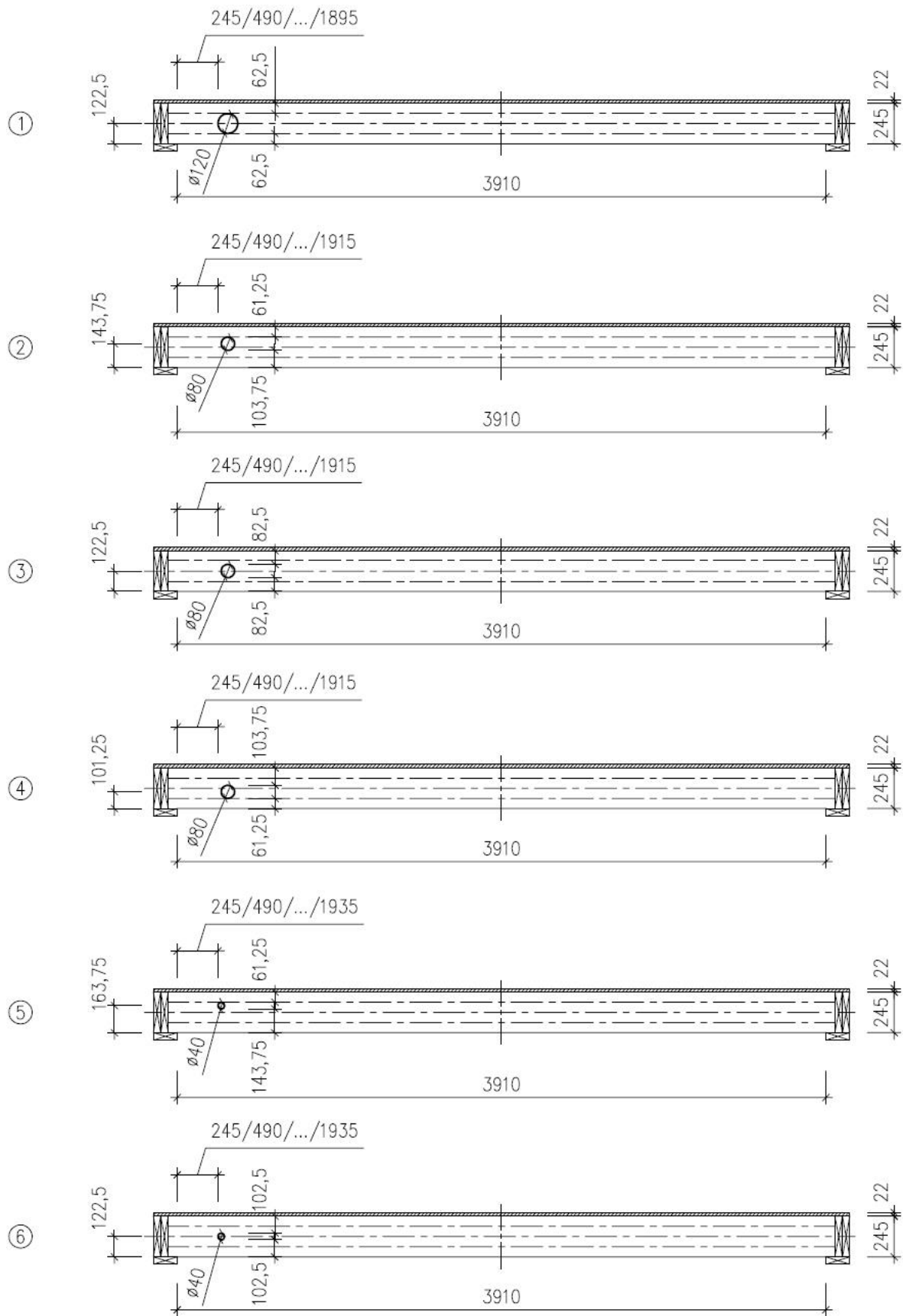
Joonis 3.2. Puitlaastplaadi arvestamine auguga tala arvutamisel

3.4. Aukudega liitristlõikega talade kirjeldus

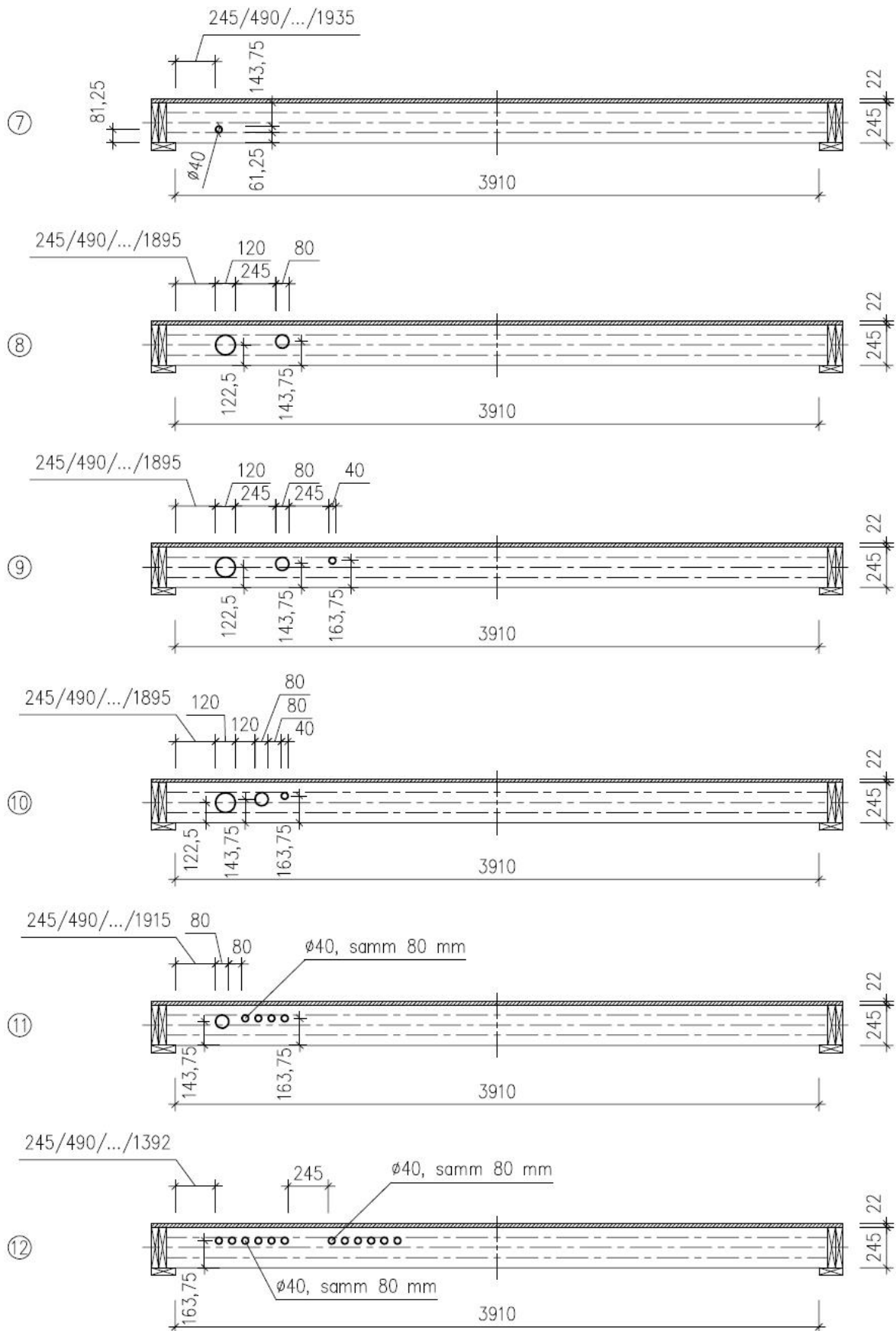
Aukudega talade tüübid, mille tugevust ja kandevõimet töös analüüsitakse on järgmised:

1. 120 mm läbimõõduga auk tala kõrguse suhtes tsentris. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 1)
2. 80 mm läbimõõduga auk, mille ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 2)
3. 80 mm läbimõõduga auk, mis asub tala kõrguse suhtes tsentris. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 3)
4. 80 mm läbimõõduga auk, mille alumine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala alaservast. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 4)

5. 40 mm läbimõõduga auk, mille ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 5)
6. 40 mm läbimõõduga auk, mis asub tala kõrguse suhtes tsentris. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.3, 6)
7. 40 mm läbimõõduga auk, mille alumine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala alaservast. Augu asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 7)
8. Kombinatsioon K-1. 120 mm läbimõõduga auk tala kõrguse suhtes tsentris ja sellest 245 mm kaugusel 80 mm läbimõõduga auk, mille ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Aukude kombinatsiooni asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 8)
9. Kombinatsioon K-2. 120 mm läbimõõduga auk tala kõrguse suhtes tsentris, sellest 245 mm kaugusel 80 mm läbimõõduga auk ja sellest omakorda 245 mm kaugusel 40 mm läbimõõduga auk. 80 mm ja 40 mm augu ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Aukude kombinatsiooni asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 9)
10. Kombinatsioon K-3. 120 mm läbimõõduga auk tala kõrguse suhtes tsentris, sellest 120 mm kaugusel 80 mm läbimõõduga auk, millest omakorda 80 mm kaugusel 40 mm läbimõõduga auk. 80 mm ja 40 mm augu ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Aukude kombinatsiooni asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 10)
11. Kombinatsioon K-4. 80 mm läbimõõduga auk, millest 80 mm kaugusel asub neljast 40 mm läbimõõduga august koosnev grupp. 40 mm augud asetsevad sammuga 80 mm. Kõikide aukude ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Aukude kombinatsiooni asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 11)
12. Kombinatsioon K-5. Talas on kaks kuuest 40 mm läbimõõduga august koosnevat gruppi. Grupiseselt asetsevad augud 80 mm sammuga. Kahe grupi vaheline kaugus on 245 mm. Kõikide aukude ülemine serv asub 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast. Aukude kombinatsiooni asukoht liigub 245 mm sammuga sildeava otsast tala keskpunkti suunas. (vt joonis 3.4, 12)



Joonis 3.3. Aukudega talade tüübid 1-6

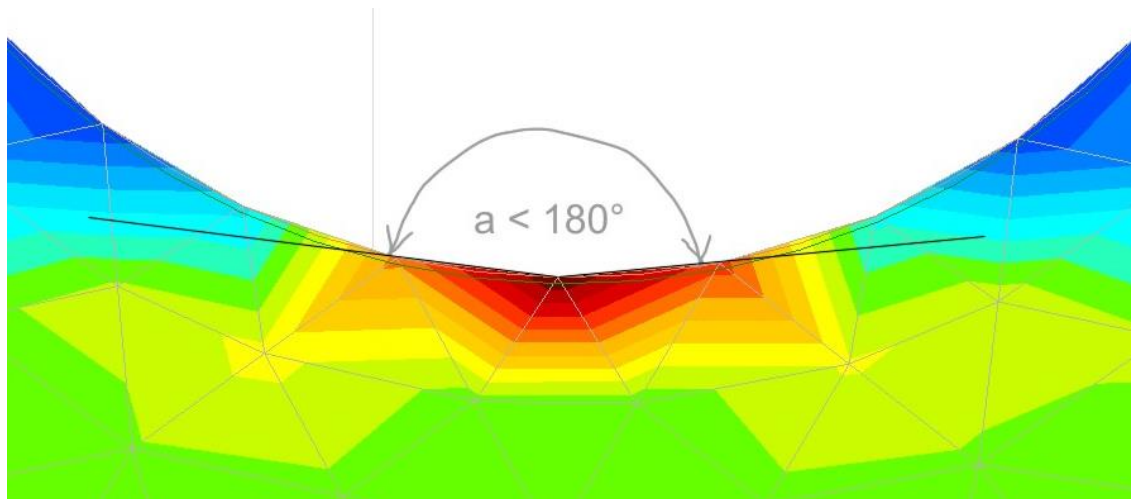


Joonis 3.4. Aukudega talade tüübid 7-12

3.5. Arvutusprogrammid

Arvutused on tehtud programmiga Mathcad 14. Joonestamiseks on kasutatud programmi Autocad 14 Student Version. Lisaks on läbipainete erinevuse hindamiseks kasutatud lõplike elementide meetodil põhinevat programmi AxisVM 11 Educational Version.

AxisVM 11 kasutamisel ilmnes probleem pingete leidmisega augu läheduses. Programmi lõplikud elemendid on sirgete servadega, kuid auk on ümmargune. Selle tõttu tekivad sirge servaga lõplike elementide liitumispunktidesse, mis asetsevad augu servas, pingekontsentratsioonid. (vt joonis 3.5) Antud punktis oleva pinge väärtus oleneb lõplike elementide suurusest. Mida väiksem on elemendi suurus, seda suurem on pinge väärtus ning see pingekontsentratsioon jaguneb elemendi suuruse kahanemisel järjest väiksemale alale. Neid leitud pingeid ei saa usaldusväärseteks pidada.



Joonis 3.5. Lõplike elementide liitumispunktis tekkiv pingekontsentratsioon

Analüüsiprogramm AxisVM 11 sobib talade läbipainete võrdlemiseks. Kui võrrelda ilma auguta talast ja plaadist koosneva süsteemi läbipaindeid, mis on arvutatud analüüsiprogrammiga ja ristlõike meetodil, siis ilmnevad tulemustes väikesed erinevused. Erinevused võivad tekkida sellest, et AxisVM 11 ei pea plaadi materjali teisendama ekvivalentseks materjaliks ja analüüsiprogramm arvestab mõjuvate jõudude poolt tekitatud sisepingete koosmõju läbipaindele. Samuti ei kasuta AxisVM 11 tegurit k_{def} . Ümmarguse auguga tala läbipainde leidmine ekvivalentse ristlõike meetodil on keeruline. AxisVM 11 on sellise analüüsi tegemiseks sobivam. Täpne läbipainde väärtus ei ole antud töös kõige olulisem, oluline on näidata läbipainde muutumist augu asetuse korral tala eri kohtades.

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

4.1. Ristkülikristlõikega puittala ja liimitud plaadiga liitristlõikega tala arvutustulemuste võrdlus

Järgnevalt on võrreldud ristkülikristlõikega saematerjalist puittala ja plaadist ning eelmainitud ristlõikega puittalast koosneva liitristlõike arvutustulemusi. Mõlemal juhul on tala ristlõike mõõtmed 45x245 mm ja pikkus 3910 mm. Talale liimitud plaat on 22 mm paks ja talad asetsevad 600 mm sammuga. Taladele mõjuvad normatiivne alaliskoormus $0,8 \frac{kN}{m^2}$ ja normatiivne kasuskoormus $2,0 \frac{kN}{m^2}$. Näidisarvutused on esitatud Lisas 1.

Plaadi liimimine puittala külge vähendab talas tekkivaid pingeid ja läbipainet võrreldes talaga, mille peale on plaat lihtsalt toetatud. Tabelis 4.1 on välja toodud erinevused painde- ja nihkepingetes ning läbipainetes. Suurimad paindepinged talas vähenevad plaadi liimimisega talale 31,6% võrra. Nihkepinged talas vähenevad 13,8%. Talast ja sellele liimitud plaadist koosneva liitristlõike nihkepinge kontroll liimühenduses on kriitilisem, kui nihkepinge kontroll talas. Erinevus tuleneb sellest, et tala puhul võrreldakse nihkepingeid tala nihketugevusega, liimühenduse kontrolli puhul puitlaastplaadi nihketugevusega. Tala tugevuse analüüsimisel tuleb sellele tähelepanu pöörata. Hetkeline läbipaine väheneb 43,3% ja lõplik läbipaine väheneb 35,1% võrra. Tala ja sellele liimitud plaat moodustavad koos töötava süsteemi, mis muudab kogu konstruktsiooni tunduvalt tugevamaks.

Kõige kriitilisem suurus on talast ja plaadist koosneva süsteemi korral tala lõplik läbipaine. Selle järgi saaks liimitud plaadiga talade sammu suurendada 500 mm võrra 1100 mm-ni arvestamata plaadi kandevõimet taladega ristuvast suunas. Sel juhul jääks lõplik läbipaine veel lubatud piiridesse.

Tabel 4.1. Ristkülikristlõikega saematerjalist puittala ja plaadist ning puittalast koosneva liitristlõike arvutustulemuste võrdlus

	Puittala	Varutegur	Liitristlõige	Varutegur
Suurim paindepinge talas $\sigma_{m.y.d}, \frac{N}{mm^2}$	10,09	0,68	6,90	0,47
Suurim nihkepinge talas $\tau_{v.d}, \frac{N}{mm^2}$	0,94	0,26	0,82	0,22
Suurim nihkepinge liimühenduses $\tau_{v.d}, \frac{N}{mm^2}$	-	-	0,35	0,41
Hetkeline läbipaine w_{inst}, mm	8,85	0,91	5,02	0,51
Lõplik läbipaine w_{fin}, mm	11,51	0,88	7,47	0,57
Saematerjali C24 arvutuslik paindetugevus $f_{m.y.d} = 14,77 \frac{N}{mm^2}$ Saematerjali C24 arvutuslik nihketugevus $f_{v.d} = 2,46 \frac{N}{mm^2}$ Lubatud hetkeline läbipaine $w_{inst.adm} = 9,78mm$ Lubatud lõplik läbipaine $w_{fin.adm} = 13,03mm$ Liimühenduse arvutuslik nihketugevus $f_{PLP.v.d} = 0,86 \frac{N}{mm^2}$				

4.2. Auguga tala läbipaine

Auguga liitristlõikega tala korral ei osutu läbipaine kriitilisemaks, augu servas tekkivad tõmbepinged on oluliselt kriitilisemad. AxisVM 11 annab ilma auguta prussist ja plaadist koosneva liitristlõikega tala hetkeliseks läbipaindeks 5,64 mm, mis on redutseeritud ristlõike meetodil arvatud hetkelisest läbipaindest (5,02 mm) vaid 0,62 mm erinev. Vahe tekib erinevatest arvutusmeetoditest läbipainde arvutamisel. Väärtuste erinevus on piisavalt väike, et AxisVM-ga leitud suurusi usaldusväärselt pidada. Järgnevas tabelis 4.2 on välja toodud liitristlõikega tala hetkelised läbipainde väärtused erinevate aukude paiknemiste korral. Tabelist on näha, et läbipaine muutub väga väikesel määral ja igal juhul jääb lubatud piiridesse. Lisas 5 on esitatud AxisVM-iga arvatud läbipainded 80 mm läbimõõduga ja tala kõrguse suhtes tsentris (vt joonis 3.3, 3) asuva auguga tala näitel. Lisas 6 on toodud AxisVM-iga saadud läbipainded augukombinatsiooni K-3 (vt joonis 3.4, 10) näitel.

Tabelis 4.2 on välja toodud talade suurimad läbipainded erinevate aukude kombinatsioonide juures. Lubatud hetkeline läbipaine konstruktsioonile on 9,78 mm. On

näha, et tala läbipaine jääb igasuguse augu või aukude kombinatsiooni korral lubatud piiridesse. Nagu võis eeldada, on üksikutest aukudest kõige ohtlikum kõige suurema läbimõõduga auk, jäädes ikkagi lubatud piiridesse. 80 mm ja 40 mm läbimõõduga aukude erineva paigutuse korral tala kõrguse suhtes ilmnes järgmine seaduspärasus - mida tala alaserva pool auk asetseb, seda suurem on tala läbipaine. Aukude kombinatsioonidest osutus kõige ohtlikumaks kombinatsioon K-3 ja väiksemad läbipainde erinevused olid kombinatsioonidel K-4 ja K-5. Kombinatsioonide puhul kehtib samuti seaduspärasus, et mida suuremad on augud, seda suurem on ka tala läbipaine. Kombinatsioonid K-2 ja K-3 koosnevad samadest aukudest, erinevus on ainult aukude omavahelises kauguses. Tulemustest on näha, et üksteisele lähemal asuvad augud põhjustavad tala suuremat läbipainet.

Tabel 4.2. Tala läbipainded (mm) erinevate aukude paigutuse korral vastavalt AxisVM-le

Augu kaugus tala otsast s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	$S_{x,max}$
1	120 mm auk tsentris	5,72	5,72	5,73	5,73	5,76	5,77	5,76	5,73
2	80 mm auk üleval	5,66	5,66	5,66	5,65	5,65	5,65	5,64	5,64
3	80 mm auk tsentris	5,66	5,66	5,66	5,67	5,67	5,67	5,67	5,66
4	80 mm auk all	5,66	5,67	5,67	5,69	5,70	5,72	5,74	5,72
5	40 mm auk üleval	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
6	40 mm auk tsentris	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
7	40 mm auk all	5,64	5,64	5,64	5,66	5,66	5,67	5,67	5,67
8	Kombinatsioon K-1	5,74	5,74	5,75	5,75	5,78	5,78	5,76	5,74
9	Kombinatsioon K-2	5,75	5,75	5,75	5,75	5,77	5,78	5,76	5,74
10	Kombinatsioon K-3	5,76	5,75	5,76	5,76	5,79	5,78	5,76	5,74
11	Kombinatsioon K-4	5,69	5,67	5,67	5,67	5,66	5,65	5,65	5,64
12	Kombinatsioon K-5	5,70	5,68	5,68	5,66	5,65	5,66	5,66	5,67

4.3. Aukudega tala tugevuse analüüs

4.3.1. Saksamaa ehitusstandardis aukude asetusele esitatavate nõuete analüüs

Saksamaa ehitusstandard DIN 1052:2008-12 seab karmid nõuded augu geomeetria ja asetusele talas. Standardi kohaselt on lubatud kõrgus augu all ja augu kohal $0,35h = 0,35 * 245 = 85,75 \text{ mm}$, mis tähendab, et üksikutest aukudest võiks selle punkti alusel

puurida talasse vaid 40 mm läbimõõduga augu tala tsentrisse. 120 mm augu puhul tala tsentris jääb augu alla ja augu kohale 62,5 mm ja 80 mm läbimõõduga augu puhul on vastavad suurused 82,5 mm. Antud töös vaadeldud augud paiknevad lisaks 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ala- ja ülaservast. 1/4 tala kõrgusest on 61,25 mm. See suurus oleks Saksamaa standardi eelmise versiooni kohaselt veel lubatud, kus augu alla ja augu kohale lubati $0,25h = 0,25 * 245 = 61,25 \text{ mm}$. Augu kõrgus on uusimas standardis piiratud suurusega $0,15h = 0,15 * 245 = 36,75 \text{ mm}$, mille kohaselt ei saaks ühtegi uuritavat auku talasse puurida. Eelmises standardi versioonis oli lubatud augu kõrguseks $0,4h = 0,4 * 245 = 98 \text{ mm}$, mis lubaks 40 ja 80 mm läbimõõduga auke. Aukudele seatud tingimused peavad kõik täidetud olema, seega ei tohiks ühtegi antud töös uuritud auku puittalasse puurida. Kirjeldatud tingimused ja nende karmimaks muutmine tõestavad, et aukude puurimisse talasse tuleb suhtuda ettevaatusega.

Saksamaa standardis lubatud aukudevaheline kaugus peab olema suurem või võrdne kui $1,5h = 1,5 * 245 = 367,5 \text{ mm}$, kuid alati vähemalt 300 mm. Antud punkti ja eelnevalt analüüsitud punkte arvesse võttes ei tohiks töös vaadeldud aukude kombinatsioone taladesse puurida.

4.3.2. Ameerika Ühendriikide juhendis aukude asetusele esitatavate nõuete analüüs

Ameerika Ühendriikide juhendi kohaselt on augu kohale ja augu alla lubatud tala kõrgus $0,15h = 0,15 * 245 = 36,75 \text{ mm}$, mille kohaselt võib kõiki uuritavaid auke talasse puurida. Samuti on kõikide aukude puhul täidetud augu kõrgusele seatud piirang $0,5h = 0,5 * 245 = 122,5 \text{ mm}$. Augu asetuse ja geomeetriasse suhtutakse leebemalt kui Saksamaa ehitusstandardis. Tähelepanu tuleb pöörata faktile, et Ameerika Ühendriikide juhend on spetsiaalselt liimpuidust talade jaoks, mis on saepuidust taladest tugevamad ja suuremad.

Ameerika Ühendriikide juhend lubab aukudevaheliseks kauguseks suurima järgnevatest suurustest: 305 mm, tala kõrgus 245 mm või neljakordne augu läbimõõt. Neljakordne augu läbimõõt leitakse suurima läbimõõduga augu läbimõõdu järgi. Kui kombinatsioonis on 120 mm läbimõõduga auk, on vastav suurus 480 mm, 80 mm läbimõõduga augu korral 320 mm ja 40 mm läbimõõduga augu korral 160 mm. Neljakordne augu läbimõõt muutub lubatud

kauguse määrajaks, kui kombinatsioonis on 120 või 80 mm läbimõõduga auk. 40 mm läbimõõduga aukudest koosnevas kombinatsioonis on lubatud aukudevaheline kaugus 305 mm. Antud tingimuse kohaselt ei ole ühtegi käesolevas töös uuritavat aukude kombinatsiooni lubatud puurida.

4.3.3. Painde- ja tõmbepingete analüüs erinevate üksikute aukude ning kombinatsioonide korral

Järgnevalt on analüüsitud aukude ja nende kombinatsioonide mõju tala kandevõimele. Paindepinged ristlõike alaservas, pikikiudu tõmbepinged augu all ja nihkepinged liimühenduses on leitud redutseeritud plaadiga liitristlõikele. Lisas 2 on välja toodud pingete arvutused näitel, kus 80 mm auk on tala kõrguse suhtes tsentris. Saksamaa ehitusstandardi arvutusmeetodit ja Ameerika Ühendriikide juhendit on rakendatud ilma plaadita talale kui ka liimitud plaadiga talale, et välja tuua plaadi liimimise mõju auguga tala kandevõimele. Lisas 3 ja 4 on välja toodud ristikiudu tõmbepingete arvutused näitel, kus 80 mm auk on tala kõrguse suhtes tsentris. Plaati arvestatakse vastavalt peatükis 3.3 välja pakutud lähenemisele. Antud juhul on pingete kontrollimisel mööda mindud augu asetusele seatud nõuetest, et võrrelda pingete arvutamise meetodeid.

Vastavate varutegurite arvutamiseks vajalikud arvutuslikud tugevused on järgmised:

- saematerjali C24 arvutuslik paindetugevus $f_{m.d} = 14,77 \frac{N}{mm^2}$;
- saematerjali C24 arvutuslik tõmbetugevus pikikiudu $f_{t.0.d} = 10,31 \frac{N}{mm^2}$;
- puitlaastplaadi arvutuslik nihketugevus $f_{PLP.v.d} = 0,86 \frac{N}{mm^2}$;
- arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu vastavalt DIN 1052:2008-12 $f_{t.90.d} = 0,25 \frac{N}{mm^2}$;
- arvutuslik efektiivne tõmbetugevus Weibulli meetodis $f_{t.90.eff.d} = 0,44 \frac{N}{mm^2}$.

Tabelist 4.3 on näha, et 120 mm läbimõõduga tala kõrguse suhtes tsentris asuva augu puhul on paindepinged ristlõike alaservas ja pikikiudu tõmbepinged augu alla jäävas osas lubatud piirides. Paindepingete varutegur on kõige ohtlikumal juhul (auk asub tala sildeava keskel) 0,63 ning tõmbepingete korral 0,73. Nihkepinge liimühenduses on iga augu asetuse korral lubatud piirides. Ilma plaadita tala korral keelab Saksamaa standard tõmbepingetest

lähtuvalt auke teha tala otsapiirkonda, antud juhul ei ole auk lubatud tala otsale lähemal kui 980 mm. Kui talale on liimitud plaat, muutub olukord paremaks. Tõmbepinged ja varutegurid vähenevad ning auku võib teha toele lähemale. Ameerika Ühendriikide juhendi järgi ei tohi 120 mm läbimõõduga auku ilma plaadita puittalasse teha. Plaadi liimimine talale muudab olukorda paremaks. Augu võib liimitud plaadiga tala korral teha tala tsentrisse. Üldiselt on näha, et nõrgima lüli teorial põhinev meetod lubab teha vähem auke.

Tabel 4.3. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 120 mm läbimõõduga auk asub tala tsentris (tala tüüp 1)

Tüüp 1. 120 mm auk tala tsentris									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm	245	490	735	980	1225	1470	1715	1895	
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa	2,66	4,47	5,99	7,22	8,16	8,81	9,17	9,25	
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$	0,18	0,30	0,41	0,49	0,55	0,60	0,62	0,63	
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa	2,16	3,63	4,87	5,87	6,63	7,16	7,45	7,51	
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$	0,21	0,35	0,47	0,57	0,65	0,70	0,73	0,73	
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa	0,28	0,24	0,20	0,16	0,12	0,07	0,03	0,00	
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$	0,33	0,28	0,23	0,18	0,13	0,08	0,04	0,00	
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,97	0,82	0,68	0,54	0,39	0,25	0,11	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,13	0,22	0,29	0,35	0,40	0,43	0,45	0,45
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,30	0,28	0,26	0,24	0,21	0,18	0,15	0,12
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	1,20	1,14	1,07	0,97	0,87	0,74	0,61	0,49
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,89	0,76	0,63	0,50	0,36	0,23	0,10	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,13	0,22	0,29	0,35	0,40	0,43	0,45	0,45
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,26	0,25	0,23	0,21	0,19	0,17	0,14	0,11
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	1,05	1,01	0,95	0,87	0,78	0,68	0,56	0,46
Weibulli meetod. Puittala	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d}$, MPa	0,87	0,74	0,61	0,48	0,35	0,22	0,09	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d}$, MPa	0,14	0,24	0,32	0,39	0,44	0,47	0,49	0,49
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	1,01	0,98	0,93	0,87	0,79	0,69	0,58	0,49
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.eff.d}$	2,28	2,21	2,10	1,96	1,78	1,57	1,32	1,11
Weibulli meetod. Liitristlõige	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d.PLP}$, MPa	0,78	0,67	0,55	0,43	0,32	0,20	0,09	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d.PLP}$, MPa	0,11	0,18	0,25	0,30	0,34	0,36	0,38	0,38
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,89	0,85	0,80	0,73	0,65	0,57	0,46	0,38
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.eff.d}$	2,01	1,92	1,80	1,65	1,48	1,28	1,05	0,86

Tabelist 4.4 on näha, et kui üksik 80 mm läbimõõduga auk asub 1/4 kõrguse kaugusel tala ülaservast, on plaadiga ristlõikes uuritavad painde-, tõmbe- ja nihkepinged lubatud piirides. Saksamaa ehitusstandardi arvutusmeetodi järgi on antud auku lubatud teha kõikidesse vaadeldavatesse kohtadesse talas. Plaadi liimimine talale parandab tugevuse varutegurit kuni 27,1%. Weibulli nõrgima lüli meetodil põhinev arvutus keelab ilma plaadita tala korral augu tegemise tala otsast kuni 1715 mm-ni. Auguga talale plaadi liimimine parandab olukorda kuni 23% ja lubab auku teha vaadeldava augu sammu võrra tala otsa poole.

Tabel 4.4. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 80 mm läbimõõduga auk asub tala ülemises pooles (tala tüüp 2)

Tüüp 2. 80 mm auk tala ülemises osas									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1915
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		2,01	3,48	4,72	5,73	6,50	7,04	7,35	7,43
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,14	0,24	0,32	0,39	0,44	0,48	0,50	0,50
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		1,32	2,28	3,10	3,76	4,27	4,62	4,82	4,87
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,14	0,25	0,33	0,41	0,46	0,50	0,52	0,53
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,30	0,25	0,21	0,17	0,12	0,08	0,04	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,67	0,57	0,47	0,37	0,28	0,18	0,08	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,13	0,23	0,32	0,38	0,43	0,47	0,49	0,50
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,96	0,96	0,94	0,91	0,85	0,78	0,68	0,59
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,62	0,52	0,43	0,34	0,25	0,16	0,07	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,10	0,18	0,24	0,29	0,33	0,36	0,38	0,38
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,20	0,19	0,19	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,80	0,79	0,76	0,71	0,66	0,59	0,50	0,43
Weibulli meetod. Puittala	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d}$, MPa	0,81	0,69	0,57	0,45	0,33	0,22	0,10	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d}$, MPa	0,09	0,15	0,21	0,25	0,29	0,31	0,33	0,33
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,90	0,84	0,78	0,71	0,62	0,53	0,42	0,33
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.eff.d}$	2,03	1,91	1,76	1,59	1,40	1,19	0,95	0,74
Weibulli meetod. Liitristlõige	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d.PLP}$, MPa	0,73	0,62	0,52	0,41	0,30	0,19	0,09	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d.PLP}$, MPa	0,07	0,12	0,16	0,20	0,22	0,24	0,25	0,25
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,80	0,74	0,68	0,61	0,52	0,44	0,34	0,25
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.eff.d}$	1,81	1,68	1,53	1,37	1,18	0,98	0,77	0,57

Weibulli nõrgima lüli teorial põhinev arvutus ei võta arvesse augu asukohta tala kõrguse suhtes. 80 mm läbimõõduga augu erineva paiknemise korral kõrguse suhtes on arvutusväärtused samad, mis tabelis 4.4 ja tabelites 4.5 ning 4.6 ei ole neid eraldi välja toodud. Painde- ja tõmbepinged on võrreldes augu paiknemisega tala ülemises osas muutunud suuremateks, kuid jäävad lubatud piiridesse. Nihkepinged liimühenduses on vähenenud. Saksamaa standardi meetodi kohaselt on tõmbepingetest lähtuvalt tala tsentrisse lubatud teha 80 mm auku igasse vaadeldavasse kohta ja plaadi liimimine talale suurendab tala tugevust. Augu paigutamine tala tsentrisse vähendab paindemomendi mõju ristikiudu tõmbepingetele võrreldes augu paiknemisega tala ülemises pooles.

Tabel 4.5. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 80 mm läbimõõduga auk asub tala tsentris (tala tüüp 3)

Tüüp 3. 80 mm auk tsentris									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1915
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		2,19	3,79	5,14	6,24	7,08	7,67	8,00	8,09
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,15	0,26	0,35	0,42	0,48	0,52	0,54	0,55
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		1,62	2,80	3,80	4,61	5,24	5,67	5,92	5,98
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,17	0,29	0,39	0,48	0,54	0,58	0,61	0,62
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,29	0,25	0,20	0,16	0,12	0,08	0,03	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,33	0,28	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,67	0,57	0,47	0,37	0,28	0,18	0,08	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,10	0,18	0,24	0,30	0,34	0,36	0,38	0,38
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18	0,16	0,14	0,11
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,93	0,90	0,86	0,80	0,73	0,65	0,55	0,46
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,62	0,52	0,43	0,34	0,25	0,16	0,07	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,10	0,18	0,24	0,30	0,34	0,36	0,38	0,38
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,20	0,19	0,19	0,18	0,16	0,15	0,12	0,11
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,80	0,79	0,76	0,72	0,66	0,59	0,51	0,43

80 mm läbimõõduga augu paiknemisel 1/4 tala kõrguse kaugusel tala alaservast jäävad painde- ja tõmbepinged lubatud piiridesse (vt tabel 4.6). Painde- ja tõmbepingete mõju on teiste 80 mm läbimõõduga aukude asetustega võrreldes kõige suuremad. See tuleneb asjaolust, et augu alla jääv talaosa on väiksem, kui teiste sama suure augu asetuste korral. Nihkepinged liimühenduses jäävad lubatud piiridesse. Ilma plaadita auguga tala

tõmbepinged vastavalt Saksamaa standardi juhendile on samad juhuga, kui sama läbimõõduga auk paikneb tala ülemises osas. Ilma plaadita olukorras on DIN 1052 arvutuses kasutatav tegur h_r , mis arvestab augu asukohta tala kõrguse suhtes, augu paiknemise korral tala ülemises või alumises pooles sama. Teguri väärtus oleneb minimaalsest suurusest, mis jääb augu kohale või alla ja see suurus on mõlema augu asetuse korral sama. Seetõttu on arvutustulemused samad. Plaadi liimimine talale muudab teguri h_r väärtust ja seetõttu tekivad tulemustes erinevused.

Tabel 4.6. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 80 mm läbimõõduga auk asub tala allosas (tala tüüp 4)

Tüüp 4. 80 mm auk tala allosas									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1915
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		2,51	4,35	5,90	7,15	8,12	8,79	9,18	9,27
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,17	0,29	0,40	0,48	0,55	0,60	0,62	0,63
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		2,04	3,54	4,81	5,83	6,62	7,17	7,48	7,56
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,20	0,34	0,47	0,57	0,64	0,70	0,73	0,73
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,29	0,25	0,21	0,16	0,12	0,08	0,03	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
DIN 1052:2008- 1.2. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,67	0,57	0,47	0,37	0,28	0,18	0,08	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,13	0,23	0,32	0,38	0,43	0,47	0,49	0,50
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,96	0,96	0,94	0,91	0,85	0,78	0,68	0,59
DIN 1052:2008- 1.2. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,62	0,52	0,43	0,34	0,25	0,16	0,07	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,13	0,23	0,32	0,38	0,43	0,47	0,49	0,50
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,14
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,84	0,85	0,84	0,81	0,77	0,71	0,63	0,55

40 mm läbimõõduga augu asetsemisel 1/4 tala kõrguse kaugusel tala ülaservast on painde-, tõmbe- ja nihkepinged lubatud piirides (vt tabel 4.7). DIN 1052 kohaselt on tõmbepingetest lähtuvalt 40 mm läbimõõduga augu puurimine talasse lubatud ja plaadi liimimine talale parandab kandevõimet kuni 30%. 40 mm läbimõõduga augu iga asetuse korral tala kõrguse suhtes on ohtlikum piirkond sildeava keskkoha ja toe vahel. Tekkinud olukord on põhjustatud augu ja tala geomeetriast ja mõjuvatest jõududest. Weibulli nõrgima lüli meetodil põhineva juhendi kohaselt on tõmbepingetest lähtuvalt 40 mm läbimõõduga auku lubatud teha tala sildeava keskossa. Auk peab paiknema vähemalt 1470 mm kaugusel toest.

Plaadi liimimine talale parandab tala kandevõimet kuni 22% ja laiendab tala sildeava keskosas olevat ala, kuhu on augu tegemine lubatud.

Tabel 4.7. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 40 mm läbimõõduga auk asub tala ülasosas (tala tüüp 5)

Tüüp 5. 40 mm auk tala ülemises osas									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1935
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		1,80	3,23	4,44	5,42	6,18	6,72	7,03	7,12
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,12	0,22	0,30	0,37	0,42	0,45	0,48	0,48
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		0,92	1,65	2,27	2,77	3,16	3,43	3,59	3,63
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,11	0,19	0,26	0,32	0,36	0,39	0,41	0,42
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,31	0,26	0,22	0,17	0,13	0,08	0,04	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,36	0,31	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,14	0,25	0,34	0,41	0,47	0,51	0,53	0,54
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,16	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,18
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,63	0,71	0,77	0,80	0,81	0,80	0,76	0,71
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,31	0,27	0,22	0,18	0,13	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,10	0,18	0,25	0,31	0,35	0,38	0,40	0,41
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,51	0,55	0,58	0,60	0,59	0,58	0,54	0,50
Weibulli meetod. Puittala	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d}$, MPa	0,75	0,64	0,53	0,42	0,31	0,21	0,10	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d}$, MPa	0,04	0,07	0,10	0,13	0,14	0,16	0,16	0,16
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,79	0,71	0,63	0,55	0,46	0,36	0,26	0,16
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.eff.d}$	1,78	1,61	1,43	1,23	1,03	0,81	0,59	0,37
Weibulli meetod. Liitristlõige	Tõmbepinge lõikejõust, $\sigma_{t.90.v.d.PLP}$, MPa	0,68	0,58	0,48	0,38	0,28	0,19	0,09	0,00
	Tõmbepinge paindemom., $\sigma_{t.90.M.d.PLP}$, MPa	0,03	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,71	0,64	0,56	0,48	0,40	0,31	0,21	0,13
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.eff.d}$	1,60	1,44	1,27	1,08	0,89	0,69	0,48	0,29

40 mm läbimõõduga augu paiknemisel tala kõrguse suhtes tsentris on painde-, tõmbe ja nihkepinged suuremad, kui augu asetuse korral tala ülemises osas, jäädes siiski lubatud piiridesse (vt tabel 4.8). Vastavalt DIN 1052 arvutusjuhendile on antud augu asetuse korral lubatud auk teha kõikidesse vaadeldud kohtadesse ja plaadi liimimine talale parandab tala kandevõimet. Tabelites 4.8 ja 4.9 ei ole välja toodud Weibulli meetodi tulemusi, sest need on samad tabelis 4.7 olevate tulemustega.

Tabel 4.8. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 40 mm läbimõõduga auk asub tala tsentris (tala tüüp 6)

Tüüp 6. 40 mm auk tsentris									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1935
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		1,90	3,40	4,68	5,71	6,51	7,08	7,41	7,50
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,13	0,23	0,32	0,39	0,44	0,48	0,50	0,51
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		1,26	2,26	3,11	3,80	4,33	4,71	4,93	4,99
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,14	0,24	0,33	0,41	0,47	0,51	0,53	0,54
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,30	0,25	0,21	0,17	0,12	0,08	0,04	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,08	0,15	0,21	0,25	0,29	0,32	0,33	0,33
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,56	0,59	0,60	0,59	0,57	0,54	0,50	0,44
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,31	0,27	0,22	0,18	0,13	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,08	0,15	0,21	0,25	0,29	0,32	0,33	0,33
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,49	0,51	0,53	0,53	0,52	0,49	0,45	0,41

Painde- ja tõmbepinged on 40 mm läbimõõduga augu asetsemise korral tala allosas suurimad võrreldes sama läbimõõduga augu teiste asetustega tala kõrguse suhtes (vt tabel 4.9). Pingete kasvamine on põhjustatud augu alla jääva osa vähenemisest. Mida väiksem osa talast jääb augu alla, seda suuremad on paindepinged ja tõmbepinged pikikiudu. Nihkepinged liimühenduses jäävad lubatud piiridesse. 40 mm läbimõõduga augu korral tekivad DIN 1052 arvutustulemustes 80 mm läbimõõduga auguga talaga analoogsed tegurist h_r põhjustatud erinevused.

Tabel 4.9. Painde-, tõmbe- ja nihkepinged ning DIN1052 ja Weibulli meetodi arvutustulemused, kui 40 mm läbimõõduga auk asub tala allosas (tala tüüp 7)

Tüüp 7. 40 mm auk tala alumises osas									
Serva kaugus sildeava otsast, s_x , mm		245	490	735	980	1225	1470	1715	1935
Paindepinge ristlõike alaservas, $\sigma_{m.d.auk}$, MPa		2,16	3,88	5,33	6,51	7,42	8,07	8,44	8,55
Varutegur, $\sigma_{m.d.auk}/f_{m.d}$		0,15	0,26	0,36	0,44	0,50	0,55	0,57	0,58
Tõmbepinge augu all, $\sigma_{t.0.d.auk}$, MPa		1,75	3,13	4,30	5,26	6,00	6,52	6,82	6,91
Varutegur, $\sigma_{t.0.d.auk}/f_{t.0.d}$		0,17	0,30	0,42	0,51	0,58	0,63	0,66	0,67
Nihkepinge liimühenduses, $\tau_{glue.d}$, MPa		0,31	0,26	0,22	0,17	0,13	0,08	0,04	0,00
Varutegur, $\tau_{glue.d}/f_{PLP.v.d}$		0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,00
DIN 1052:2008- 12. Puittala	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d}$, kN	0,34	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemomendist, $F_{t.90.M.d}$, kN	0,14	0,25	0,34	0,41	0,47	0,51	0,53	0,54
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d}$, MPa	0,16	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,18
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d}/f_{t.90.d}$	0,63	0,71	0,77	0,80	0,81	0,80	0,76	0,71
DIN 1052:2008- 12. Liitristlõige	Tõmbejõud lõikejõust, $F_{t.90.v.d.PLP}$, kN	0,31	0,27	0,22	0,18	0,13	0,09	0,04	0,00
	Tõmbejõud paindemom., $F_{t.90.M.d.PLP}$, kN	0,14	0,25	0,34	0,41	0,47	0,51	0,53	0,54
	Tõmbepinge ristikiudu, $\sigma_{t.90.d.PLP}$, MPa	0,14	0,15	0,17	0,18	0,18	0,18	0,17	0,16
	Varutegur, $\sigma_{t.90.d.PLP}/f_{t.90.d}$	0,55	0,63	0,69	0,72	0,74	0,73	0,70	0,66

Mitme augu puurimisel talasse tuleb eelkõige jälgida DIN 1052 standardis ja Ameerika Ühendriikide juhendis kehtestatud aukude paiknemisele esitatavaid nõudeid. Analüüsi mõttes geomeetristest piirangutest mööda minnes, tuleb Saksamaa ehitusstandardi arvutuse kasutamiseks jälgida ka aukudevahelist kaugust seoses augu serva tekkiva pingekolmnurga pikkusega $l_{t.90}$. Vastavalt peatükis 2.4 kirjeldatud põhjustele on kolmnurkse pingepüüri tekkimine vajalik DIN 1052 arvutusmeetodi kasutamiseks. 120 mm läbimõõduga augu puhul on ilma plaadita tala korral pingekolmnurga pikkus 164,5 mm ja liimitud plaadiga tala korral 175,9 mm. 80 mm läbimõõduga augu korral on vastavad suurused 150,7 mm ja 161,7 mm ning 40 mm läbimõõduga augu korral 136,6 mm ja 147,6 mm. Oluline on jälgida, et aukude vahele jääks piisavalt ruumi pingekolmnurga tekkimiseks, või paigutada augud nii, et üks auk ei katkestaks teise augu pingekolmnurka. Auke on võimalik paigutada erinevatele kõrgustele talas. Lisaks tuleb vaadelda augukombinatsiooni erinevates aukudega ristlõigetel tekkivaid ristikiudu tõmbepingeid kas DIN 1052 meetodil või Weibulli nõrgima lüli teorial põhineval meetodil. Kontrollima peab iga augu servas tekkivaid ristikiudu tõmbepingeid. Augukombinatsiooni iga augu ristikiudu tõmbepinged peavad olema lubatud piirides.

KOKKUVÕTE

Augu puurimisega puittalasse muudetakse tala normaalset pingeaotust ja vähendatakse töötava ristlõike suurust. Augu näol on tegu väga tõsiselt võetava nõrgestusega. Puuritud auguga talas tekkivate pingete kontrollimine on väga oluline. Fakt, et augu mõju käsitletakse standardites ja käsiraamatutes erinevalt, kui üldse käsitletakse, viitab sellele, et aukude mõju arvestamine on keeruline ja vajab veel põhjalikku uurimist.

Rootsi liimpuidu käsiraamatus kirjeldatud meetodid ja Ameerika Ühendriikide auguga liimpuidust tala arvutusjuhend on spetsiaalselt liimpuidust talade jaoks. Saksamaa ehitusstandardis DIN 1052:2008-12 ei ole täpsustatud, missugustele taladele juhend mõeldud on. Eurokoodeksis 5 ei ole üldse aukudega talade arvutust käsitletud ja kehtiv Saksamaa standard on muutnud nõudeid augu geomeetria eelmise standardi versiooniga võrreldes karmimaks. Väikesemõõduliste saepuidust aukudega talade arvutamiseks sobiliku juhendi leidmine on keeruline.

Käesolevas töös kasutati arvutusteks Saksamaa ehitusstandardis ja Ameerika Ühendriikide juhendis kirjeldatud meetodeid. Ristkülikristlõikega puittala ja puitprussist ja puitlaastplaadist koosneva liitristlõikega põrandatala kandevõimet ja läbipainet kontrolliti ilma auguta ja ka auguga juhtudel. Auguga puittalast ja redutseeritud laiusega puitlaastplaadist koosnevas liitristlõikes kontrolliti paindepingeid tala alaservas, pikikiudu tõmbepingeid augu all ja nihkepingeid tala ja plaadi vahelises liimühenduses. Augu servas tekkivaid ristikiudu tõmbepingeid kontrolliti vastavalt Saksamaa ehitusstandardi DIN 1052:2008-12 juhendile ja Ameerika Ühendriikide Weibulli nõrgima lüli teoorial põhinevale juhendile. Plaadi mõju ristikiudu tõmbepingete kontrollimisel arvestati vastavalt töö autori poolt välja pakutud meetodile, kus arvutustes suurendati tala kõrgust plaadi paksuse võrra. Puitlaastplaadist ja auguga puittalast liitristlõikega tala läbipainded jäävad iga augu asetuse või augukombinatsiooni korral lubatud piiridesse.

Tulemustest selgus, et plaadi liimimisega talale saavutatakse tala parem kandevõime. Puittala ja sellele liimitud puitlaastplaat hakkavad koos tööle ja seetõttu paraneb kandevõime ja väheneb läbipaine. Paindepinged tala alaservas vähenesid plaadi liimimisega talale 31,6% ja talas tekkivad nihkepinged vähenesid 13,8%. Hetkeline

läbipaine vähenes plaadi tala külge liimimise järel 43,3% ja lõplik läbipaine 35,1%. Puitlaasplaadi liimimine puittala külge annab tuntava kandevõime paranemise ja läbipainde vähenemise.

Plaadi talale liimimise positiivne mõju tuli välja ka ristikiudu tõmbepingete kontrollimisel. Iga augu suuruse ja asetuse korral oli plaadist ja auguga talast koosneva liitristlõike ristikiudu tõmbepingete tugevusvaru suurem ilma plaadita ristkülikulise ristlõikega auguga puittala tugevusvarust. Ristikiudu tõmbepingete arvutused tehti mööndusel, et minnakse mööda juhendites kirjeldatud augu asetusele talas seatud piirangutest. DIN 1052:2008-12 ja Ameerika Ühendriikide juhend seavad augu geomeetria ja asukohale talas väga karmid nõuded. DIN 1052 geomeetria seatud piiranguid järgides ei tohiks ühtegi antud töös vaadeldud auku uuritud suurusega taladesse puurida. Samas lubab ristikiudu tõmbepingete seisukohalt Saksamaa standard rohkem auke kui Ameerika Ühendriikide juhend. Ameerika Ühendriikide juhend lubab geomeetriast lähtuvalt kõiki vaadeldud auke teha. Tuleb ära mainida, et Ameerika Ühendriikide juhend on spetsiaalselt liimpuidu jaoks, mis on saepuidust tunduvalt tugevam.

Magistritöö käigus selgus, et aukude puurimine saepuidust taladesse on ohtlik. Iga arvutusjuhend märkis ära, et esmajoones tuleb aukude puurimist vältida ja seda juba liimpuidust talade korral. Augu tegemine on äärmuslik abinõu, mida tuleb kasutada viimase võimalusena. Et saematerjalist taladesse puuritud aukude mõjust paremini aru saada ja kontrollida olemasolevate arvutusjuhendite kasutamise võimalikkust aukudega saepuidust talade korral, on vaja viia läbi põhjalikud katsed ja tulemuste analüüs.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aicher, S., Höfflin, L. Fracture behaviour and design of glulam beams with round holes. 2008. 8 p.

Aicher, S., Höfflin, L. New Design Model for Round Holes in Glulam Beams. 2004. 6 p.

AITC Technical Note 19. Guidelines for Evaluation of Holes and Notches in Structural Glued Laminated Timber Beams. 2012. 14 p.

Allikas, L. Puit- ja plastmasskonstruktsioonid. Tallinn: kirjastus Valgus, 1985. 360 lk.

Danielsson, H., Gustafsson, P. J. Strength of Glulam Beams with Holes – Tests of Quadratic Holes and Literature Test Result Compilation. 2008. 11 p.

Danielsson, H. The Strength of Glulam Beams With Holes. 2009. 69 p.

Danielsson, H. The Strength of Glulam Beams With Holes. A Survey of Tests and Calculation methods. 2007. 85 p.

DIN 1052:2004-08. Design of Timber Structures – General Rules and Rules for Building. 2004. German Institute for Standardization.

DIN 1052:2008-12. Design of Timber Structures – General Rules and Rules for Building. 2008. German Institute for Standardization.

EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007+A1:2008+NA:2009. Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. 2009. Eesti Standardikeskus.

Falk, R.H., DeVisser, D., Plume, G.R., Fridley, K.J. Effect of Drilled Holes on the Bending strength of Large Dimension Douglas-fir Lumber. *Forest Products Journal*, 2003, Vol. 53, No. 5, p 55-60.

Just, E. Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2012. 183 lk.

Kretschmann, D, E. Mechanical Properties of Wood. *Wood Handbook. Chapter 5, 2010.*
46 p.

Limträhandbok. Toimetaja Olle Carling. Sundsvall: Print & Media Center, 2008. 232 p.

Ehituskonstruktori käsiraamat. Toimetaja Tiit Masso. Tallinn: kirjastus Ehitame, 2012.
576 lk.

Porteus, J., Kermani, A. Structural Timber Design to Eurocode 5. Malden: Blackwell
Publishing Ltd, 2007. 542 p.

Saarman, E., Veibri, U. Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts, 2006. 560 lk.

LISAD

LISA 1. Puittalast ja puitlaastplaadist koosneva liitristlõike ning plaadita

ristkülikristlõike kandevõime ja läbipainde arvutused

Puitlaastplaadist ja talast koosneva liitristlõike tugevusarvutus redutseeritud ristlõike meetodil

Tala efektiivne pikkus	$L_{ef} := 3910\text{mm}$
Tala laius	$b_w := 45\text{mm}$
Tala kõrgus	$h_w := 245\text{mm}$
Talade samm	$s_w := 600\text{mm}$
Plaadi paksus	$h_f := 22\text{mm}$
Tala ristlõike pindala	$A_w := b_w \cdot h_w = 11025 \cdot \text{mm}^2$
Ristlõike kõrgus	$h := h_w + h_f = 267 \cdot \text{mm}$
Talade puhas vahe	$b_f := s_w - b_w = 555 \cdot \text{mm}$
Efektiivne plaadi laius survetsoonis	$b_{c,ef} := \min(0.2 \cdot L_{ef}, 30 \cdot h_f) = 660 \cdot \text{mm}$
Nõtkepikkuse kontroll survevõõle	$\frac{b_f}{2 \cdot b_{c,ef}} = 0.42 \quad \frac{b_f}{2 \cdot b_{c,ef}} < 1 \rightarrow 1$
	$b_{eff.1} := b_{c,ef} + b_w = 705 \cdot \text{mm}$
Plaadi efektiivne laius	$b_{eff} := \min(s_w, b_{eff.1}) = 600 \cdot \text{mm}$

Materjalide tugevusomadused

Paindetugevus	$f_{m.k} := 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Nihketugevus	$f_{v.k} := 4.0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Elastusmoodul	$E_{0.mean} := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Nihkemoodul	$G_{mean} := 690 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Paindetugevus	$f_{PLP.m.k} := 11.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Survetugevus	$f_{PLP.c.k} := 10 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Tõmbetugevus	$f_{PLP.t.k} := 8.0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Lõiketugevus	$f_{PLP.v.k} := 1.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Elastsusmoodul	$E_{PLP.m.mean} := 2800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Osavarutegurid

Alaline koormus $\gamma_G := 1.2$

Muutuvkoormus $\gamma_Q := 1.5$

Kombinatsioonitegur. Kasuskoormus. Klass A $\psi_2 := 0.3$

Materjali osavarutegur $\gamma_M := 1.3$

$\gamma_{PLP.M} := 1.3$

Koormused

Alaline koormus $g_k := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Muutuvkoormus $q_k := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Arvutuslik joonkoormus $p_{jd} := (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot s_w = 2.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Arvutuslik paindemoment $M_d := \frac{p_{jd} \cdot L_{ef}^2}{8} = 4.54 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Arvutuslik lõikejõud $V_d := p_{jd} \cdot \frac{L_{ef}}{2} = 4.65 \text{ kN}$

Paindemoment alaliskoormusest $M_{y.g.k} := \frac{g_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^2}{8} = 0.92 \text{ m} \cdot \text{kN}$

Paindemoment muutuvkoormusest $M_{y.q.k} := \frac{q_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^2}{8} = 2.29 \text{ m} \cdot \text{kN}$

Modifikatsioonitegurid

Kasutusklass 1. Keskkestev.

$k_{\text{mod.C24}} := 0.8$

$k_{\text{mod.PLP}} := 0.7$

k.mod ühendus $k_{\text{mod.con}} := (k_{\text{mod.C24}} k_{\text{mod.PLP}})^{0.5} = 0.748$

Süsteemi tugevuse tegur $k_{\text{sys}} := 1.0$

Pragunemistegur $k_{\text{cr}} := 0.67$

Tala kõrguse tegur $k_h := 1.0$ Sest $h_w > 150 \text{ mm}$

Deformatsiooni tegur, tala $k_{\text{def.w}} := 0.6$

Deformatsiooni tegur, plaat $k_{\text{def.f}} := 1.5$

$k_{\text{def.kesk}} := 2 \cdot \sqrt{k_{\text{def.w}} \cdot k_{\text{def.f}}} = 1.897$

Geomeetriselised omadused

Hetkeline olukord

Redutseeritud plaadi laius

$$b_{f.tfd.inst} := \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) = 152.73 \cdot \text{mm}$$

Redutseeritud ristlõike pindala

$$A_{ef.inst} := A_w + \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot h_f = 14385 \cdot \text{mm}^2$$

Keskstelje kaugus (ristlõike alt)

$$x_{c.inst} := \frac{b_{f.tfd.inst} \cdot h_f \cdot \left(h_w + \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot h_w \cdot \frac{h_w}{2}}{A_{ef.inst}} = 153.68 \cdot \text{mm}$$

Plaadi inertsimoment

$$I_{ef.inst} := \frac{b_{f.tfd.inst} \cdot h_f^3}{12} + b_{f.tfd.inst} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c.inst} - \frac{h_f}{2} \right)^2 = 3.5311 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Tala inertsimoment

$$I_{ef.w} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot \left(x_{c.inst} - \frac{h_w}{2} \right)^2 = 6.5868 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Ristlõike inertsimoment

$$I_{ef.inst} := I_{ef.inst} + I_{ef.w} = 1.0118 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

Lõplik olukord

Redutseeritud plaadi laius

$$b_{f.tfd.fin} := \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot \frac{1 + \psi_2 \cdot k_{def.w}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def.f}} = 124.29 \cdot \text{mm}$$

Redutseeritud ristlõike pindala

$$A_{ef.fin} := A_w + \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot h_f \cdot \frac{1 + \psi_2 \cdot k_{def.w}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def.f}} = 13759.34 \cdot \text{mm}^2$$

Keskstelje kaugus (ristlõike alt)

$$x_{c.fin} := \frac{b_{f.tfd.fin} \cdot h_f \cdot \left(h_w + \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot h_w \cdot \frac{h_w}{2}}{A_{ef.fin}} = 149.03 \cdot \text{mm}$$

Plaadi inertsimoment

$$I_{ef.fin} := \frac{b_{f.tfd.fin} \cdot h_f^3}{12} + b_{f.tfd.fin} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c.fin} - \frac{h_f}{2} \right)^2 = 3.1398 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Tala inertsimoment

$$I_{ef.w.fin} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \cdot \left(x_{c.fin} - \frac{h_w}{2} \right)^2 = 6.2908 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Ristlõike inertsimoment

$$I_{ef.fin} := I_{ef.fin} + I_{ef.w.fin} = 9.4306 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Plaadi survepinge kontroll. Hetkeline olukord

Survepinge plaadis
$$\sigma_{f.c.d} := \frac{M_d}{I_{ef.inst}} \cdot \left(h - x_{c.inst} - \frac{h_f}{2} \right) \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} = 1.17 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Plaadi survetugevus
$$f_{PLP.c.d} := \frac{k_{mod.PL} k_{sys} \cdot f_{PLP.c.k}}{\gamma_{PLP.M}} = 5.38 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{f.c.d}}{f_{PLP.c.d}} = 0.22$$

$$\frac{\sigma_{f.c.d}}{f_{PLP.c.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Plaadi paindepinge kontroll. Hetkeline olukord

Paindepinge plaadis
$$\sigma_{f.m.d} := \frac{M_d}{I_{ef.inst}} \cdot (h - x_{c.inst}) \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} = 1.29 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Plaadi paindetugevus
$$f_{PLP.m.d} := \frac{k_{mod.PL} k_{sys} \cdot f_{PLP.m.k}}{\gamma_{PLP.M}} = 6.30 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{f.m.d}}{f_{PLP.m.d}} = 0.21$$

$$\frac{\sigma_{f.m.d}}{f_{PLP.m.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Tala paindepinge kontroll

Hetkeline olukord

Paindepinge talas
$$\sigma_{w.c.d.inst} := \frac{M_d}{I_{ef.inst}} \cdot (x_{c.inst}) = 6.90 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Tala paindetugevus
$$f_{w.d} := \frac{k_{mod.C24} k_{sys} \cdot k_h \cdot f_{m.k}}{\gamma_M} = 14.77 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{w.c.d.inst}}{f_{w.d}} = 0.47$$

$$\frac{\sigma_{w.c.d.inst}}{f_{w.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Paindepinge talas
$$\sigma_{w.c.d.fin} := \frac{M_d}{I_{ef.fin}} \cdot x_{c.fin} = 7.18 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{w.c.d.fin}}{f_{w.d}} = 0.49$$

$$\frac{\sigma_{w.c.d.fin}}{f_{w.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Tala nihkepinge kontroll

Hetkeline olukord

Ülemise osa staatiline
moment kesketelje
suhtes

$$S_{\text{ül.inst}} := b_{\text{ftfd.inst}} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{\text{c.inst}} - \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot (h_w - x_{\text{c.inst}}) \cdot \left(\frac{h_w - x_{\text{c.inst}}}{2} \right) = 5.3141 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Nihkepinge talas $\tau_{\text{v.d.inst}} := \frac{V_d \cdot S_{\text{ül.inst}}}{I_{\text{ef.inst}} \cdot b_w \cdot k_{\text{cr}}} = 0.81 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tala nihketugevus $f_{\text{v.d}} := \frac{k_{\text{mod.C24}} \cdot k_{\text{sys}} \cdot f_{\text{v.k}}}{\gamma_M} = 2.46 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\frac{\tau_{\text{v.d.inst}}}{f_{\text{v.d}}} = 0.33$$

$$\frac{\tau_{\text{v.d.inst}}}{f_{\text{v.d}}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Ülemise osa staatiline
moment kesketelje
suhtes

$$S_{\text{ül.fin}} := b_{\text{ftfd.fin}} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{\text{c.fin}} - \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot (h_w - x_{\text{c.fin}}) \cdot \left(\frac{h_w - x_{\text{c.fin}}}{2} \right) = 4.9972 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Nihkepinge talas $\tau_{\text{v.d.fin}} := \frac{V_d \cdot S_{\text{ül.fin}}}{I_{\text{ef.fin}} \cdot b_w \cdot k_{\text{cr}}} = 0.82 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\frac{\tau_{\text{v.d.fin}}}{f_{\text{v.d}}} = 0.33$$

$$\frac{\tau_{\text{v.d.fin}}}{f_{\text{v.d}}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Liimühenduse kontroll

Hetkeline olukord

Plaadi staatiline moment keskelje suhtes

$$S_{f_{inst}} := b_{ftd} \cdot inst \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c,inst} - \frac{h_f}{2} \right) = 3.4379 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Nihkepinge liimühenduses

$$\tau_{glue.d,inst} := \frac{V_d \cdot S_{f_{inst}}}{I_{ef,inst} \cdot b_w} = 0.35 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Plaadi nihketugevus

$$f_{PLP,v,d} := \frac{k_{mod} \cdot \alpha_{sys} \cdot f_{PLP,v,k}}{\gamma_{PLP,M}} = 0.86 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Plaadi nihketugevus plaadi tasandis

$$f_{PLP,v,90,d} := \begin{cases} f_{PLP,v,d} & \text{if } b_w \leq 8 \cdot h_f \\ \left[f_{PLP,v,d} \left(\frac{8 \cdot h_f}{b_w} \right)^{0.8} \right] & \text{if } b_w \geq 8 \cdot h_f \end{cases} = 0.86 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau_{glue.d,inst}}{f_{PLP,v,90,d}} = 0.41$$

$$\frac{\tau_{glue.d,inst}}{f_{PLP,v,d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Plaadi staatiline moment keskelje suhtes

$$S_{f_{fin}} := b_{ftd,fin} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c,fin} - \frac{h_f}{2} \right) = 2.9249 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Nihkepinge liimühenduses

$$\tau_{glue.d,fin} := \frac{V_d \cdot S_{f_{fin}}}{I_{ef,fin} \cdot b_w} = 0.32 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau_{glue.d,fin}}{f_{PLP,v,90,d}} = 0.37$$

$$\frac{\tau_{glue.d,fin}}{f_{PLP,v,d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Tala läbipaine

Hetkeline olukord

Läbipaine alaliskoormusest

$$w_{inst,G} := \frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,inst}} + \frac{M_{y,g,k}}{G_{mean} \cdot A_w} = 1.43 \cdot \text{mm}$$

Läbipaine muutuvkoormusest

$$w_{inst,Q} := \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,inst}} + \frac{M_{y,q,k}}{G_{mean} \cdot A_w} = 3.58 \cdot \text{mm}$$

Lõplik hetkeline läbipaine

$$w_{inst} := w_{inst,G} + w_{inst,Q} = 5.02 \cdot \text{mm}$$

Lubatud läbipaine

$$w_{inst,adm} := \frac{L_{ef}}{400} = 9.78 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{w_{inst}}{w_{inst,adm}} = 0.51$$

$$\frac{w_{inst}}{w_{inst,adm}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Redutseeritud plaadi laius $b_{SLS.f.tfd} := \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot \frac{1 + k_{def.w}}{1 + k_{def.f}} = 97.75 \cdot \text{mm}$

Redutseeritud ristlõike pindala $A_{SLS.ef.fin} := A_w + \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot h_f \cdot \frac{1 + k_{def.w}}{1 + k_{def.f}} = 13175.40 \text{mm}^2$

Kesktele kaugus (ristlõike alt) $x_{SLS.c.fin} := \frac{b_{SLS.f.tfd} h_f \left(h_w + \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot h_w \cdot \frac{h_w}{2}}{A_{SLS.ef.fin}} = 144.29 \cdot \text{mm}$

Plaadi inertsimoment $I_{SLS.ef.fin} := \frac{b_{SLS.f.tfd} h_f^3}{12} + b_{SLS.f.tfd} h_f \left(h - x_{SLS.c.fin} - \frac{h_f}{2} \right)^2 = 2.692 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$

Tala inertsimoment $I_{SLS.ef.w.fin} := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + A_w \left(x_{SLS.c.fin} - \frac{h_w}{2} \right)^2 = 6.0382 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$

Ristlõike inertsimoment $I_{SLS.ef.fin} := I_{SLS.ef.f.fin} + I_{SLS.ef.w.fin} = 8.7305 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$

Läbipaine alaliskoormusest $w_{fin.G} := \left(\frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^4}{E_{0.mean} \cdot I_{SLS.ef.fin}} + \frac{M_{y.g.k}}{G_{mean} \cdot A_w} \right) \cdot (1 + k_{def.w}) = 2.63 \cdot \text{mm}$

Läbipaine muutuvkoormusest $w_{fin.Q} := \left(\frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot s_w \cdot L_{ef}^4}{E_{0.mean} \cdot I_{SLS.ef.fin}} + \frac{M_{y.q.k}}{G_{mean} \cdot A_w} \right) \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def.w}) = 4.84 \cdot \text{mm}$

Lõplik läbipaine $w_{fin} := w_{fin.G} + w_{fin.Q} = 7.47 \cdot \text{mm}$

Lubatud lõplik läbipaine $w_{fin.adm} := \frac{L_{ef}}{300} = 13.03 \cdot \text{mm}$

$$\frac{w_{fin}}{w_{fin.adm}} = 0.57$$

$$\frac{w_{fin}}{w_{fin.adm}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Nelinurkristlõikega puittala tugevusarvutus

Paindepinge kontroll

Ristlõike vastupanumoment $W_y := \frac{b_w \cdot h_w^2}{6} = 4.5019 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$

Paindepinge talas $\sigma_{m.y.d} := \frac{M_d}{W_y} = 10.09 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tala paindetugevus $f_{m.y.g.d} := \frac{k_{\text{mod.C24}} f_{m.k}}{\gamma_M} = 14.77 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.g.d}} = 0.68$$

$$\frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.g.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Nihkepinge kontroll

Tala nihketugevus $f_{v.d.1} := \frac{k_{\text{mod.C24}} f_{v.k}}{\gamma_M} = 2.46 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Nihkepinge talas $\tau_d := \frac{1.5 \cdot V_d}{h_w \cdot b_w \cdot k_{cr}} = 0.94 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\frac{\tau_d}{f_{v.d.1}} = 0.38$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v.d.1}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Läbipaine

Hetkeline olukord

Lihttala inertsimoment	$I_y := \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} = 5.515 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$
Läbipaine alaliskoormusest	$w_{\text{LT.inst.G}} := \frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot s_w \cdot L_{\text{ef}}^4}{E_{0,\text{mean}} \cdot I_y} + \frac{M_{y.g.k}}{G_{\text{mean}} \cdot A_w} = 2.53 \cdot \text{mm}$
Läbipaine muutuvkoormusest	$w_{\text{LT.inst.Q}} := \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot s_w \cdot L_{\text{ef}}^4}{E_{0,\text{mean}} \cdot I_y} + \frac{M_{y.q.k}}{G_{\text{mean}} \cdot A_w} = 6.32 \cdot \text{mm}$
Lõplik hetkeline läbipaine	$w_{\text{LT.inst}} := w_{\text{LT.inst.G}} + w_{\text{LT.inst.Q}} = 8.85 \cdot \text{mm}$
Lubatud hetkeline läbipaine	$w_{\text{LT.inst.adm}} := \frac{L_{\text{ef}}}{400} = 9.78 \cdot \text{mm}$

$$\frac{w_{\text{LT.inst}}}{w_{\text{LT.inst.adm}}} = 0.91$$

$$\frac{w_{\text{inst}}}{w_{\text{inst.adm}}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Läbipaine alaliskoormusest	$w_{\text{LT.fn.G}} := w_{\text{LT.inst.G}} (1 + k_{\text{defw}}) = 4.05 \cdot \text{mm}$
Läbipaine muutuvkoormusest	$w_{\text{LT.fn.Q}} := w_{\text{LT.inst.Q}} (1 + \psi_2 \cdot k_{\text{defw}}) = 7.46 \cdot \text{mm}$
Lõplik läbipaine	$w_{\text{LT.fn}} := w_{\text{LT.fn.G}} + w_{\text{LT.fn.Q}} = 11.51 \cdot \text{mm}$
Lubatud lõplik läbipaine	$w_{\text{LT.fn.adm}} := \frac{L_{\text{ef}}}{300} = 13.03 \cdot \text{mm}$

$$\frac{w_{\text{LT.fn}}}{w_{\text{LT.fn.adm}}} = 0.88$$

$$\frac{w_{\text{fn}}}{w_{\text{fn.adm}}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

LISA 2. Auguga talast ja plaadist koosneva liitristlõike tugevusarvutus redutseeritud ristlõike meetodil 80 mm auguga tala tsentris näitel

Ristlõike andmed

Tala efektiivne pikkus	$L_{ef} := 3910\text{mm}$
Tala laius	$b_w := 45\text{mm}$
Tala kõrgus	$h_w := 245\text{mm}$
Talade samm	$s_w := 600\text{mm}$
Plaadi paksus	$h_f := 22\text{mm}$
Augu kõrgus	$h_d := 80\text{mm}$
Augu kohale jääv tala kõrgus	$h_{ü} := 82.5\text{mm}$
Augu alla jääv tala kõrgus	$h_a := 82.5\text{mm}$
Tala ristlõike pindala	$A_w := b_w \cdot h_w - b_w \cdot h_d = 7425 \cdot \text{mm}^2$
Ristlõike kõrgus	$h := h_w + h_f = 267 \cdot \text{mm}$
Talade puhas vahe	$b_f := s_w - b_w = 555 \cdot \text{mm}$
Efektiivne plaadi laius survetsoonis	$b_{c,ef} := \min(0.2 \cdot L_{ef}, 30 \cdot h_f) = 660 \cdot \text{mm}$
Nõtkepikkuse kontroll survevõõle	$\frac{b_f}{2 \cdot b_{c,ef}} = 0.42 \quad \frac{b_f}{2 \cdot b_{c,ef}} < 1 \rightarrow 1$
	$b_{eff.1} := b_{c,ef} + b_w = 705 \cdot \text{mm}$
Plaadi efektiivne laius	$b_{eff} := \min(s_w, b_{eff.1}) = 600 \cdot \text{mm}$

Materjalide tugevusomadused

Tala C24

Paindetugevus	$f_{m.k} := 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Nihketugevus	$f_{v.k} := 4.0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Tõmbetugevus	$f_{t.0.k} := 14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Elastusmoodul	$E_{0,mean} := 11000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Puitlaastplaat 22 mm

Lõiketugevus	$f_{PLP.v.k} := 1.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Elastusmoodul	$E_{PLP.m.mean} := 2800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Osavarutegurid

Alaline koormus	$\gamma_G := 1.2$
Muutuvkoormus	$\gamma_Q := 1.5$
Materjali osavarutegur	$\gamma_M := 1.3$
	$\gamma_{PLP.M} := 1.3$
Kombinatsioonitegur Klass A	$\psi_2 := 0.3$

Koormused

Alaline koormus	$g_k := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Muutuvkoormus	$q_k := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Arvutuslik joonkoormus	$P_{jd} := (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot s_w = 2.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Modifikatsioonitegurid

Kasutusklass 1. Keskkestev.

Modifikatsioonitegur	$k_{\text{mod.C24}} := 0.8$
	$k_{\text{mod.PL}} := 0.7$
Modifikatsioonitegur, ühendus	$k_{\text{mod.con}} := (k_{\text{mod.C24}} k_{\text{mod.PL}})^{0.5} = 0.748$
Süsteemi tugevuse tegur	$k_{\text{sys}} := 1.0$
Deformatsiooni tegur, tala	$k_{\text{def.w}} := 0.6$
Deformatsiooni tegur, plaat	$k_{\text{def.f}} := 1.5$
Tala kõrguse tegur	$k_h := 1.0$ Sest $h_w > 150 \text{ mm}$
Kõrguse tegur augu all	$k_{h.a} := \min \left[\left(\frac{150 \text{ mm}}{h_a} \right)^{0.2}, 1.3 \right] = 1.127$

Geomeetrised omadused

Hetkeline olukord

Redutseeritud plaadi laius	$b_{\text{ffd.inst}} := \left(b_{\text{eff}} \cdot \frac{E_{\text{PLP.m.mean}}}{E_{0.\text{mean}}} \right) = 152.73 \cdot \text{mm}$
Redutseeritud ristlõike pindala	$A_{\text{ef.inst}} := A_{\text{w}} + \left(b_{\text{eff}} \cdot \frac{E_{\text{PLP.m.mean}}}{E_{0.\text{mean}}} \right) \cdot h_{\text{f}} = 10785 \cdot \text{mm}^2$
Kesktelje kaugus (ristlõike alt)	$x_{\text{c.auk.inst}} := \frac{b_{\text{ffd.inst}} \cdot h_{\text{f}} \cdot \left(h_{\text{w}} + \frac{h_{\text{f}}}{2} \right) + b_{\text{w}} \cdot h_{\text{w}} \cdot \frac{h_{\text{w}}}{2} - b_{\text{w}} \cdot h_{\text{d}} \cdot \left(h_{\text{a}} + \frac{h_{\text{d}}}{2} \right)}{A_{\text{ef.inst}}} = 164.09 \cdot \text{mm}$
Plaadi inertsimoment	$I_{\text{eff.inst}} := \frac{b_{\text{ffd.inst}} \cdot h_{\text{f}}^3}{12} + b_{\text{ffd.inst}} \cdot h_{\text{f}} \cdot \left(h - x_{\text{c.auk.inst}} - \frac{h_{\text{f}}}{2} \right)^2 = 2.8518 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$
Tala ülemise osa inertsimoment	$I_{\text{ef.w.ü.inst}} := \frac{b_{\text{w}} \cdot h_{\text{ü}}^3}{12} + b_{\text{w}} \cdot h_{\text{ü}} \cdot \left[\frac{h_{\text{ü}}}{2} + (h_{\text{w}} - x_{\text{c.auk.inst}} - h_{\text{ü}}) \right]^2 = 7.9448 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$
Tala alumise osa inertsimoment	$I_{\text{ef.w.a.inst}} := \frac{b_{\text{w}} \cdot h_{\text{a}}^3}{12} + b_{\text{w}} \cdot h_{\text{a}} \cdot \left(x_{\text{c.auk.inst}} - \frac{h_{\text{a}}}{2} \right)^2 = 5.8127 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$
Ristlõike inertsimoment	$I_{\text{ef.auk.inst}} := I_{\text{eff.inst}} + I_{\text{ef.w.ü.inst}} + I_{\text{ef.w.a.inst}} = 9.459 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$
Plaadi staatiline moment	$S_{\text{f.auk.inst}} := b_{\text{ffd.inst}} \cdot h_{\text{f}} \cdot \left(h - x_{\text{c.auk.inst}} - \frac{h_{\text{f}}}{2} \right) = 3.0881 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$

Lõplik olukord

Redutseeritud plaadi laius

$$b_{f.tfd.fin} := \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot \frac{1 + \psi_2 \cdot k_{def.w}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def.f}} = 124.29 \text{ mm}$$

Redutseeritud ristlõike pindala

$$A_{ef.fin} := A_w + \left(b_{eff} \cdot \frac{E_{PLP.m.mean}}{E_{0.mean}} \right) \cdot h_f \cdot \frac{1 + \psi_2 \cdot k_{def.w}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def.f}} = 10159.345 \text{ mm}^2$$

Kesktele kaugus (ristlõike alt)

$$x_{c.auk.fin} := \frac{b_{f.tfd.fin} \cdot h_f \cdot \left(h_w + \frac{h_f}{2} \right) + b_w \cdot h_w \cdot \frac{h_w}{2} - b_w \cdot h_d \cdot \left(h_a + \frac{h_d}{2} \right)}{A_{ef.fin}} = 158.43 \text{ mm}$$

Plaadi inertsimoment

$$I_{ef.f.fin} := \frac{b_{f.tfd.fin} \cdot h_f^3}{12} + b_{f.tfd.fin} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c.auk.fin} - \frac{h_f}{2} \right)^2 = 2.614 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Tala ülemise osa inertsimoment

$$I_{ef.w.ü.fin} := \frac{b_w \cdot h_{ü}^3}{12} + b_w \cdot h_{ü} \cdot \left[\frac{h_{ü}}{2} + (h_w - x_{c.auk.fin} - h_{ü}) \right]^2 = 9.7305 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

Tala alumise osa inertsimoment

$$I_{ef.w.a.fin} := \frac{b_w \cdot h_a^3}{12} + b_w \cdot h_a \cdot \left(x_{c.auk.fin} - \frac{h_a}{2} \right)^2 = 5.3083 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Ristlõike inertsimoment

$$I_{ef.auk.fin} := I_{ef.f.fin} + I_{ef.w.ü.fin} + I_{ef.w.a.fin} = 8.8954 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

Plaadi staatiline moment

$$S_{f.auk.fin} := b_{f.tfd.fin} \cdot h_f \cdot \left(h - x_{c.auk.fin} - \frac{h_f}{2} \right) = 2.6679 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Augu serva kaugus tala otsast

$$s_x := 1225 \text{ mm}$$

Uuritava lõike kaugus tala otsast

$$x := s_x + \frac{h_d}{2} = 1265 \text{ mm}$$

Lõikejõud uuritavas lõikes

$$V_{d,x} := \left| P_{jd} \cdot \left(\frac{L_{ef}}{2} - x \right) \right| = 1.64 \text{ kN}$$

Paindemoment uuritavas lõikes

$$M_{d,x} := \frac{P_{jd}}{2} \cdot (L_{ef} \cdot x - x^2) = 3.97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tala paindepinge kontroll. Lõplik olukord

Paindepinge ristlõike alaservas

$$\sigma_{m.d.auk} := \frac{M_{d,x}}{I_{ef.auk.fin}} \cdot x_{c.auk.fin} = 7.08 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

C24 paindetugevus

$$f_{m.d} := \frac{k_{mod.C24} \cdot k_{sys} \cdot k_h \cdot f_{m.k}}{\gamma_M} = 14.77 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{m.d.auk}}{f_{m.d}} = 0.48$$

$$\frac{\sigma_{m.d.auk}}{f_{m.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Tala tõmbepinge kontroll. Lõplik olukord

Tõmbepinge augu all

$$\sigma_{t.0.d.auk} := \frac{M_{d,x}}{I_{ef.auk.fin}} \cdot \left(x_{c.auk.fin} - \frac{h_a}{2} \right) = 5.24 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Tala tõmbetugevus pikikiudu

$$f_{t.0.d} := \frac{k_{mod.C24} \cdot k_{sys} \cdot k_{h.a} \cdot f_{t.0.k}}{\gamma_M} = 9.71 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{t.0.d.auk}}{f_{t.0.d}} = 0.54$$

$$\frac{\sigma_{t.0.d.auk}}{f_{t.0.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Liimühenduse kontroll

Hetkeline olukord

Nihkepinge liimühenduses

$$\tau_{glue.d.auk.inst} := \frac{V_{d,x} \cdot S_{f.auk.inst}}{I_{ef.auk.inst} \cdot b_w} = 0.12 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Plaadi nihketugevus

$$f_{PLP.v.d} := \frac{k_{mod.con} \cdot k_{sys} \cdot f_{PLP.v.k}}{\gamma_{PLP.M}} = 0.86 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{glue.d.auk.inst}}{f_{PLP.v.d}} = 0.14$$

$$\frac{\tau_{glue.d.auk.inst}}{f_{PLP.v.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

Lõplik olukord

Nihkepinge liimühenduses

$$\tau_{glue.d.auk.fin} := \frac{V_{d,x} \cdot S_{f.auk.fin}}{I_{ef.auk.fin} \cdot b_w} = 0.11 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{glue.d.auk.fin}}{f_{PLP.v.d}} = 0.13$$

$$\frac{\tau_{glue.d.auk.fin}}{f_{PLP.v.d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

LISA 3. Tõmbepingete kontroll vastavalt DIN 1052:2008-12 80 mm auguga tala tsentris näitel

Geomeetria

Tala pikkus	$L_{ef} := 3910\text{mm}$
Tala kõrgus	$h := 245\text{mm}$
Tala laius	$b_w := 45\text{mm}$
Talade samm	$s_w := 600\text{mm}$
Augu läbimõõt	$h_d := 80\text{mm}$
Tala kõrgus augu kohal	$h_{ro} := 82.5\text{mm}$
Tala kõrgus augu all	$h_{ru} := 82.5\text{mm}$

Puidu omadused ja tegurid

Tõmbetugevus	$f_{t,90,k} := 0.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Modifikatsioonitegur	$k_{mod} := 0.8$
Osavarutegur	$\gamma_M := 1.3$
Alaline koormus	$\gamma_G := 1.2$
Muutuvkoormus	$\gamma_Q := 1.5$

Koormused

Alaline koormus	$g_k := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Muutuvkoormus	$q_k := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Arvutuslik joonkoormus	$p_{jd} := (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot s_w = 2.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Arvutuslik max paindemoment	$M_d := \frac{p_{jd} \cdot L_{ef}^2}{8} = 4.54 \text{kN} \cdot \text{m}$
Arvutuslik max lõikejõud	$V_d := p_{jd} \cdot \frac{L_{ef}}{2} = 4.65 \text{kN}$

Augu serva kaugus tala otsast

$$s_x := 1225\text{mm}$$

Uuritava lõike kaugus tala otsast

$$x := s_x + \frac{h_d}{2} = 1265\text{mm}$$

Paindemoment uuritavas lõikes

$$M_{d,x} := \frac{p_j d}{2} \cdot (L_{ef} \cdot x - x^2) = 3.97\text{kN}\cdot\text{m}$$

Lõikejõud uuritavas lõikes

$$V_{d,x} := \left| p_j d \cdot \left(\frac{L_{ef}}{2} - x \right) \right| = 1.64\text{kN}$$

Pingekolmnurga eeldatav pikkus

$$l_{t,90} := 0.353 \cdot h_d + 0.5 \cdot h = 150.74\text{mm}$$

Tegur h_r

$$h_r := \min(h_{ro} + 0.15 \cdot h_d, h_{ru} + 0.15 \cdot h_d) = 94.50\text{mm}$$

Tegur $k_{t,90}$

$$k_{t,90} := \min \left[1, \left(\frac{450\text{mm}}{h} \right)^{0.5} \right] = 1$$

Tõmbejõud lõikejõust

$$F_{t,90,V,d} := \frac{V_{d,x} \cdot 0.7 \cdot h_d}{4 \cdot h} \cdot \left[3 - \frac{(0.7h_d)^2}{h^2} \right] = 0.28\text{kN}$$

Tõmbejõud paindemomendist

$$F_{t,90,M,d} := 0.008 \cdot \frac{M_{d,x}}{h_r} = 0.34\text{kN}$$

Resultantjõud

$$F_{t,90,d} := F_{t,90,V,d} + F_{t,90,M,d} = 0.61\text{kN}$$

Tõmbepinge ristikiudu

$$\sigma_{t,90,d} := \frac{F_{t,90,d}}{0.5 \cdot l_{t,90} \cdot k_{t,90} \cdot b_w} = 0.18 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tala tõmbetugevus

$$f_{t,90,d} := k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0.25 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} = 0.73$$

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} \leq 1 \rightarrow 1$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

LISA 4. Tõmbepingete kontroll vastavalt Weibulli nõrgima lüli teorial põhinevale meetodile 80 mm auguga tala tsentris näitel

Geomeetria

Tala pikkus	$L_{ef} := 3910\text{mm}$
Tala kõrgus	$h := 245\text{mm}$
Tala laius	$b_w := 45\text{mm}$
Talade samm	$s_w := 600\text{mm}$
Augu läbimõõt	$h_d := 80\text{mm}$

Puidu omadused ja tegurid

Tõmbetugevus	$f_{t,90,k} := 0.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Modifikatsioonitegur	$k_{mod} := 0.8$
Osavarutegur	$\gamma_M := 1.3$
Alaline koormus	$\gamma_G := 1.2$
Muutuvkoormus	$\gamma_Q := 1.5$

Koormused

Alaline koormus	$g_k := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Muutuvkoormus	$q_k := 2.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Arvutuslik joonkoormus	$p_{jd} := (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot s_w = 2.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Arvutuslik max paindemoment	$M_d := \frac{p_{jd} \cdot L_{ef}^2}{8} = 4.54 \text{kN} \cdot \text{m}$
Arvutuslik max lõikejõud	$V_d := p_{jd} \cdot \frac{L_{ef}}{2} = 4.65 \text{kN}$

Augu serva kaugus tala otsast

$$s_x := 1225\text{mm}$$

Uuritava lõike kaugus tala otsast

$$x := s_x + \frac{h_d}{2} = 1265\text{mm}$$

Lõikejõud uuritavas lõikes

$$V_{d,x} := \left| p_{jd} \cdot \left(\frac{L_{ef}}{2} - x \right) \right| = 1.64\text{kN}$$

Paindemoment uuritavas lõikes

$$M_{d,x} := \frac{p_{jd}}{2} \cdot \left(L_{ef} \cdot x - x^2 \right) = 3.97\text{kN}\cdot\text{m}$$

Tõmbepinge lõikejõust

$$\sigma_{t,90,V,d} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d,x}}{b_w \cdot h} \cdot \left(1.23 + 0.82 \cdot \frac{h_d}{h} \right) = 0.33 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tõmbepinge paindemomendist

$$\sigma_{t,90,M,d} := \frac{0.6}{b_w} \cdot \frac{M_{d,x}}{h^2} \cdot \frac{h_d}{h} = 0.29 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tõmbepinge ristikiudu

$$\sigma_{t,90,d} := \sigma_{t,90,V,d} + \sigma_{t,90,M,d} = 0.62 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puidu tõmbetugevus

$$f_{t,90,d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0.25 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Suuruse mõju tegur

$$k_{size} := 1$$

Pingete jaotust arvestav tegur

$$k_{dis} := 1.8$$

Efekttiivne tõmbetugevus

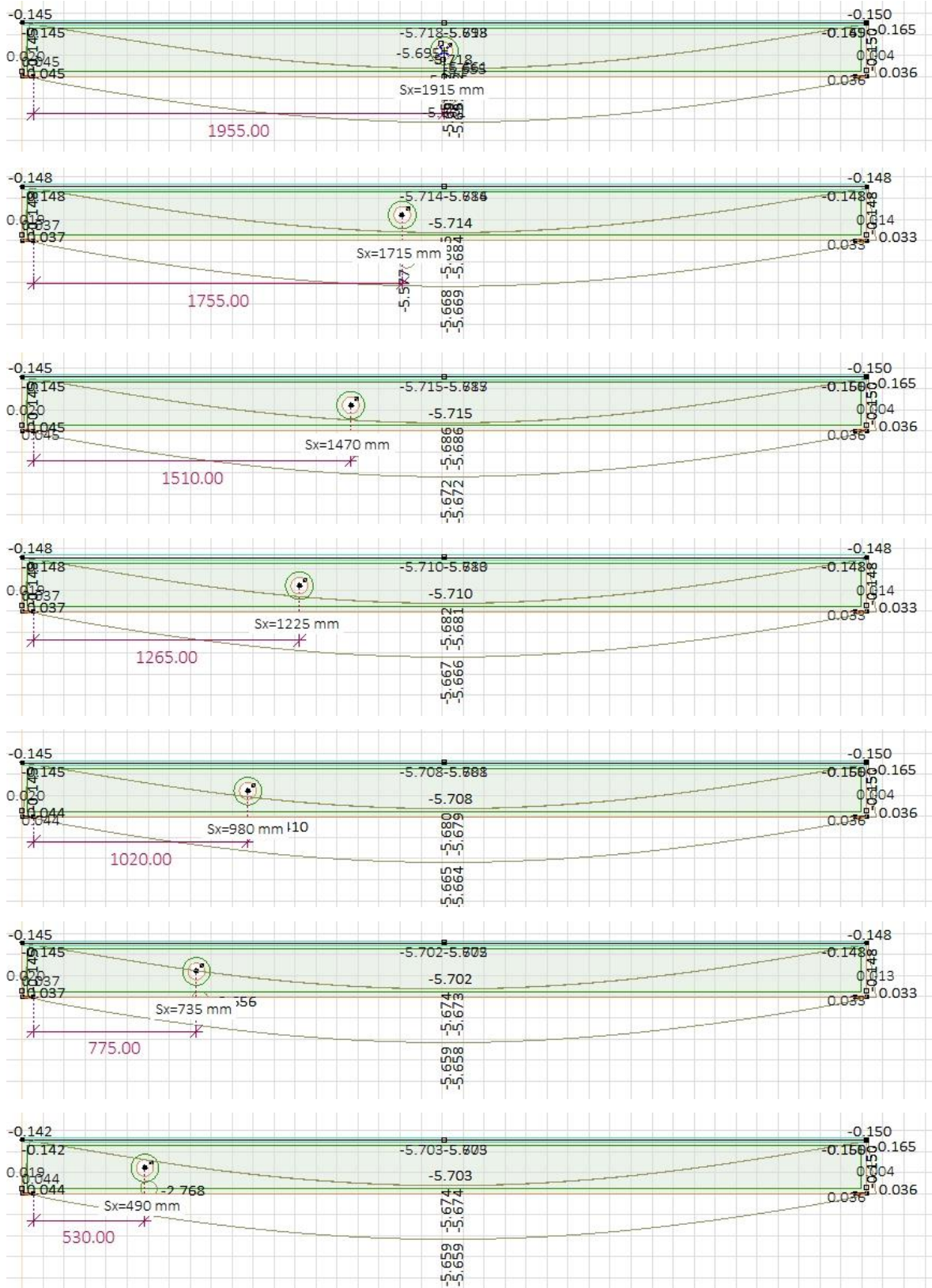
$$f_{t,90,eff,d} := f_{t,90,d} \cdot k_{size} \cdot k_{dis} = 0.44 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

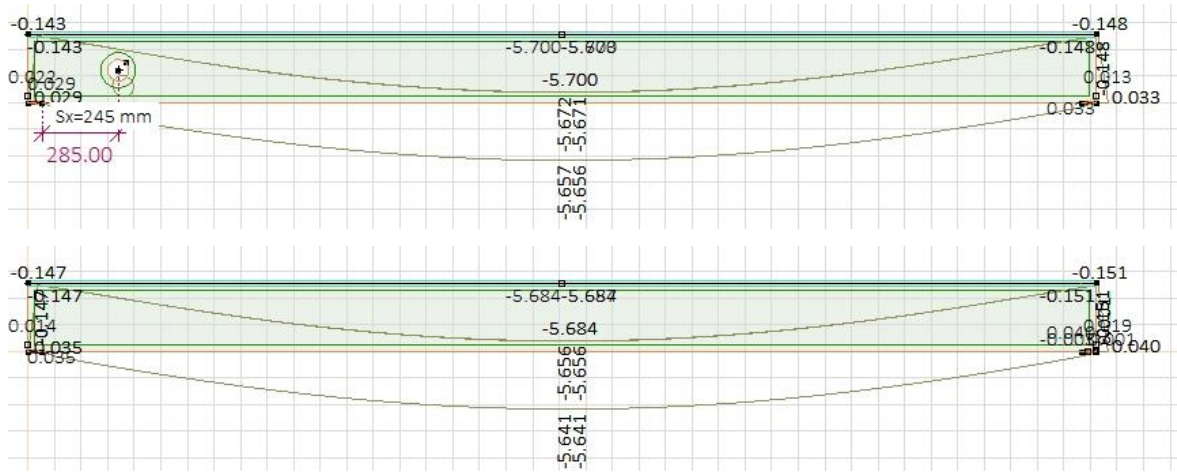
$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,eff,d}} = 1.40$$

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,eff,d}} \leq 1 \rightarrow 0$$

1 - tingimus on rahuldatud
0 - tingimus pole rahuldatud

LISA 6. 80 mm läbimõõduga tala tsentris asetseva auguga tala läbipaine vastavalt programmile AxisVM 11





LISA 7. Augukombinatsiooniga K-3 tala läbipaine vastavalt programmile AxisVM 11

