



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**AUGUSTATUD PUITTALADE ANALÜÜS LÕPLIKE
ELEMENTIDE MEETODIL PÕHINEVA
TARKVARAGA DLUBAL RFEM
ANALYZING WEAKENED WOODEN BEAM WITH FINITE
ELEMENT METHOD BASED SOFTWARE DLUBAL RFEM**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Helene Lumi

Üliõpilaskood 153924

Juhendajad: MSc Illimar Kalk/ehitusinsener

PhD Andrus Räämet/vanemlektor

Tartu 2021

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....."2021.

Autor: Helene Lumi

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021.

Juhendajad: Illimar Kalk

/ allkirjastatud digitaalselt /

Andrus Räämet

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Helene Lumi (sünnikuupäev: 10.07.1994)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose: „AUGUSTATUD PUITTALADE ANALÜÜS LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETODIL PÕHINEVA TARKVARAGA DLUBAL RFEM“, mille juhendajad on Illimar Kalk ja Andrus Räämet.

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkirjastatud digitaalselt)

_____ 2021.a(kuupäev)

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Helene Lumi 153924

Õppekava, peeriala: EAEI02/12 Tartu - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendajad: ehitusinsener MSc Illimar Kalk, 52 74 929

vanemlektor PhD Andrus Räämet, 620 2561

Lõputöö teema:

*AUGUSTATUD PUITTALADE ANALÜÜS LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETODIL PÕHINEVA
TARKVARAGA DLUBAL RFEM*

*ANALYZING WEAKENED WOODEN BEAM WITH FINITE ELEMENT METHOD BASED
SOFTWARE DLUBAL RFEM*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida antud teemaga seotud varasemaid uurimusi ning teoreetilist tausta
2. Tundma õppida lõplike elementide meetodil põhinevat tarkvara
3. Modelleerida katseelemendid lõplike elementide programmis
4. Analüüsida saadud arvutustulemusi ning teha järeldused

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teooriaga tutvumine, ülesande püstitus	20.09.2020
2.	Programmi valik ja tundmaõppimine, mudelite koostamine	31.10.2020
3.	Arvutused, tulemuste analüüs	30.11.2020
4.	Töö vormistamine	20.12.2020

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 5. jaanuar 2021 a

Üliõpilane: Helene Lumi "....." 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Illimar Kalk "....." 2021.a
/allkiri/

Juhendaja: Andrus Räämet "....." 2021.a
/allkiri/

Programmijuht: Aime Ruus "....." 2021.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. TEOORIA	12
2.1 Varasemad uurimused	12
2.2 Puit kui konstruktsioonimaterjal	14
2.2.1 Puidu ajalugu	14
2.2.2 Puidu mehaanilised omadused	15
2.2.3 Puidu eelised teiste materjalide ees.....	16
2.2.4 Puidu puudused	16
2.3 Puitkonstruktsioonide arvutamine.....	17
2.3.1 EVS-EN 1995-1:2005 alusel	18
2.3.2 Rootsi juhendi <i>Limträhandbok</i> alusel.....	18
2.3.3 Saksamaa kood- DIN 1052:2004-08.....	23
2.4 Lõplike elementide meetod	25
2.4.1 Lõplike elementide meetodi ajalugu	25
2.4.2 LEM olemus	25
2.4.3 LEM eelised ja puudused	25
2.4.4 Võrgustiku valik	26
2.4.5 Erinevad arvutusmudelid	28
2.5 Pingete kontsentratsioon	30
2.6 Plaadi teooriad	33
2.7 Eeldatav tulemus.....	33
3. METOODIKA.....	35
3.1 Magistritöö alused	35
3.1.1 Arvutatavad konstruktsioonid.....	35
3.1.2 Koormused	38
3.1.3 Programmi sisendandmed	38
3.1.4 Võrgustiku valik	39
3.2 LEM programmiga tehtud arvutuste tulemused	41
3.2.1 Mudelid 1-4	41
3.2.2 Mudelid 5-8.....	44
4. ANALÜÜS.....	47
4.1 Ristikiudu tõmbepinged avade ümber	47

4.2	Pingete jaotumine	51
4.3	Läbivajumite analüüs	52
4.4	Juhendite võrdlus tulemustega	52
4.5	Koormuste kasvu seos pingete kasvuga	54
4.6	Võrdlus eeldusega	55
5.	KOKKUVÕTE.....	57
6.	SUMMARY	59
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	60
	LISAD	63
	Lisa 1 Katseliselt leitud puidu tugevusomadused puiduliikide alusel	64
	Lisa 2 Mudeli 1 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	65
	Lisa 3 Mudeli 2 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	66
	Lisa 4 Mudeli 3 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	68
	Lisa 5 Mudeli 4 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	70
	Lisa 6 Mudeli 5 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	71
	Lisa 7 Mudeli 6 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	73
	Lisa 8 Mudeli 7 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	75
	Lisa 9 Mudeli 8 tulemused programmis <i>Dlubal RFEM</i>	77
	Lisa 10 Maksimaalse koormuse arvutus Rootsi 2018.a näite alusel, talad 1-4 ..	78
	Lisa 11 Maksimaalse koormuse arvutus Rootsi 2018.a näite alusel, talad 5-8 ..	81
	Lisa 12 Katselised tulemused (Danielsson, 2008).....	84

EESSÕNA

Lõputöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Ülesanne on püstitatud otsesel vajadusel kasutada augustatud puittalade kande- ja kasutuspiirseisundi kontrolli kiiremal ja efektiivsemal viisil, kui praegused arvutuseeskirjad võimaldavad. Lõputöö idee ning sõnastus on tulnud praktiseerivalt ehitusinsenerilt, kes on spetsialiseerunud puitkonstruktsioonidele ja kes kasutab lõplike elementidel põhinevat tarkvara oma igapäeva töös.

Lõputöö uurib, kas nõrgestatud ristlõikega puittalasid saab analüüsida lõplike elementide meetodil rajaneva arvutusprogrammiga. Talade ristlõigetesse on vaja tekitada nõrgestusi peamiselt tehnosüsteemide tarvis. Tehnosüsteemide vajalikkuse tõttu on suurenenud ka kandekonstruktsioonidesse rajatavate avauste hulk. Nõrgestatud ristlõikeid arvutatakse käsiraamatutes toodud juhiste alusel. Puuduvad suunised, kuidas kasutada LEM-it nõrgestatud talade arvutamisel. Nõrgestatud puittalade arvutamine on oluline inseneride igapäeva töös, et saavutada optimaalsemad lahendused konstruktsioonide dimensioneerimisel. Vältides üledimensioneerimist, on võimalik hoida kokku ehitusmaterjale kui ka hoida tarindite gabariidid optimaalsetena.

Puitkonstruktsioonide kande- ja kasutuspiirseisundi arvutamise eeskirjadena on kasutatud Eesti kehtivat standardit EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 „Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1“, mis aga ei sisalda juhiseid augustatud ristlõigete arvutamiseks.

Lõputöö raames tehtud lõplike elementide meetodil põhinevad arvutused on teostatud konstruktsioonide analüüsimise programmiga *Dlubal RFEM*. Tulemuste analüüsimiseks on kasutatud programmi *Microsoft Excelit*.

Võtmesõnad: lõplike elementide meetod, puitkonstruktsioonid, projekteerimine, augustused, pingete kontsentreerumine, magistritöö

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

A	-	ristlõike pindala, mm^2
a	-	tegur, mis arvestab allesjääva tala osa kõrgust terve ristlõike kõrgusega
b	-	tala ristlõike laius, mm
D	-	ava läbimõõt, mm
σ_n	-	normaalpinge nimiväärtus, N/mm^2
e	-	tegur, mis arvestab ava laiust
$F_{t,90}$	-	mõjuv jõud ristikiudu, kN
$f_{t,90,d}$	-	arvutuslik materjali ristikiusuunaline tõmbetugevus, N/mm^2
$F_{t,V,d}$	-	mõjuv põikjõud, kN
$F_{t,M,d}$	-	mõjuv paindemoment, kNm
f_v	-	materjali nihketugevus, N/mm^2
$f_{v,red}$	-	vähendatud nihketugevus, N/mm^2
h	-	arvutuslik kõrgus (keskmesse paigutatud ava korral $h=H/2$, muidu $h=h_i+b/2$)
h_i	-	tala allesjääv kõrgus ava lõikes, mm
h_d	-	ava kõrgus, mm
h_r	-	ava paiknemist arvestav tegur
h_u	-	ava kohale jääv tala kõrgus ava kohal, mm
h_l	-	tala alla jääv tala kõrgus ava all, mm
j	-	ava kuju arvestav tegur
k_{hole}	-	vähendustegur, mis arvestab ava mõju
k_{mod}	-	koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur
k_{vol}	-	vähendustegur
$k_{v,i}$	-	vähendustegur vastavalt alumisele või ülemisele osale
$k_{t,90}$	-	arvustes kasutatav tegur (suurendab kõrgemate kui 450mm ristlõikega talades arvutuslikke pingeid)
K	-	kontsentratsioonitegur
L	-	tala suurim pikkusmõõde, mm
LEM	-	lõplike elementide meetod (ingl k Finite Element Method, FEM)
$l_{t,90}$	-	ristikiudu tõmbepinge pingekolmnurga pikkus

M	-	mõjuv moment, kNm
$max\sigma$	-	maksimaalne kohalik normaalpinge
$max\tau$	-	maksimaalne kohalik nihkepinge
T	-	tala paksus, mm
τ	-	nihepinge, N/mm ²
τ_n	-	nihepinge nimiväärtus, N/mm ²
V	-	mõjuv põikjõud, kN
V_i	-	mõjuv põikjõud, kN
w_{fin}	-	lõplik läbipaine, mm
w_{inst}	-	hetkeline läbipaine, mm
γ_M	-	materjali omaduste osavarutegur, mis võtab arvesse ka mudeli määramatusi ja mõõdete varieeruvust
X_d	-	arvutuslik materjali tugevus
X_k	-	normatiivne materjali tugevus

1. SISSEJUHATUS

Puit on olnud ehitusmaterjalina kasutusel aegade algusest saati, seda eelkõige puidu lihtsa töödeldavuse tõttu, kuid puit varieerub enda füüsikaliste omaduste poolest laialdaselt, olenedes puuliigist, kasvutingimustest kui ka tingimustest, milles ta viibib (Saarman & Veibri, 2006, p. 133). Need asjaolud on viimastel aastakümnetel puidu ehitusmaterjalina lükanud tahaplaanile ning esile on kerkinud homogensemamad ja ettearvatavamad materjalid nagu raudbetoon, teras ning erinevad tehisplokid, mida on võimalik küllaltki lihtsalt arvutada. Vastavalt ehitussektori tootlikkuse analüüsile (Tartu Ülikool, 2018) on lähiaastatel oodata Eestis läbimurret, mis seisneb ehitussektori digitehnoloogiliste lahenduste kasutuselevõtus ja mis tõstab Eesti ehitussektori tootlikkust, mis antud hetkel jääb märgatavalt alla Euroopa keskmisele tootlikkusele. Antud lõputöö käsitleb puitelementide arvutamist digitaalsete teisikute kaudu, mis võib oluliselt kiirendada ja lihtsustada puitkonstruktsioonide arvutamist. Võimalik puitkonstruktsioonide suurem kasutuselevõtt projekteerijate poolt aitaks täita ka Euroopa Liidu energialiidu ja kliimameetmete juhtimise määruse eesmärgi, sest puidu CO₂ jalajälg (Architectural Record, 2015) on väiksem sarnase konstruktsiooni projekteerimisel betoonist või terasest.

Puitkonstruktsioonide arvutused Eestis põhinevad peamiselt Eurokoodeksitel, mis on üle võetud Eesti Vabariigi standarditeks. Digiajastu edenedes on arendatud programme, mis teeksid keerukaid ja kompleksseid arvutusi meie eest, millest levinuimaks meetodiks on lõplike elementide meetodil põhinevad arvutusmudelid. Peamiseks põhjuseks programmide kasutuselevõtuks on ajamahukus, kuid ka asjaolu, et korrektselt programmeeritud arvutid teevad vähem eksimusi. Selleks, et saaksime neid ka reaalselt töös rakendada, peame teadma, mis on nende võimalikud ebatäpsused ning mis olukordades on neid võimalik rakendada (Robam, 2015). Puitkonstruktsioonid on väga keerukad, sest puit ise on kompleksne materjal, mis ei käitu nii nagu ülejäänud enamlevinud ehitusmaterjalid nagu teras või betoon. Teema aktuaalsus seisneb selles, et hoida kokku inseneride ajaressurssi, anda panus ehitussektori tootlikusse tõstmiseks ning ka puitmaterjali kasutamist virgutada.

Lõputöö eesmärgiks on uurida avadega liimpuittalade tõmbepingete kontsentreerumist avade ümbruses ning kriitilise pingete teket.

Hüpoteesi kohaselt tekib avade ümbruses pingete kontsentreerumine, mis ületab materjali ristisuunas lubatud pinged, mis põhjustavad nõrgestatud ristlõigetega talade pragude tekke ava nurkades.

Lõputöö koosneb kolmest peamisest peatükist, millest esimene annab ülevaate puidust kui ehitusmaterjalist, selle arvutuseeskirjadest ja varasemalt tehtud lõputöödest. Teine peatükk süveneb arvutusmetoodikasse, kirjeldades arvutatavaid mudelelemente ning programmi sisendandmeid. Kolmas peatükk koondab arvutustulemused ning analüüsib saadud väärtusi ja loob olemasoleva teooria ning analüüsi põhjal uusi teadmisi.

Magistritöö arvutusprogrammina on kasutatud *Dlubal RFEM* programmi, mis põhineb lõplike elementide meetodil. Andmete töötlemisel on kasutatud *Microsoft Excelit*.

2. TEOORIA

2.1 Varasemad uurimused

Varasemalt on uuritud liimpuittalasid erinevate suundade alt nii Eestis kui välismaal. P. Toomik uuris avaustega puitprussidest põrandatalasid, nende kandevõimet ning läbipainet, ning nende võimalikku tugevdamist puitlaastplaatide abil. Uurimustöö rajanes Saksa ehitusstandardile DIN 1052:2008-12, Rootsi liimpuidu juhendite ja Weibulli nõrgima lüli teooriale (Toomik, 2014).

2020 kevadel uuris L. Kolpakov oma lõputöös erinevaid puidupõhiseid vahelagesid lähtudes vajadusest teha nendesse konstruktsioonidesse väljalõikeid ning nende maksumuse erinevusi. Töös võrreldi puit-metallsõrestiktalasisid, augustatud I- talasid, liimpuittalasid ja spoonliimpuittalasid. Lõputöös selgus, et suuremate sillete korral on soodsam kasutada positalasid, mis ei vaja eraldi augustamist. Positalad on metallist ja puidust koosnevad talaelemendid, kus kaks puidust vööd on ühendatud omavahel metallelementidega (Kolpakov, 2020).

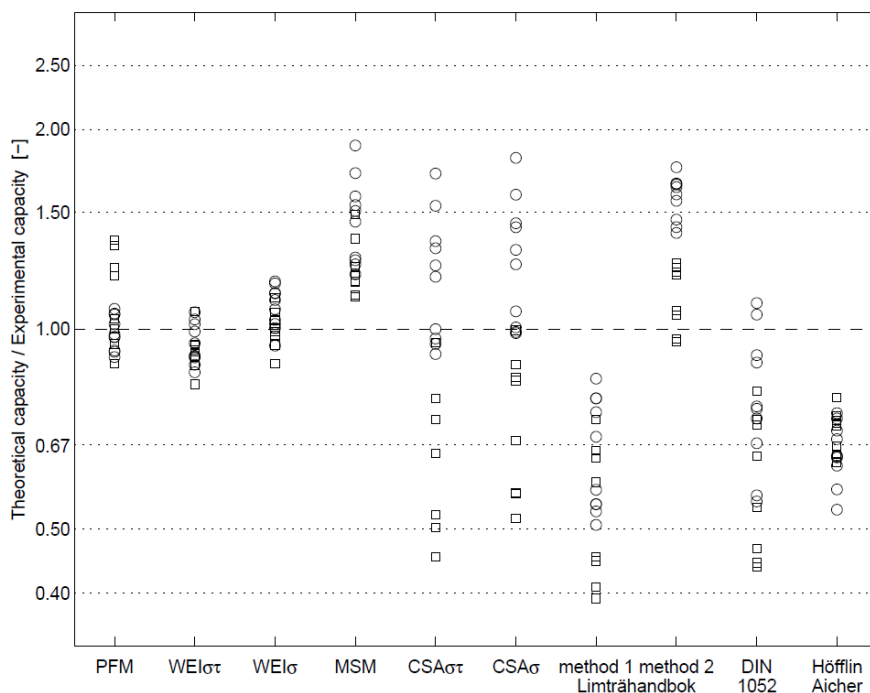
R. Kapp uuris 2015.a Maaülikoolis augustatud kuusepuust puittalasid, nende läbipainete muutumist augustuste mõjul ning kuidas oksakoha lähedus nõrgestuse ümbruses mõjutab paindetugevust. Lõputööst selgus, et oksakohad avause läheduses avaldavad mõju ning töös käsitleti ka võimalusi, kuidas avasid tugevdada. Taladesse mõõtmetega 45 x 245 mm puuriti 1, 3, 5 ja 7 ava suurusega 120mm ning arvutuseeskirjadena kasutati SINTEF 522.351 juhendit, mille korral jäid paindemomendid lubatud piiridesse, kuid oksakoha sattumisel ava ligidusse, polnud paindekandevõime enam tagatud ning tekkis vajadus aukude tugevdamiseks (Kapp, 2015).

Tabel 2.1 R. Kapp lõputöös esitletud tabel erinevate augustatud puittalade arvutamiseeskirjadest (Kapp, 2015)

Juhend	Lubatav auk	Lubatav 245mm korral	Lubatav augu asukoht	Kaugus teisest august
Limträ handbook	0,5h	122,5mm	Tala keskel(+/-10%)	puhasvahe 1h
AITC	0,5h väiksem kui 356mm	122,5mm	Üleval/alt servast 0,15h	4 x augu diameeter, 305mm, või h
DIN	0,15h	50mm	Ülevalt ja alt servast vähemalt 0,35h	1,5h, kuid vähemalt 300mm
DIN vanem	0,4h	98mm	Ülevalt ja alt servast vähemalt 0,25h	h, kuid vähemalt 300mm
SINTEF	0,5h	122,5mm	Tala keskel	Tsentrist tsentrisse 2h
IBC	1/3h	82mm	2 tolli ülevalt ja alt servast	-
IRC	1/3h	82mm	1/3h, kuid mitte vähem kui 2 tolli	Vähemalt 2 tolli

Puitalade käitumist on põhjalikult uurinud Vanesa Baño, kes simuleeris LEM programmi abil puittaladele oksakohad, mida võrreldi ka katseliste koormamistega. Katsekehasid katsetati kolme versioonina, kus esimesel juhul käsitleti oksakohta kui auku ning teistel juhtudel kui jätkuvate kiududena. Võrreldes katseliste tulemustega andis kõige parema tulemuse esimene mudel, mille veapiir jäi alla 10%. Uuringu kokkuvõtteks purunesid 70% katsekehadest nõrgestuste mõjul, kui nõrgestused asusid tõmbetsoonis (Baño, jt., 2010).

H. Danielsson on põhjalikult uurinud augustatud liimpuittalasid. Aastal 2006 koostas ta ülevaatliku uurimustöö erinevatest katsetest, mis on liimpuittaladega läbi viidud ning kirjeldas peamiseid arvutusmeetodeid ning nende erisusi. (Danielsson & Gustafsson, 2006) 2008. aastal viis H. Danielsson ise läbi katsed augustatud liimpuittaladega kahe erineva arvutusskeemiga katsetades kahes mõõdus talasid. Avad olid ruudukujulised, mille nurgad olid ümardatud ning küljepikkus moodustas kolmandiku tala kõrgusest. Kokku viidi läbi 36 katsetust keskendudes peamiselt sellele, kuidas tala suurus ning avause asetus avaldab mõju tala võimele vastu võtta koormuseid. Lisaks sellele on uurimuses uuritud ka põikjõu ja mõjuva paindemomendi suhte mõju avause tsentris. (Danielsson, 2008, lk. 3-5) Samade katsetulemuste edasiarendusena on H. Danielsson kirjutanud 2009. aastal töö, kus on keskendunud erinevate tugevusanalüüside võrdlusele analüüsides talasid osakeste mehaanika meetodil, mis põhineb Weibulli nõrgima lüli teorial (Danielsson & Gustafsson, 2010). Töö tulemusena selgus, et Rootsi *Limträhandboki* juhendite alusel saadavad tulemused on mitte-konservatiivsed, kuid Höfflin ja Aicheri ning DIN 1052 alahindavad talade kandevõimet (Danielsson, 2009, lk. 1-5).



Joonis 2.1 Erinevate arvutusmeetodite teoreetilise ning eksperimentaalsete tulemuste suhete võrdlus. (PFM- tõenäoslik osakeste mehaanika meetod, WEI- Weibulli nõrgima lüli teooriad, MSM- keskmise pinge meetod, CSA-üldlevinud pinge analüüs, *Limträhandbok*- Rootsi arvutusjuhend, DIN 1052- Saksamaa juhend, Höfflin, Aicher- Weibulli teoorial põhinev juhend) (Danielsson, 2009, lk. 64-65)

2.2 Puit kui konstruktsioonimaterjal

2.2.1 Puidu ajalugu

Puit on laialdase kättesaadavuse, kerguse ja töödeldatavuse tõttu ehitusmaterjalina kasutust leidnud juba kiviajal. Teadaolevalt esimesed suuremad puidust konstruktsioonid olid roomlaste poolt ehitatud sillad enne meie ajaarvamist. Erinevaid puittapliiteid on leitud enne meie ajaarvamist üle kogu maailma laevade- ja katusekonstruktsioonidest ning erinevatest tugistikest ja kaartest. Eestis on vanimad puitkonstruktsioonid eelkõige rõhtpalkkonstruktsioonid, mis pärinevad nooremast pronksiajast 1100-500 eKr (Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liit, 2016, lk. 17).

16. sajandil kasutas Itaalia arhitekt Andre Palladio enda loomingus konstruktsioonides hulganisti puitu, seda nii puitturvikutega kirikute ruumide sildamisel, kui kõrgete kirikutornide konstruktsioonides, mis katsetas puitu, kui ehitusmaterjali võimalustega. Alles 18. sajandil hakati puidu füüsikalisi omadusi teaduslikult uurima. 19. sajandil koos

tööstuse ja kaubanduse arenguga kasvas hüppeliselt ka puidu kasutamine nii taristute kui hoonete konstruktsioonides. (Just, jt., 2018)

2.2.2 Puidu mehaanilised omadused

Okaspuud on olemuselt lihtsama ehitusega, vastupidavamad seenkahjustuse suhtes ja paremate töötlemisomadustega, mille tõttu kasutatakse ehituspuiduna peamiselt okaspuitu. Uurimustöö käsitleb edaspidiselt vaid okaspuid, kuuske ja mäнди, mis käituvad konstruktsioonipuiduna üheväärsetena. Puidu mehaanilised omadused tulenevad trahheiididest, mis on piklikud rakud, kus toimub puu mahlade vool. Puit on materjalina anisotroopne, mis tähendab, et selle omadused varieeruvad erinevates suundades, mille tõttu eristatakse jõudude mõjumise suundasid. Suurim tugevus on puidu pikikiududel, mis on ka eelistatuim töösuund. Puidu oluliseks määranguks on ka puidu elastsus, mis oleneb puuliigist, niiskusesisaldusest ja koormuse suundadest. Puidu elastsusmoodulid jäävad pikikiudu vahemikku 7000-12000 $\frac{N}{mm^2}$ ja ristikiudu 200-500 $\frac{N}{mm^2}$. Puit on hügrokoopne materjal, mis tähendab, et selles sisaldub vesi ning materjali omadused on sõltuvuses niiskusesisaldusest. Puit puruneb tõmbel hapralt ehk ilma nähtavate deformatsioonideta võib aset leida purunemine. Riketeta mäندی- ja kuusepuidu paindetugevuseks on saadud ca 100 MPa, kuid puit on elusmaterjal ning esineb erinevaid defekte, mis vähendavad puidu tugevusomadusi 4-5 korda (oksad, keerdkasvud, struktuuri ebareeglipärasused). Seega vähendatakse puidu tugevusomadusi. Lisaks sellele peab puidu puhul arvestama ka väsimusega, mille korral võib materjal puruneda normaalsest madalama pinge korral kui seda koormatakse tsükliliselt või vahelduvate koormustega (Saarman & Veibri, 2006, lk. 45-175).

Puit konstruktsioonimaterjalina on kergesti töödeldav ning omab vähese kaaluga suurt kandevõimet, mis ületab erikaalu suhtes teisi levinud ehitusmaterjale nagu betoon ja teras. Puitkonstruktsioonide arvutamisel kasutatakse lubatud pingete meetodit, mis väldib erinevatest kahjustustest tulenevate nõrgestuste esinemisel konstruktsioonide ohutust (Saarman & Veibri, 2006).

Puidu kõige nõrgem tugevusomadus on ristikiudu tõmbetugevus ja tavapärasel tööseisundis ei teki olukordi, kus see probleemina esile tuleks. Avauste ning pingete ümberjaotumisel võib see aga saada määravaks. Allika kohaselt on kuusepuu katseliselt leitud tulemused ristikiudu tõmbel maksimaalselt 2,4-2,8 N/mm² (David W. Green, 1999, lk. 4-8). Standardikohaselt on normatiivne lubatud ristikiudu tõmbepinge liimpuidu korral suurusjärgus 0,5 N/mm² (Eesti Standardikeskus, 2015).

Puidu kestustugevus. Puit kaitub materjalina vastavalt reoloogia eeskirjadele, mis tähendab, et puidu omadusi mõjutab ka koormuste ajaline kulg. Katseliselt on välja selgitatud, et koormamise ajalisel pikendamisel puidu tugevusomadused vähenevad ja lähenevad asümtootiliselt kindla väärtuseni- kestustugevuseni. Kestustugevus on materjali piirtugevus, kui seda väärtust koormamise käigus ei ületata, siis deformatsioonid ajas sumbuvad ning element ei purune. Kestustugevuse ületades tekivad plastsete deformatsioonide piirkonnad ning element puruneb teatud aja jooksul olenevalt mõjuva pinge suuruselt (Just, jt., 2018).

2.2.3 Puidu eelised teiste materjalide ees

Puit on konstruktsioonimaterjalina hinnatud kui kerge ja suure kandevõimega materjal, millel on kindlad eelised ka tulekahjuolukorras. Võrreldes raudbetoon konstruktsioonidega on leitud, et puit on oluliselt etteaimatavam ja vastupidavam tulekahju korral (Saarman & Veibri, 2006, lk. 105-107). Puidu kasutamine vähendab süsihappegaasi lisandumist atmosfääri ja puit on ökoloogiliselt puhas materjal ning ainuke laialt kasutatav taastuv looduslik ehitusmaterjal (Just, jt., 2018).

Puit on ainukene ehitusmaterjal, mida saab lugeda taastuvaks. Lisaks sellele, saab puidust toodete valmistamiseks vajamineva energia kuni 80% ulatuses tootmise käigus saadavatest jäätmetest, mis ei saasta keskkonda. Puidust või puitkarkass hoone on analoogsest kivimajast kuni 8 korda kergem. Liimpuittala valmistamiseks kulub 6 korda vähem energiat kui samaväärse terastala ja 5 korda vähem kui samaväärse betoonitala jaoks. Tuleohutuse seisukohast on puitmaterjalid etteaimatavad ning projekteerimisfaasis saab lihtsasti saavutada vajaminevat tulekindlust (Just & Just, 2015).

2.2.4 Puidu puudused

Puit on anisotroopne materjal, mis tähendab, et selle omadused varieeruvad eri suundades. Sellest tulenevalt puruneb puit erinevalt ning nihkel ja tõmbel puruneb puit hapra materjalina. Niiskuse toimel võib puit loodusliku materjalina mädanema hakata või hävineda putukkahjurite mõjul. Puit on hügrokoopne materjal ja niiskusesisalduse muutusel toimuvad puidus mahumuutused. Pideval koormamisel tuleb arvestada suurte deformatsioonidega, mis ei taastu peale koormuse eemaldamist. Puidu tugevusomadused ja elastsusmoodul sõltuvad ka temperatuurist, vähenedes märgatavalt temperatuuri tõusmisel. 20-50 °C temperatuuri tõusu korral langevad

tugevusnäitajad 12-40%. Puuduliku konstruktiivse lahenduse ja materjali kasutamise korral on puit tuleohtlik, sest on põlev materjal (Just, jt., 2018).

2.3 Puitkonstruktsioonide arvutamine

Eestis arvutatakse puitkonstruktsioone standardi EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 alusel, mis omakorda põhineb Euroopa standardile EN 1995-1-1:2004. Eurokoodeksid on alguse saanud aastal 1975 kui Euroopa Ühenduse Komisjon lõi kaubavahetuse ja tehniliste tingimuste ühtlustamiseks ehitusalase tegevusprogrammi. Selle programmi raames alustati tehniliste reeglite süsteemi rajamist, et Euroopa liikmesriikides oleks ühtne süsteem konstruktsioonide projekteerimiseks. Eurokoodeksite esimene põlvkond valmis 1980-tel aastatel. Eurokoodeksid on alusdokumentideks, et tagada hoonete ja rajatiste vastavust Euroopa Nõukogu direktiivi 89/106/EMÜ nõuetele mehaanilise tugevuse ja stabiilsuse osas (Eesti Standardikeskus, 2015). Peamised arvutusseisundid on kandepiirseisund, kus on määrav konstruktsiooni püsivus ning kandevõime säilimine, ning kasutuspiirseisund, kus on määravaks esteetilised väärtused nagu läbipaine.

Puitkonstruktsioonide arvutamisel on oluline jälgida koormuste kestusklasse, sest puidu tugevust mõjutab koormuste ajaline kestus. Koormuste kestusklasse võetakse arvesse koormuse modifikatsiooniteguriga k_{mod} .

Puitkonstruktsioone mõjutab niiskus, mille tõttu võetakse keskkonna tingimusi arvesse erinevate keskkonnaklassidega, mis on määratletud puidu niiskusesisaldusega, mida mõjutab temperatuuri ja keskkonna suhteline õhuniiskus (Just, jt., 2018). Puidu keskmine paindetugevus standardile vastava katsekeha korral on $f_m = 60 \dots 70 \frac{N}{mm^2}$, kuid puidu nõrgestuste tõttu väheneb tugevus 45...50% (Just, jt., 2018).

Eurostandardi EN338 kohaselt on okaspuit jaotatud 12 tugevusklassi- C14...C50. Kus numbriline osa tähendab normpaindetugevust vastavas tugevusklassis ning täht viitab okaspuu puiduliigile (C- *coniferous*). Normtugevustes on juba arvestatud materjali statistilist muutuvust.

Arvutustes kasutatakse arvutustugevusi, mis saadakse normtugevuse korrutamisel koormuse modifikatsiooniteguriga k_{mod} ja jagamisel materjali osavaruteguriga:

$$X_d = \frac{k_{mod} X_k}{\gamma_m} \quad (2.1)$$

Modifikatsioonitegur k_{mod} arvestab koormuse kestust ning kasutusklassi. Modifikatsiooniteguri määramisel lähtutakse kõige lühiajalisemast koormusest.

Talade läbipaindes eristatakse hetkelist läbipainet w_{inst} ning lõpliku läbipainet w_{fin} . Läbipainded arvutatakse eraldi alaliskoormusest ja muutuvkoormusest. Peakandurite korral on soovitatavad piirväärtused läbipaindele toodud avaldistes 2.2 ja 2.3. (Rohusaar, jt., 2014, lk. 512).

$$w_{inst} \leq l/400 \quad (2.2)$$

$$w_{fin} \leq l/200 \quad (2.3)$$

2.3.1 EVS-EN 1995-1:2005 alusel

Puitkonstruktsioone arvutatakse Eestis vastavalt EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Standard ei anna aga juhiseid augustatud ristlõigete kandevõime arvutamiseks.

2.3.2 Rootsi juhendi *Limträhandbok* alusel

Rootsi juhend nimega *Limträhandbok* pole ametlikult Rootsi norm, kuid on abivahendiks ja soovituslikuks materjaliks liimpuittalade arvutamisel. Võimalusel tuleks avade tegemist taladesse vältida, kui see pole võimalik tuleks järgida põhimõtteid (Danielsson & Gustafsson, 2006):

- Ava tsenter asetada tala nulljoonega kohakuti
- 10%-line nihe tala kõrgusest H arvestatuna on lubatud
- Ava kõrgus peab olema väikem kui pool tala kõrgusest
- Ava laius peab olema väiksem kui kolmekordne ava kõrgus
- Kui talas on kaks avaust kõrvuti, peab nende vahele jääma vähemalt tala kõrgune vahemaa äärest-ääreni

- Nurgad peavad olema ümardatud

Juhend käsitles varasemates versioonides kahte peamist lähenemist augustatud liimpuittalade arvutamiseks: empiiriline ning otsast sälgatud tala analoogial põhinev meetod (Danielsson & Gustafsson, 2006).

Empiiriline meetod teostab kontrolli augustatud ristlõike kandevõimele, arvestades ristlõikes allesjäävat osa. Nihkepinget võrreldakse vähendatud nihketugevusnäitajaga vastavalt võrrandile (Carling, 2006):

$$\tau = \frac{1,5 \cdot V_i}{T \cdot h_i} \leq f_{v,red} \quad (2.4)$$

kus	V_i	–	mõjuv põikjõud ava lõikes, kN
	T	–	tala laius, mm
	h_i	–	tala allesjääv kõrgus ava lõikes, mm
	τ	–	nihkepinge, N/mm ²
	$f_{v,red}$	–	vähendatud nihketugevus, N/mm ²

Alaindeks i viitab vastavalt kas *upper* või *lower* ehk vastavalt kas ülemisele või alumisele väärtusele.

Ristlõike nihketugevust vähendatakse vastavalt võrrandile:

$$f_{v,red} = k_{vol} k_{hole} f_v \quad (2.5)$$

kus	k_{vol}	–	tala mõõtmeid arvestav tegur
	k_{hole}	–	ava mõõtmeid arvestav tegur
	f_v	–	materjali nihketugevus, N/mm ²

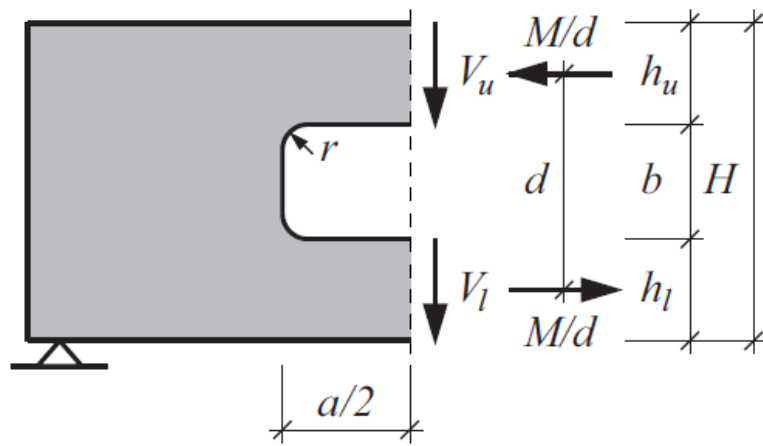
Tegur, mis arvestab geomeetriat leitakse valemiga:

$$k_{vol} = \left(\frac{90}{T}\right)^{0,2}, \text{ (tingimusel } 90 \leq T \leq 215\text{mm)} \quad (2.6)$$

Tegur, mis arvestab ava mõõtmeid leitakse valemiga:

$$k_{hole} = \begin{cases} 1 - 555(D/H)^3 & , \text{kui } D/H \leq 0,1 \\ \frac{1,62}{(1,8+D/H)^2} & , \text{kui } D/H > 0,1 \end{cases} \quad (2.7)$$

kus D – $\sqrt{b^2 + a^2}$, kandiliste avade korral, mm
 H – ristlõike kõrgus, mm



Joonis 2.2 Arvutuste skeem *Limträhandbog*-i esimese meetodi alusel (Danielsson, 2006)

Otsast sälgatud tala meetod põhineb eeldusel, et ava tehakse domineeriva põikjõuga alasse nagu tavaliselt toimub tugelel ning tekkivad nihkepinget võrreldakse vähendatud nihketugevusega, mis leitakse järgneva võrrandiga (Danielsson, 2006):

$$\tau = \frac{1,5 \cdot V_i}{T \cdot h_i} \leq f_{v,red} \quad (2.8)$$

Alaindeks i viitab vastavalt kas *upper* või *lower* ehk vastavalt kas ülemisele või alumisele väärtusele

kus V_i – mõjuv põikjõud ava lõikes
 T – tala laius
 h_i – tala allesjäänv kõrgus ava lõikes
 τ – nihkepinge,
 $f_{v,red}$ – vähendatud nihketugevus.

Ristlõike nihketugevust vähendatakse vastavalt võrrandile:

$$f_{v,red} = k_{v,i} \cdot f_v \quad (2.9)$$

kus $k_{v,i}$ – vähendustegur vastavalt alumisele või ülemisele osale
 f_v – materjali nihketugevus, N/mm²

Vähendusteguri alumisele osale on kandliste avade korral :

$$k_{v,l} = 1, \text{ kandliste avade korral}$$

Ülemise osa vähendustegur leitakse valemiga:

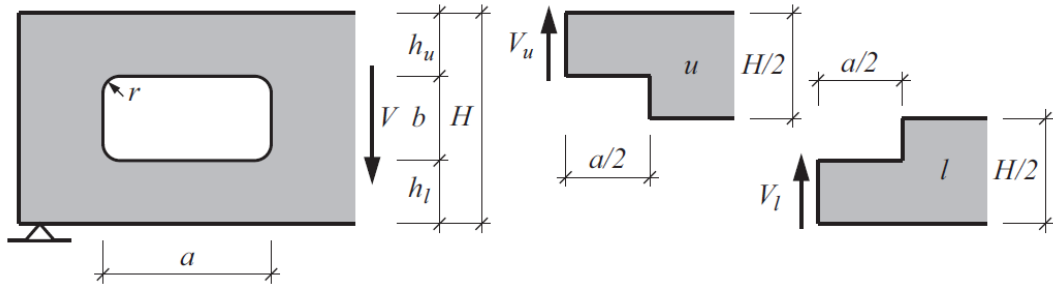
$$k_{v,u} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 6,5 \left(1 + \frac{1,1 \cdot j^{1,5}}{\sqrt{h}} \right) \\ \sqrt{\sqrt{h}(\sqrt{\alpha - \alpha^2} + 0,8 \frac{e}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2})} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

kus $j - j=0$, kandiliste avade korral,
 h – arvutuslik kõrgus (keskmesse paigutatud ava korral $h=H/2$,
 muidu $h = h_i + \frac{b}{2}$,
 α – tegur, mis arvestab allesjääva tala osa kõrgust terve ristlõike,
 kõrgusega,
 e – tegur, mis arvestab ava laiust.

Vastavad arvutusegurid leitakse:

$$\alpha = \frac{h_i}{h} \quad (2.11)$$

$$e = a/2, \text{ kandiliste avade korral} \quad (2.12)$$



Joonis 2.3 Arvutuste skeem *Limträhandbog*-i sälgatud tala meetodi alusel (Danielsson, 2006)

Praegune juhend aastast 2018 (Svenskt Trä, 2018) toob avaga tala arvutusnäitena kohandatud Saksa juhendi modifikatsiooni, kus arvestab eraldi põikjõu ning momendipoolt tekkivate jõududega ning leiab nende koosmõjul tekkiva kolmnurkse pingeaotuse avade otstes ning teostab kontrolli ristikiusuunalisele tõmbepingele:

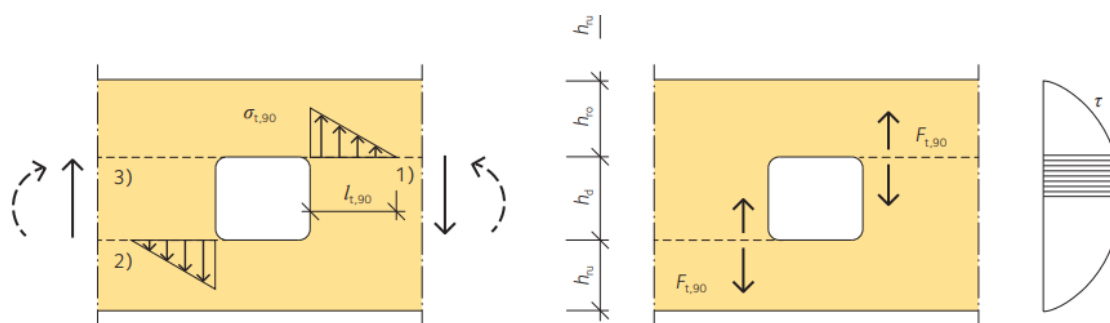
$$\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90}}{0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b} \leq k_{t,90} f_{t,90,d} \quad (2.13)$$

- kus
- $F_{t,90}$ – mõjuv jõud ristikiudu, kN
 - $l_{t,90}$ – $0,5(h_d + h)$ kandiliste avade korral, mm
 - b – tala ristlõike laius, mm
 - $k_{t,90}$ – $\min \left\{ \frac{1}{(450/h)^2} \right\}$
 - $f_{t,90,d}$ – arvutuslik materjali ristikiusuunaline tõmbetugevus, N/mm²

Mõjuv resultantjõud on leitav kahe komponendi liitmisel:

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{V h_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r} \quad (2.14)$$

- kus
- h_r – $\min \left\{ \begin{matrix} h_{ru} \\ h_{ro} \end{matrix} \right\}$ kandiliste aukude korral
 - V – mõjuv põikjõud, kN
 - h_d – ava kõrgus, mm
 - h – ristlõike kõrgus, mm
 - M – mõjuv moment, kNm



Joonis 2.4 Pingete kontsentreerumine avade ümbruses ning tähiste illustatsioon (Svenskt Trä, 2018, lk. 77)

2.3.3 Saksamaa kood- DIN 1052:2004-08

Juhend läheneb augustatud liimpuittaladele teisest küljest, kui eelnevalt kirjeldatud *Limträhandbok*. Saksamaa juhend on pool-empiriiline ning toetub osaliselt ka eksperimentaalsetele tulemustele ning käsitleb kolmnurkse pingeaotuse teket avade ümbruses. Üldised soovituslikud nõuded ühtivad suures osas eelnevalt kirjeldatud Rootsi juhendis toodutele, lisaks määrab Saksamaa juhend kasutatavad kasutusklassid, lubades ilma tugevdusteta avasid vaid kasutusklassides 1 ja 2. Ava ümbruses peab olema täidetud tingimus (H.J Blab, 2005):

$$F_{t,90,d} \leq 0,5l_{t,90}k_{t,90}Tf_{t,90,d} \quad (2.15)$$

- kus
- $F_{t,90,d}$ – resultantjõud
 - $l_{t,90}$ – ristikiudu tõmbepinge pingekolmnurga pikkus
 - T – tala laius
 - $k_{t,90}$ – arvutustes kasutatav tegur (suurendab kõrgemate kui 450mm ristlõikega talades arvutuslikke pingeid)
 - $f_{t,90,d}$ – materjali arvutuslik tõmbetugevus ristikiudu

Pingekolmnurga eeldatava pikkuse leidmiseks kasutatakse valemit:

$$l_{t,90} = 0,5(b + H), \text{ kandiliste avade korral} \quad (2.16)$$

Resultantjõu komponendid on lõikejõust ning paindemomendist avas tulenevad suurused, tähistatud vastavalt $F_{t,V,d}$ ja $F_{t,M,d}$.

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d} \quad (2.17)$$

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d x}{4H} \left(3 - \frac{x^2}{H^2} \right) \quad (2.18)$$

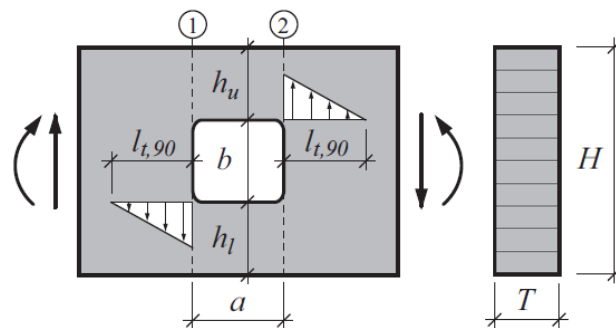
kus V_d – arvutuslik põikjõu väärtus ava lõikes 1 või 2 (vt joonist 2.5)
 x – $x=b$, kandliste avade korral
 H – tala kõrgus

$$F_{t,M,d} = 0,008 \frac{M_d}{h_r} \quad (2.19)$$

kus M_d – arvutuslik paindemoment väärtus ava lõikes 1 või 2 (vt joonist 2.5)
 h_r – ava paiknemist arvestav tegur

$$h_r = \min \left\{ \begin{array}{l} h_u \\ h_l \end{array} \right. , \text{ kandiliste avade korral} \quad (2.20)$$

kus h_u – ava kohale jääv tala kõrgus ava kohal
 h_l – tala alla jääv tala kõrgus ava all



Joonis 2.5 Pingete kontsentreerumisel tekkinud kolmnurkne pingeepüür ava nurkades koos tähistuste graafilise esitusega (H.J Blab, 2005)

2.4 Lõplike elementide meetod

2.4.1 Lõplike elementide meetodi ajalugu

Lõplike elementide meetod on alguse saanud 20. sajandi alguses lennundusest, kus selle meetodi abil lahendati lennumasinade struktuurset analüüsi. 1956. aastal avaldati konstruktsioonelementide uuring, mis käsitles jäikusmaatrikseid. Termin *finite element* (lõplik element e.k) võeti esmakordselt kasutusele aga alles aastal 1960 Clough'i poolt (Chandrupatla & Belegundu, 2003).

20. sajandi teisel poolel kasutati LEM'i juba inseneride poolt ligikaudsete lahendite saamiseks erinevatele probleemidele nagu pinge analüüs, vedelike liikumine, soojuste ülekandumine. Edasistele arengutele andis suure hüppe Argyris'e 1955. aastal avaldatud raamat energiateoreemide ja maatriksmeetodite kohta. Esimene raamat LEM kohta avaldati 1967. aastal ning peagi hakati meetodit rakendama ka mittelineaarsete probleemide ja deformatsioonide lahendamiseks (Chandrupatla & Belegundu, 2003).

2.4.2 LEM olemus

Lõplike elementide meetod on arvutusmehaanika liik, mis tähendab, et mehaanika rakendusülesanne lahendatakse numbriliselt arvuti või arvutiprogrammi abil. Põhimõtteliselt töötab meetod elemendi jaotamisel väiksemateks elementideks. Igale väiksemale elemendile seatakse koormused ning elementide arvutamiseks kasutatakse matemaatilisi ja füüsikalisi printsiipe, peale seda seotakse kõik elemendid kokku (Liu & Quek, 2013).

Olemuslikult on lõplike elementide meetod ligikaudne ning lihtsustab reaalselt olukorda ehk on matemaatiline mudel tegelikust olukorrast. Arvestatavate tulemuste saamiseks ja kasutamiseks tuleks sooritada ka füüsilisi katseid ning kasutada teisi arvutusmeetodeid, et mõista LEM saadavaid tulemeid ning hinnata nende õigsust (Gokhale, jt., 2008, lk. 1).

2.4.3 LEM eelised ja puudused

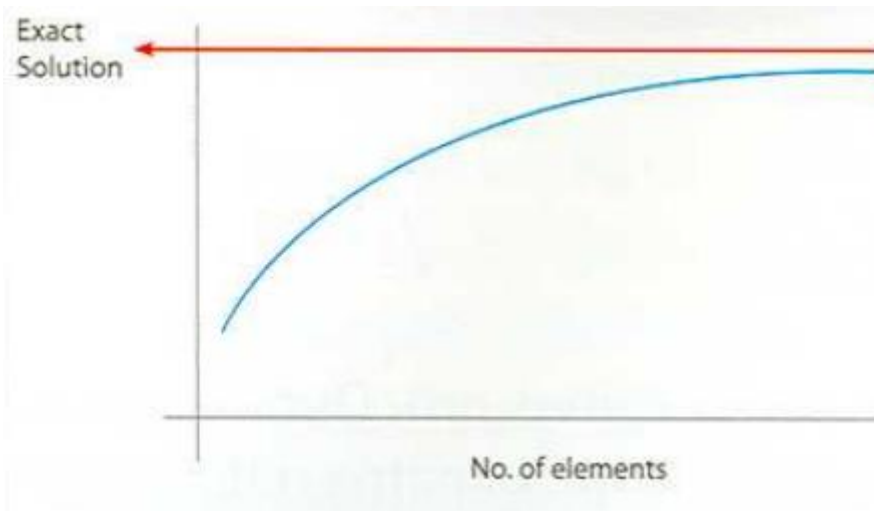
Peamised eelised, miks kasutada LEM programme on visuaalne tulemus ehk protsessi käigus tekib mudel, mis annab visuaalse pildi võimalikust tekkivast olukorrast, mis on eriliselt oluline just keerukamate konstruktsioonide korral. Lisaks sellele vähendab

meetod oluliselt disainiprotsessi aega, tehtavate prototüüpide vajadust ning testimiseks kuluvat aega, mis viib kõik optimaalse disainini. (Gokhale, jt., 2008)

Meetodi peamiseks puuduseks on õige mudeli koostamine. Selleks on vaja seada materjalidele õiged parameetrid, koostada võimalikult täpne mudel. Lisaks sellele on väga oluline seada mudelile sobiv elementideks jaotamise võrgustik (*meshing* ingl.k). Programmist saadavaid tulemusi tuleb hinnata, mis eeldab eelteadmiste olemasolu antud meetodist ning konstruktsioonide käitumisest üldiselt (Gokhale, jt., 2008).

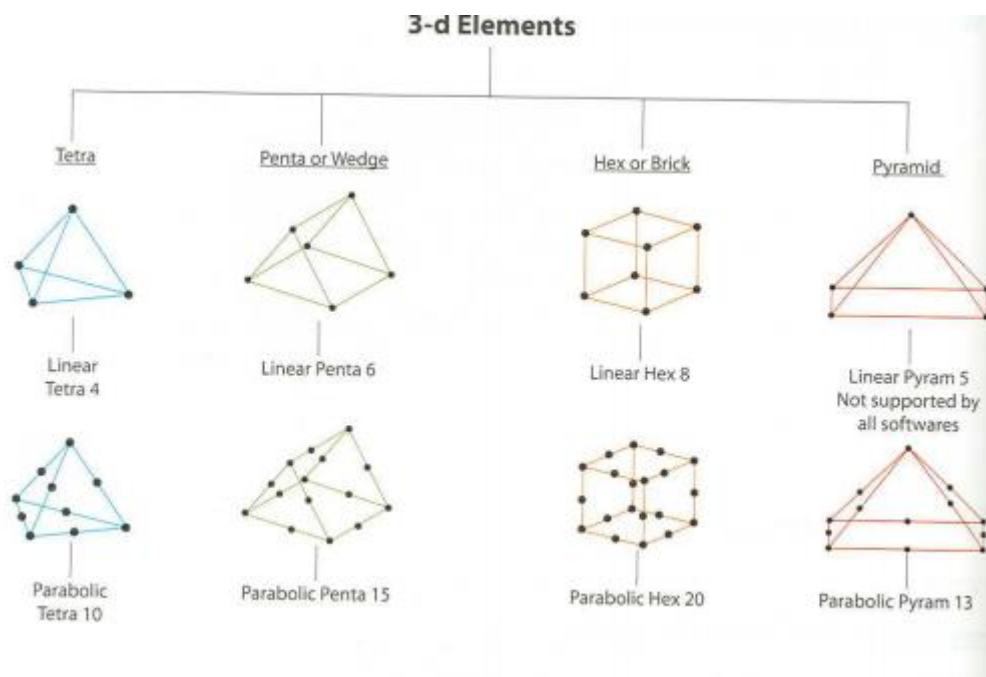
2.4.4 Võrgustiku valik

Võrgustiku samm on lõplike elementide meetodi puhul äärmiselt oluline. Suurte elementide kasutamine annab ebatäpseid tulemusi, kuid liiga väikesed elemendid teevad arvutuskäigu liialt mahukaks. Arvutustulemused lähenevad elementide suuruse vähendamisel asümptootiliselt õige tulemuseni. Vaja on leida optimaalne võrgustiku suurus, mis annab piisavalt täpse tulemi, piisavalt optimaalse arvutamismahu korral. Kriitiliste alade nagu avade ümbruses on vajalik vähemalt 12 lõpliku elemendi olemasolu, mis asetseksid vähemalt kahes reas augu ümber. Võrgustiku puhul on oluline võrgustiku samm, elemendi kuju kui ka orientatsioon. Kõik elemendid peaksid olema sama kujuga, eelistatud on kandilised elemendid, mille korral on tagatud reaalsemad tulemused tulenevalt paremast interpolarisatsiooni funktsioonist. Kolmnurksed elemendid on olemuselt jäigemad ning lisavad mudelile lisajäikust, mis moonutab tulemusi. Võrgustik peab olema korrapärane, kuigi LEM programmid pakuvad välja ka automaatset võrgustikku, mis lähtub elemendi geomeetriast (Gokhale, jt., 2008, lk. 18,49-110).



Joonis 2.6 Suurendades elementide arvu läheneb graafik asümptootiliselt õige lahendini (Gokhale, jt., 2008, lk. 184)

Antud uurimustöös keskendutakse 3D elementide analüüsile, LEM saab rakendada nii 1-d, 2-d kui 3-d kehadele. Eelistatumad on „Hex“ või „Brick“ tüüpi elemendid, mis on toodud joonisel 2.7.



Joonis 2.7 Erinevat tüüpi 3-d lõplikud elemendid. (Gokhale, et al., 2008, p. 112)

Võrgustiku kontroll (Gokhale, jt., 2008):

1. Lõimenurk- ideaalväärtus=0 (aktsepteeritav $<30^\circ$)
2. *Jacobiani* väärtus- ideaalväärtus=1.0 (aktsepteeritav $>0,5$)
3. Moonutus faktor- ideaalväärtus=1.0 (aktsepteeritav $>0,5$)

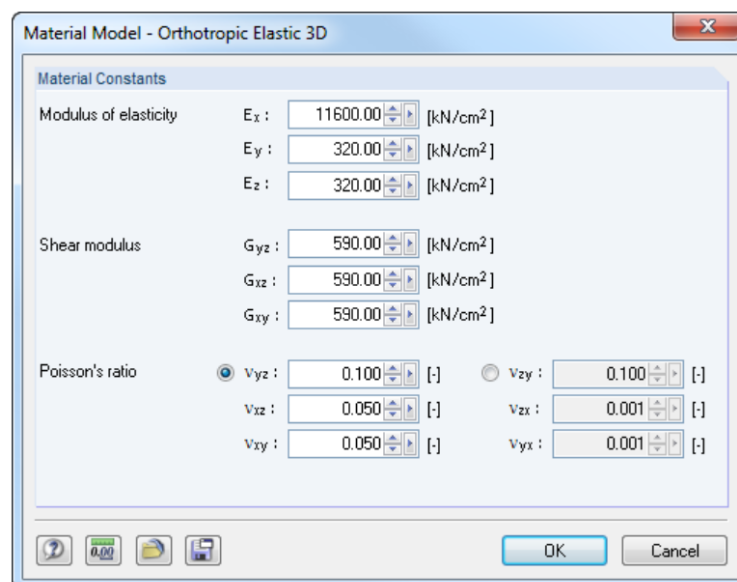
4. Venivuse faktor- ideaalväärtus=1.0 (aktsepteeritav >0,2)
5. Proportsioonide suhe ideaalväärtus =1,0 (aktsepteeritav <5, ideaalkuju on ruut)
6. Kaldumise faktor- ideaalväärtus =0 (aktsepteeritav <45°)
7. Visuaalne vaatlus, et võrgustikus pole korrapäratusi

2.4.5 Erinevad arvutusmudelid

*Dlubal*is on 12 erinevat materjalimudelit ning 3D kehade korral on valikus 5 mudelit: isotroopne mittelineaarne elastne 3D, isotroopne plastne 3D, ortotroopne elastne 3D, ortotroopne plastne 3D ja isotroopne kahjustuse 3D.

Puidu kui materjali eripärasid võimaldavad käsitleda ortotroopsed mudelid (*Dlubal Software, Inc, 2020*).

Ortotroopne- elastne 3D arvutusmudel sobib puidule kui materjalile, mis erineb pikikiu-, ristikiu- ning radiaalsuunas enda omaduste poolest. Ortotroopne- elastne mudel võimaldab defineerida jäikust iga keha jaoks eraldi. Arvestatakse erinevate normaalelastsusmoodulite E , nihkeelastsusmoodulite G ning *Poissoni* põhiliste ning ka teisejärguliste teguritega. *Poissoni* tegur väljendab erisuunaliste suhteliste deformatsioonide suhet ehk moonete suhet.



Joonis 2.8 Valikute moodul *Dlubal* programmis omaduste määramiseks ortotroopse- elastse mudeli korral

Elastne maatriks on defineeritud kujul:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Joonis 2.9 Maatriks ortotroopse-elastse 3D mudeli korral (Dlubal Software, Inc, 2020)

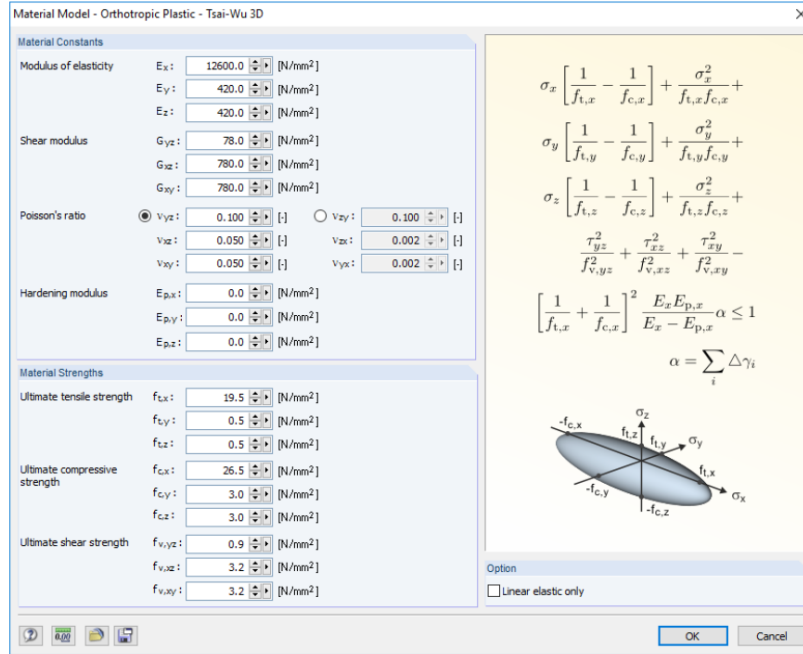
Poissoni tegurite vahelised seosed:

$$\frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y}; \quad \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}; \quad \frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x}$$

Tingimused, mis peavad olema täidetud:

$$E_x > 0; \quad E_y > 0; \quad E_z > 0 \\ G_{yz} > 0; \quad G_{xz} > 0; \quad G_{xy} > 0$$

Ortotroopne- plastne 3D arvutusmeetod põhineb Tsau-Wu lähenemisele (Dlubal Software, Inc, 2020). Arvutusmeetod võimaldab määratleda anisotroopsete materjalide karakteristikuid lähtuvalt erinevatest suundadest. Lisaks sellele saab määratleda materjali arvutuslikke tugevusväärtusi. Pingete ületamisel laseb mudel tekkida plastilistel deformatsioonidel, mille tõttu pinged jäävad konstantseks. Vastavalt määratletud jäikusele on koormustel võimalik ümber jaotuda (Dlubal Software, Inc, 2020).

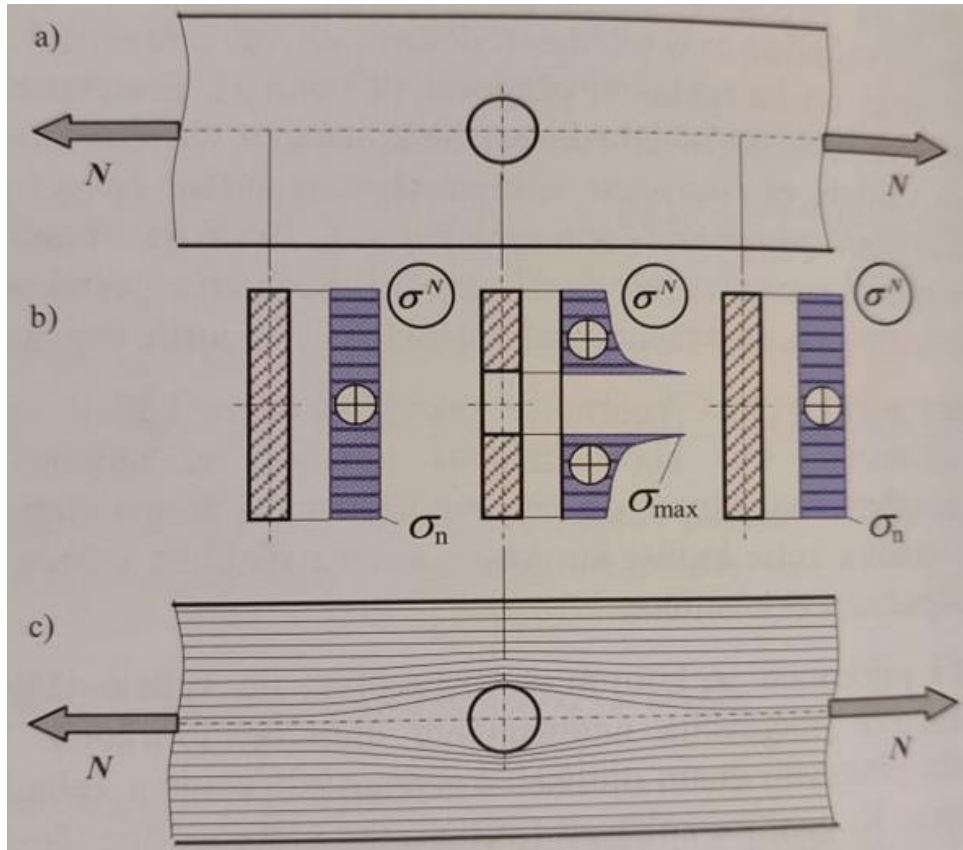


Joonis 2.10 Tsai-Wu-I põhineva ortotroopse- plastilise mudeli valikumoodul omaduste määramiseks Dlubalis

Pingete korral, mis ei ületa materjali tugevusomadusi vastab mudel ortotroopse-elastsele mudelile. Tugevust ületatavate pingete korral tekivad mudelitesse plastilised tsoonid vastavalt Tsai-Wu lähenemisele.

2.5 Pingete kontsentratsioon

Temperatuuri, detailide kujust, sisestruktuurist põhjustatud järsud muutused konstruktsioonielemendis tekitavad pingeväljas anomaaliaid. Konstruktsioonielemendides toimub pidev pingete jaotus, kui elemendis on aga nõrgestus, nagu ava või oksakoht, siis ei saa pinged ühtlaselt jaguneda ning nad hakkavad kontsentreeruma, tekitades konstruktsioonielemendis alasid, kus pinged hakkavad kasvama (Kretchmann, 2010). Pingete tõusu tekitaja on pingekontsentraator, mis tekitab häiringuid piiratud alal ehk kohalikke pingeid (A. Klauson, 2017).



Joonis 2.11 Pingekontsentratsioon: a) avaga element; b) pinged elemendi ristlõigetes; c) peapingete kulgjooned (A. Klauson, 2017, lk. 274)

Ülaltoodud joonisel on pingekontsentraatoriks keset elementi paiknev ava, mis mõjutab normaalpingete jaotust ning tekitab ava ääresse alad, kus maksimaalne pinget σ_{max} ületab märgatavalt ilma avata paiknevas ristlõikes paiknevat pinget σ_n . Joonise c osa väljendab, kuidas pingete kulgjooned taastavad peale anomaalia teket esialgse kuju, olles paralleelne. Jooniselt 2.11 on näha, et ristlõikes olev pingekontsentraator mõjutab vaid teatud ala ava ümber.

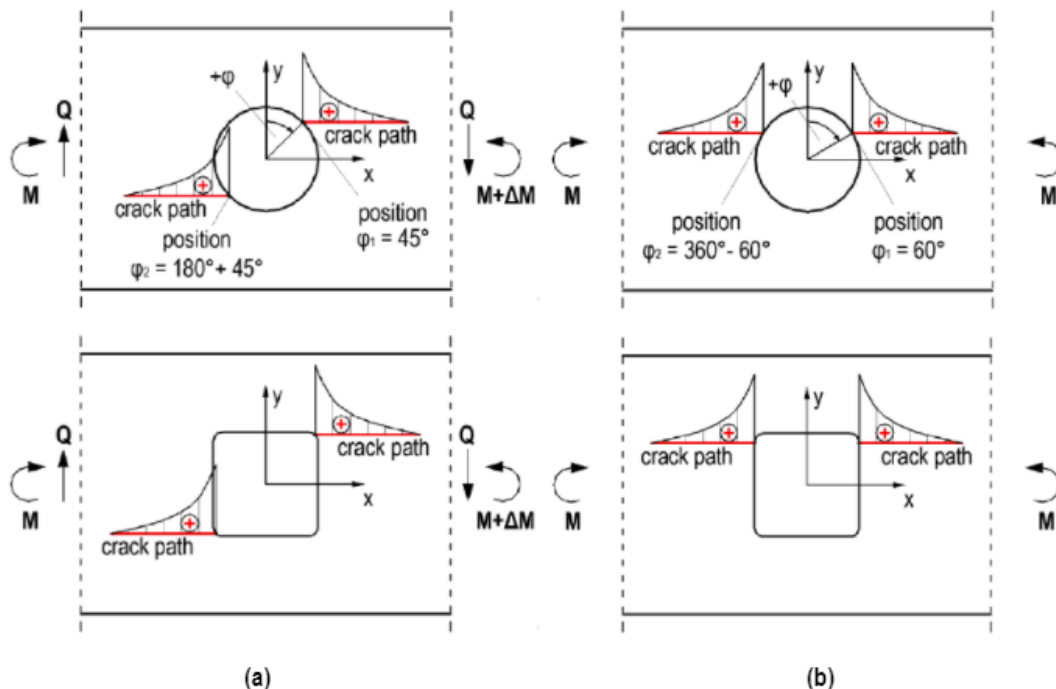
Arvuliselt iseloomustatakse pingekontsentratsiooni teoreetilise kontsentratsiooniteguriga, mis väljendab mitu korda ületab maksimaalne pingeväärtus samas kohas olevat pinget nimiväärtust (A. Klauson, 2017).

$$K_{t\sigma} = \frac{\max\sigma}{\sigma_n} \quad (2.21)$$

$$K_{t\tau} = \frac{\max\tau}{\tau_n} \quad (2.22)$$

- kus K – kontsentratsioonitegur
 $max\sigma$ – maksimaalne kohalik normaalpinge
 $max\tau$ – maksimaalne kohalik nihkepinge
 σ_n – normaalpinge nimiväärtus
 τ_n – nihkepinge nimiväärtus

Staatilisel koormamisel hinnatakse pingekontsentratsiooni mõju efektiivse kontsentratsiooniteguriga K_σ , mis on määratav katseliselt. Tõmbetugevuse ületamisel tekib materjalis pragu ning tekkiva prao otsas on pingekontsentratsioon algasendiga võrreldes suurem, mille tõttu areneb pragu aina edasi kuni elemendi purunemiseni (A. Klauson, 2017, lk. 153,274).

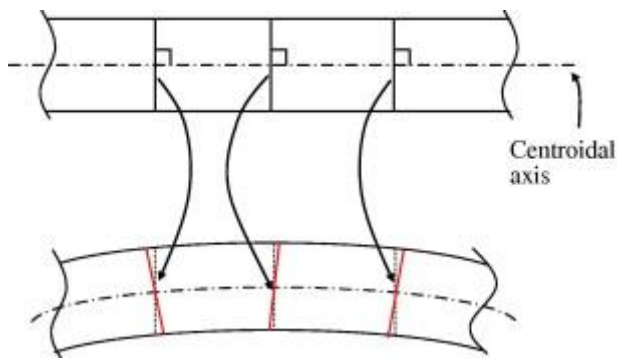


Joonis 2.12 Joonisel (a) on toodud pingete kontsentreerumine, kui mõjub nii lõikejõud kui paindemoment, teisel juhul (b) mõjub peamiselt vaid paindemoment (Aicher & Höfflin, 2006)

Liimpuidu korral tekivad kriitilised alad pingekontsentratsioonide korral avauste nurkadesse, kus tekib ristikiudu tõmme, sest puidu tõmbetugevus ristikiudu on vaid 2% tõmbetugevusest pikikiudu. Joonisel 2.12 on kujutatud maksimaalsete tõmbepingete epüürid ava nurkades, punase joonega on näidatud tõenäolisele prao arenemise trajektoori. Pingekontsentratsioonide teke oleneb arvutuskeemist ning mõjuvatest jõududest nagu on ka joonisel 2.12, kus vasakpoolsete avade korral mõjuvad nii põikjõud kui ka paindemoment ja paremal ainult paindemoment. Ristikiudu tõmbel puruneb puit hrapa materjalina, mille tõttu tuleb pingekontsentratsioonide tugevusarvutustes arvestada.

2.6 Plaadi teooriad

Arvutustes tehakse lihtsustusi materjalide ja mudelite käitumisele ning programm *Dlubal RFEM* võimaldab kasutada kahte plaaditeooriat: Reissner-Mindlini ja Kirchoffi. Reissner-Mindlini plaaditeooria on rakendatav paksude plaatide korral, kui nihkedeformatsioonide ja pöördinerti poolt tekitatud efektid on arvesse võetud. Sellisel juhul ei ole eeldatud, et ristlõiked jäävad telgede suhtes täisnurkseteks peale deformeerumist nagu on näidatud ka joonisel 2.13. Joonisel on kujutatud, et enne koormamist risti olnud lõiked pole alumisel joonisel peale koormamist enam peateljega risti. Kirchoffi lähenemine, kus ristlõiked on ka peale koormamist teljega risti, on andnud paremaid tulemusi õhukeste plaatide ja koorikute korral (G.R.Liu & S.S.Quek, 2014, lk. 13-41).



Joonis 2.13 Mindlini teooria kohaselt deformeerudes pole ristlõiked telje suhtes enam risti (G.R.Liu & S.S.Quek, 2014, lk. 13-41)

2.7 Eeldatav tulemus

Käesolevas lõputöös modelleeritud mudelites tekivad tulenevalt arvutusskeemist vastavalt põikjõud ja paindemoment, millest omakorda tekivad avauste vastasnurkadesse pingekontsentratsioonid. Tulemuste analüüsis on vaadeldud ristikiusuunalisi normaalpingeid. Avauste vastasnurkadesse tekivad samamärgilised ristikiudu pinged, vastavalt kas tõmbe- või survepinged ristikiudu. Koormused on võrdselises seoses pingetega.

Mudelite läbivajumid on vastavuses varasemalt katseliselt saadud läbivajumitega, mis annab tunnistust sellest, et mudelid on korrektselt formuleeritud ning katselised tulemused on võrreldavad mudelitest saadava informatsiooniga.

Eelduste kohaselt ületavad mudelitele asetatud koormuste korral tekkivad pinged materjali ristisuunalise tugevuse, mis põhjendaks katsetulemustes tekkinud pragusid.

Katseliselt tekkisid praod nurkadesse, kus materjali tõmbetugevus oli programmi tulemuste põhjal ületatud. Prao tekkimiseks vajalik tõmbepinge vastab varasemates uuringutes leitud maksimaalsete tõmbepingete väärtustele, mida on kirjeldatud peatükis 2.2.2. "Puidu mehaanilised omadused", lk 15.

Rootsi ning Saksa juhendite alusel leitud maksimaalsed lubatavad koormused on konservatiivsemad ning ei lase tõmbepingetel üle materjali tugevusväärtuste minna.

Lihttala ning konsoolse osaga talaelemendi arvutuskeem mõjutab talaelemendis tekkivaid pingeid ning ava ümber tekkivaid pingekontsentratsioone. Arvutuskeemi erinevus kajastub ka läbivajumite erisuses ning ristikiudu pingete erinevas jaotumises talaelemendis.

Võrreldes avadega ja samal koormusel ilma avadeta mudelite korral on avadega mudelite läbivajum suurem. Eelduste kohaselt avaldab kõige rohkem mõju ava paiknemine tala tõmbetsoonis.

3. METOODIKA

Lõputöö eesmärgiks on uurida nõrgestatud ristlõikega liimpuittalasid lõplike elementide meetodil põhineva programmiga. Eesmärgi saavutamiseks on kasutatud loodusteaduslikku meetodit, mis põhineb eelnevalt H. Danielssoni ja P. J. Gustafssoni poolt teostatud katseliste uuringute põhja hüpoteeside püstitamises ning teostatud uuringu tulemuste paikapidavuse kontrollil, (Theodore, 2016) lõplike elementide meetodil põhineva programmiga *Dlubal RFEM*. Hüpoteeside paikapidavuse kontrollimisel arvestatakse programmiga katsete läbiviimisel tulemuste jälgitavuse ja kordamise võimaluse printsiipi (Gauch, 2003, lk. 11).

3.1 Magistritöö alused

Lõputöö aluseks on võetud H. Danielssoni ja P. J. Gustafssoni uurimustööd, kus on augustatud liimpuittalasid arvutatud vastavalt olemasolevatele arvutuseeskirjadele ja on teostatud ka katselised uuringud (Danielsson, 2008). Vastavalt sellele tööle annavad kõik praegu kasutusel olevad eeskirjad erinevaid tulemusi, millest esineb ka tulemuse alahindamist, mis võib osutada väga ohtlikuks konstruktsioonides. Käesolevas töös on uuringu aluseks võetud H. Danielssoni ja P. J. Gustafssoni uurimustöös (Danielsson, 2008) katsetatud talade parameetrid samade avadega, et leida võimalik korrelatsioon testitulemuste ning juhendite vahel. Töös vaadeldakse pragusid tekitavaid ristisuunalisi tõmbepingeid, mis on puidu kui materjali kõige nõrgem tööolukord.

3.1.1 Arvutatavad konstruktsioonid

Taladena on kasutatud kuusepuidust (*Ld. Picea Abies*), lamellipaksusega 45mm homogeenset liimpuitu (*glulam*).

Katsetatud talade tugevuse klass vastab tugevusklassile GL 32h, mille materjaliomadused on toodud tabelis 3.1 (Eesti standardikeskus, 2013, tabel 5).

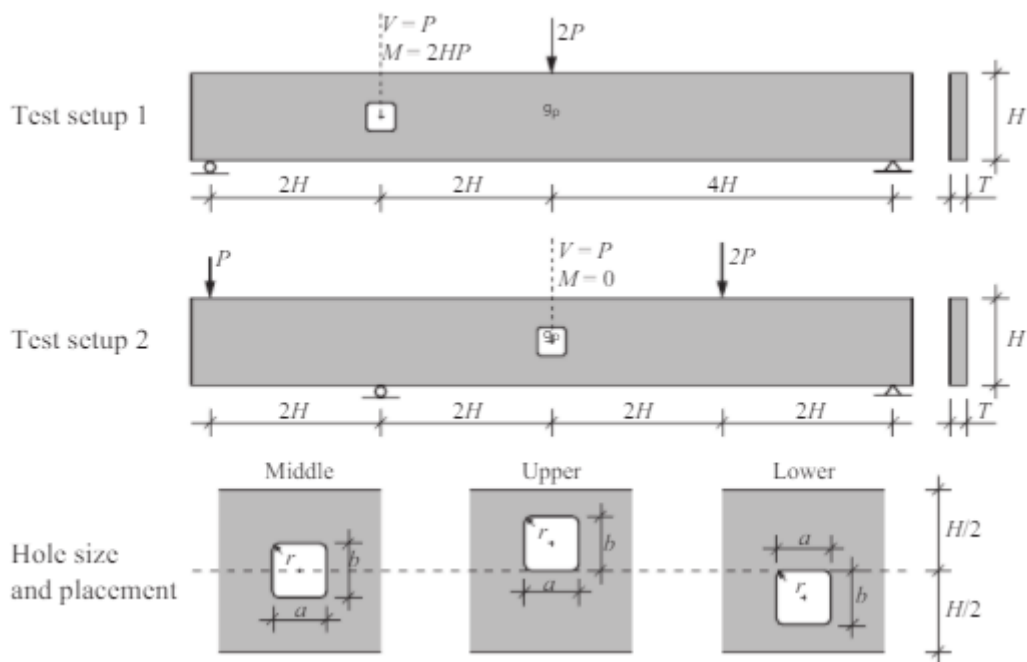
Tabel 3.1 Tugevusklass GL 32h omadused vastavalt EVS-EN 14080:2013 (Eesti standardikeskus, 2013)

Omadus	Tähis	Tugevusklass GL 32h
Paindetugevus	$f_{m.g.k}$	32 N/mm^2
Tõmbetugevus	$f_{t.0.g.k}$	$25,6 \text{ N/mm}^2$
	$f_{t.90.g.k}$	$0,5 \text{ N/mm}^2$
Survetugevus	$f_{c.0.g.k}$	32 N/mm^2
	$f_{c.90.g.k}$	$2,5 \text{ N/mm}^2$
Nihketugevus	$f_{v.g.k}$	$3,5 \text{ N/mm}^2$
Elastsusmoodul	$E_{0.g.mean}$	14200 N/mm^2
	$E_{0.g.05}$	11800 N/mm^2
	$E_{90.g.mean}$	300 N/mm^2
	$E_{90.g.05}$	250 N/mm^2
Nihkemoodul	$G_{0.g.mean}$	650 N/mm^2
	$G_{0.g.05}$	540 N/mm^2
Tihedus	$\rho_{g,k}$	440 kg/m^3
	$\rho_{g,mean}$	490 kg/m^3

Arvutatavad katseelementide mõõtmed on toodud tabelis 3.2 ning need põhinevad varasemalt katsetatud elementidele (Danielsson, 2008). Elementide ristlõiked on kahes erinevas suuruses 115x630 mm ja 115x180 mm, taladesse lõigatud avad vastavalt 210x210 mm ja 60x60 mm. Talade kogupikkused on võrdelises seoses talade kõrgusega H. Lõputöös ja varasemas uuringus (Danielsson, 2008) katsetati liimpuittalasid kahe arvutusskeemi alusel, millest esimeses töötas tala lihttala skeemil ning teises oli talal ka konsoolne osa, arvutusskeemid koos mõjuvate koormusetega on toodud joonisel 3.1.

Tabel 3.2 Mudelite karakteristikud

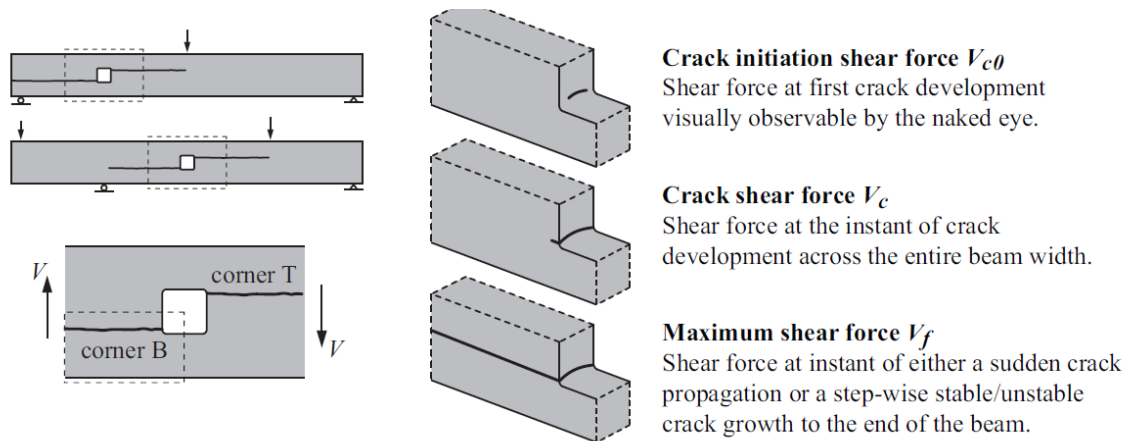
Katseelement	Tala ristlõike mõõtmed	Ava suurus	Ava nurga raadius	Ava asetus
(varasemas uuringus olev tähis)	laius x kõrgus (mm)	(mm)	(mm)	ristlõike kõrguse suhtes/tala suhtes
1 (AMh)	115x630	210x210	25	Keskel, ääres
2 (AUh)	115x630	210x210	25	Üleval, ääres
3 (ALh)	115x630	210x210	25	All, ääres
4 (BMh)	115x630	210x210	25	Keskel, keskel
5 (CMh)	115x180	60x60	7	Keskel, ääres
6 (CUh)	115x180	60x60	7	Üleval, ääres
7 (CLh)	115x180	60x60	7	All, ääres
8 (DMh)	115x180	60x60	7	Keskel, keskel



Joonis 3.1 Varasemas uurimuses kasutatud asetused ja neid illustreeriv joonis (Danielsson, 2008)

3.1.2 Koormused

Koormused on võetud varasemast Lundi ülikoolis tehtud katsetuste keskmised väärtused (Danielsson, 2008) kolme olukorra korral (illustratsioon purunemisolukordadest on joonisel 3.2): 1. esimese prao tekkel, 2. ristlõiget läbiva prao tekkel, 3. tervet tala läbiva prao tekkel (vaid 1-3 ja 5-7 elementidel) ning Rootsi ja Saksa juhendite alusel.



Joonis 3.2 Erinevaid koormusolukordi iseloomustav graafik (Danielsson & Gustafsson, 2006)

3.1.3 Programmi sisendandmed

Materjali mudeliks on valitud ortotroopne- elastne 3D, kus ei võimaldata plastsete deformatsioonide teket. Erinevaid materjalimudeleid on kirjeldatud peatükis 2.4.5. Programm arvestab materjali omadustega eri suundades ning erinevate elastsus- ja nihkemoodulitega. Materjali karakteristikud programmis vastavad eelnevas tabelis toodud materjali omadustele: Tabel 3.1 Tugevusklass GL 32h omadused vastavalt EVS-EN 14080:2013. *Poissoni* tegurid võib liimpuidu korral võtta võrdseks 0-ga (J. Kováčiková, 2016).

Programmis on võimalik valida plaadi teooriana kas Mindlini või Kirchhoffi lähenemist. Teooriaosas on tutvustatud erinevaid plaaditeooriaid, lk 33. Arvutustes on kasutatud Mindlini lähenemist, mis annab täpsemaid tulemusi 3D kehade korral. Kirchhoffi lähenemine on eelistatud õhukeste elementide korral nagu koorikud.

Mudelitele paigutatud koormused on katseliselt saadud maksimaalsed tulemused, *Limträhandbok* ja DIN 1052:2004 alusel. Varasemas uurimustöös on võrreldud katselisi

tulemusi ka varasema Eurokoodi juhenditega, aga see on antud lõputööst välja jäetud põhjusel, et lubaks suuremat koormust kui katseliselt saadud tulemused, mille tõttu ei saa reaalsuses talaelementidele sellist koormust paigutada (Danielsson & Gustafsson, 2008, lk. 9).

Koormustena on kasutatud H. Danielssoni poolt läbiviidud katsete keskmisi väärtusi (*mean values* ingl. k.) kolme juhu korral: koormus kui tekkisid esimesed märgatavad praod (V_c), terve tala laiuses tekkiv pragu (V_c), elementi läbiva prao teke (maksimaalne põikjõud V_f). Lisaks sellele on võrdlusesse lisatud Rootsi ning Saksamaa juhendite maksimaalsed koormused (vt Lisa 12).

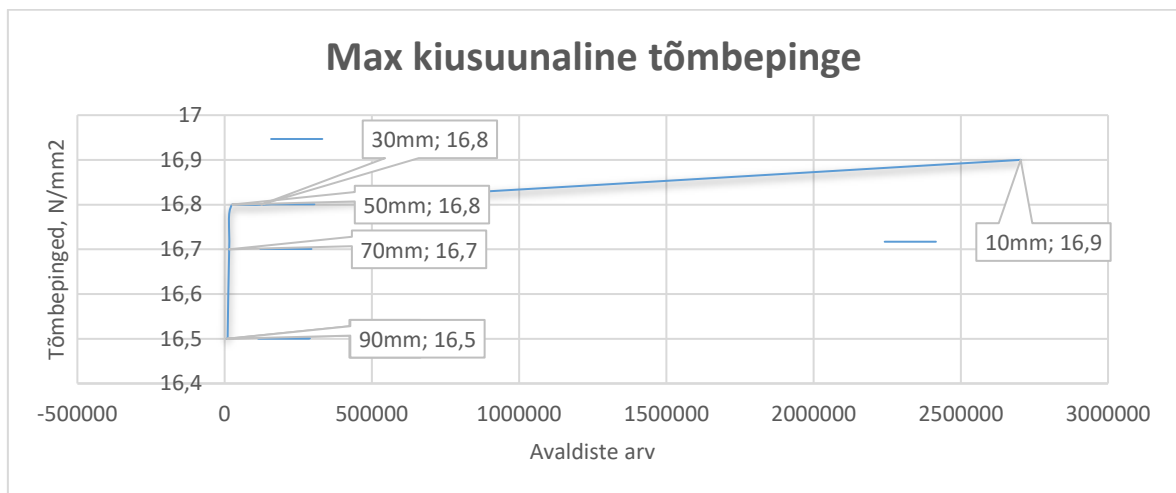
Talaseid käsitletakse lihttaladena.

Lahenduses kasutatakse *Dlubal RFEM* 5.23.02 64-bitist versiooni.

3.1.4 Võrgustiku valik

Võrgustiku valikul on arvesse võetud talade kõrgused, et jaotada terve ristlõige ühtlase suurusega elementideks, mudelitel 1-4 on kasutatud põhivõrgustikuna 70 mm suuruse küljemõõduga elemente ja mudelites 5-8 on kasutatud põhivõrgustikus 20 mm suuruse küljemõõduga elemente. Avade, tugede ja koormuste asukohtades on kasutatud tihedamat võrgustikku. Võrgustiku tihendamisel on kasutatud pindade (avades avasisest pinda, tugedel ja koormuse paiknemisel nende mõjuala pinda) ümber tihendamist sammuga 5mm.

Võrgustiku valiku kontrollimiseks teostati kontrollarvutused erinevate võrgustiku tihedustega kontrollkoormusel 103,5 kN. Koormus on jaotatud alale 600x115 mm, avaldudes pinnakoormusena 1500 kN/mm² vastavalt arvutusskeemile 1 (vt joonis 3.1) ilma avadeta tala korral. Võrgustiku tiheduse muutumist lõplike elementide suuruse vähendamisel ja arvutustulemuste seosed on kirjeldatud peatükis 2.4.4. Jooniselt 3.3 on näha, et muutes võrgudetaili suurust 30 mm-lt 10mm-ni suureneb märgatavalt programmi poolt loodud avaldiste arv arvutuse teostamiseks. Võrgustiku suurusel 70 mm ja 10 mm on saadava arvutustulemuste suhe 0,988, mis tähendab, et võrgustiku suurusest tulenev viga jääb lubatava 95% sisse ning juba 70 mm suuruse võrguelemendi korral on saadav tulemus piisava täpsusega. Optimaalse võrgustiku suuruse määramine on oluline, et saavutada piisavalt kiire mudeli arvutusaeg ja saadavad tulemused oleksid piisava täpsusega.



Joonis 3.3 Tõmbepinge muutus vastavalt lõplike elementide suuruste muutumisel

Võrgustiku puhul kontrollitakse järgnevaid andmeid, mida on kirjeldatud ka peatükis 2.4.4 ning joonisel 3.4 on välja toodud väljavõtte tarkvarast *Dlubal RFEM* kontrollitingimuste analüüsist.

FE Mesh

FE Mesh Settings Mesh Quality Criteria Adaptive Mesh Refinement

Surfaces

Define criteria:	Warning	Failure
<input checked="" type="checkbox"/> 1.1 Aspect ratio 2D	20.00 [-]	100.00 [-]
<input checked="" type="checkbox"/> 1.2 Parallel deviations 2D	100.00 [°]	160.00 [°]
<input checked="" type="checkbox"/> 1.3 Corner angles 2D		
- Triangles	105.00 [°]	175.00 [°]
- Quadrilateral	155.00 [°]	179.00 [°]
<input checked="" type="checkbox"/> 1.4 Warping 2D		
- Membranes	0.01 [-]	0.20 [-]
- Non-membranes	1.00 [-]	4.00 [-]
<input checked="" type="checkbox"/> 1.5 Jacobian ratio 2D	30.00 [-]	800.00 [-]

Solids

Criteria	Warning	Failure
<input checked="" type="checkbox"/> 2.1 Aspect ratio 3D	20.00 [-]	100.00 [-]
<input checked="" type="checkbox"/> 2.2 Parallel deviations 3D	100.00 [°]	160.00 [°]
<input checked="" type="checkbox"/> 2.3 Corner angles 3D		
- Triangles	105.00 [°]	175.00 [°]
- Quadrilateral	155.00 [°]	179.00 [°]
<input checked="" type="checkbox"/> 2.4 Warping 3D	0.10 [-]	0.50 [-]
<input checked="" type="checkbox"/> 2.5 Jacobian ratio 3D	30.00 [-]	800.00 [-]

Jacobian Ratio

$$R = \frac{\max(\det J_1, \det J_2, \det J_3, \det J_4, \det J_5, \det J_6, \det J_7, \det J_8)}{\min(\det J_1, \det J_2, \det J_3, \det J_4, \det J_5, \det J_6, \det J_7, \det J_8)}$$

Mesh Quality Color Indication

- OK (1033118/1033632, 99.95%) ■
- Warning (290/1033632, 0.03%) ■
- Failed (224/1033632, 0.02%) ■

Joonis 3.4 Programmi *Dlubal* võrgustiku kontrolli kriteeriumid

Vastavalt joonisele 3.4 on mudelite võrgustiku kvaliteet katsetatavatel mudelitel 99,95%-i ulatuses hea, 0,03% ulatuses hoiatusseisundis ning 0,02% võrgustikust pole












korrektne. Autori hinnangul on ebaõnnestunud võrgustikuelementide arv piisavalt väike, et selle mõju mitte arvestada.

3.2 LEM programmiga tehtud arvutuste tulemused

Programmiga *Diubal RFEM* on võimalik analüüsida erinevaid pingeolukordi, koormuseid ja koormuskombinatsioone. Antud lõputöö raames on vaadeldud vaid puidukiududega ristisuunalisi pingeid ning läbipaindeid. Positiivseteks pingeteks on loetud tõmbepinged ning negatiivsed pinged on survepinged. Värvikoodid on valitud vastavalt sellele, et oleks võimalikult lihtsalt eristatav piir, kus on mudelites tõmbepinged ning kus need lähevad üle survepingeteks. Värvikood on toodud tabelis 3.3.

Katseliselt saadud ning mudelsimulatsioonide tulemusel leitud läbipainde tulemusi võrreldakse hetkeliste läbipainete soovitatavate piirväärtustega, arvestades, et tegu on peakanduritega (Rohusaar, jt., 2014, lk. 512).

Tabel 3.3 Lõplike elementide meetodi programmis kasutatud värvikoodid ja neile vastavad pinged

σ_z , N/mm ²	
	0,7-∞
	0,5-0,7
	0,32-0,5
	0,16-0,32
	0-0,16
	-0,4-0
	-0,8-0,4
	-1,2-0,8
	-1,8-1,2
	-2,6-1,8
	∞-2,6

3.2.1 Mudelid 1-4

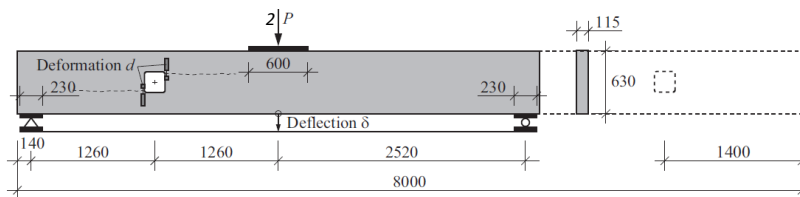
Arvutuskeemid esimesel neljal mudelil (edaspidi kasutatud ka väljendit suuremad elemendid). Võrgustikuna on kasutatud põhivõrguna 70 mm suuruseid elemente. Avade, koormuste ja tugede pindadel on võrku tihendatud 5mm-ni. Mudelite

arvutuskeemid on toodud joonisel 3.5 ja elementide mõõtmed ja karakteristikud tabelis 3.4.

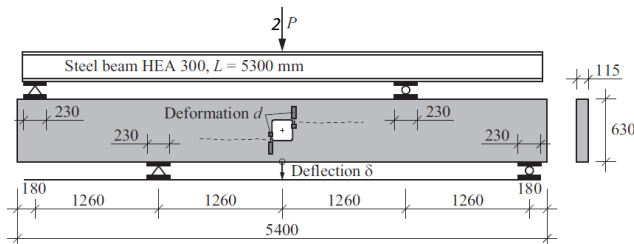
Tabel 3.4 Mudelite 1-4 karakteristikud

Mudelid 1-4											
Mudeli nr	Ristlõike laius, B	Ristlõike kõrgus, H	Tala sildepikkus m	Tala kogupikkus m	Ava suurus	Ava nurkade ümarduse raadius	Ava paigutus nulljoone suhtes	Arvutuskeem, vt joonis 3.4	Läbipaine soovitatavad piiväärtused, w inst, mm	Normatiivne survetugevus ristikiudu N/mm ²	Normatiivne tõmbetugevus ristikiudu N/mm ²
1	115	630	5,04	5,32	210x210	25	Keskel	1	12,6	2,50	0,5
2	115	630	5,04	5,32	210x210	25	Üleval	1	12,6	2,50	0,5
3	115	630	5,04	5,32	210x212	25	All	1	12,6	2,50	0,5
4	115	630	5,22	5,4	210x213	25	KEskel	2		2,50	0,5

Arvutuskeem põhineb H. Danielssoni läbi viidud katsetel (Danielsson, 2008, lk. 6).



Arvutuskeem 1



Arvutuskeem 2

Joonis 3.5 Arvutuskeemid mudelitele 1-4 (Danielsson, 2008, lk. 6)

Tulemused 1-4 mudelitel

Tabel 3.5 Mudeli nr 1 (AMh) tulemused

Mudel 1	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	89,60	0,069	1298,55	2,20	-2,30	2,30	-2,20	10,80	10,30
Vc, Esimene läbiv pragu	114,60	0,069	1660,87	2,70	-2,90	2,90	-2,80	13,80	13,30
Vf, Tervet tala läbistav pragu	121,20	0,069	1756,52	2,90	-3,10	3,00	-2,90	14,60	14,00
Limträhandbok	73,20	0,069	1060,87	1,80	-1,90	1,80	-1,70	8,80	8,50
DIN 1052	83,60	0,069	1211,59	2,00	-2,20	2,10	-2,00	10,10	9,70

Tabel 3.6 Mudeli nr 2 (AUh) tulemused

Mudel 2	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	87,40	0,069	1266,67	1,80	-2,10	2,00	-2,60	10,70	10,10
Vc, Esimene läbiv pragu	111,40	0,069	1614,49	2,40	-2,60	2,60	-3,20	13,60	12,90
Vf, Tervet tala läbistav pragu	116,60	0,069	1689,86	2,50	-2,70	2,70	-3,30	14,20	13,50
Limträhandbok	73,20	0,069	1060,87	1,60	-1,60	1,70	-1,80	9,00	8,50
DIN 1052	71,80	0,069	1040,58	1,50	-1,70	1,70	-2,10	8,80	8,30

Tabel 3.7 Mudeli nr 3 (ALh) tulemused

Mudel 3	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	82,40	0,069	1194,20	1,80	-1,60	2,50	-1,80	10,00	9,50
Vc, Esimene läbiv pragu	100,00	0,069	1449,28	2,30	-2,00	3,00	-2,20	12,10	11,50
Vf, Tervet tala läbistav pragu	131,60	0,069	1907,25	3,00	-2,60	3,90	-2,80	15,90	15,10
Limträhandbok	73,20	0,069	1060,87	1,70	-1,50	2,20	-1,60	8,90	8,50
DIN 1052	71,80	0,069	1040,58	1,60	-1,40	2,10	-1,60	8,70	8,30

Tabel 3.8 Mudeli nr 4 (BMh) tulemused

Mudel 4	Koormus, P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, konsool kN/m ²	Koormus jaotatuna pinnale, silde keskel kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Läbivajum, konsool mm	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum, konsool mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	51,4	0,026	1943,29	3886,58	2,5	-2,5	2,5	-2,5	5	4,4	4,7	4,1
Vc, Esimene läbiv pragu	62,2	0,026	2351,61	4703,21	3	-3	3,1	-3,1	6,1	5,3	5,7	4,9
Limträhandbok	36,6	0,026	1383,74	2767,49	1,8	-1,8	1,8	-1,8	3,6	3,2	3,4	2,9
DIN 1052	50,2	0,026	1897,92	3795,84	2,5	-2,5	2,5	-2,5	4,9	4,3	4,6	4

Tulemuste põhjal hakkab mudelites pragu arenema sarnaselt katseliselt saadud tulemustele (Danielsson, 2008), peamiselt ava paremast ülemisest nurgast, kus mudelite andmetel tekib maksimaalne ristikiudu tõmbepinge. Tõmbepingete

konsentreerumisel tekib esimese pragu kohas, kus ristisuunalised tõmbepinged on $2,0...2,5 \text{ N/mm}^2$, mis kirjanduse põhjal on ka maksimaalseks puidu ristikiudu katseliselt saadud tõmbetugevuse väärtuseks, mida on kirjeldatud peatükis 2.2.2 lk. 15.

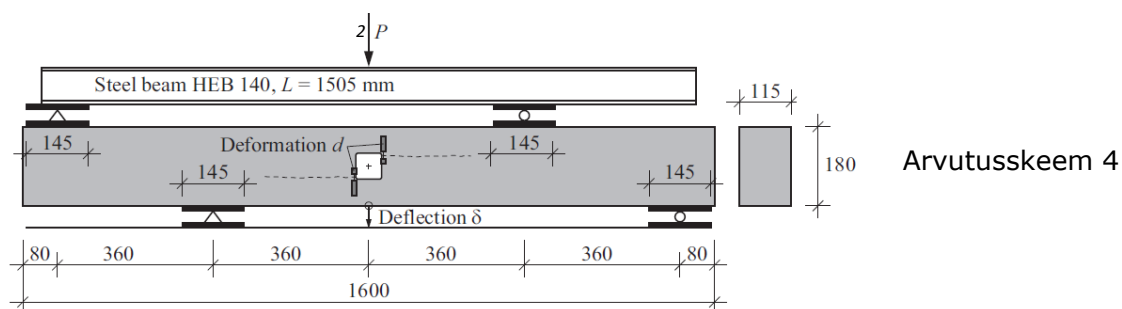
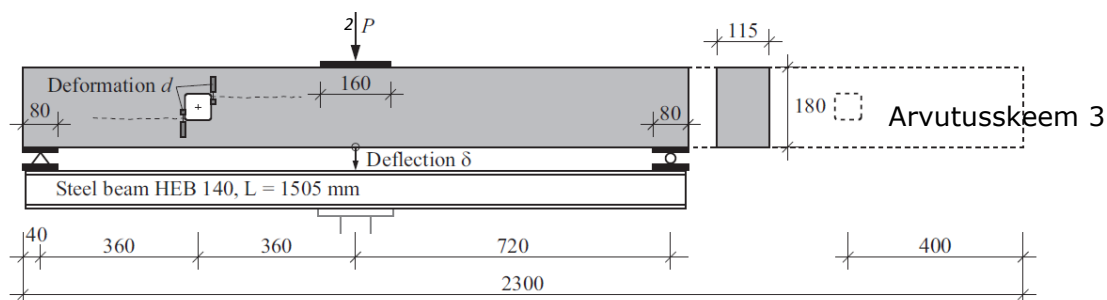
3.2.2 Mudelid 5-8

Arvutuskeemid ning elementide mõõtmed neljal madalamal mudelil on toodud tabelis 3.9 ja joonisel 3.6. Võrgustikuna on kasutatud põhivõrguna 20 mm suuruseid elemente. Võrgustiku valikul on lähtutud põhimõttest, et pikitelge jääks vähemalt 7-10 elementi. Avade, koormuste ja tugede pindadel on võrku tihendatud 5 mm-ni, kasutades selleks pinna alusel tihendamist (*mesh refinement* ingl. k.).

Tabel 3.9 Mudelite 5-8 karakteristikud

Mudelid 5-8											
Mudeli nr	Ristlõike laius, B	Ristlõike kõrgus, H	Tala sildepikkus, m	Tala kogupikkus, m	Ava suurus	Ava nurkade ümarduse raadius	Ava paigutus nulljoone suhtes	Arvutuskeem, vt joonis 3.5	Läbipaine soovitatavad piirväärtused, w inst, mm	Normatiivne survetugevus ristikiudu N/mm^2	Normatiivne tõmbetugevus ristikiudu N/mm^2
5	115	180	1,44	1,56	60	7	Keskel	3	3,6	2,50	0,5
6	115	180	1,44	1,56	60	7	Üleval	3	3,6	2,50	0,5
7	115	180	1,44	1,56	60	7	All	3	3,6	2,50	0,5
8	115	180	1,52	1,6	60	7	keskel	4		2,50	0,5

Arvutuskeem põhineb H. Danielsseni läbi viidud katsetel (Danielsson, 2008, lk. 6)



Joonis 3.6 Arvutuskeem mudelitele 5-8

Tulemused 5-8 mudelitel

Tabel 3.10 Mudel 5 tulemused

Mudel 5	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	43,2	0,018	2347,83	3,5	-3,5	3,7	-3,6	5,2	5
Vc, Esimene läbiv pragu	51,2	0,018	2782,61	4,1	-4,2	4,4	-4,3	6,1	5,9
Vf, Tervet tala läbistav pragu	54,6	0,018	2967,39	4,3	-4,4	4,7	-4,6	6,5	6,3
Limträhandbok	21,0	0,018	1141,30	1,7	-1,7	1,8	-1,8	2,5	2,4
DIN 1052	23,8	0,018	1293,48	1,9	-1,8	2,1	-2	2,9	2,8

Tabel 3.11 Mudel 6 tulemused

Mudel 6	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	37,6	0,018	2043,48	2,8	-2,7	3,00	-3,9	4,6	4,3
Vc, Esimene läbiv pragu	46,8	0,018	2543,48	3,4	-3,5	3,7	-4,8	5,7	5,4
Vf, Tervet tala läbistav pragu	47,2	0,018	2565,22	3,5	-3,5	3,8	-4,9	5,7	5,4
Limträhandbok	21,0	0,018	1141,30	1,5	-1,6	1,7	-2,2	2,6	2,4
DIN 1052	20,4	0,018	1108,70	1,5	-1,5	1,6	-2,1	2,5	2,4

Tabel 3.12 Mudel 7 tulemused

Mudel 7	Koormus, 2P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	39,0	0,018	2119,57	2,8	-2,6	3,9	-2,7	4,7	4,5
Vc, Esimene läbiv pragu	46,0	0,018	2500,00	3,3	-3	4,6	-3,5	5,6	5,3
Vf, Tervet tala läbistav pragu	53,2	0,018	2891,30	3,8	-3,5	5,3	-4,1	6,4	6,1
Limträhandbok	21,0	0,018	1141,30	1,5	-1,4	2,1	-1,5	2,5	2,4
DIN 1052	20,4	0,018	1108,70	1,3	-1,4	2,0	-1,6	2,5	2,4

Tabel 3.13 Mudel 8 tulemused

Mudel 8	Koormus, P, kN	Pind m ²	Koormus jaotatuna pinnale, konsool kN/m ²	Koormus jaotatuna pinnale, silde keskel kN/m ²	Tekkiv pinge ava vasakus all nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge vasakus üleval nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava üleval paremas nurgas (max) N/mm ²	Tekkiv pinge ava all paremas nurgas (max) N/mm ²	Läbivajum, konsool mm	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum, konsool mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm
Vco, Prao teke	24,0	0,017	1439,28	2878,56	3,70	-3,80	3,80	-3,80	1,80	1,90	2,00	1,70
Vc, Esimene läbiv pragu	26,6	0,017	1595,20	3190,40	4,10	-1,70	4,20	-4,20	2,00	2,10	2,00	1,80
Limträhandbok	10,5	0,017	629,69	1259,37	1,60	-1,60	1,70	-1,60	0,80	0,80	0,80	0,70
DIN 1052	14,3	0,017	857,57	1715,14	2,20	-2,20	2,30	-2,20	1,10	1,10	1,10	1,00

Sarnaselt suuremate talade puhul tekivad ka madalamate mudelite korral maksimaalsed ristikiisuunalised tõmbepinged avause ülemise parema nurga ümbrusesse, erandiks on konsooliga arvutuskeemiga mudel 8, kus suurimad pinged tekkisid avause vasaku alumise nurga ümbrusesse. Erisuse tingib erinev arvutuskeem, mis mõjutab talale mõjuvaid jõudusid. Väiksemate talade korral tekib esimene pragu pingetel 3,0...3,9 N/mm², mis ületab kordades normatiivset ristikiudu tõmbetugevust. Katsed teostati hetkelise koormamisega, mille tõttu võivad katses leitud purunemispinged ületada materjali tugevusomadusi, sest puidu tugevusomadused on seotud koormamise kestusega, mida on kirjeldatud peatükis 2.2.2.

Tabelis 3.14 on katseliselt saadud läbivajumid (Danielsson, 2008) ning mudelite läbivajumid, mis on samas suurusjärgus. Läbivajumite kokkulangevus viitab sellele, et talaelemendid käituvad koormusolukordades sarnaselt katselistele taladele. Katselised läbivajumid varieeruvad, sest elemendid on mõjutatud puitmaterjali eripäradest. Mudelsimulatsioonides käsitletakse talasid, kui ideaalsete kehadena, millel on kindlad materjaliomadused.

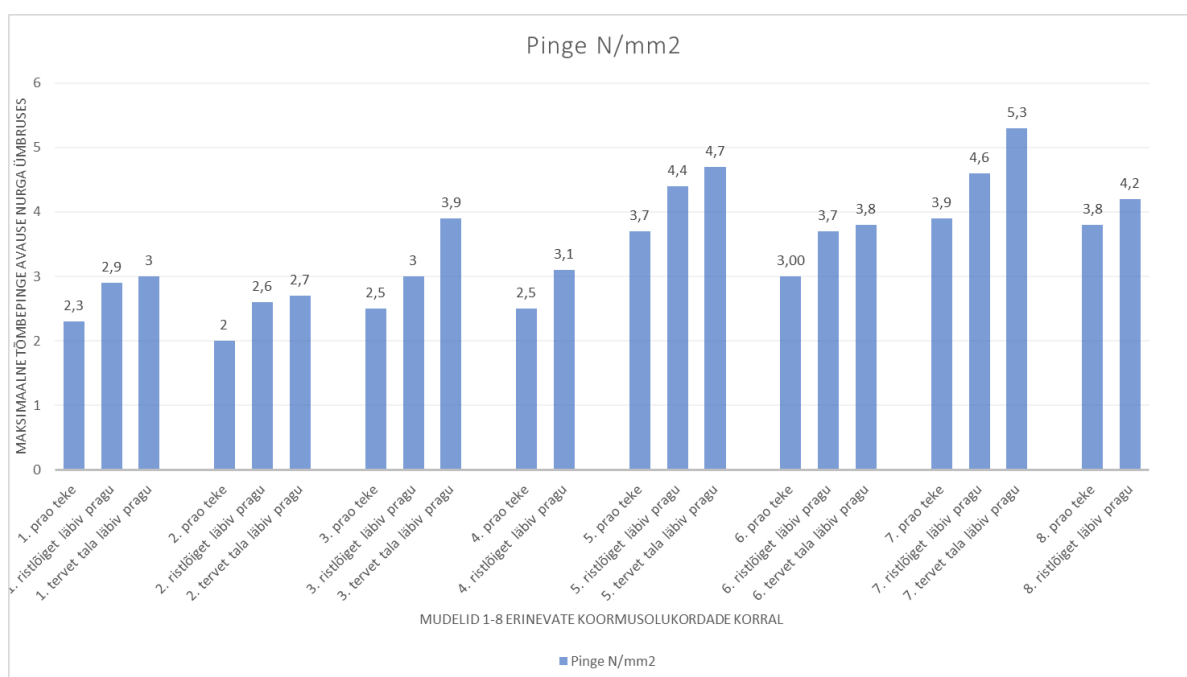
Tabel 3.14 Katseliste ja mudelsimulatsioonide läbivajumite võrdlus, katselised läbivajumid pärinevad varasemast uurimustööst (Danielsson, 2008, lk. 16-24)

Koormusolukord: esimene ristlõiget läbiv pragu		
Mudel/katseelement	Mudeli läbivajum, mm	Katseline läbivajum, mm
1	13,6	12,5...17,5
2	13,8	15...17
3	12,1	10,5...14
4	5,3	3...5,5
5	6,8	7,5...8
6	6,3	6,2...7,5
7	6,1	6,0...7,5
8	2,7	1,8...3,2

4. ANALÜÜS

4.1 Ristikiudu tõmbepinged avade ümber

Käesolevas lõputöös leitud tulemused toetavad varasemaid uurimusi, mida on kirjeldatud peatükis 2.1 ning katseliselt leitud tulemusi analoogsete talade korral (Danielsson, 2008). Augustatud taladel tekkisid koormuste korral pingekontsentratsioonid avade nurkadesse vastavalt peatükis 2.5 kirjeldatule. Joonisel 4.1 on toodud iga talaelemendi maksimaalsed puidu kiududega risti tekkinud tõmbepinged, erinevate purunemiskoormuste korral.



Joonis 4.1 Mudelite 1-8 maksimaalsed tõmbepinged ristikiudu erinevate katseliste koormusolukordade korral

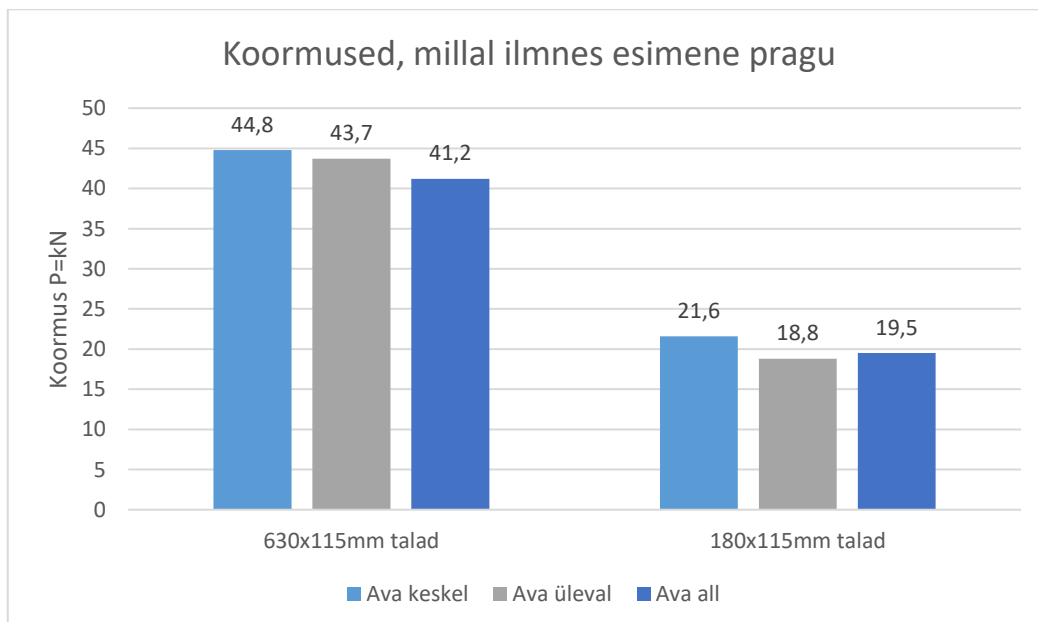
Jooniselt 4.1, joonistub välja, et esimene pragu tekkis katseelementidel 1-4 olukorras, kus mudelite pingekontsentratsioon oli jõudnud ületada materjali normatiivse tõmbetugevuse ristikiudu $f_{t,90,g,k} = 0,50 N/mm^2$. Talaelementide 1-4 korral on prao tekkimise ristisuunaliseks tõmbepingeks $\sigma_z = 2,0 - 2,5 N/mm^2$, mis vastab katseliselt saadud kuusepuust puidu maksimaalsetele tõmbetugevusnäitajatele, mis on välja toodud peatükis 2.2.2.

Väiksemate mudelite korral tekkisid esimesed praod pingetel $3,0-3,9 N/mm^2$, mis ületab normatiivse puidu ristikiudu tõmbetugevuse. Eelduse kohaselt on purunemisel tekkinud

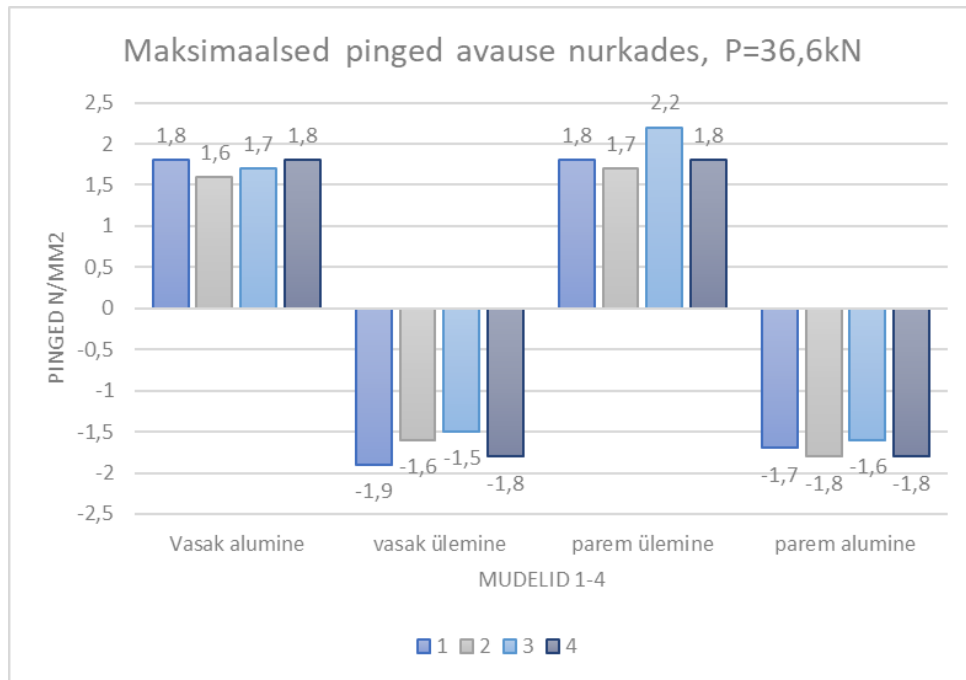
pinged samas suurusjärgus, sest talade mõõtmed on võrdelises seoses, kuid jooniselt 4.1 joonistub välja, et väiksemad talad purunevad suuremate pingete korral. Pole täpselt teada, mis on põhjustanud mudelite ning eeldatud tulemuse erinevuse. Pingete mitmekordne normatiivse ristikiudu tõmbetugevuse ületamine võib olla põhjustatud hetkelisest koormusolukorrast ning selle välja selgitamiseks on vaja teha edasisi uuringuid.

Jooniselt 4.1 tuleb välja, et talade korral, kus ava on paigutatud tala ülaossa tekib tervet tala läbiv pragu äkilisemalt, ehk kui on juba tala ristlõiget läbiv pragu, siis juba väga väikese pingelise lisandumisel areneb välja tervet tala läbiv pragu, mis tekitab kandevõime kao. Avaase tegemisel tala ülaossa peab suhtuma kriitiliselt juba esimese prao ilmnemisel. Vastupidiselt eeldusele toimub tala pragunemine ava asetsemisel tala alumises pooles suuremate pingete kontsentreerumisel, kui ava asetsemisel tala keskel või üleval pool.

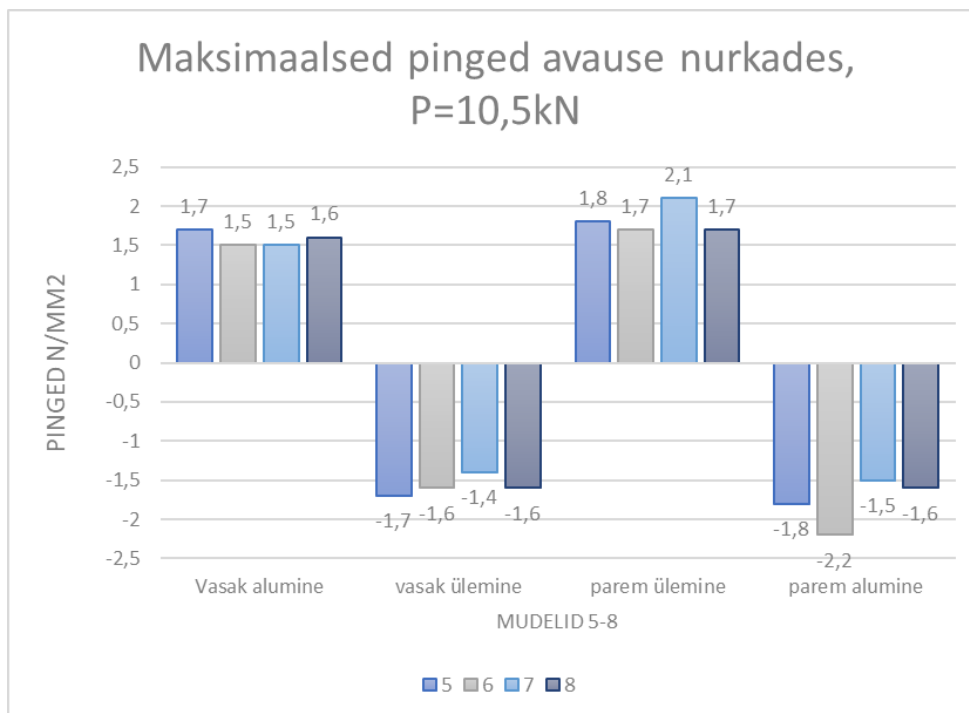
Võrreldes koormuseid, mis ava erinevate asetuste korral, tekitasid katseelementides pragunemise, siis avaldub jooniselt 4.2, et suuremate talade 1-3 korral on kõige kriitilisem ava asetus alumises ääres, väiksemate taladelementide 5-7 korral tekkis kõige väiksema koormusega pragunemine ava asetusega tala ülaosas. Mudelite 1-3 ja 4-7 korral väheneb tala kandevõime ava nihutamisel kõrguse tsentrist välja.



Joonis 4.2 Talade koormused esimeste pragude ilmnemisel erinevate ava asetuste korral



Joonis 4.3 Mudelite 1-4 maksimaalsete pingete muutus sõltuvalt ava asukohast, varasema Rootsi juhendi koormustega



Joonis 4.4 Mudelite 5-8 maksimaalsete pingete muutus sõltuvalt ava asukohast, Rootsi juhendi koormustega

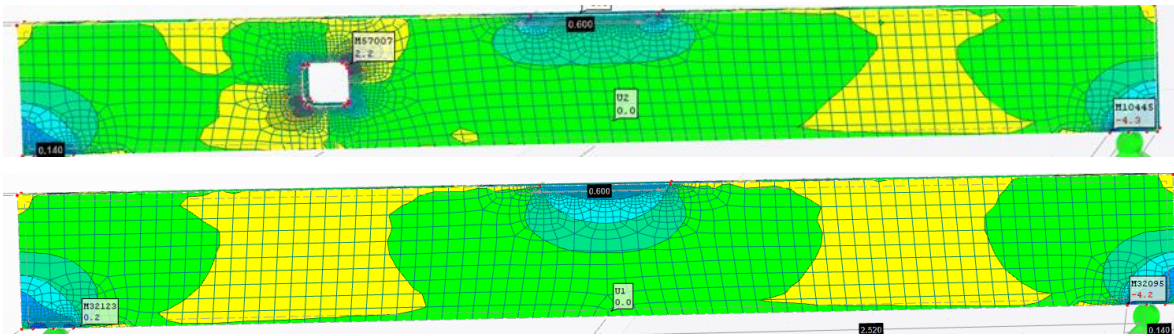
Joonis 4.3 ja joonis 4.4 illustreerivad varasema *Limträhandbok*-i alusel leitud maksimaalsete koormuste rakendumist mudelitele 1-4 ning 5-8, maksimaalsed koormused juhendi alusel oli taladele samad, vastavalt suurematel taladel 36,6 kN ning väiksematel taladel 10,5 kN. Põhjusel, et mudelitel 1-4 ja 5-8 mõjuvad juhendi alusel

sama suured koormused on võrreldavad ka ava ümbruses tekkivad pinged ning nende ümberjaotumine ava asukoha muutumisel.

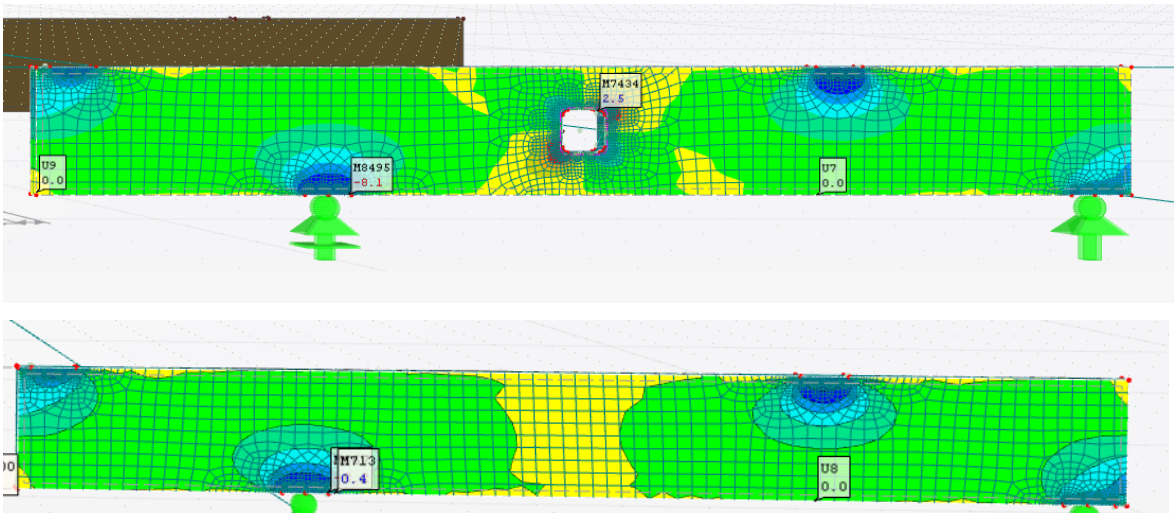
Esimene osa näitab, et kui ava asub tala keskel, siis on pinged kõigis ava nurkades küllaltki võrdsed, ava liikumisel tala ülemisse poolde suureneb pinge paremal allnurgas, mis on aga survepinge ning ei ole antud arvutuskeemi puhul kriitiline. Juhul kui ava on nihutatud tala alumisse poolde, siis vähenevad vasakus nurgas tekkivad tõmbepinged ja suurenevad nii parempoolsete ülemiste kui alumiste pingete väärtused, kus tõmbepinged lähenevad kriitilisele piirile. Selle alusel on kõige kriitilisemad olukorrad tõmbepingete kontsentreerumisel kui ava on tala alumises pooles, mis tekitab pingekontsentratsiooni paremasse ülanurka, kus materjali ristikiudu tõmbetugevus saavutab kõige kriitilisema väärtuse. Samad tendentsid on mõlemal graafikul, ehk pingete jaotumine avause nurkades toimub sarnaselt erimõõtmeliste ristlõigetega taladel. Joonistub välja ka talaelementide 4 ja 8 korral tekkiv olukord, kus kõige kriitilisemaks tõmbepingete punktiks on vasak alumine nurk, mis tuleneb erinevast arvutuskeemist ja mõjuvatest jõududest.

Kui võrrelda *Dlubal RFEM*-iga saadud tõmbepingeid ristikiudu Saksa juhendi DIN 1052-ga arvutatutega, kus väärtused on arvutatud ainult normatiivse tõmbetugevusega ristikiudu $f_{t,90,g,k} = 0,50 \frac{N}{mm^2}$ ja modifikatsioonitegurit k_{mod} kasutamata, siis annab *Dlubal RFEM* $(1,6 \dots 2,5)/0,5 = 3,2 \dots 5$ korda suuremad pingete väärtused, kui normatiivne tugevus. Selle erinevuse täpne põhjus jäi selgusetuks, kuid silma jäi asjaolu, et *Dlubal RFEM* jaotas pinged kontsentreeritumalt lühemale alale.

4.2 Pingete jaotumine



Joonis 4.5 Mudeli 1 puidukiududega risti pingajaotus



Joonis 4.6 Mudeli 4 puidukiududega risti pingajaotus

Joonised 4.5 ja joonis 4.6 annavad graafilise ülevaate, kuidas ava talas muudab ristikiudu pingete jaotumist. Joonistelt on näha, et avad on lõigatud asukohtadesse, kus ka ilma avata taladel tekivad ristikiudu tõmbepinged lähtuvalt arvutuskeemidest. Avade tekkimisel nendesse tsoonidesse muutuvad pingete jaotumised ning tekivad varasemasse tõmbetsooni ka survepingetsoonid. Jooniselt 4.5 on näha, et avaus lihttala arvutuskeemi korral tala vasakus pooles mõjutab pingete jaotust ka tala paremas otsas, mis väljendab, kui seotud on terve tala ning selles pingete jaotumine. Konsooliga arvutuskeemi korral ei levi avausega seotud pingete jaotus teisele poole tala otsa ning muudatused pingegaotuses on lokaalsemad. Pingekontsentraatori tekitatud anomaaliad pingegaotuses muutuvad aina väiksemaks liikudes selle tekitajast kaugemale, mida on kirjeldatud ka pingekontsentratsioone seletavas lõigus 2.5.

4.3 Läbivajumite analüüs

Arvutusmudelite tulemustest selgub, et avadega talade läbipaine on suurem kui ilma avadeta mudelite korral, vt tabelit 4.1. Erinevused on 0,1...0,5 mm suurema ristlõikega mudelite korral ja 0,1...0,2 mm väiksema ristlõikega mudelitel. Võrreldes talade läbipaindeid Rootsi juhendi alusel leitud maksimaalse koormusega, mis on taladel 1, 2, 3 sama suur, ilmneb, et kõige suuremat mõju läbipaindele avaldab ava asetsemine tala kõrguse suhtes nihutatuna ülesse poole. Väiksemate talamudelite korral avaldub sama tulemus.

Tabel 4.1 Läbivajumite erinevused Rootsi juhendi alusel leitud koormusega

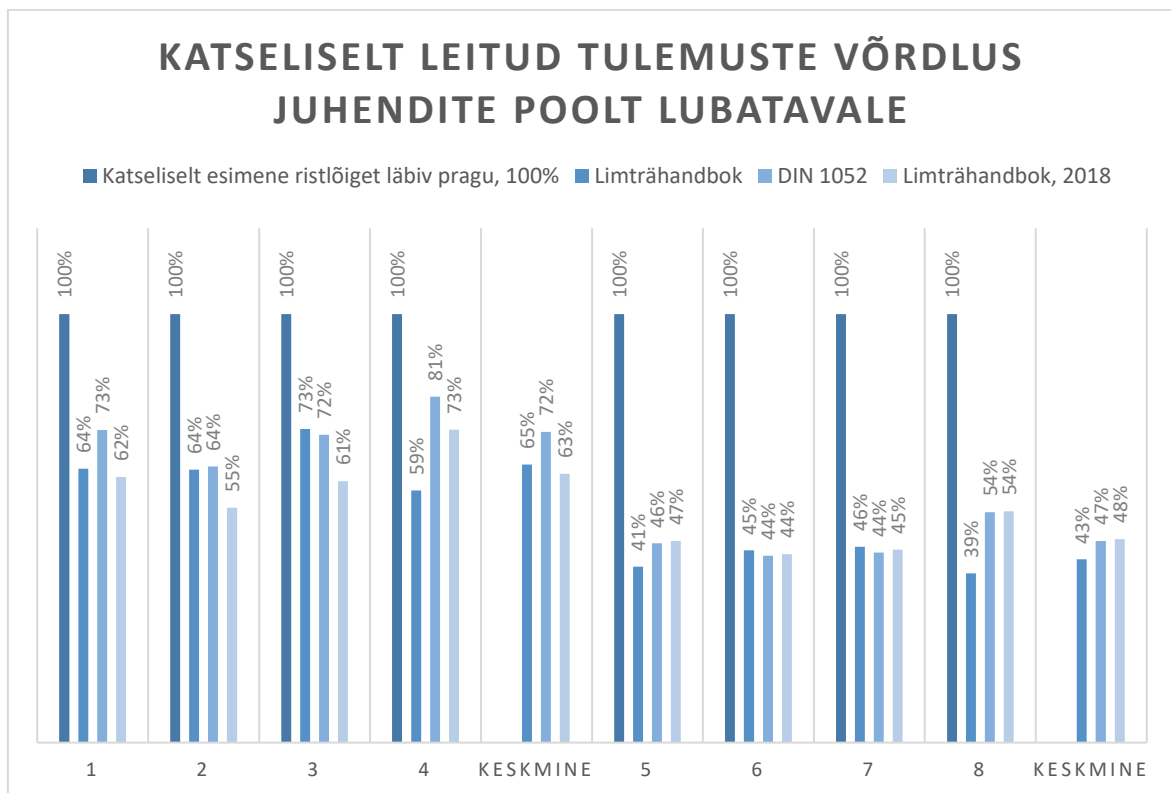
Mudel	Koormus P, kN	Max läbivajum, avaga mm	Läbivajum ilma avata analoogsel talal, mm	Erinevus, mm
1	36,6	8,8	8,5	0,3
2	36,6	9,0	8,5	0,5
3	36,6	8,9	8,5	0,4
5	10,5	2,5	2,4	0,1
6	10,5	2,6	2,4	0,2
7	10,5	2,5	2,4	0,1

Saadud tulemused tarkvaraga *Dlubal RFEM* kinnitavad eeldust, et ava mõjutab talade läbipaindeid negatiivselt, ehk suurendab deformatsioone. Kõige suuremat mõju avaldab ava paiknemine tala ülaosas.

4.4 Juhendite võrdlus tulemustega

2018. aastal uuendatud Rootsi arvutusjuhendi alusel leitud maksimaalsed koormused on toodud lisa 10 ja 11 ning on lisatud võrdlusesse allolevas graafikus. Uuendatud arvutusjuhendis arvestab ava asukohta tala kõrguse suhtes, ning piirab seetõttu lubatavaid

koormuseid lihttala arvutusskeemide korral. Konsooliga arvutusskeemi korral annab uuendatud juhend aga suuremad lubatavad koormused, mis tulenevad sellest, et konsooliga arvutusskeemi korral on ava kohal olev paindemoment võrdne 0-ga, mis kaotab valemist 2.14 paindemomendiga seotud liikme. Jooniselt 4.7 on näha, et juhendid alahindavad tala kandevõimet ning on tagavara kasuks. Eriti suur erinevus on väiksemate talade korral, sest juhendid ei arvesta talade ristlõike suurust. Talaelemendid 5-8 on lühemad ja madalamad kui talaelemendid 1-4, kuid talaelementide pikkus on võrdeline tala kõrgusega (L=8H).



Joonis 4.7 Tala ristlõiget läbiva prao tekkel mõjuva koormuse võrdlus juhendite poolt lubatava koormusega protsentuaalselt

Arvutades ülaltoodu katsetulemuste ja juhenditest lähtuvad koormused, saame vastavad osavarutegurid, mis on leitud valemiga:

$$\frac{100\%}{\text{keskmine juhendi alusel saadud väärtus, \%}} = \text{osavarutegur}$$

Tabel 4.2 Osavarutegurid arvestades katselisi tulemusi ning juhendite alusel leitud lubatud koormuseid

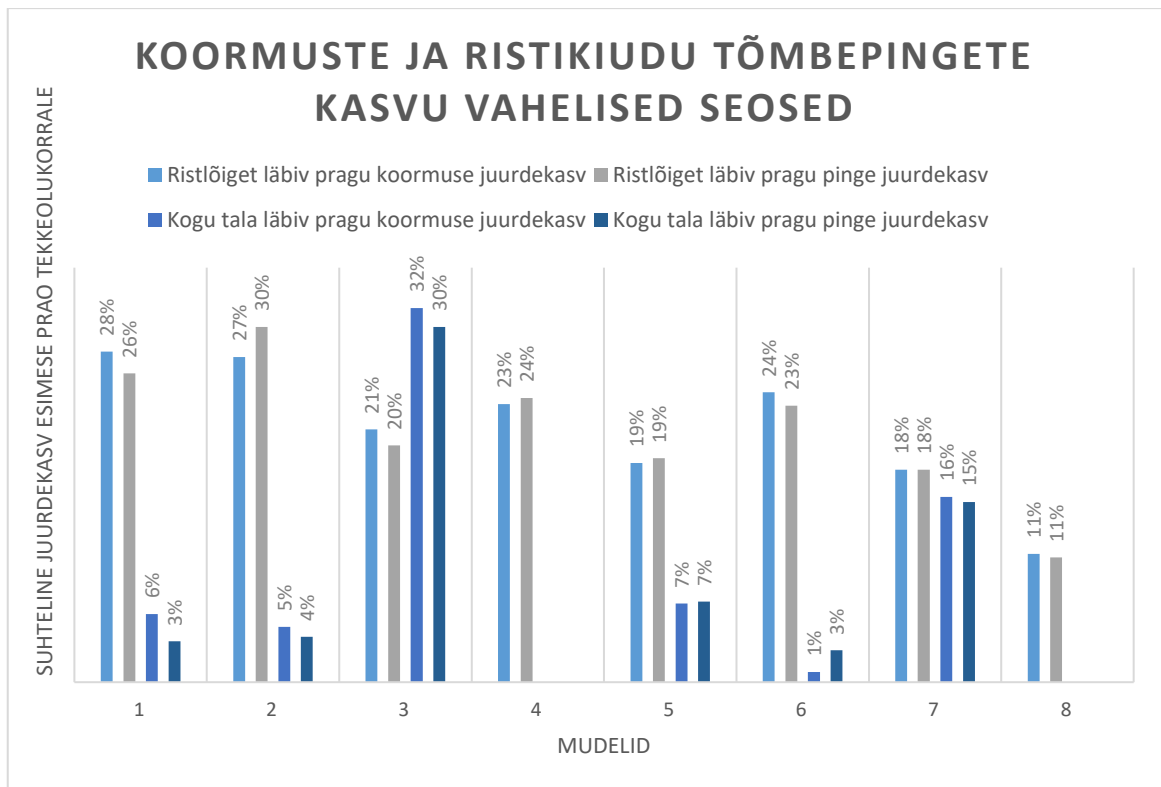
Katseliselt esimene ristlõiget läbiv pragu	Mudeli 1-4		Mudeli 5-8	
	% purustavast koormusest	osavarutegur	% purustavast koormusest	osavarutegur
Rootsi juhend	65%	1,54	43%	2,3
DIN 1052	72%	1,3	47%	2,1
2018.a Rootsi juhend	63%	1,3	48%	2,1

Tabelist 4.2 tuleb välja, et väiksemate talade korral alahindavad juhendid tala kandevõimet üle 2 korra ning näitab, et talade mõõtmeid tuleb arvutuseeskirjades täpsemalt arvesse võtta.

Varasemad uurimustööd, millele antud lõputöös viidatud on, pole arvestanud koormuse kestvusest tuleneva mõjuga, mida võetakse arvesse modifikatsiooniteguriga k_{mod} . Juhendite alusel leitud maksimaalsed koormuste leidmisel on arvestatud puidu normatiivsete tugevusomaduste alusel. Hetkelise koormamise korral, mida katsetustel tehti (Danielsson, 2008) võib modifikatsioonitegur olla ka tugevusomadust suurendav.

4.5 Koormuste kasvu seos pingete kasvuga

Eelduse kohaselt on koormuste muutumine võrdelises seoses pingete muutumisega, ehk koormuse suurenedes muutub võrdeliselt ka vastav pingeväärtus. Lõputöös on kasutatud varasemalt katsetatud talade koormustulemusi pragude tekkel ning nende alusel LEM-il põhinevas tarkvaras saadud maksimaalsete ristikiudu tõmbepingete tulemusi. Joonisel 4.8 on esitatud esimese prao tekkeolukorra suhtes koormuste suhteline juurdekasv ning koormuse tõusule vastavad pingete juurdekasvud.



Joonis 1.8 Koormuste ja pingete kasvude vahelised suhtelised seosed

Jooniselt 4.8 on näha, et peale esimese nähtava prao teket on võimalik koormust suurendada suurema ristlõikega talade korral 21...32 % ja väiksema ristlõikega talade korral 11...24 % enne kui areneb tervet ristlõiget läbiv pragu. Pinged muutuvad koormuse tõusmiselt võrdeliselt, erinedes 2...3 %. Jooniselt tuleb välja, et ava asetsemisel ristlõike kõrguse suhtes tsentris või tsentrist nihutatud ülesse toimub prao arenemine ristlõiget läbivast kogu tala läbivani väikese koormuse suhtelise lisandumise korral 1...7 %, millele vastab pingete suurenemine 3...7 %. Ava asetsemisel tala ristlõike allosas sarnast olukorda ei teki.

Üldiselt on koormuste kasv võrdelises seoses pingete kasvuga, mis oli ka eeldatav tulemus.

4.6 Võrdlus eeldusega

Eeldused avauste nurkadesse tekkivatest pingekontsentratsioonidest vastasid mudelite simulatsioonides avaldunud pingekontsentratsioonide asukohtadega. Vastasnurkadesse tekkisid samasugused ristikiudu pinged, kas tõmbepinged (vasakusse alanurka ning parempoolsesse ülanurka) või survepinged (vasakusse ülanurka ning paremasse

alanurka). Kõige väiksema koormusega tekkis talaelementidel 1-4 pragu avaga allosas, talaelementide 5-8 korral tekkis kõige varasemalt pragu juhul kui ava asus tala ülaosas.

Mudelite läbivajumid on võrreldavad elementide katseliselt saadud väärtustega, mahtudes katseliselt saadud läbivajumite vahemikku. Mudelite läbivajumid on keskmisest madalamad, mis on kirjeldatavad asjaoluga, et mudelid on idealiseeritud ning reaalse katseelementidel võivad esineda erinevad defektid, mis mõjutavad läbipaindeid. Ilma avata talamudelite läbivajumid on väiksemad kui avadega. Kõige rohkem mõjutab läbivajumeid ava paiknemine tala ülaosas.

Katsete tulemusel hakkasid praod enamasti arenema paremast ülanurgast, kus ka mudelitel tekkisid maksimaalsed pingekontsentratsioonid, mis tähendab, et katseelementide pragude tekkepõhjuseks võib peamiselt pidada ristikiudu tekkivaid tõmbepingeid. Pragude tekkimise koormustele vastavates suuremate talade mudelsimulatsioonides tekkivad pingekontsentratsioonid vastavad kirjanduses esitatud materjali maksimaalsetele tõmbepingetele. Tulemuste põhjal selgub, et ava nihutamine tala kõrguse tsentrist üles- või allapoole mõjutavad tala kandevõimet ning läbivajumeid ning ei saa üheselt välja tuua, milline neist olukordadest on kriitilisem.

Juhendite alusel leitud koormused on tagavaru kasuks ning vastavad osavarutegurid ristlõiget läbiva prao koormuse ning juhendite alusel lubataval on esitatud tabelis lk 54. Arvestades materjali normatiivset tõmbetugevust, siis prao tekkimisel on see väärtus mitmekordselt ületatud ning sellest ei saa lähtuda, et arvestada konstruktsioonelemendile lubatavad koormused. Juhendite alusel saadud lubatavad koormused on madalamad kui esimese prao teket põhjustav koormus, kuid ka selle koormuse korral on pingete kontsentreerumisel tekkivad pinged avauste nurkades ületatud. Ohutu koormuse leidmisel peaks lähtuma katselistest tulemustest ning teostama uusi mudelsimulatsioone.

Pingete kontsentratsioonid on konsoolse osaga mudelite 4 ja 8 korral erinevad lihttala arvutusskeemil olevatest (mudelid 1-3 ja 5-7). Illustreeriv joonis sellest erinevusest on toodud lk 51 ning ka graafilises osas lõputöö lisis 2-10, kus on esitatud kõikide mudelite erinevate koormuste kiududega ristikiudu tekkivad pingeaotused. Erinevused pingete jaotumisest olenevad koormuste suurusel, mõjutades seda, kui suur tõmbetsoon ava ümbrusesse tekib. Kõige suurem erinevus arvutusskeemidel avaldub läbivajumites, mis on mudelitel 4 ja 8 olles tunduvalt väiksem kui lihttala skeemidel. Põhjus selleks on lühemas sildeavas, silde keskel puuduv paindemomendis ning konsoolil olevast koormusest, mis tekitab vastupidiseid reaktsioone läbivajumit põhjustavatele.

5. KOKKUVÕTE

Puitkonstruktsioonide arvutamine on keerukas ja ajamahukas ning nõrgestatud ristlõikega liimpuittalade konstruktsioonilise osa arvutusjuhised Eurokoodeks number 5 alusel puuduvad. Avasid on vaja peamiselt tehnosüsteemide majutamiseks. Lõputöö annab ülevaate augustatud liimpuitaladest teostatud uurimustöödest ning teoreetilisest traktaadist nagu puit, arvutusjuhenditest puitkonstruktsioonidele ja teeb üldise sissejuhatuse lõplike elementide meetodisse ja selle rakendamisse. Lõputöös on lähtunud varasematest Rootsisis H. Danielsson poolt tehtud uuringutest ja katsetest, mida simuleeriti käesoleva lõputöö raames 3D mudelitena lõplike elementide meetodil põhinevas arvutusprogrammis *Dlubal RFEM*. Programmis ehitati üles 16 mudelit ning katsetati 38-t koormusolukorda.

Mudelite ning katseliselt leitud läbivajumite tulemused olid võrreldavad H. Danielssoni poolt läbi viidud katsetega, mis viitavad sellele, et arvutiprogrammilised mudelid vastasid reaalselt katsetatud puitelementidele. Lõputöö tulemusena selgus, et katseliselt tekkinud praod tekkisid aladesse, kus tekkisid kiududega ristisuunalised tõmbepinged, mis ületasid puidu normatiivsed ristikiulisi tugevusomadusi mitme kordselt. See võib olla tingitud koormuse kestusest, mida varasemates uurimustöödest leitud katsetulemuste korral ei olnud arvestatud. Täpsema põhjuse välja selgitamiseks tuleb teostada edasisi uuringuid.

Autori hinnangul täitis lõputöö oma eesmärgi, milleks oli välja selgitada kas nõrgestatud ristlõikega puittalasid saab analüüsida lõplike elementide meetodil rajaneva arvutusprogrammiga. Mudelsimulatsioonide abil saadud tulemused on võrreldavad katseliste tulemustega. LEM põhineva programmi rakendamiseks augustatud ristlõikega talade analüüsiks on vaja teha edasisi uuringuid ja katsetusi, kuid autori hinnangul on sellel potentsiaali. Töö tegemise käigus selgus, et väikesemgi viga materjali karakteristikus mõjutab saadud tulemusi, mis eeldab programmi kasutajalt materjalide ja konstruktsiooniliste elementide käitumise eelnevat põhjalikku tundmist, et hinnata kriitiliselt programmi arvutustulemusi.

Jätkuna käesolevale lõputööle tuleks välja selgitada, mis täpsemalt põhjustab arvutusjuhiste ja *Dlubal RFEM*-iga arvutatud ristikiudu tõmbepingete sellise erinevuse ning kas seda on võimalik vähendada. Kindlasti tasuks katseliselt edasi uurida tõmbepingeid, mille korral tekivad liimpuittaladesse esimesed praod. Võrdluse mitmekesistamiseks võiks tulemusi võrrelda ka teiste LEM-il põhineva arvutusprogrammi tulemustega. Lisaks sellele oleks võimalik uurida, kuidas talade

mõõtmed mõjutavad pingete jaotumist talas, et leida seletus, miks erineva ristlõike kõrgusega talade tõmbepingete väärtused varieeruvad nii suurel ulatusel samade materjaliomaduste korral.

6. SUMMARY

Calculation of wood structures can be complex and time-consuming, especially the calculations for irregular elements like beams with holes. The main standard Eurocode 5 does not include directions for calculating beams with holes. The holes in structures are needed more and more to accommodate different technical systems, for instance, ventilation pipes. This final thesis gives an overview of previous researches about glulam timber beams with holes, makes an introduction to the material wood and different regulations for calculating it and introduces the final element method and how it is used in the calculation process. Mainly this research is based on Swedish researches and tests, made by H. Danielsson which have been simulated as 3D models. To conclude, 16 models were built up and 36 different load cases were simulated.

The sag in the test report and models are relatable, which indicates that models represent the actual test elements and the results are compatible. The models showed that the cracks in the test elements appeared in regions where cross fibre tension concentrated. Furthermore, a difference can be seen in the results for bigger beams and smaller beams, and the Swedish manual nor the German manual DIN1052 do not take into account the size of the beam. Previous test results and the thesis conclusion is, that the beam size has an effect and it should be taken into account.

The author of the thesis is convinced that the research fulfilled the goals set for the work. FEA programs could potentially be used for the analysis for weakened beams. Before implementation of FEA into analysis, further tests should be done to find correlations with stresses which arise in the real beams and in the models. The modelling in FEA programme is complex and modifications of characteristic values change the outcomes. Therefore it is necessary to have knowledge in the field to critically evaluate the results.

To conclude, tensile stress caused by stress concentrations near openings could be researched further. Tensile stress values, what generate the cracks in the beams should be determined and the sizes of the beams should be considered. As a continuation of this thesis it could be researched why the cross fiber tension calculated with the manuals differs so much from the results in FEA models. To variegate the results, ohter FEA programs should be used for comparison.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. A. Klauson, J. M. P. P. U. R., 2017. *Tugevusõpetus*. 2 ed. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
2. Aicher, S. & Höfflin, L., 2006. *New Design Model for Round Holes in Glulam Beams*, Stuttgart: University of Stuttgart.
3. Architectural Record, 2015. *Building Materials Matter*. [Online] Available at: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/think-wood/building-materials-matter/> [Accessed 10 september 2020].
4. Baño, V., Arriaga, F., Guaita, M. & Soilán, A., 2010. *F.E.M. analysis of the strength loss in timber due to the presence of knots*, Uruguay: World Concerence on TImber Engineering.
5. Beer, F. P., Jr, E. R. J. & DeWolf, J. T., 2006. *Mechanics of Materials. Forth Edition in SI Units*. New York: McGraw Hill Education.
6. Blaß, H. J. & Bejtka, I., 2003. *Querzugverstärkungen in gefährdeten Bereichen mit selbstbohrenden*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
7. Carling, O., 2006. *Limträhandbok*. Stockholm: Svenskt Limträ AB.
8. Chandrupatla, T. R. & Belegundu, A. D., 2003. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. New DELhi: Patience-Hall of India.
9. Danielsson, H., 2008. *STRENGTH TESTS OG GLULAM BEAMS WITH QUADRATIC HOLES- Test report*, Lund: Lund University.
10. Danielsson, H., 2009. *THE STRENGHT OF GLULAM BEAMS WITH HOLES- A Probabilistic Fracture Mechanics Method and Experimental Tests*. Lund, Lund University.
11. Danielsson, 2006. *STRENGTH OF GLULAM BEAMS WITH HOLES – A Survey of Tests and Calculation Methods*, Lund: Lund University.
12. Danielsson, H. & Gustafsson, P. J., 2008. *Strength of Glulam Beams with Holes- Test of Quadratic Holes and Literature Test Result Compilation*. St. Andrews, Lund University.
13. Danielsson, H. & P, J. G., 2010. *A Probabilistic Fracture Mechanics Method for Strength Analysis of Glulam Beams with Holes*, Lund: Lund University.
14. David W. Green, J. E. W. D. E. K., 1999. *Mechanical Properties of Wood*. 2 ed. Madison, Wisconsin: Forest Products Laboratory.
15. Dlubal Software, Inc, 2020. <https://www.dlubal.com/>. [Online] Available at: <https://www.dlubal.com/en-US/downloads-and-information/documents/online-manuals/rfem-5/04/03> [Accessed 19 november 2020].

16. Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liit, 2016. *Puit Eesti arhitektuuris*. Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda.
17. Eesti standardikeskus, 2013. *Puitkonstruktsioonid. Lamell-liimpuit ja plankliimpuit.Nõuded*. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
18. Eesti Standardikeskus, 2015. *EUROKOODEKS 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks*, Tallinn: Eesti Standardikeskus.
19. Eesti Standardikeskus, 2015. *EVS-EN 1991-1-7:2006+NA:2009+A1:2014*. Brüssel: Euroopa standardiorganisatsioon.
20. Eesti standardikeskus, 2016. *EVS-EN 338:2016*. Brüssel: Euroopa standardiorganisatsioon.
21. G.R.Liu & S.S.Quek, 2014. *Briefing on Mechanics for Solids and Structures*. 2 ed. s.l.:Butterworth Heinemann.
22. Gauch, H. G. J., 2003. *Scientific Method in Practice*. Cambridge : Cambridge University Press.
23. Gokhale, N. S., Deshpande, S. S., Bedekar, S. V. & Thite, A. N., 2008. *Practical FInite Element Analysis*. 1 ed. Maharashtra: FInite to Infinite.
24. H. J. Blab, J. E. H. K. G. S., 2005. *Din 1052:2004-08 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. München: DGfH innovations. und Service GmbH.
25. H.J Blab, J. E. H. K. G. S., 2005. *Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. München: DGfH innovations - und Service GmbH.
26. Herzog, T. et al., 2004. *TImber Construction Manual*. Basel; Boston; Berlin: Birkhausen.
27. Holmberg, S., Persson, K. & Petersson, H., 1999. *Computers & Structures*.: 1 ed. Lund: PERGAMON.
28. J. Kováčiková, M. E. O. I. S. B., 2016. *FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TIMBER BEAMS WITH FLAWS*. Bratislava, Skellefteå, Luleå University of Technology; Slovak University of Technology.
29. Just, E. & Just, A., 2015. *PUITKONSTRUKTSIOONID*, Tallinn: ELMAR JUST, ALAR JUST.
30. Just, E.-J., Õiger, K. & Just, A., 2018. *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
31. Kapp, R., 2015. *Augustatud puittalade uurimine*, Tartu: Eesti Maaülikool.
32. Kolpakov, L., 2020. *ELAMUTE VAHELAGEDE PUITTALADE*, Tartu: TalTEch.
33. Kretchmann, D. E., 2010. *Mechanical properties of wood. Wood handbook*. Wisconsin: Forest Products Laboratory.

34. Lahe, A., 1998. *Lõplike elementide meetod*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool Mehaanikainstituut.
35. Liu, G. R. & Quek, S. S., 2013. *The Finite Element Method : A Practical Course*. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Fransisco; Singapore; Sydney; Tokyo: Elsevier Science & Technology.
36. Nordic Wood , 2001. *Nordic Glulam Handbook*. Stockholm: Nordic Wood .
37. Robam, K., 2015. *PUIDU PLASMATÖÖTLUS*, Tallinn: TTÜ.
38. Rohusaar, J. et al., 2014. *Ehituskonstruktori käsiraamat*. 4. ed. Tallinna: EHITAME kirjastus.
39. Saarman, E. & Veibri, U., 2006. *Puiduteadus*. Tartu: Eesti Metsaselts.
40. Sterling, L. S., 2009. *The Art of Agent-Oriented Modeling*. London: The MIT Press.
41. Svenskt Trä, 2018. *Limtraehandbok*. Stockholm: Svenskt Trä.
42. Tartu Ülikool, 2018. <https://eehitus.ee>. [Online] Available at: <https://eehitus.ee/wp-content/uploads/2019/04/Ehitussektori-tootlikkuse-lisandv%C3%A4%C3%A4rtuse-ja-majandusm%C3%B5ju-anal%C3%BC%C3%BCs.pdf> [Accessed 15 september 2020].
43. Theodore, G. J., 2016. *The Scientific Method as an Ongoing Process*. Riverside: University of California.
44. Toomik, P., 2014. *Augustatud puitprussist ja puitlaastplaadist liitristlõikega põrandataala arvutused*, Tartu: TTÜ.

LISAD

Lisa 1 Katseliselt leitud puidu tugevusomadused puiduliikide alusel

Tabel L1.1 Puidu katseliselt leitud tugevusomadused (David W. Green, 1999)

Table 4–3a. Strength properties of some commercially important woods grown in the United States (metric)^a—con.

Common species names	Moisture content	Specific gravity ^b	Static bending			Impact bending (mm)	Compression parallel to grain (kPa)	Compression perpendicular to grain (kPa)	Shear parallel to grain (kPa)	Tension perpendicular to grain (kPa)	Side hardness (N)
			Modulus of rupture (kPa)	Modulus of elasticity ^c (MPa)	Work to maximum load (kJ/m ³)						
Pine—con.											
Pond	Green	0.51	51,000	8,800	52	—	25,200	3,000	6,500	—	—
	12%	0.56	80,000	12,100	59	—	52,000	6,300	9,500	—	—
Ponderosa	Green	0.38	35,000	6,900	36	530	16,900	1,900	4,800	2,100	1,400
	12%	0.40	65,000	8,900	49	480	36,700	4,000	7,800	2,900	2,000
Red	Green	0.41	40,000	8,800	42	660	18,800	1,800	4,800	2,100	1,500
	12%	0.46	76,000	11,200	68	660	41,900	4,100	8,400	3,200	2,500
Sand	Green	0.46	52,000	7,000	66	—	23,700	3,100	7,900	—	—
	12%	0.48	80,000	9,700	66	—	47,700	5,800	—	—	—
Shortleaf	Green	0.47	51,000	9,600	57	760	24,300	2,400	6,300	2,200	2,000
	12%	0.51	90,000	12,100	76	840	50,100	5,700	9,600	3,200	3,100
Slash	Green	0.54	60,000	10,500	66	—	26,300	3,700	6,600	—	—
	12%	0.59	112,000	13,700	91	—	56,100	7,000	11,600	—	—
Spruce	Green	0.41	41,000	6,900	—	—	19,600	1,900	6,200	—	2,000
	12%	0.44	72,000	8,500	—	—	39,000	5,000	10,300	—	2,900
Sugar	Green	0.34	34,000	7,100	37	430	17,000	1,400	5,000	1,900	1,200
	12%	0.36	57,000	8,200	38	460	30,800	3,400	7,800	2,400	1,700
Virginia	Green	0.45	50,000	8,400	75	860	23,600	2,700	6,100	2,800	2,400
	12%	0.48	90,000	10,500	94	810	46,300	6,300	9,300	2,600	3,300
Western white	Green	0.36	32,000	8,200	34	480	16,800	1,300	4,700	1,800	1,200
	12%	0.38	67,000	10,100	61	580	34,700	3,200	7,200	—	1,900
Redwood											
Old-growth	Green	0.38	52,000	8,100	51	530	29,000	2,900	5,500	1,800	1,800
	12%	0.40	69,000	9,200	48	480	42,400	4,800	6,500	1,700	2,100
Young-growth	Green	0.34	41,000	6,600	39	410	21,400	1,900	6,100	2,100	1,600
	12%	0.35	54,000	7,600	36	380	36,000	3,600	7,600	1,700	1,900
Spruce											
Black	Green	0.38	42,000	9,500	51	610	19,600	1,700	5,100	700	1,600
	12%	0.46	74,000	11,100	72	580	41,100	3,800	8,500	—	2,300
Engelmann	Green	0.33	32,000	7,100	35	410	15,000	1,400	4,400	1,700	1,150
	12%	0.35	64,000	8,900	44	460	30,900	2,800	8,300	2,400	1,750
Red	Green	0.37	41,000	9,200	48	460	18,800	1,800	5,200	1,500	1,600
	12%	0.40	74,000	11,100	58	640	38,200	3,800	8,900	2,400	2,200
Sitka	Green	0.33	34,000	7,900	43	610	16,200	1,400	4,400	1,700	1,600
	12%	0.36	65,000	9,900	65	640	35,700	3,000	6,700	2,600	2,300
White	Green	0.37	39,000	7,400	41	560	17,700	1,700	4,800	1,500	1,400
	12%	0.40	68,000	9,200	53	510	37,700	3,200	7,400	2,500	2,100
Tamarack	Green	0.49	50,000	8,500	50	710	24,000	2,700	5,900	1,800	1,700
	12%	0.53	80,000	11,300	49	580	49,400	5,500	8,800	2,800	2,600

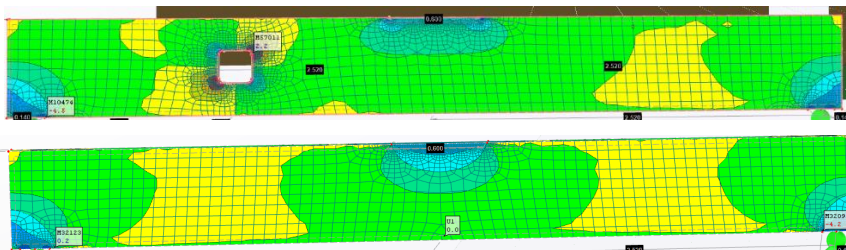
^aResults of tests on small clear specimens in the green and air-dried conditions, converted to metric units directly from Table 4–3b. Definition of properties: impact bending is height of drop that causes complete failure, using 0.71-kg (50-lb) hammer; compression parallel to grain is also called maximum crushing strength; compression perpendicular to grain is fiber stress at proportional limit; shear is maximum shearing strength; tension is maximum tensile strength; and side hardness is hardness measured when load is perpendicular to grain.

^bSpecific gravity is based on weight when oven-dry and volume when green or at 12% moisture content.

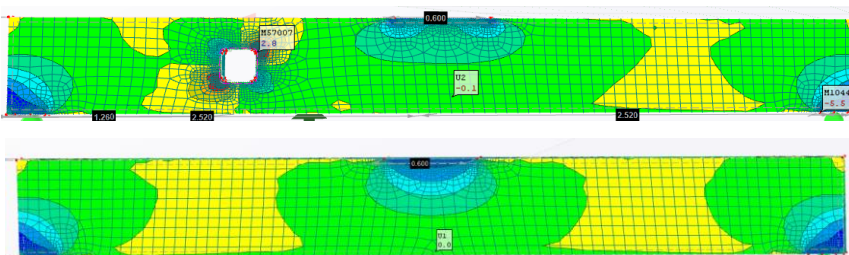
^cModulus of elasticity measured from a simply supported, center-loaded beam, on a span depth ratio of 14/1. To correct for shear deflection, the modulus can be increased by 10%.

^dCoast Douglas-fir is defined as Douglas-fir growing in Oregon and Washington State west of the Cascade Mountains summit. Interior West includes California and all counties in Oregon and Washington east of, but adjacent to, the Cascade summit; Interior North, the remainder of Oregon and Washington plus Idaho, Montana, and Wyoming; and Interior South, Utah, Colorado, Arizona, and New Mexico.

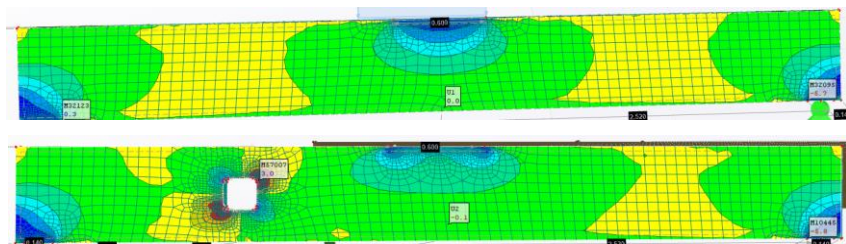
Lisa 2 Mudeli 1 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



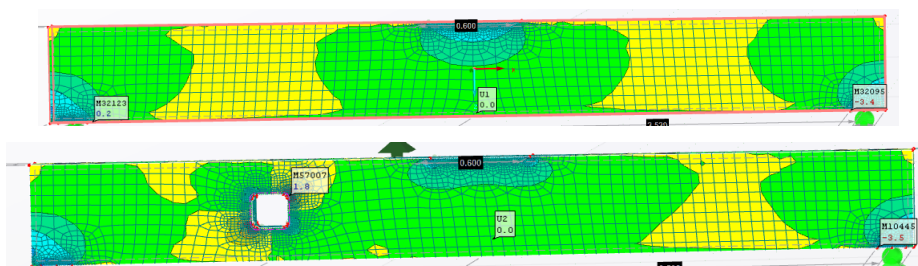
L 2.1. Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



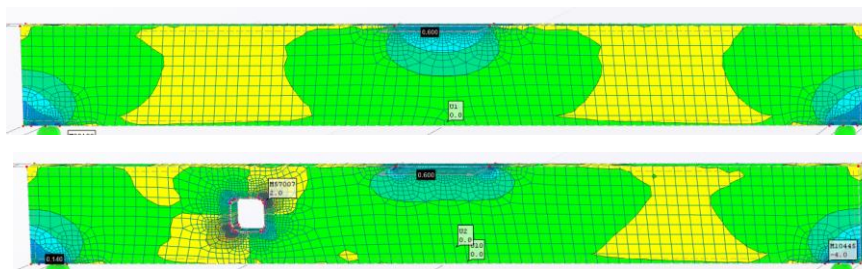
L 2.2. Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 2.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

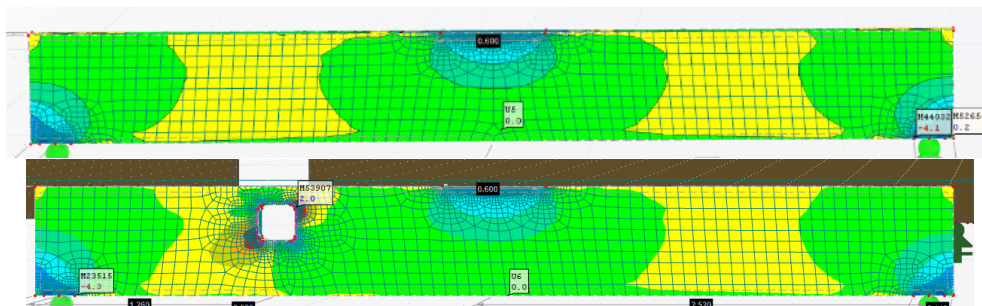


L 2.4. Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

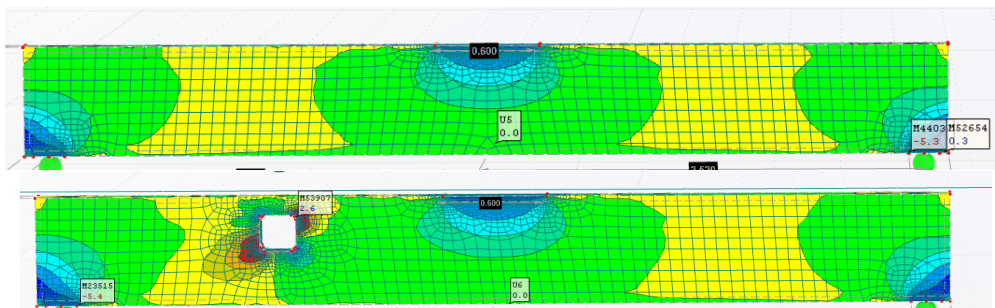


L 2.5. Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

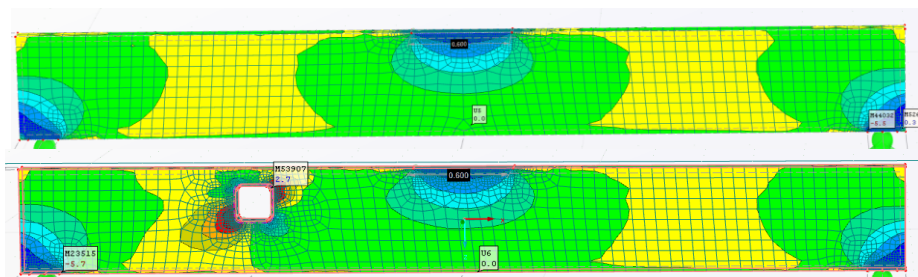
Lisa 3 Mudeli 2 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



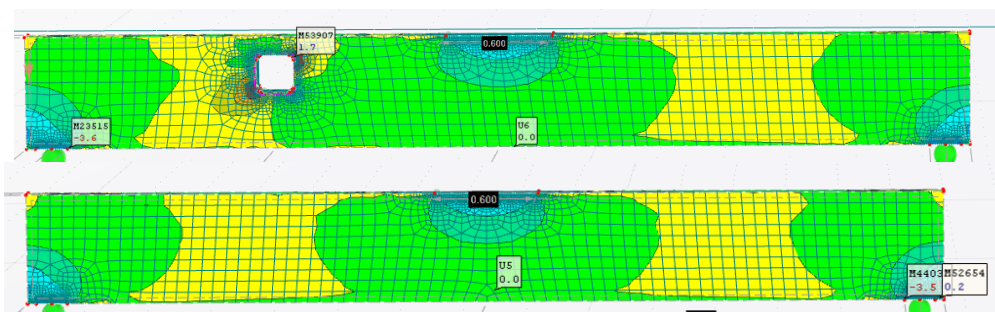
L 3.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentrist ülevalpool ja ilma avata ristlõike korral



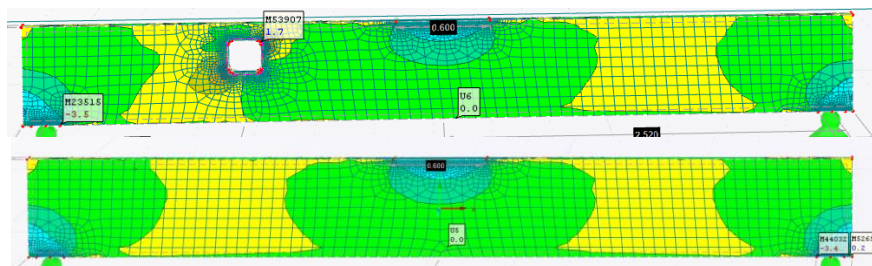
L 3.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 3.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

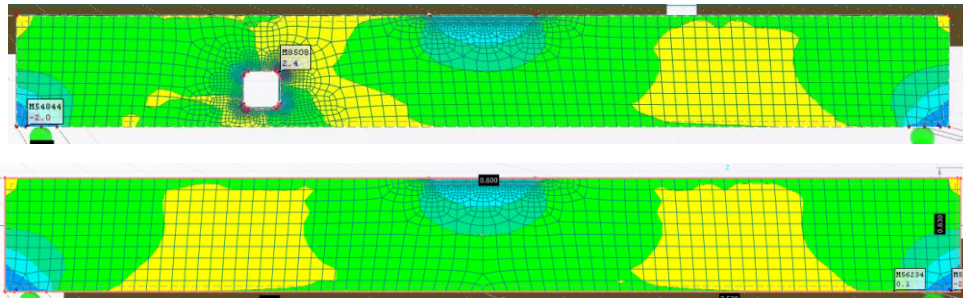


L 3.4 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

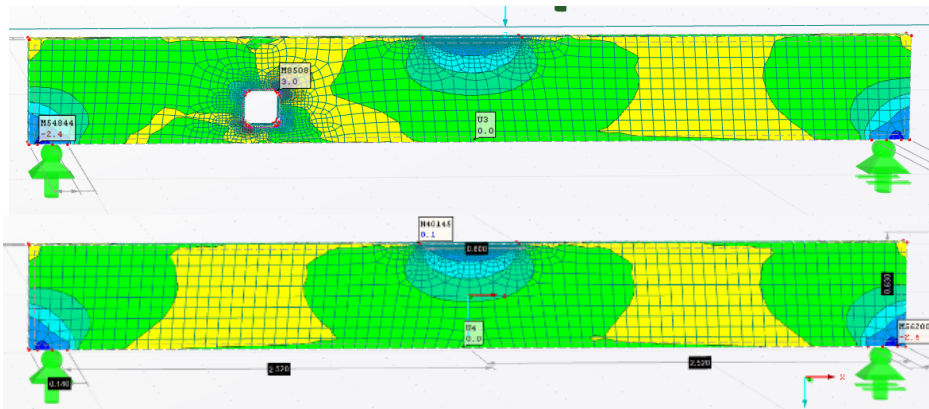


L3.5 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

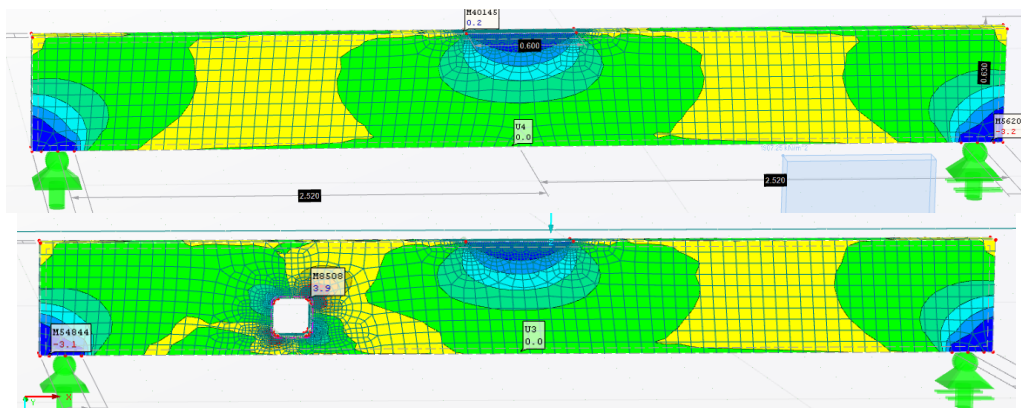
Lisa 4 Mudeli 3 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



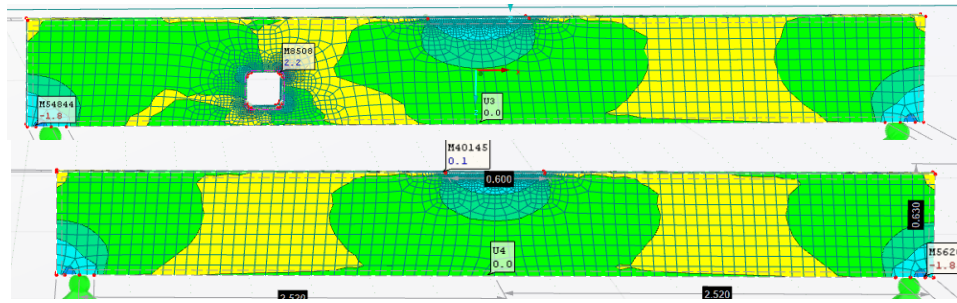
L 4.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris allpool ja ilma avata ristlõike korral



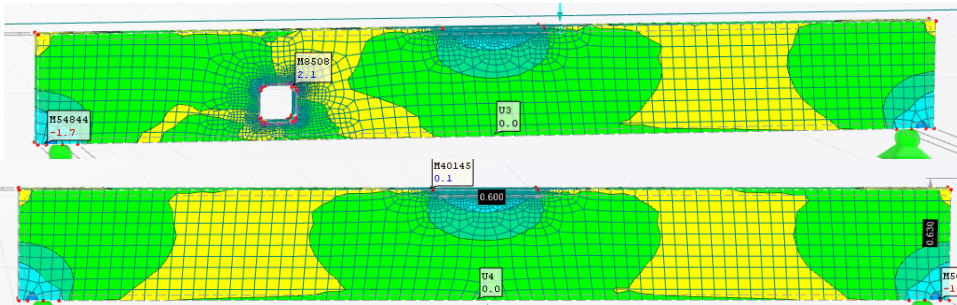
L 4.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 4.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

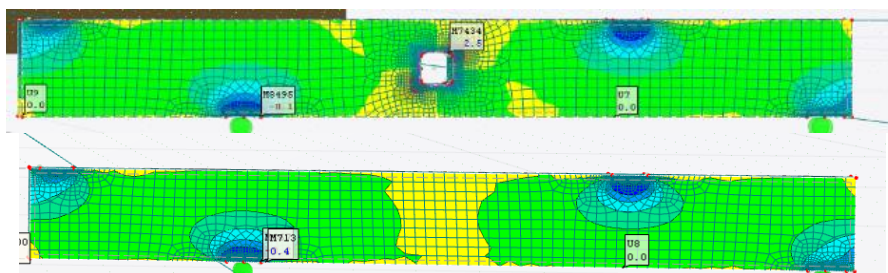


L 4.4 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

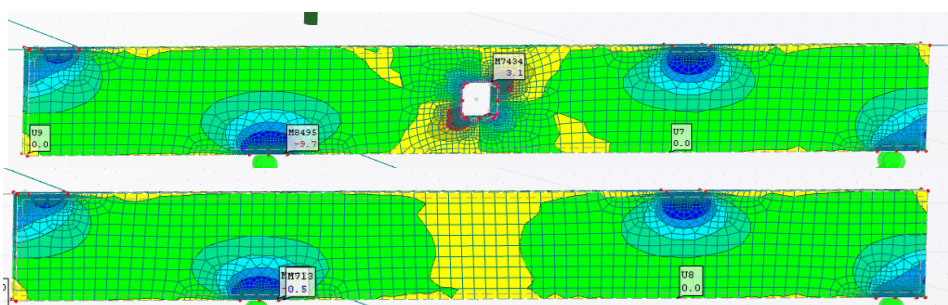


L 4.5 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

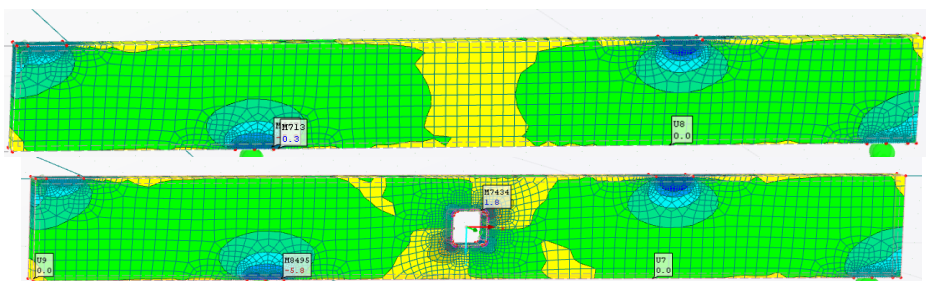
Lisa 5 Mudeli 4 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



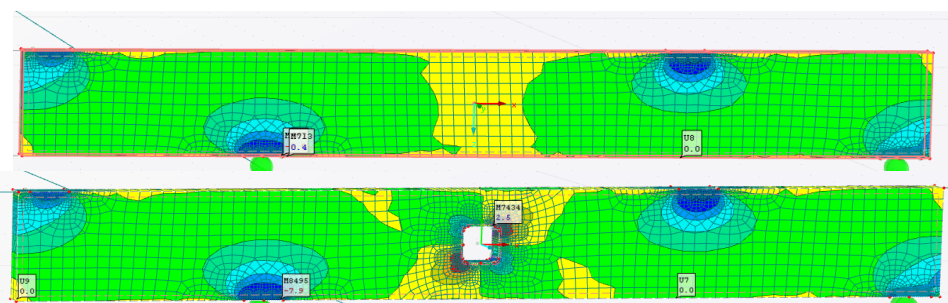
L 5.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 5.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

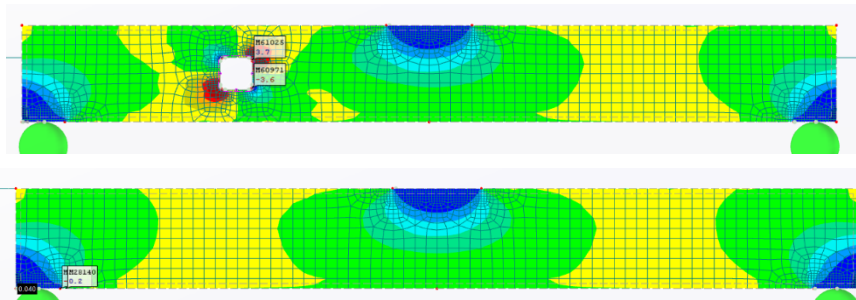


L 5.3 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

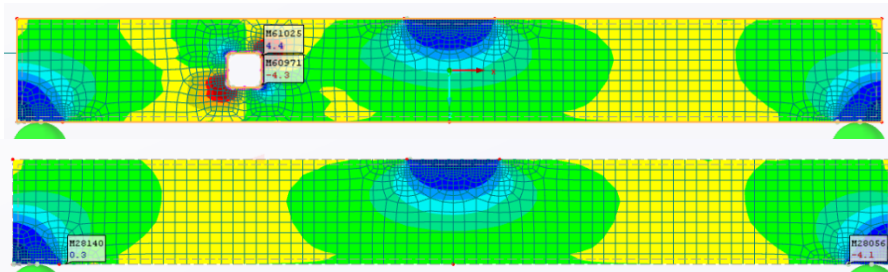


L 5.4 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

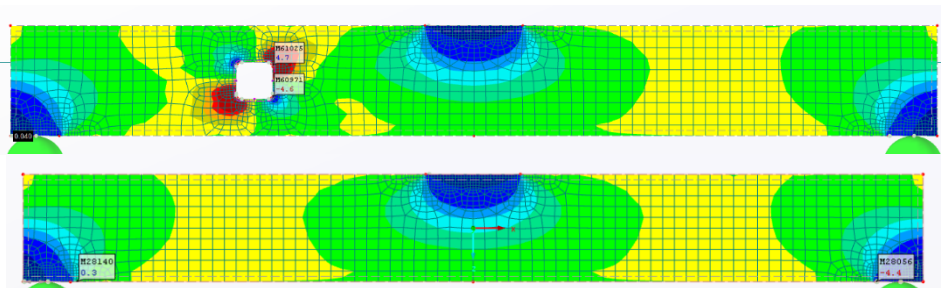
Lisa 6 Mudeli 5 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



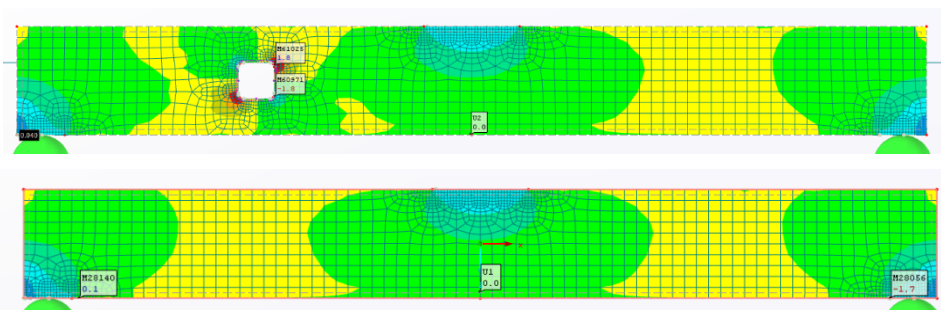
L 6.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



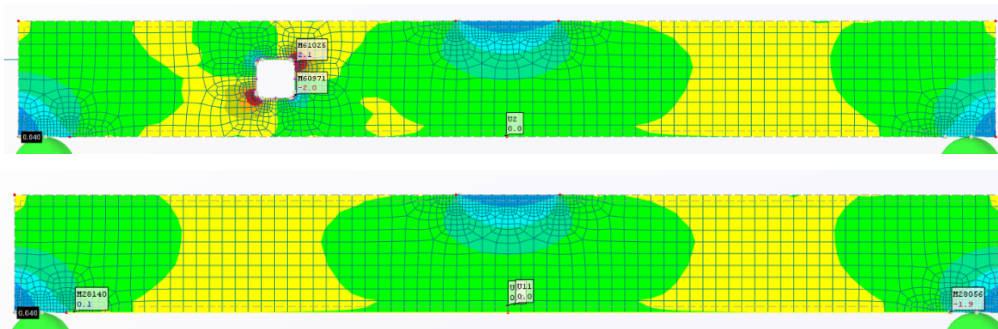
L 6.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 6.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

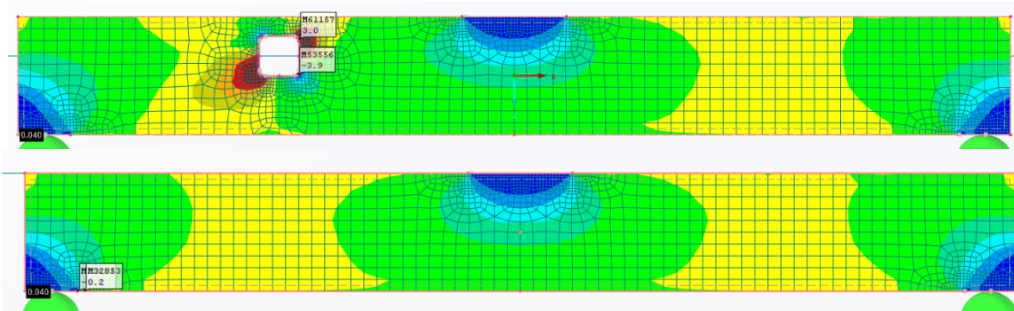


L 6.4 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

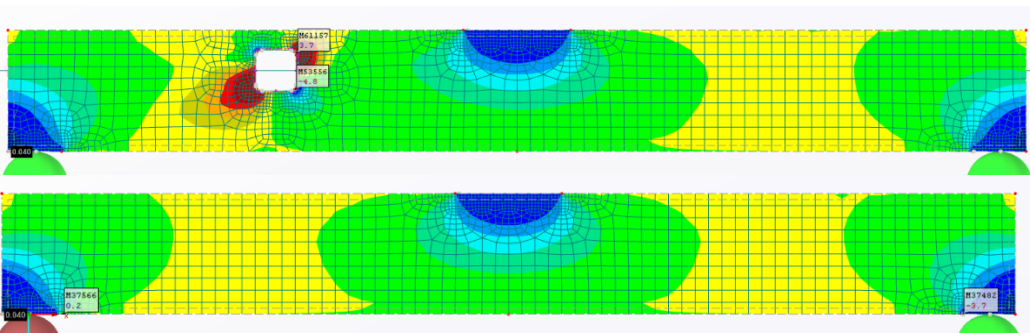


L 6.5 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

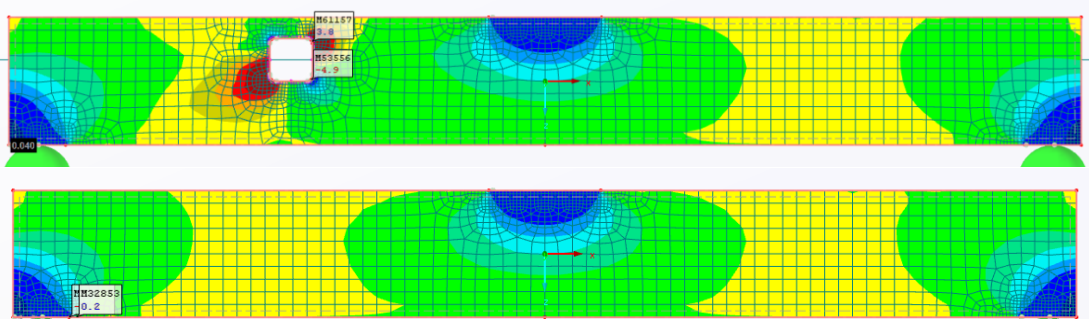
Lisa 7 Mudeli 6 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



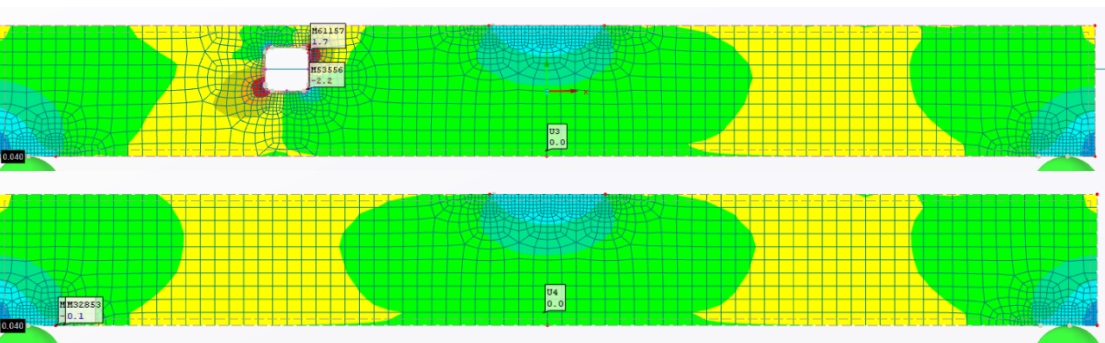
L 7.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



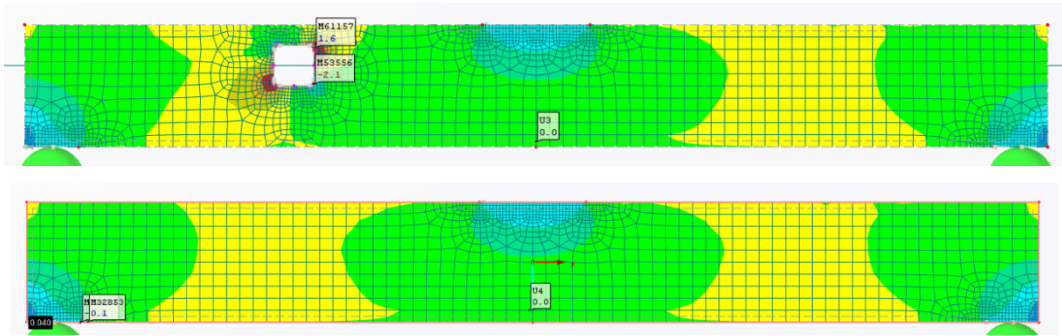
L 7.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 7.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

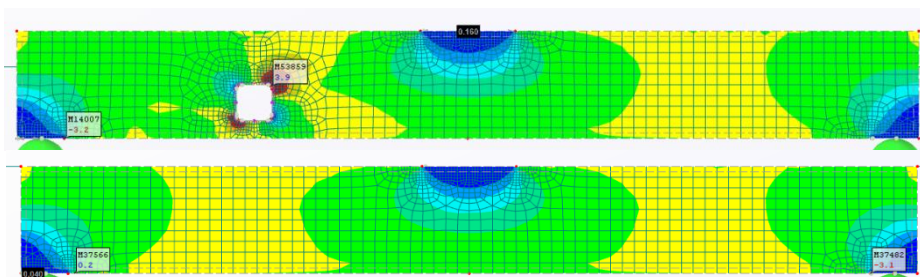


L 7.4 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

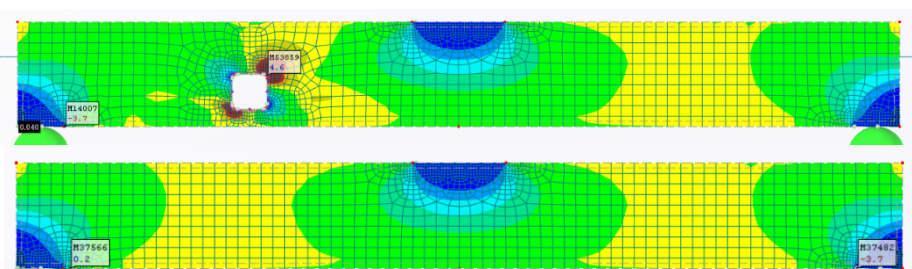


L 7.5 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

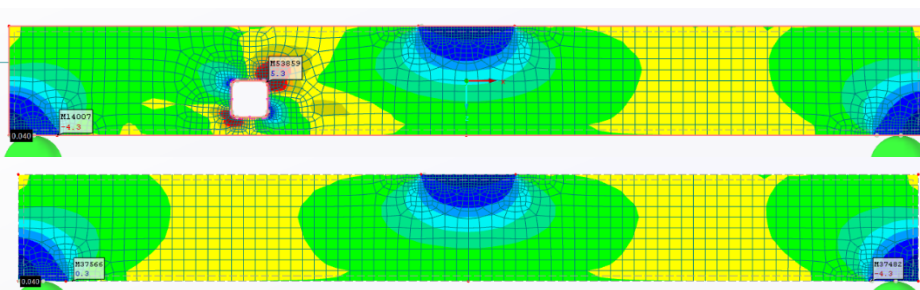
Lisa 8 Mudeli 7 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



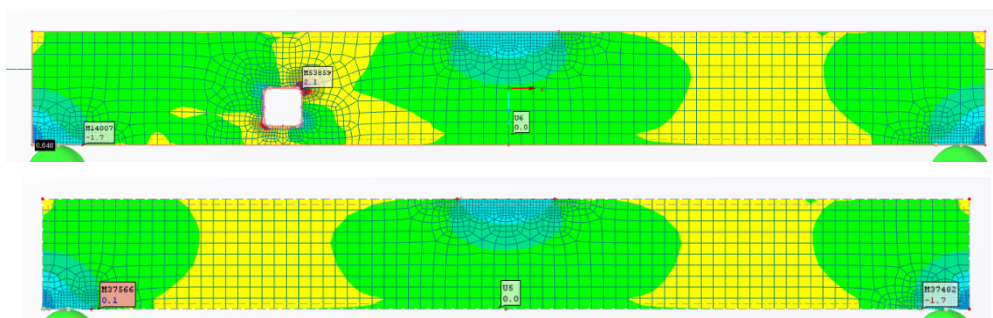
L 8.1 Esimese prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



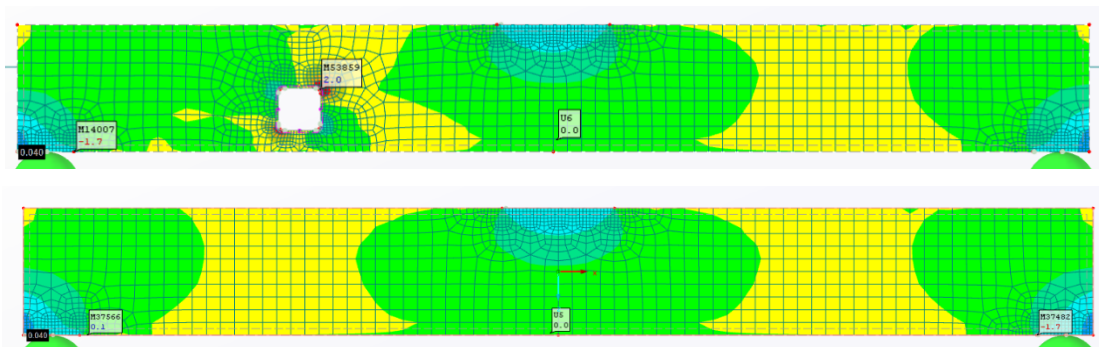
L 8.2 Esimese läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 8.3 Esimese tala läbiva prao tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

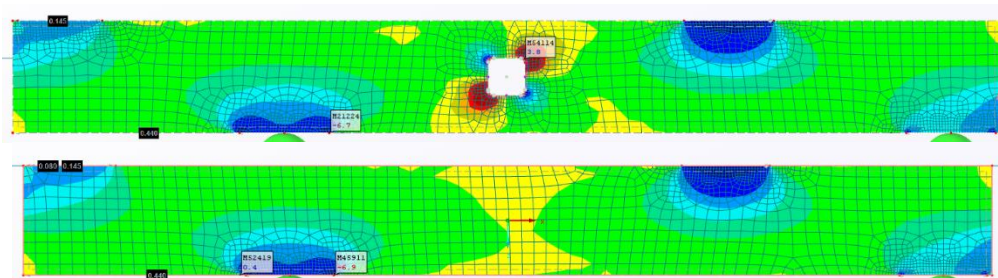


L 8.4 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

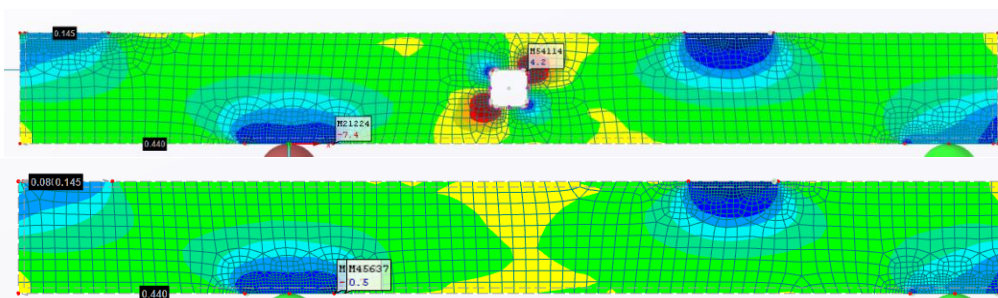


L 8.5 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

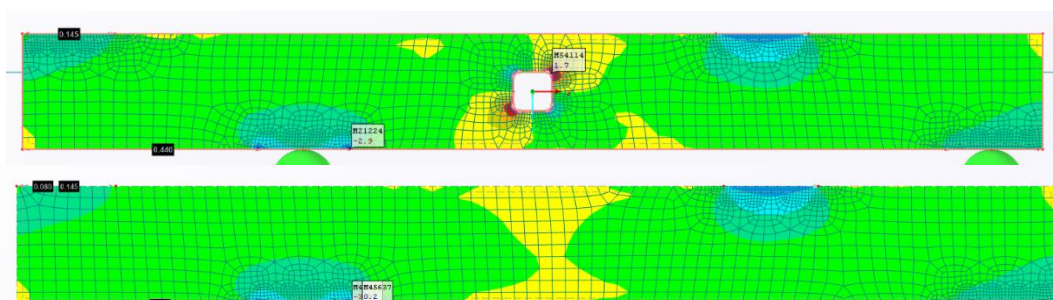
Lisa 9 Mudeli 8 tulemused programmis *Dlubal RFEM*



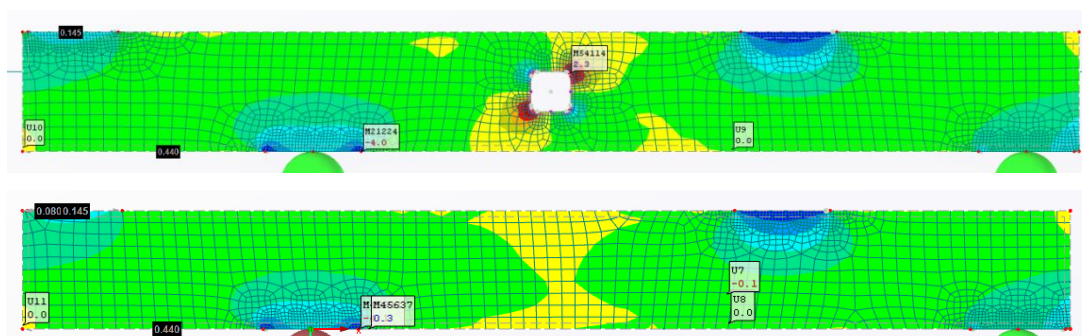
L 9.1 Esimese praio tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 9.2 Esimese läbiva praio tekke koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 9.3 Rootsi juhendi lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral



L 9.4 Saksa juhendi alusel lubatav koormusolukord avaga tsentris ja ilma avata ristlõike korral

Lisa 10 Maksimaalse koormuse arvutus Rootsi 2018.a näite alusel, talad 1-4

1. Ava asub tala kõrguse tsentris

$$l_{t,90} = 0,5(210 + 630) = 420\text{mm}$$

$$b = 115\text{mm}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{630} \right)^{0,5} = 0,85 \right. \quad \longrightarrow \quad \left. 0,85 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5\text{N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 2HP = 2 \cdot 0,63 \cdot P = 1,26P$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 210}{4 \cdot 630} \left(3 - \frac{210^2}{630^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0,008 \frac{1,26P}{0,210} = 0,048P$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P + 0,048P = 0,289P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 420 \cdot 115 \cdot 0,85 \cdot 0,5 = 10\,263,8\text{N}$$

$$\underline{P = 35,5\text{ kN}}$$

2. Tsentrist nihutatud ava korral

$$l_{t,90} = 0,5(210 + 630) = 420\text{mm}$$

$$b = 115\text{mm}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{630} \right)^{0,5} = 0,85 \right. \quad \longrightarrow \quad \left. 0,85 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5\text{N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 2HP = 2 \cdot 0,63 \cdot P = 1,26P$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 210}{4 \cdot 630} \left(3 - \frac{210^2}{630^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0,008 \frac{1,26P}{0,105} = 0,096P$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P + 0,096P = 0,337P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 420 \cdot 115 \cdot 0,85 \cdot 0,5 = 10\,263,8N$$

$$\underline{P = 30,5 \text{ kN}}$$

3. Konsooliga tala korral

$$l_{t,90} = 0,5(210 + 630) = 420mm$$

$$b = 115mm$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{630} \right)^{0,5} = 0,85 \right. \quad \left. 0,85 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 0$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 210}{4 \cdot 630} \left(3 - \frac{210^2}{630^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 420 \cdot 115 \cdot 0,85 \cdot 0,5 = 10\,263,8N$$

$$\underline{P = 42,588 \text{ kN}}$$

Lisa 11 Maksimaalse koormuse arvutus Rootsi 2018.a näite alusel, talad 5-8

1. Kui ava asub tala kõrguse tsentris

$$l_{t,90} = 0,5(60 + 180) = 120\text{mm}$$

$$b = 115\text{mm}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{180} \right)^{0,5} = 1,6 \right. \quad \left. 1,0 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5\text{N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 2HP = 2 \cdot 0,18 \cdot P = 0,36P$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 60}{4 \cdot 180} \left(3 - \frac{60^2}{180^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0,008 \frac{0,36P}{0,060} = 0,048P$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P + 0,048P = 0,289P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 120 \cdot 115 \cdot 1,0 \cdot 0,5 = 3450 \text{ N}$$

$$\underline{P = 11,94 \text{ kN}}$$

2. Kui ava asub tsentrist nihutatult

$$l_{t,90} = 0,5(60 + 180) = 120\text{mm}$$

$$b = 115\text{mm}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{180} \right)^{0,5} = 1,6 \right. \quad \left. 1,0 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5\text{N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 2HP = 2 \cdot 0,18 \cdot P = 0,36P$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 60}{4 \cdot 180} \left(3 - \frac{60^2}{180^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0,008 \frac{0,36P}{0,030} = 0,096P$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P + 0,096P = 0,337P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 120 \cdot 115 \cdot 1,0 \cdot 0,5 = 3450 \text{ N}$$

$$\underline{P = 10,24 \text{ kN}}$$

3. Konsoolse otsaga tala

$$l_{t,90} = 0,5(60 + 180) = 120\text{mm}$$

$$b = 115\text{mm}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{180} \right)^{0,5} = 1,6 \right. \quad \left. 1,0 \right.$$

$$f_{t,90,d} = 0,5\text{N/mm}^2$$

$$F_{t,90} = F_{t,90,V} + F_{t,90,M} = \frac{Vh_d}{4h} \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \frac{M}{h_r}$$

$$V = P$$

$$M = 0$$

$$F_{t,90,V} = \frac{P \cdot 60}{4 \cdot 180} \left(3 - \frac{60^2}{180^2} \right) = 0,241P$$

$$F_{t,90,M} = 0$$

$$\underline{F_{t,90} = 0,241P}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot l_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} f_{t,90,d}$$

$$F_{t,90} = 0,5 \cdot 120 \cdot 115 \cdot 1,0 \cdot 0,5 = 3450 \text{ N}$$

$$\underline{P = 14,32 \text{ kN}}$$

Lisa 12 Katselised tulemused (Danielsson, 2008)

	V_{c0} [kN]			V_c [kN]			V_f [kN]	
	V_{c0B}	V_{c0T}	min	V_{cB}	V_{cT}	min		
AMh	1			47.6	45.7	45.7	52.1	
	2	47.5	47.5	47.5	71.4	64.4	64.4	71.4
	3		42.0	42.0	58.4	58.4	58.4	58.4
	4				60.5	60.5	60.5	60.5
	mean (std)			44.8 (3.9)			57.3 (8.1)	60.6 (8.0)
AMc	1	61.0		61.0	64.3	64.3	64.3	64.3
	2	48.0	44.4	44.4	49.7	51.3	49.7	63.6
	3	45.0	40.0	40.0	51.2	51.2	51.2	52.8
	4				49.1	47.7	47.7	54.4
	mean (std)			48.5 (11.1)			53.2 (7.5)	58.8 (6.0)
AUh	1		28.6	28.6	59.2	57.6	57.6	59.2
	2				51.6	59.0	51.6	60.5
	3		55.1	55.1	56.2	56.2	56.2	56.2
	4	47.5	54.6	47.5	57.4	57.4	57.4	57.4
	mean (std)			43.7 (13.6)			55.7 (2.8)	58.3 (1.9)
ALh	1	50.2	41.5	41.5	53.9	50.2	50.2	58.9
	2		43.7	43.7	54.5	52.1	52.1	69.6
	3		40.0	40.0	64.8	53.2	53.2	64.8
	4		39.5	39.5	57.0	44.6	44.6	69.8
	mean (std)			41.2 (1.9)			50.0 (3.8)	65.8 (5.1)
BMh	1		51.9	51.9	61.3	61.3	61.3	-
	2	59.4	49.0	49.0	65.7	65.7	65.7	-
	3	61.4	56.0	56.0	62.1	62.1	62.1	-
	4	48.5		48.5	59.7	68.7	59.7	-
	mean (std)			51.4 (3.4)			62.2 (2.5)	-
CMh	1	20.6	20.6	20.6	27.3	27.3	27.3	27.3
	2	24.1	23.3	23.3	24.9	24.9	24.9	29.5
	3	23.1	17.9	17.9	24.4	23.1	23.1	25.3
	4	24.4	24.4	24.4	27.0	27.0	27.0	27.0
	mean (std)			21.6 (2.9)			25.6 (2.0)	27.3 (1.7)
CUh	1	24.0	18.8	18.8	25.3	25.3	25.3	25.3
	2		19.0	19.0	23.2	22.5	22.5	25.3
	3	20.5	20.5	20.5	23.3	23.3	23.3	23.3
	4	16.7	16.7	16.7	22.3	22.3	22.3	22.3
	mean (std)			18.8 (1.6)			23.4 (1.4)	23.6 (2.2)
CLh	1		17.5	17.5	23.1	22.3	22.3	26.9
	2	19.2	19.2	19.2	23.7	23.7	23.7	29.5
	3	21.8	23.4	21.8	24.3	24.3	24.3	25.5
	4				21.8	21.8	21.8	24.5
	mean (std)			19.5 (2.2)			23.0 (1.2)	26.6 (2.2)
DMh	1	26.0	26.0	26.0	29.1	29.1	29.1	-
	2				25.3	25.3	25.3	-
	3	23.3		23.3	25.3	25.3	25.3	-
	4	25.4	22.6	22.6	26.7	28.1	26.7	-
	mean (std)			24.0 (1.8)			26.6 (1.8)	-

Lisa 12.1 Katseliste tulemuste koondtabel (Danielsson, 2008)