



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

TTÜ ehituse ja arhitektuuri instituut

PERFOREERITUD SEINAGA KÜLMPAINUTATUD
PROFIILIST PÕIKSUUNAS TOETATUD TALADE
KÄITUMINE

BEHAVIOUR OF LATERALLY RESTRAINED COLD-FORMED BEAMS WITH
PERFORATED WEBS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Ingrid Lepik /nimi/
Üliõpilaskood:	144576EAEI
Juhendaja:	Ivar Talvik, dotsent /nimi, amet/

Tallinn 2019

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.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ingrid Lepik, 144576EAEI (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EAEI02/09 – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Dotsent, Ivar Talvik, 620 2410 (amet, nimi, telefon)
Konsultandid:(nimi, amet)
.....(ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

Perforeeritud seinaga külmpainutatud profiilist põiksuunas toetatud talade käitumine
Behaviour of laterally restrained cold-formed beams with perforated webs

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida perforeeritud seinaga külmpainutatud profiilidele sobilik standardikohane arvutus.
2. Katsetada külmpainutatud profiili ning võrrelda katsetulemusi arvutuslike tulemustega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Uuritava teemaga seotud teadustööde analüüsimine ja materjalide kogumine	15.03.19
2.	Arvutuslike parameetrite määramine	19.04.19
3.	Katsekonstruktsiooni projekteerimine ja katsetamine	17.05.19

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: “.....”201...a

Üliõpilane: “.....”201...a
/allkiri/

Juhendaja: “.....”201...a
/allkiri/

Konsultant: “.....”201...a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÖNA.....	7
SISSEJUHATUS	8
1. ÜLDISELT KÜLMPAINUTATUD PROFIILIDEST	11
1.1 Käitumine	11
1.2 Kasutamine.....	12
2. TEOREETILINE ANALÜÜS	14
2.1 Sissejuhatus.....	14
2.2 Esimene arvutuskäik.....	15
2.3 Teine arvutuskäik	19
2.3.1 Täisseinalise profiili arvutus	25
2.3.2 RFEM mudeldamine	26
2.4 Kahe arvutusviisi võrdlus.....	30
2.5 Täisseinalise ja perforeeritud seinaga profiili arvutuslik võrdlus	31
3. KATSELINE ANALÜÜS.....	32
3.1 Eesmärgid ja ulatus	32
3.2 Katsetulemuste prognoos	32
3.3 Katsekehade spetsifikatsioon.....	34
3.4 Koormuste spetsifikatsioon.....	35
3.4.1 Katsekeha	36
3.5 Katsekorraldus.....	36
3.6 Mõõtmised	43
4. KATSETULEMUSTE ARUANNE.....	47
4.1 Katsekeha ebatäiused enne katsetamist.....	47
4.2 Profiili töötamine katsel	47
4.2.1 Katsekeha töötamine	48
4.2.2 Kandevõime kaotus	51
4.2.3 Pärast koormuse eemaldamist.....	54
4.2.4 Muudatused järgnevatele katsetele	55
4.3 Katseandmete analüüs.....	55
4.3.1 Siirde-jõu graafikute analüüs	55
4.3.2 Arvutusliku koormuse määramine	58
4.3.3 Arvutuskäik arvutusliku koormuse määramiseks.....	59
5. JÄRELDUSED TEOREETILISEST JA KATSELISEST ANALÜÜSIST	61
KOKKUVÕTE	63

SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	67
LISAD	69
LISA 1. ESIMENE ARVUTUSKÄIK	70
L1.1 Ristlõike parameetrid	70
L1.1.1 Paksus ja paksustolerantsid	70
L1.1.2 Nurkade ümarduste mõju	70
L1.1.3 Geomeetrilised proportsioonid	71
L1.2 Jäigastamata tasapinnalised elemendid	72
L1.2.1 Netoristlõike parameetrid	72
L1.2.2 Ristlõike töötamine painde olukorras tugevama tasapinna suhtes	74
L1.3 Efektiivristlõike ristlõike parameetrid	82
LISA 2. TEINE ARVUTUSKÄIK	84
L2.1 Ristlõike parameetrid	84
L2.1.1 Paksus ja paksustolerantsid	84
L2.1.2 Nurkade ümarduste mõju	85
L2.1.3 Geomeetrilised proportsioonid	85
L2.2 Ristlõike pindala ja raskuskeskme asukoht	87
L2.3 Ristlõike efektiivpindala painde olukorras tugevama tasapinna suhtes	88
L2.3.1 Ülemise flantsi efektiivpindala	90
L2.3.2 Jäikuri efektiivne laius	91
L2.3.3 Ülemise flantsi jäikuri poolse efektiivse ristlõike osa ja jäikuri efektiivse ristlõike osa raskuskeskme leidmine	92
L2.4 Flantsi deformatsioon	92
L2.5 Seinä ülemise osa efektiivpindala	97
L2.6 Perforeeritud osa täpsustatud efektiivne laius	99
L2.7 Seinä ülemise osa täpsustatud efektiivne laius	100
L2.8 Lõplikud tulemused	101
LISA 3. TEINE ARVUTUSKÄIK – TÄISSEINALINE PROFIIIL	102
L3.1 Ristlõike parameetrid	102
L3.1.1 Paksus ja paksustolerantsid	102
L3.1.2 Nurkade ümarduste mõju	102
L3.1.3 Geomeetrilised proportsioonid	103
L3.2 Ristlõike pindala ja raskuskeskme asukoht	104
L3.3 Ristlõike efektiivpindala painde olukorras tugevama tasapinna suhtes	105
L3.3.1 Ülemise flantsi efektiivpindala	106

L3.3.2 Jäikuri efektiivne laius.....	107
L3.3.3 Ülemise flantsi jäikuri poolse efektiivse ristlõike osa ja jäikuri efektiivse ristlõike osa raskuskeskme leidmine	108
L3.4 Flantsi deformatsioon.....	108
L3.5 Seinade efektiivpindala.....	112
L3.6 Lõplikud tulemused	114

EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati lõputöö koostaja algatusel, mis lähtus Tema isiklikust huvist ning igapäevasesest kokkupuutest perforeeritud seinaga külmpainutatud profiilidega. Lõputööks vajalikud andmed koguti lõputöö koostajaga seotud perforeeritud seinaga külmpainutatud profiilidega tegeleva ettevõtte abiga.

Lõputöö käsitleb endas külmpainutatud perforeeritud seinaga C-profiili arvutuslikku ja katselist analüüsi, mille eesmärgiks on määrata uuritava profiili vastupanumoment. Uurimistöös on aluseks võetud standard EN 1993-1-3, mis käsitleb üld- ja lisareegleid külmvormitud profiilidele, kuid milles puuduvad eeskirjad perforeringu arvestamiseks. Perforeeringu arvestamisel on lähtutud varasemates uurimistöödest. Arvutuslikus analüüsis vaadeldakse kahte erinevat arvutusviisi, mis mõlemad toetuvad mingil määral standardile EN 1993-1-3. Katseline analüüs on sooritatud eesmärgil, et kontrollida arvutuslikult saadud tulemuste õigsust. Tööga on võimalik välja selgitada sobilikum standardipõhine arvutusviis külmpainutatud perforeeritud seinaga profiilidele.

Sooviksin tänu avaldada vastutulelikusse eest lõputöö koostamisega seotud olnud ettevõttele.

SISSEJUHATUS

Külm-painutatud profiilid on toodetud õhukesest teraslehest külmaltsimise või painutamise teel. Õhukene teraseleht muudab valmistatava profiili küllaltki kergeks ja see läbi ökonoomseks.

Külm-vormitud profiilid on kasutuses ehituses erinevates valdkondades. Erineva kujuga külm-vormitud profiile on võimalik kasutada hoone kandevkarkassi valmistamiseks, mittekanadvate siseseinte rajamiseks, välisfassaadi ehitamiseks ning paljudes muudes valdkondades. Antud uurimistöös on vaadeldud välisfassaadi valmistamiseks kasutatavaid külm-vormitud profiile. Välisfassaadi moodustamiseks koostatakse külm-painutatud profiilidest villaga täidetud paneelid, mis on siseküljest viimistletud silepleki ja kipsiga ning väljastpoolt kaitstud tuuletõkke, kübarroovi ja välispinna viimistlusmaterjaliga, milleks võivad olla näiteks kivi- või komposiitplaadid.

Välisfassaadi üheks oluliseks aspektiks on selle soojapidavus, kuid terasest valmistatud külm-vormitud profiil on suureks külmasillaks, mistõttu kasutatakse külmasilla vähendamiseks perforatsioonid avasid seinas. Perforeeritud avad seinas pikendavad soojuse liikumisteed, mis omakorda muudab profiili soojapidavamaks. Lisaks perforatsioonid avade positiivsele mõjule paneeli soojapidavuse suurendamisel on perforatsioonid seinas ka negatiivne aspekt. Külm-vormitud profiili perforatsioonid sein vähendab profiili paindejäikust ning sellega ka profiili tugevust. Külm-vormitud profiilide puhul on tegemist enamasti 4-nda ristlõikeklassiga profiilidega, mis tähendab, et enne kandevõime kaotust võivad profiili tekkida mõlged, mis mõjutavad profiili lõpliku kandevõimet. Sellest lähtuvalt on perforatsioonid seinaga profiili käitumist keeruline ennustada.

Euroopas kasutusel olev standard EN 1993 käsitleb teraskonstruktsioonide projekteerimist ning osa 1-3 vaatleb täpsemalt üld- ja lisareegleid külm-vormitud profiilidele ja profiilplekile. Eelmainitud standard annab juhiseid täisseinaliste külm-vormitud profiilide arvutamiseks, kuid puuduvad täiendavad reegleid seinas asuva perforatsioon arvestamiseks. Seega ei eksisteeri hetkel Eestis kindlaid eeskirju, kuidas külm-vormitud profiilide projekteerimisel arvestada perforatsiooniga profiili seinas. Standardi põhjal on võimalik teha tagavara kasuks arvutusi ning siiski arvutada perforatsioonid sein külm-vormitud profiile.

Külm-vormitud perforatsioonid seinaga profiile on varasemalt maailmas uuritud, kuid suurem osa uurimistöödest on tehtud vaadeldes profiili töötamist surve olukorras. Survele töötades on kogu ristlõige surutud ehk ebaefektiivsed ristlõike osad tekivad üle kogu ristlõike, kuid töötades paindele on surutud ainult pool ristlõiget. Painutatud ristlõike puhul tekivad ebaefektiivsed osad ainult survetsooni ning seega on painutatud külm-vormitud profiili efektiivne pindala suurem kui surutud külm-vormitud profiili puhul, mis tähendab ka seda, et painutatud profiilil on ristlõike tugevus

suurem kui surutud profiilil. Seetõttu ei ole võimalik lähtuda antud uurimistöös surutud külmpainutatud profiilide kohta tehtud teadustöödest.

Leidub ka mitmeid paindele töötavaid kül-m-vormitud profiilidele keskendunud uurimistöid, mille seinas asub ava, kuid neid uurimistöid ei ole võimalik arvutuste aluseks võtta, sest enamasti asub profiili seinas üks suur ava. Eelpool kirjeldatud ühe suure avaga profiile kasutatakse enamasti hoone karkassi puhul ning ava eesmärgiks on viia sealt läbi erinevaid kommunikatsioone. Varasemalt mainitud kül-m-vormitud profiili 4-ndat ristlõikeklassi ja avade tõttu seinas kandevõime keeruka määramise tõttu ei olegi võimalik võrrelda ühe suure avaga profiili ja mitme järjestikuse kitsama avaga profiili kandevõime kaotuse viise eriti kui puuduvad täpsed eeskirjad, kuidas avade paigutus ja suurus mõjutavad kandevõimet.

Uurimistöö koostamisel on võimalik lähtuda ainult sarnaselt perforeeritud seinaga kül-m-vormitud profiilide töötamisel painutatud olukorras tehtud teadustöödest. Perforeeritud seinaga kül-m-vormitud profiilide katselistest uuringutest painutatud olukorras on tehtud kokkuvõttev artikkel, kus on kirjeldatud selle alaseid uurimistöid ja nende tulemeid. Artiklis on välja toodud, et olemas olevates standardites napib soovitusi, kuidas arvutada sellise ristlõikega profiiliga ning seetõttu on keeruline uurida perforeeritud seinaga profiili ainult teoreetilistel alustel ning enamus uurimusi põhineb katselistele alustele toetudes [1].

Tuginedes Euroopa standardile ja katselistele tulemustele on koostatud mõned teadustööd eelkõige Põhjamaa riikides, kus kliima tõttu kasutatakse kül-m-vormitud profiile, mille sein on soojuslike omaduste parendamiseks perforeeritud. Andreas Limnell on 2015. aastal koostanud uurimistöö, mis käsitleb arktilises kliimas oleva elektri jaama katuseelemente, mis on valmistatud kül-m-vormitud teraselemendist. Uurimistöös vaadeldakse perforeeritud seinaga kül-m-vormitud profiilist valmistatud katuseelementide kandevõimet, tulepüsivust ja soojuslike omadusi. Katuselement asub maapinna suhtes horisontaalselt ning tänu sellele töötab paindele [2].

Euroopas toetutakse kül-m-vormitud profiilide arvutamisel standardile EN1993-1-3, mis võtab aluseks efektiivse laiuse meetodi, kuid Ameerika Ühendriikides on välja töötatud arvutusviis, mis lähtub elastsest kriitilisest nõtkemomendist ning mida nimetatakse otsese jõu meetodiks (Direct Strength Method) [3]. Otsese jõu meetod ei ole aktsepteeritud Euroopas ning seega on antud arvutusviis jäänud kõrvale uurimistööst.

Lõputöö teemaks valitud külmpainutatud perforeeritud seinaga profiilide töötamist on uuritud painutatult ainult varasemate teadustööde tegijatele kättesaadavate konkreetsete ristlõike gabariitidega ja perforeeritud avade mõõtmetega profiilide juures. Puuduvad üldistused, kuidas arvestada perforeeritud avasid, uurimistöode käigus on leitud vaid vaadeldavate profiilide

tugevusparameetrid. Antud uurimistöös uuritavate mõõtmetega profiili kohta puuduvad täpsemad tugevusparameetrid ja profiili käitumine, mis tõttu on võetud antud profiil uurimise alla.

Külm-vormitud perforeeritud seinaga profiili tugevusparameetrite leidmisel on lähtutud teoreetilisest ja katselisest analüüsist. Teoreetilise analüüsi aluseks on võetud kaks erinevat arvutusviisi, mis tuginevad standardile EN1993-1-3. Esimene arvutusviis on vaatluse alla võetud põhjusel, et selliselt on arvatud külmpainutatud roovidega tegelevas ettevõttes perforeeritud seinaga profiilide tugevusparameetreid. Teise arvutusviisi puhul on perforeeritud seinaga paindejäikust arvestatud lõplike elementide programmi, Dlublar RFEM, abil ning arvestatud ka jäikurite jäigastava mõjuga. Katselises analüüsis on sooritatud paindekatsed uuritava profiiliga. Töö eesmärgiks on leida kahest arvutusviisist sobilikum arvutuskäik antud külm-vormitud profiili arvutamiseks ning välja selgitada kui palju on erinevad arvutusviisid tagavara kasuks.

1. ÜLDISELT KÜLMPAINUTATUD PROFIILIDEST

Külm-painutatud profiilide ideeks on kasutada eelkõige profiilikuju kui profiilipaksust koormuse vastuvõtmiseks [4]. Külm-vormitud profiilid on ökonoomsemad kui kuum-vormitud profiilid oma suurema tugevuse ja kaalu suhte tõttu ehk sama tugevuse juures on külm-vormitud profiilid kergemad [5]. Külm-vormitud ristlõiked üldiselt ei saavuta oma täielikku materjali tugevusel põhinevat tugevust, sest enne voolepiirini jõudmist ilmnevad erinevad mülkevormid [5]. Külm-vormitud profiilide ökonoomseks kasutamiseks moodustub ristlõige õhukestest plaadielementidest, mille mülkumisega ja selle mõjutusega kogu ristlõikele peab arvestama [5].

1.1 Käitumine

Õhukeseseinaliste profiilide kasutamisel ja külm-vormimise teel profiilide tootmisel esineb probleeme, mida paksude kuum-vormitud profiilide puhul ei esine [6]. Eelkõige on need probleemid seotud külm-vormitud profiilide õhukeseseinalisusega. Õhukene sein on ebastabiilsem ning sellel esineb erinevates vormides stabiilsuse kaotusi.

Külm-vormitud õhukeseseinaliste puhul võib esineda 4 tüüpi stabiilsus kadusid – lokaalne mülkumine, globaalne ehk külgsuunas väändumine, moonumisest tingitud stabiilsuse kaotus ja nihe [7]. Lisaks võib esineda ka põikjõu koormusest põhjustatud seina lokaalne kandevõime kaotus.

Lokaalne ehk kohalik mülkumine on väga levinud külm-painutatud profiilidel. Kohalik mülkumine toimub tänu sellele, et ristlõige koosneb eraldi plaatidest, mis moodustab profiili koos oma nurgajoontega. Seega mülkuvad survejõu tõttu ristlõikest välja eraldi olevad plaadid. Seetõttu ei kaota profiil tingimata kandevõimet kui kohaliku mülkumise kriitiline pinge on saavutatud ning profiil võib koormust edasi vastu võtta kohalikust mülkumisest hoolimata [6].

Kohalik mülkumine esineb juba väga varajases staadiumis, aga ristlõige on võimeline kandma mitu korda suuremat koormust. Kohalik mülkumine tähendab, et kohalik ala, mis on mülkunud, on jõudnud kriitilise pingeni ja lisandunud pinge jaotatakse teistele aladele ristlõikes. Kandevõime kadu esineb siis kui ei ole enam rohkem võimalik koormust tõsta [2].

Kohalikku mülkumist iseloomustab lühike poolaine pikkus, mis ei ole pikem kui pikim element surve all. Külm-vormitud profiil ei kaota kohaliku mülkumise kriitilise pinge saavutamisel oma kandevõimet ja seega Eurokood ei arvesta kohaliku mülkumise tagajärjel kahjustunud ristlõike osasid ristlõike tugevusarvutustes [2].

Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus leiab aset deformatsiooni tagajärjel ristlõikes. Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus esineb ristlõikes sellisel juhul kui flantside, seina ja

jäikurite jäikus ei ole piisav, et hoida ristlõike kuju surve all. Seda efekti on võimalik vähendada mõlkepikkuse vähendamisega või tagades flantside väändekindluse [2].

Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotust iseloomustab moonutatud ristlõige ja keskmine poolaine pikkus, mis on lokaalse ja globaalse mõlkumise vahel.

Eurokood EN1993-1-3 ei anna selgeid sätteid, kuidas arvesse võtta moondumisest tingitud stabiilsuse kaotust. Kalkulatsioonid saab teha läbi iteratsioonide, mille reeglid on antud eurokoodis serva plaadielementide või keskmise jäikuri kohta survele. Surveelementide kuju, kas serva või plaadi keskel oleva jäikuri puhul põhineb eeldusel, et jäikur käitub kui surveelemendi jätkuva osalise tugevdusena. Sellel tugevdusel on vedrujäikus, mis sõltub kõrval olevatest ristlõike plaadielementide ääretingimustest ja paindetugevusest [6].

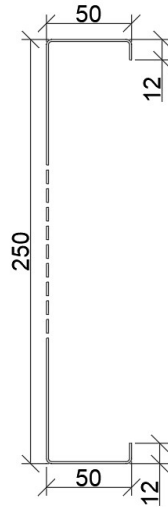
Globaalne ehk külgsuunas väändumine toimub kui ristlõige nõtkub läbi terve silde ulatuses seejuures oma kuju muutmata. Üldist mõlkumist iseloomustab pikk poolaine pikkus.

Kohalik mõlkumine ja moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus võivad omavahel ristuda, samamoodi nagu võib nendega ristuda külgsuunas väändumine.

Seina kohalik kandevõime kaotus lokaalsele põikjõule on lokaalse mõlkumise üks vorme, mis esineb punktkoormuse all või tugeudel. Külm-vormitud profiilid, mis on tugevdamata punktkoormusele on vastuvõtlikud kandevõime kaotusele läbi seina nihke. Seina nihkejõu tugevuse teoreetiline arvutus on keerukas paljude muutujate tõttu [8].

1.2 Kasutamine

Külmu-vormitud profiile kasutatakse mitmetes ehitusvaldkondades, kuid antud uurimistöös vaadeldakse külmu-vormitud profiili kasutamist välisfassaadi paneeli kandva osana. Tänu profiili külmu-vormimisele on võimalik profiili ristlõige gabariite muuta vastavalt vajadusele. Postidena on kasutusel C-profiilid, mille seina kõrgus muutub vastavalt projektile ning poste ühendavate horisontaalsete profiilidena kasutatakse U-profiile, mille kõrgust on samuti vastavalt C-profiilile seina kõrgusele võimalik muuta. Kasutusel on 1,2 mm, 1,5 mm ja 2,0 mm materjali paksusega roovid, profiilide paksus sõltub vajalikust kandevõimest või läbipaindest. Joonis 1.1 kirjeldab uuritava C-profiili ristlõike mõõtmed, kui profiili paksuseks on 1,5 mm.



Joonis 1.1 Ristlõige 250x50x12-1,5

C-profiilid ühtses paneelis koos töötades lisavad kogu paneelile rohkem jäikust kui vaadelda üksikut roovi, kuid väheste andmete tõttu üksiku profiili töötamise tõttu ei ole võimalik esmalt uurida paneeli kui terviku töötamist kui puuduvad täpsed teadmised üksiku perforatsiooniga seinaga külmvormitud profiili töötamise kohta.

2. TEOREETILINE ANALÜÜS

2.1 Sissejuhatus

Standard EN-EVS 1993-1-3:2006 käsitleb üld- ja lisareegleid külmvormitud profiilidele ja profiilplekile. Standardis on kõiki profiile vaadeldud täisseinalistena ning arvesse on võetud erinevate jäikurite mõjusid. Antud uurimistöös käsitletav profiil on osaliselt perforatsiooniga seinaga C-profiil, millele perforatsiooniga töttu ei ole standardikohast arvutuseeskirja koostatud.

Standardi EVS-EN 1993-1-3:2006 järgi on võimalik arvutada täisseinalise C-profiili tugevusparameetrid, kuid puuduvad eeskirjad, kuidas arvestada perforatsiooniga. Perforatsiooniga seinas nõrgestab seina paindejäikust. Täpsete arvutuseeskirjade puudumisel on võimalik standardile toetudes arvutada osaliselt perforatsiooniga seinaga C-profiili tugevusparameetrid kahe erineva arvutuskäigu abil.

Esimese arvutusviisi puhul on tugevusparameetrite arvutamisel vaadeldud profiili netoristolõiget, kus on arvestamata jäetud perforatsiooniga seiniosa. Esimeses arvutuskäigus kirjeldatavat arvutusviisi on uurimistöös käsitletud põhjusel, et selliselt on arvatud külmpanutatud roovidega tegelevas ettevõttes perforatsiooniga seinaga profiilide tugevusparameetreid. Arvutuskäik on jäetud võimalikult muutumatuks, et töö hilisemas faasis oleks võimalik võrrelda varasemalt kasutusel olnud arvutusviisi täpsema arvutusviisi ja lisaks veel katsega.

Teise arvutusviisi puhul on jäikuri vedrujäikus arvatud läbi lõplike elementide mudeli ning lähtutud standardi EVS-EN 1993-1-3:2006 peatükist 5.5.3, mis kirjeldab ääre- või vahejäikuriga tasapinnalisi ristlõikeosi ja nende arvutamist.

Teisest arvutusviisist lähtudes on leitud ka ilma perforatsiooniga profiili tugevusparameetrid, et oleks võimalik võrrelda täisseinalise profiili ja perforatsiooniga seinaga profiili vastupanumomente. Täisseinalise profiili arvutamisel ei teki jäikuri vedrujäikuse määramisel probleeme, seega on võimalik sooritada täielikult standardipõhine arvutuskäik.

Eesmärgiks on võrrelda hetkel kasutatavat arvutuskäiku ning keerukamat arvutuskäiku. Kahte erinevat arvutusviisi toetab ka katse, mis näitab arvutusviiside täpsust. Täisseinalise profiili arvutustulemuste põhjal saab hinnata, kui palju perforatsiooniga seinas profiili tugevust mõjutab.

2.2 Esimene arvutuskäik

Esimene arvutuskäik võtab aluseks standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 punktis 5.5.2 jäigastamata tasapinnalised elemendid välja toodud arvutusmeetodi. Antud standardipunktis ei arvestata C-profiili flantsi servas oleva jäikuri jäigastava omaduse mõjuga kogu profiili tugevusele. Selline lähenemine on arvutuskäiku lihtsustav.

Arvutuskäigus on materjali tegeliku paksuse vähendamiseks kasutatud vähendustegurit 0,8. Materjali arvutuslik paksus on leitud valemiga (2.1).

$$t = 0,8 * t_{nom} \quad (2.1)$$

kus t – materjali arvutuslik paksus, mm

t_{nom} – materjali tegelik paksus, mm

Arvutuses on arvesse võetud vöö nurkade ümarduste mõjuga, kus esmalt on kontrollitud, kas nurkade ümarduste mõju on üldse ristlõike tugevusparameetrite arvutamisel vaja arvestada. Järgnevalt välja toodud võrratuse (2.2) kehtivuse puhul ei ole vaja nurkade ümarduse mõjuga arvestada. Valemitega (2.3), (2.4) ja (2.5) on leitud ristlõike tasapinnaliste osade tinglikud laiused, mille leidmist iseloomustab Joonis 2.2.

$$r \leq 0,10b_{p,vöö} \quad (2.2)$$

$$b_{p,sein} = b - t - 2 * g_r \quad (2.3)$$

$$b_{p,vöö} = b - t - 2 * g_r \quad (2.4)$$

$$b_{p,jäikur} = b - \frac{t}{2} - g_r \quad (2.5)$$

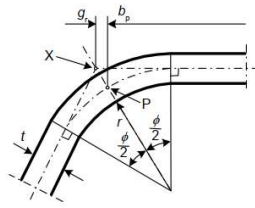
$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad (2.6)$$

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad (2.7)$$

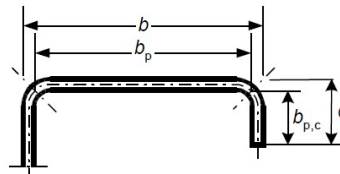
kus ϕ – ristlõike nurga paindenurk, °

b – ristlõike tasapinnalise osa pikkus, mm

r – ristlõike nurgaraadius, mm



Joonis 2.1 Teguri g_r leidmist kirjeldav joonis [9]

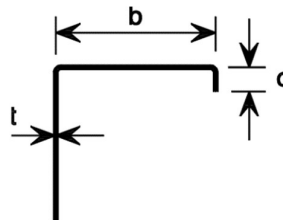


Joonis 2.2 Ristlõike tasapinnaliste osade tinglike pikkuste leidmist kirjeldav joonis [9]

Arvestada tuleb ka geomeetriliste proportsioonide sobivusega arvutusteks, mille tingimused on võimalik saada standardist EVS-EN 1993-1-3:2006 peatükk 5-st tabel 5.1-st, kus on välja toodud suurimad lubatud laius-paksuse suhted. Joonis 2.3-le toetudes peavad kehtima võrratused (2.8) ja (2.9) ning Joonis 2.4-le toetudes peavad kehtima võrratused (2.10) ja (2.11).

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad (2.8)$$

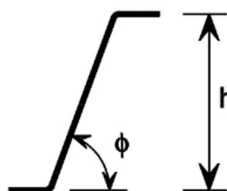
$$\frac{c}{t} \leq 50 \quad (2.9)$$



Joonis 2.3 Flantsi ja jäikurit iseloomustav joonis [9]

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (2.10)$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 * \sin \phi \quad (2.11)$$



Joonis 2.4 Profili kõrgust ja paindenurka iseloomustav joonis [9]

Piisava jäikuse tagamiseks ja jäikurite enda primaarse stabiilsuskaot vältimiseks peaksid jäikurite mõõtmed jääma võrratuses (2.12) antud piiridesse [9].

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6 \quad (2.12)$$

Edasises arvutuskäigus toimub ristlõike parameetrite määramine, mis lähtub standardist EN1993-1-3 peatükist 5.5.2 jäigastamata tasapinnalised elemendid ja seal antud juhustest. Esimeses arvutuskäigus on eeldatud, et perforeeringuga nõrgestatud ala ei tööta efektiivse ristlõikeosana kaasa, seega jääb perforeeritud ala tinglikult ristlõikest välja, kasutades edasistes arvutustes vaid netoristlõiget. Esmalt leitakse netoristlõike raskuskese.

Standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 peatükis 5.5.2 punktis (3) on öeldud, et jäigastamata tasapinnaliste ristlõikeosade efektiivlaidused tuleks leida standardi EN 1993-1-5 kohaselt, kasutades tingsaledusest $\bar{\lambda}_p$ sõltuva vähendusteguri ρ leidmisel laiuse \bar{b} väärtusena tinglaidust b_p [9].

Järgnevalt leitakse ristlõike ebaefektiivsed piirkonnad ristlõike osas, mis on survetsoonis. Flantsi vaadeldakse kui kahelt servalt toetatud ühtlaselt surutud vööd ning ebaefektiivsed ristlõikealad leitakse standardi EVS-EN 1993-1-5 tabeli 4.1 järgi ning vähendusteguri leidmise puhul kasutatakse valemeid (2.13), (2.14) ja (2.15) [10].

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (2.13)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0 \quad (2.14)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}, \quad (2.15)$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \quad (2.16)$$

kus ρ – mõlkumist arvestav vähendustegur

ψ – pingete suhe

\bar{b} – asjakohane plaadi laius, mm

k_σ – pingete suhtele ja ääretingimustele vastav mõlketegur

f_y – voolepiir, N/mm²

Seina survetsoonis asuvat seiniosa vaadeldakse kui konsoolse surutud osana, sest roovisein on perforeeringu tõttu sisuliselt katkestatud. Konsoolse surutud osana arvutatakse ka jäikurit. C-profiil ülemine seiniosa ja jäikur on surutud ja konsoolselt kinnitatud, seega kehtivad EN1993-1-5 tabel

4.2 tingimused [10]. Efektiivristlõike parameetreid täpsustakse kasutades pingete suhet ψ , mis põhineb brutopindala asemel juba eelnevalt leitud efektiivpindalal. Vähendusteguri leidmisel konsoolsele ristlõike osale kasutatakse valemeid (2.15), (2.17) ja (2.18).

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \quad (2.17)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (2.18)$$

Saades kahe viimase iteratsiooniga seiniosa efektiivlaiuseks võrdsed tulemused on sellega sein efektiivlaiuse määramine lõppenud.

Saadud tulemuste põhjal leitakse uus ebaefektiivseid alasid arvestava ristlõike raskuskese ning sellest tulenevad inerts- ja vastupanumomendid.

Arvutuskäik perforeeritud seinaga profiilile seinapaksusega 1,5 mm on esitatud Lisas 1.

2.3 Teine arvutuskäik

Teise arvutuskäigu aluseks on võetud standardi punkt 5.5.3 Ääre- või vahejäikuritega tasapinnalised ristlõikeosad. Selline arvutusviis on arvutuslikult keerukam, kuid saadud tulemus on täpsem kui esimese arvutusviisi puhul.

Standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 peatükis 5.5.3.1 punktis (1) on öeldud, et ääre- ja vahejäikuritega surutud elementide arvutus peaks põhinema oletusel, et jäikur käitub osalise toetusega jätkuvelemendina, mille vedrujäikus sõltub ääritingimustest ja tasapinnaliste naaberelementide paindejäikusest. Naaberelemendi ehk seina paindejäikus on perforeeringu tõttu teadmata ning seega ei ole võimalik jäikuri vedrujäikust K leida standardis välja toodud meetodiga. Jäikuri vedrujäikust on võimalik leida lõplike elementide arvutusel põhinevas programmis, milleks on antud uurimistöös kasutatud programmi RFEM. RFEM-is tehtud arvutusmudeli kirjeldus on esitatud uurimistöös punktis 2.3.2 RFEM mudeldamine.

Arvutuskäigus on arvestatud paksustolerantsidega, mis sõltuvad tsinkpinnakatte paksusest ning lubatud tolerantsidest teraseklassidele. Standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 punktis 3.2.4 on välja toodud, et traditsioonilise tsinkpinnakatte Z275 puhul $t_{zink} = 0,04$ mm ning tolerantsid teraseklassidele on saadud standardist EVS-EN 10143:2006 peatükist 6 tabelist 2 [11].

$$t = t_{cor} \text{ kui } tol \leq 5\% \quad (2.19)$$

$$t = t_{cor} * \frac{100-tol}{95} \text{ kui } tol > 5\% \quad (2.20)$$

$$t_{cor} = t_{nom} - t_{metallic \ coatings} , \quad (2.21)$$

kus tol – tolerants miinustolerantsi protsentides, %

t_{cor} – terastuuma paksus, mm

Arvutuses on arvesse võetud ka nurkade ümarduste mõjuga, kus esmalt on kontrollitud, kas nurkade ümarduste mõju on üldse ristlõike tugevusparameetrite arvutamisel vaja arvestada. Järgnevalt välja toodud kolme võrratuse (2.22), (2.23) ja (2.24) kehtivuse puhul ei ole vaja nurkade ümarduse mõjuga arvestada. Võrratuses kasutatud tegurite arvutus on välja toodud peatükis 2.2 Esimene arvutuskäik valemities (2.3) kuni (2.7).

$$r \leq 0,10b_{p,sein} \quad (2.22)$$

$$r \leq 0,10b_{p,vöö} \quad (2.23)$$

$$r \leq 0,10b_{p,jäikur} \quad (2.24)$$

Võrratuse mitte kehtimisel tuleb arvestada nurkade ümarduse mõjuga valemite (2.25), (2.26) ja (2.27) abiga.

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta), \quad (2.25)$$

kus A_g - ristlõike brutopindala

$A_{g,sh}$ - A_g väärtus ümardamata nurkadega ristlõike puhul

$$I_g \approx I_{g,sh}(1 - 2\delta), \quad (2.26)$$

kus I_g - brutoristlõike inertsimoment

$I_{g,sh}$ - I_g väärtus ümardamata nurkadega ristlõike puhul

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}}, \quad (2.27)$$

kus m – ristlõike tasapinnaliste osade arv

n – ümardatud nurkade arv

r_j – ümardatud nurga siseraadius, mm

Arvestada tuleb peale nurkade ümarduse mõju ja paksustolerantside ka geomeetriliste proportsioonidega. Geomeetriliste proportsioonidega arvestamise valemid (2.8) kuni (2.12) on välja toodud peatükis 2.2 Esimene arvutuskäik.

Seina ülemise osa esmase efektiivpindala leian eeldusel, et sein on konsoolselt surutud element ning ebaefektiivne pindala leitakse standardi EVS-EN 1993-1-5 tabeli 4.2 järgi ning vähendusteguri leidmise puhul kasutatakse valemiteid (2.15), (2.17) ja (2.18) [10]. Esiialgu sein efektiivpindala leidmisel eeldan, et $\sigma_{c,max} = f_{yb}$ ning $\sigma_{t,max} = -f_{yb}$.

Jäikuri vedrujäikuse K leidmiseks on kasutatud valemit (2.28)

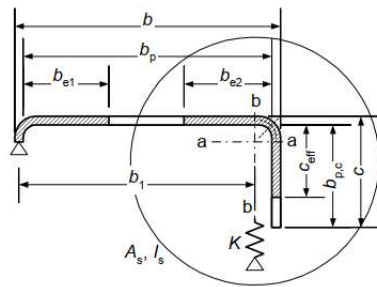
$$K = \frac{u}{\delta}, \quad (2.28)$$

kus δ - jäikuri siire ühikkoormusest u , mm

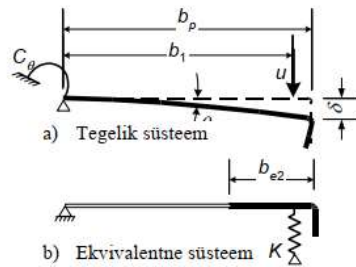
u – ühikkoormus, mis rakendub efektiivristlõike raskuskeskmesse, N/mm

Efektiivristlõike raskuskeskme leidmiseks tuleb leida esmane efektiivne ristlõike osa, mis põhineb standardi EN 1993-1-5 efektiivristlõike leidmisel [10]. Hiljem tegelik efektiivristlõike pindala

täpsustatakse iteratsioonide kaudu. Efektivristslöike raskuskeskme leidmist kirjeldab Joonis 2.5, kus otsitavad teljekoordinaadid on teljed a ja b.



Joonis 2.5 Efektivristslöike raskuskeskme leidmine [9]



Joonis 2.6 Tegelik ja ekvivalentse süsteemi võrdlus [9]

Jäikuri efektiivne laius leitakse standardi EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 järgi, kus on antud valem (2.29) lihtsa äärejäikuri efektiivlaiuse leidmiseks.

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} \quad (2.29)$$

kus ρ leitakse standardi EN1993-1-3 jaotise 5.5.2 kohaselt, kasutades see juures järgmisi mõlketeguri k_σ väärtusi:

$$\text{- Kui } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35, \text{ siis } k_\sigma = 0,5 \quad (2.30)$$

$$\text{- Kui } 0,35 < \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6, \text{ siis } k_\sigma = 0,5 + 0,83^3 \sqrt{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \quad (2.31)$$

Lõplik efektiivne laius leitakse peatükis 2.2 Esimene arvutuskäik esitatud valemite (2.15), (2.17) ja (2.18) abil.

Ülemise flantsi esmase efektiivpindala leian eeldusel, et flants on kahest servast toetatud ning ebaefektiivne pindala leitakse standardi EVS-EN 1993-1-5 tabeli 4.1 järgi ning vähendusteguri leidmise puhul kasutatakse peatükis 2.2 Esimene arvutuskäik 2.2 Esimene esitatud valemiteid (2.13), (2.14) ja (2.15) [10].

Efektiivristlõike raskuskeskme leidmisel arvestatakse jäikuri efektiivpindala ja flantsi jäikuripoolse osa efektiivpindalaga. Joonis 2.5 kirjeldatud telje b asukoha määramise järgselt on võimalik antud tulemust kasutada programmis RFEM ühikkoormuse u asukoha määramisel.

Pärast lõplike elementide programmi abil leitud vedrujäikuse K abil on võimalik määrata vedrujäikusest sõltuv moonumis-stabiilsuskao vähendustegur χ_d , mida rakendatakse jäikuri ja flantsi jäikuripoolse efektiivse osa arvutusliku paksuse määramisel. Vähendustegur χ_d leitakse kasutades äärejäikuri elastsusteooria kohast kriitilist pinget $\sigma_{cr,s}$.

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (2.32)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38 \quad (2.33)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (2.34)$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (2.35)$$

EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 punkt 7 äärejäikuri elastsusteooria kohane kriitiline pinget leitakse valemiga (2.36).

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_{z,s}}}{A_s} \quad (2.36)$$

Kus E – normaalelastsusmoodul, N/mm²

A_s – jäikuri efektiivpindala, mm²

$I_{z,s}$ – jäikuri efektiivpindala A_s põhjal leitud efektiivinertsimoment efektiivristlõike raskuskeset läbiva telje a-a suhtes, mida kirjeldab Joonis 2.5, mm⁴

Moondumis-stabiilsuskao vähendustegurit arvestatakse flantsi ja jäikuri efektiivpindala määramisel. EN1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 punkt 10-s on öeldud, et kui $\chi_d < 1$, võib selle väärtuse leida iteratiivselt. Iteratsiooni alustatakse eelnevalt leitud redutseeritud vähendusteguri ρ väärtusest, võttes pinget väärtuseks valemi (2.37) nii, et kehtib valem (2.38).

$$\sigma_{com,Ed,1} = \frac{\chi_d \cdot f_{yb}}{\gamma_{MO}} \quad (2.37)$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad (2.38)$$

Iteratsiooni jätkatakse kuni $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$, kusjuures $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$. Lõplik efektiivristlõige määratakse väärtuste b_{e2} , c_{eff} ja väärtuste $\chi_{d,n}$ vastava redutseeritud paksuse t_{red} põhjal, mille leidmist kirjeldab valem (2.39).

Redutseeritud paksuse arvutamiseks on antud juhised standardis EN-1993-1-3 peatükis 5.5.3.2 äärejäikuritega tasapinnalised elemendid punktis (11) ja (12). Standardis on toodud valemid (2.39) ja (2.40).

$$t_{red} = t * A_{s,red} / A_s \quad (2.39)$$

$$A_{s,red} = \chi_d * A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad (2.40)$$

kus $\sigma_{com,Ed}$ – efektiivristlõike põhjal leitud survepinge jäikuri keskpinnas, MPa

f_{yb} – voolepiir, MPa

γ_{M0} – varutegur, mille väärtus on 1,0

Eelneva arvutuskäiguga on kindlaks määratud survetsoonis asuva jäikuri ja flantsi lõplik efektiivpindala. Saadud lõplike jäikuri ja flantsi efektiivpindala leidmisega on võimalik välja kalkuleerida täpsemad efektiivristlõike raskuskeskme koordinaadid, kuid mitte veel lõplikud koordinaadid. Esialgse eelduse tõttu on $A_{4,eff} = 0$.

$$y_{c0} = \frac{A_{1,eff} * y_1 + A_{2,eff} * y_2 + A_{3,eff} * y_3 + A_{4,eff} * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{eff,tot}} \quad (2.41)$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_3 + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}} \quad (2.42)$$

Kus $A_{eff,tot}$ – efektiivristlõike pindala, valem (2.45), mm²

$A_{i,eff}$ – ühe ristlõike osa efektiivpindala, mm²

Tänu uuele leitud nulljoone asukohale on võimalik leida ka perforatsiooni efektiivne pindala. Perforatsiooni efektiivse pindala moodustab tõmbetsoonis asuv perforatsioonid seinaosa. Kui esialgses nullpunkti arvutuses pärast flantsi ja jäikuri efektiivpindala kindlaks määramist on võetud perforatsioonid seinaosa pindala $A_{4,eff} = 0$, nagu arvutuskäigu alguses eeldati, siis pärast uue nulljoone leidmist on $A_{4,eff}$ väärtust võimalik iteratsioonide kaudu täpsustada.

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad (2.43)$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perf} * t \quad (2.44)$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7 \quad (2.45)$$

Kus n – tõmbetsooni jääva perforatsioonid osa avade arv

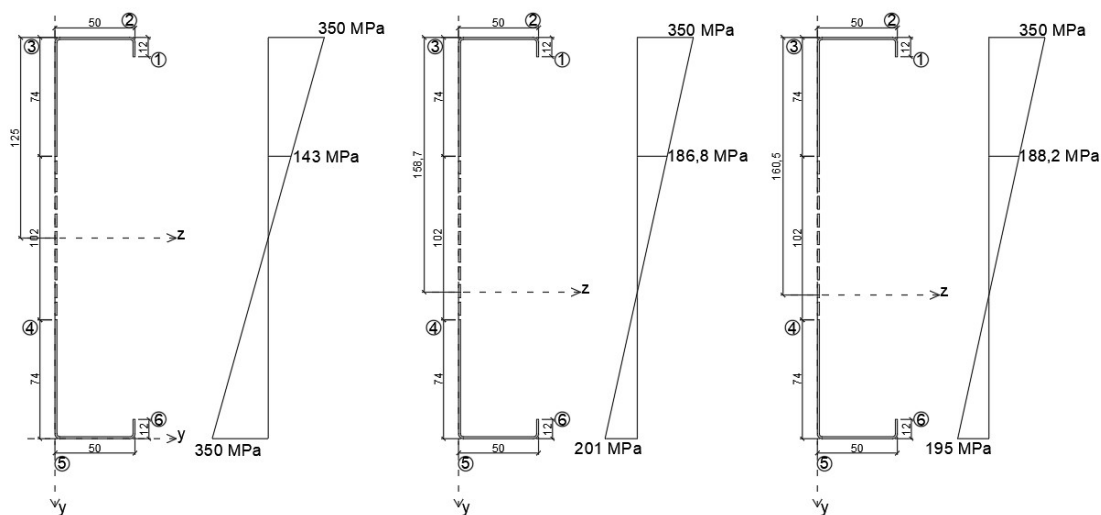
d_{perf} – perforatsiooniaava laius, mm

h_{perf} – perforeeritud osa kõrgus, mm

Iteratsioon toimub kuni $z_{4,eff,1} = z_{4,eff,2}$ ning $z_{c0,1} = z_{c0,2}$, siis on efektiivse ristlõike raskuskeskme koordinaadid üheselt määratud.

Esmases arvutuses, kus leidsin seina ülemise osa efektiivpikkuse eeldasin, et $\sigma_{c,max} = f_{yb}$ ning $\sigma_{t,max} = -f_{yb}$, kuid tegelikult raskuskeskme nihkumisel efektiivpindalade tõttu muutub ka maksimaalne tõmbepinge profiilis, see mõjutab omakorda seina ülemise osa efektiivlaiust. Iteratsioonide kaudu on võimalik leida tegelik maksimaalne tõmbepinge profiilis ja selle kaudu leida täpsem seina ülemise osa efektiivpikkus ning korrigeerida tõmbetsooni jääva perforeeritud osa pikkust.

Joonis 2.7 kirjeldab tõmbe- ja survetsooni osade muutumist nulljoone muutumise nihkumise tõttu tänu ebaefektiivsetele osadele. Joonis kirjeldab profiili paksusega 1,5 mm tõmbepinge vähenemist nulljoone nihkumise tõttu.



Joonis 2.7 Tõmbepinge vähenemine roovis paksusega 1,5 mm

Igas iteratsioonikäigus vaatlen seina ülemist osa kui konsoolselt surutud plaati. Vähendusteguri leidmisel konsoolsele ristlõike osale kasutatakse peatükis 2.2 Esimene arvutuskäik välja toodud valemeid (2.15), (2.17) ja (2.18).

Pärast seina ülemise osa efektiivselaiause leidmist on võimalik uuesti leida täpsustunud ristlõike raskuskeskme z-koordinaat valemiga (2.42) ja uue z-koordinaadi leidmisel täpsustatakse maksimaalset tõmbepinget ristlõikes.

Iteratsioon kestab seni kuni $z_{3,eff,n} \approx z_{3,eff,(n-1)}$ ning iga iteratsioonikäigu aluseks on eelmises iteratsioonikäigus leitud täpsustunud pinge σ_2 .

Kui sein ülemise osa efektiivne laius on määratud ning ristlõike uus z-koordinaat on leitud tuleb ümber arvutada juba varasemalt leitud perforeeritud osa efektiivne laius, võites aluseks viimati leitud z-koordinaadi väärtuse valemitega (2.43), (2.44) ja (2.45).

Iteratsioon toimub kuni $z_{4,eff,1} = z_{4,eff,2}$ ning $z_{c0,1} = z_{c0,2}$, siis on efektiivse ristlõike raskuskeskme koordinaadid üheselt määratud. Z-koordinaadi muutuse korral tuleb uuesti üle kontrollida ka sein ülemise osa efektiivne laius ning uuesti määrata ristlõike z-koordinaat. Protsessi tuleb jätkata kuni $z_{4,eff}$ leidmiseks sooritatud iteratsioonide kaudu leitud z-koordinaadi väärtus on võrdne $z_{3,eff}$ leidmiseks sooritatud iteratsioonide kaudu leitud z-koordinaadi väärtusega.

Saadud tulemuste põhjal leitakse uus ebaefektiivseid alasid arvestava ristlõike raskuskese ning sellest tulenevad inertsi- ja vastupanumomendid.

Arvutuskäik perforeeritud seinaga profiilile seinapaksusega 1,5 mm on esitatud Lisas 2.

2.3.1 Täisseinalise profiili arvutus

Täisseinalise profiili arvutuses on lähtutud peatükis 2.3 Teine arvutuskäik 2.3 Teine välja toodud arvutuskäigust mõningate erinevustega. Paksustolerantsid, geomeetrilised gabariidid ja nurkade ümarduste mõju on arvestatud nagu peatükis 2.3 Teine arvutuskäik valemitega (2.3) kuni (2.12) ja (2.19) kuni (2.27).

Seina esmase efektiivpindala leian eeldusel, et sein on painutatud ja kahest servast toetatud ning ebaefektiivne pindala leitakse standardi EVS-EN 1993-1-5 tabeli 4.1 järgi ning vähendusteguri leidmise puhul kasutatakse valemite (2.13), (2.14) ja (2.15) [10]. Esiialgu sein efektiivpindala leidmisel eeldasin, et $\sigma_{c,max} = f_{yb}$ ning $\sigma_{t,max} = -f_{yb}$.

Jäikuri vedrujäikuse arvestamiseks on kasutatud standardis EN1993-1-3 toodud valemit (2.46)

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4(1-\nu^2)} * \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 b_1 b_2 h_w k_f} \quad (2.46)$$

Kus ν – Poissoni tegur, $\nu = 0,30$

k_f – tegur, mis sõltub profiili koormusolukorrast. Painde korral $k_f = 0$

b_1 – sein ja vöö 1 äärejäikuri efektiivpindala raskuskeskmete vahekaugus, mm

b_2 – sein ja vöö 2 äärejäikuri efektiivpindala raskuskeskmete vahekaugus, mm

h_w – sein kõrgus, mm

Jäikuri vedrujäikust on võimalik määrata ka samamoodi nagu peatükis 2.3 Teine arvutuskäik leiti teguri K väärtus programmis RFEM. Mudeldatud profiili kontrolliks jäikuri vedrujäikus leiti ka lõplike elementide meetodil põhinevas programmis, antud arvutuste võrdlust on kirjeldatud peatükis 2.3.2 RFEM mudeldamine.

Edasises arvutuskäigus lähtuti peatükis 2.3 Teine arvutuskäik 2.3 Teine toodud valemite (2.32) kuni (2.40) ning nende valemitega seotud kirjeldustest. Pärast jäikuri ja vöö efektiivpindala kindlaks määramist on võimalik määrata profiili ristlõikekoordinaadid valemitega (2.47) ja (2.48).

$$y_{c0} = \frac{A_{1,eff} * y_1 + A_{2,eff} * y_{2,eff} + A_{3,eff} * y_3 + A_4 * y_4 + A_5 * y_5}{A_{eff,tot}} \quad (2.47)$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_4 * z_4 + A_5 * z_5}{A_{eff,tot}} \quad (2.48)$$

Kus $A_{eff,tot}$ – efektiivristlõike pindala, valem (2.49), mm²

$A_{i,eff}$ – ühe ristlõike osa efektiivpindala, mm²

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_4 + A_5 \quad (2.49)$$

Esmases arvutuses, kus leidsin seina efektiivpikkuse eeldasin, et $\sigma_{c,max} = f_{yb}$ ning $\sigma_{t,max} = -f_{yb}$, kuid tegeliku raskuskeskme nihkumisel efektiivpindalade tõttu muutub ka maksimaalne tõmbepinge profiilis, see mõjutab omakorda seina efektiivlaiust. Iteratsioonide kaudu on võimalik leida tegelik maksimaalne tõmbepinge profiilis ja selle kaudu leida täpsem seina efektiivpikkus. Igas iteratsioonikäigus vaatlen seina kui kahelt servalt toetatud plaati. Vähendusteguri leidmisel painutatud ristlõike osale kasutatakse valemeid (2.13), (2.14) ja (2.15). Iteratsioon kestab seni kuni $z_{c0,n} \approx z_{c0,(n-1)}$ ning iga iteratsioonikäigu aluseks on eelmises iteratsioonikäigus leitud täpsustunud ristlõike z-koordinaat.

Saadud tulemuste põhjal leitakse uus ebaefektiivseid alasid arvestava ristlõike raskuskese ning sellest tulenevad inertsi- ja vastupanumomendid.

Arvutuskäik täisseinalisele profiilile seinapaksusega 1,5 mm on esitatud Lisas 3.

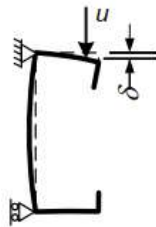
2.3.2 RFEM mudeldamine

Standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 on antud valemid, kuidas määrata vedrujäikust K, et leida ristlõike täpsed ebaefektiivsete osade laiused. Perforeeritud seina tõttu ei ole võimalik määrata vedrujäikus K standardis ette antud valemitega, sest puudub teadmine, kuidas arvestada seal juures seinas asuvat perforeeringut. Kõige täpsem viis on leida vedrujäikuse K väärtus lõplike elementide

meetodil põhineva programmi abil. Läbi programmi leitakse ühikkoormusest tingitud läbipaine ning saadud väärtuste abil leitakse vedrujäikus K .

Antud uurimistöös on kasutatud lõplike elementide programmiks Dlubal RFEM versiooni 5.18. Programm RFEM-i kasutatakse tasapinnaliste ja ruumiliste konstruktsioonide arvutamiseks, sealjuures defineerides struktuurid, materjalid ja koormused. Konstruktsioonid võivad koosneda plaatidest, seintes, koorikutest ja teistest elementidest [12]. Programm on valitud põhjusel, et sama programmi on kasutatud Andreas Linnelli lõputöös, kus on uuritud samamoodi perforeeritud seinaga profiili töötamist paindele [2].

Ääritingimuste valikul on lähtutud standardis EN 1993-1-3:2006 joonisel 5.6 välja toodud ääritingimustest painutatud olukorras, mida iseloomustab antud töös Joonis 2.8.



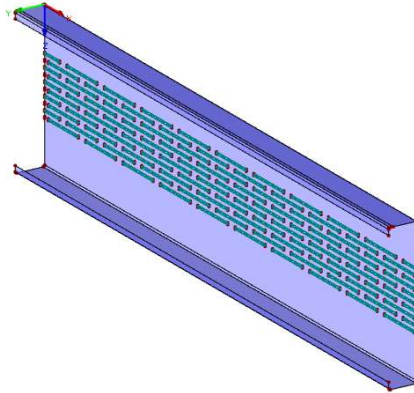
Joonis 2.8 Kinnitustingimused [9]

Standardis antud kinnitustingimustest lähtuvalt on uuritava profiili kinnitustingimused esitatud Tabel 2.1 Uuritava profiili kinnitustingimused. Tabel 2.1 lahtris olev „+“ märgib, et antud siire või pööre ei ole vastava telje suhtes lubatud.

Tabel 2.1 Uuritava profiili kinnitustingimused

	Mudelis olev tähis	u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
Ülemine kinnitus		+	+	+			
Alumine kinnitus		+	+				

Profiil on mudeldatud plaatidena ning arvesse on võetud ka nurkade raadiused, samuti on mudelisse kantud ka seina perforatsioon. Profiili pikkuseks on valitud 1 meeter. Mudeldatud profiili on näha Joonis 2.9, mis on saadud RFEM programmist.

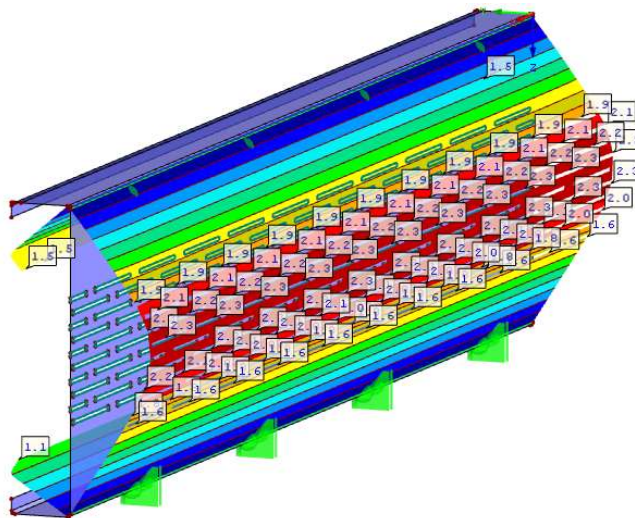


Joonis 2.9 Mudeldatud koormatav profiil programmis RFEM

Ühikkoormuse suuruseks u on valitud $0,1 \text{ N/mm}$ ning koormuse asukoha valikut on kirjeldatud uurimistöö punktis 2.3 Teine arvutuskäik.

Lõplike elementide meetodi puhul on oluline määrata võrgusilma suurus ehk mis suurusteks osadeks on arvutatav element jaotatud. Antud uurimistöös on võrgusilma suuruseks valitud $10 \times 10 \text{ mm}$, mis ei tekita probleeme nurkade juures kalkuleerimisel.

Joonis 2.10 kirjeldab perforeeritud seinaga profiili mudeldustulemusi programmis RFEM.

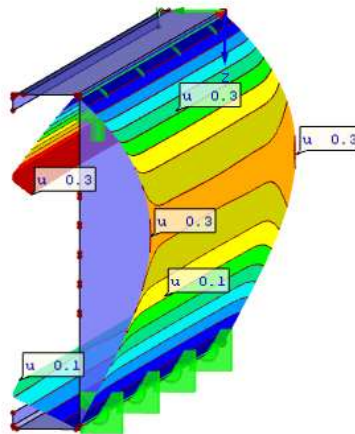


Joonis 2.10 Ühikkoormusega mudeldatud perforeeritud seinaga profiil koos siirde väärtustega

Mudeldamisprotsessi õigsust on kontrollitud täisseinalise profiili mudeldamisel ja koormamisel samadel tingimustel nagu perforeeritud seinaga profiili puhul. Saadavat tulemust on võimalik võrrelda standardis EN1993-1-3 toodud täisseinalise profiili jäikuri vedrujäikuse määramise valemiga (2.46). Saadud tulemused on esitatud Tabel 2.2 Mudeldatud ja arvutusliku jäikuri vedrujäikuse võrdlus ning programmis RFEM mudeldatud profiil siiretega on kirjeldatud Joonis 2.11.

Tabel 2.2 Mudeldatud ja arvutusliku jäikuri vedrujäikuse võrdlus

	RFEM	EN1993-1-3
Jäikuri vedrujäikus K	$K = \frac{0,1}{0,3} = 0,333 \text{ N/mm}^2$	$K = 0,334 \text{ N/mm}^2$



Joonis 2.11 Ühikkoormusega mudeldatud täisseinaline profiil siirde väärtustega

Tabel 2.2 kirjeldab jäikuri vedrujäikuse K väärtusi, mis on arvutatud lõplikel elementidel põhinevas programmis RFEM ning sama väärtust arvutatuna standardis EN1993-1-3 toodud valemipõhiselt. Tulemustest selgub, et mudeldades saadud tulemus ja arvutades saadud tulemus on ligilähedased. Eelmisest võrdlusest võib järeldada, et mudeldades on kõik piirtingimused määratud piisavalt täpselt ning saadud järeldusele toetudes võib järeldada, et perforeeritud seinaga profiili jäikuri vedrujäikus on programmis RFEM samuti korrektselt leitud.

2.4 Kahe arvutusviisi võrdlus

Tabel 2.3 Kahe arvutusviisi tulemuste võrdlus olevad tulemused on saadud Lisa 1 ja Lisa 2 esitatud arvutuskäigu tulemustest.

Tabel 2.3 Kahe arvutusviisi tulemuste võrdlus

	Esimene arvutuskäik	Teine arvutuskäik
Vastupanumoment W_y	$W_{y,1} = 18206 \text{ mm}^3$	$W_{y,2} = 18878 \text{ mm}^3$

Kahe arvutusviisi erinevus on 672 mm^3 , mis teeb erinevuseks protsentides 3,56%. Saadud tulemuse põhjal võiks öelda, et mõlemad arvutusviisid on tagavara kasuks, kuid esimene arvutusviis on siiski liiga ebatäpne lähtudes standardis antud juhistest.

Esimese ja teise arvutusviisi esimeseks suurimaks erinevuseks on paksustolerantsidega arvestamine. Esimeses arvutusviisis on võetud vähendusteguriks 0,8, mille valimise kohta puudub täpsem informatsioon. Vähendusteguri valimine on väga riskantne tegevus, kuid praegusel juhul kahele arvutusele toetudes oli vähendusteguri suurus õigustatud. Teise arvutusviisi juures on lähtutud standardis välja toodud paksustolerantsi arvutuseeskirjast. Esimeses arvutusviisis tuli arvutuslikuks materjali paksuseks 1,2 mm ja teises arvutusviisis tuli arvutuslikuks paksuseks 1,42 mm. Kahe arvutusviis paksuste erinevus on 15,5%, mis on antud olukorras suur erinevus. Paksus on oluline faktor 4-da ristlõikeklassi arvutuste juures, sest paksuse ja ristlõike osa tasapinnalise pikkuse suhe määrab ristlõikeklassi ning sinna tekkivad ebaefektiivsed alad.

Teine suur erinevus kahe arvutusviisi vahel tuli ristlõike üldise kuju määramisel. Lähtuvalt ristlõike kujust on võimalik profiili tugevusparameetreid arvutada, kas jäigastamata või jäigastatud elemendina ristlõiget vaadeldes. Jäigastamata element tähendab, et ristlõikel puuduvad erinevad ääre- ja vahejäikurid, kuid jäigastatud elemendil on need olemas. Antud uurimistöös vaadeldav element on äärejäikuritega profiil, sest flantsi servas asuvad 12 mm pikkused jäikurid ning sellest ka profiilil nimetus C-profiil. Esimeses arvutuskäigus on profiil võetud kui jäigastamata element, mis tähendab, et jäikuri jäigastavat mõju ei ole arvesse võetud arvutuste kaudu, kuid jäikurit on arvestatud oma pindalaga ristlõike koosseisu. Esimeses arvutusviisis kasutatud lähenemist on raske hinnata, kas tegemist on pigem tagavara kasuks või kahjuks sooritatud valikuga. Lähtuvalt arvutustulemustest võiks öelda, et selline arvutuskäik on tagavara kasuks võrreldes teise arvutuskäigu tulemusega, kuid tulemus ei pruugi olla samapidine mõne sarnase profiili arvutuse juures. Teises arvutusviisis on vaadeldud profiili kui ristlõiget, mis on jäigastatud elementidega. Teine arvutuskäik lähtub võimaluste piires väga täpselt standardist.

Esimene arvutuskäik arvestab perforeeritud seinaga kohealt ristlõike koosseisust välja, kuid teine arvutusviis arvestab tõmbetsooni jääva ristlõike perforeeritud osaga. Perforeeritud osa ristlõikest välja jätmise on kindlasti tagavara kasuks astunud samm, kuid teises arvutuskäigus tõmbetsoonis arvestatud perforeeritud seinaga arvestamine ristlõike koosseisu ei ole samuti tagavara kahjuks, sest profiili nulljoon on väga täpselt välja itereeritud.

Standardis EN1993-1-3 on käsitletud täisseinalist külme-vormitud profiili ning puuduvad eeskirjad, kuidas arvestada perforatsiooniga profiili seinas. Nagu eelnevalt mainitud, siis esimene arvutusviis jättis perforatsiooni täiesti arvestamata, kuid teine arvutusviis arvestas tõmbetsooni jäävat perforeeritud osa ning ka perforeeringu mõjutustega vedrujäikuse arvutamisel.

Kahe arvutusviisi võrdlusest selgub, et esimene arvutusviis ei ole piisavalt kooskõlas standardiga ning kasutama peaks teist arvutuskäiku, lisaks annab teine arvutuskäik ka täpsema tulemuse.

2.5 Täisseinalise ja perforeeritud seinaga profiili arvutuslik võrdlus

Perforeeritud seinaga profiili vastupanumomendi arvutamisel on kasutatud teist arvutusviisi. Mõlemad arvutusviisid lähtusid standardist EN1993-1-3, seega on võimalik võrrelda perforeeritud seinaga profiili ja täisseinalise profiili tugevusparameetrite erinevust. Tabel 2.4 kirjeldab arvutustest saadud tulemusi.

Tabel 2.4 Kahe profiili vastupanumomentide võrdlus

	Perforeeritud seinaga profiil	Täisseinaline profiil
Vastupanumoment W_y	$W_{y,1} = 18878 \text{ mm}^3$	$W_{y,2} = 21355 \text{ mm}^3$

Perforeeritud seinaga profiili vastupanumoment on 11,6% väiksem kui täisseinalise profiili vastupanumoment. Seega arvutuslikult mõjutab perforeering seinaga profiili piisavalt suure ulatuses, et perforeeringuga arvestamine seinas on oluline osa arvutusest. Perforeeritud seinaga profiili juures perforeeringuga mitte arvestamine on tagavara kahjuks tehtud arvutus, mis ei ole mitte mingil juhul lubatud.

3. KATSELINE ANALÜÜS

Külm-vormitud profiile on katsetatud neljapunkti paindega.

3.1 Eesmärgid ja ulatus

Katsete eesmärgiks on välja selgitada tegelikud külmpainutatud perforeeritud seinaga profiili tugevusparameetrid ning katsetulemuste kooskõla teoreetiliste arvutustega. Antud katsete sooritamise tagajärjel on võimalik hinnata arvutuskäigu usaldatavust.

3.2 Katsetulemuste prognoos

Katsekeha eripäraks võrreldes teiste külmvormitud profiilidega on perforeeritud sein. Perforatsioon vähendab elastse lokaalse mõlkumise kriitilist pinget seinas ja samuti vähendab perforatsioon seinas paindejäikus, mis omakorda vähendab moondumisest tingitud stabiilsuse kaotuse kriitilist pinget [13].

Teoreetiliste tulemuste järgi on võimalik ennustada, milliste koormuste juures tekib kandevõime kaotus, kuid kandevõime kaotusviisi on keeruline teoreetiliste tulemuste põhjal hinnata. Samuti lähtudes eelnevatest sarnastest uuringutest on ebausaldusväärne hinnata kandevõime kaotuse koormust ja viisi, sest kandevõimet mõjutavad ristlõike gabariidid ja perforeeringu kuju ning suurus, mis on enamasti igal tootjal erinevad. Võimalik on välja tuua väga üldiseid seoseid kandevõime ja profiili kuju vahel, kuid puuduvad täpsed suhted ning eeskirjad kandevõime määramiseks.

- 1) Ühe ristlõike osa kohaliku kandevõime kadu ei pruugi viia terve elemendi kandevõime kaoni, aga see võib kaasa aidata teise mõlketüübi kandevõime kaole ning võib kiirendada teise tüübi kandevõime kadu [2]. Seetõttu on keeruline täpselt hinnata, kuidas ja mis koormuse juures profiil oma kandevõime kaotab.
- 2) Kohaliku mõlkumisega seotud käitumine on suhteliselt lihtne, kui laiuse-paksuse suhe kasvab, siis kohaliku mõlkumise kriitiline pinge muutub madalamaks. Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotuse kohta ei saa sama lihtsat üldistust teha [6]. Puuduvad täpsemad andmed kui palju muutub laiuse-paksuse suhte kasvades kohaliku mõlkumise kriitiline pinge madalamaks, seega on võimatu prognoosida kriitilist pinget. Lisaks mõjutab kriitilise pinge suurust ka perforatsioon seinas ehk et sein võib vaadelda pikemana tänu perforatsiooni nõrgestava poole tõttu.
- 3) Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotuse kriitiline pinge C-profiilil surve töötamisel puhul on reguleeritud sein ja flantsi liitekoha pöördejäikusega. Pikemad seinad on rohkem painduvamad ja seega on väiksem pöördejäikust sein ja flantsi liitekohal [6]. Lisaks

muudab seina veel rohkem painduvamaks seinas olev perforatsioon. Laia seina puhul ilmub moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus juba varajases staadiumis.

- 4) Kui flants on kitsas, siis seina kohaliku mõlkumise lainepikkus on lähedane moondumisest tingitud stabiilsuse kaotuse lainepikkusega ja moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus toimub väiksema pinge juures kui kohalik mõlkumine. Kui flants on ülemäära lai, siis kohalik mõlkumine ei ole probleem, aga pigem on probleemiks jäikuri suurus, mis hoiab flantsi paigal [6]. Kitsast ning laia flantsi ei ole täpsemalt defineeritud, kuid uuritava profiili flants on seina pikkusega võrreldes pigem kitsas kui lai. Seega võib ennustada, et moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus ja kohalik mõlkumine võivad toimuda lähedaste pingete juures.

Perforeeritud seinaga külm-vormitud profiilide käitumise määramise kohta ei ole koostatud eeskirju ega universaalseid valemeid seetõttu, et iga perforatsioon on erinev ning selle mõju kandevõimele muutub perforatsiooni muutumisega. Lisaks perforatsioonile mõjutab kandevõimet ka profiili erinevate osade pikkused ja pikkuste suhted.

Eelpool kirjeldatud faktidest lähtudes on võimalik teha mõningaid ennustusi, kuidas toimub purunemine, kuid pole võimalik ennustada, et millise koormuse juures esinevad erinevad mõlketüübid ja milline mõlkumisviis saab kandevõimele saatuslikuks. Teoreetilistele arvutustele tuginedes on võimalik hinnata kandevõime kaotuse koormust. Täpsete tulemuste välja selgitamiseks konkreetse profiili kohta ongi sooritatud katse.

Kohalik mõlkumine toimub väikeste koormuste juures ja ei põhjusta ilmnenisel koheselt kandevõime kaotust profiilil. Kohaliku mõlkumise lainepikkust antud profiil on keeruline ennustada, sest uuritava profiili kohta ei ole tehtud laiapõhjalist lõplike elementide mudeli analüüsi, mis aitaks täpsemalt ennustada kohaliku mõlkumise kriitilist pinget ning lainepikkust.

Moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus peaks toimuma suurema kriitilise pinge juures kui kohalik mõlkumine, kuid kitsa flantsi puhul võivad kohalik kriitiline pinge ja moondumisest tekkinud stabiilsuse kaotuse kriitiline pinge olla lähedaste väärtustega. Moondumisest tekkinud stabiilsuse kaotuse ei pruugi samuti põhjustada kohest kandevõime kaotust.

Külgsuunas väändumine saab toimuda pikemate lainepikkuste juures. Konstruksiooniliste tingimuste tõttu on maksimaalseks võimalikuks lainepikkuseks 300 mm, seega võib üldise mõlkumise ehk külgsuunas väändumise välistada. Külgsuunas väändumine on takistatud ka põhjusel, et standard arvestab oma arvutuskäigus kohalikust mõlkumisest ja osaliselt ka moondumisest põhjustatud stabiilsuse kaotusega ristlõike efektiivse pindala vähendamisega.

Tugede ja koormuse rakenduspunktide kohal on kasutatud tugevdavaid osi, mis väldivad põikjõu koormusest põhjustatud seina lokaalse kandevõime kaotuse.

3.3 Katsekehade spetsifikatsioon

Katsetatavaks külm-vormitud profiiliks on C-profiil mõõtmetega 250x50x12, mis vaadeldav ka Joonis 1.1. Vaadeldakse C-profiili seinapaksusega 1,5 mm.

Katsekeha pikkus peaks vähemalt 15-kordselt ületama ristlõike suurimat mõõdet [9]. Katsekeha suurimaks nimilaiuseks on 250 mm, mis teeb standardi kohaselt katsekeha pikkuseks minimaalselt $250 \text{ mm} * 15 = 3750 \text{ mm}$, mis on valitud ka katsekeha pikkuseks.

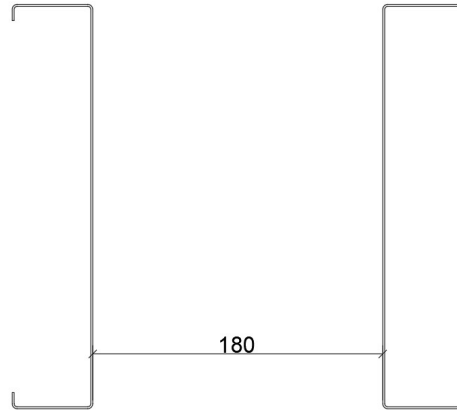
Survevööd ei tohiks külgsuunas toetada väiksema vahemaa tagant kui tegelikult konstruktsioonil [9]. Tegelikult konstruktsioonil on survevööd ja ka tõmbevööd toetatud iga 300 mm tagant, kust on kinnitatud paneeli kattmaterjal roovitise külge. Katsekehal on sellest lähtuvalt survevöö ja ka tõmbevöö kinnitatud iga 300 mm tagant.

Standardis EVS-EN 1993-1-3:2006 Lisas A punktis A.3.4 Täismõõdus ristlõike paindekatses on alapunktis (3) öeldud, et katsekeha tuleks koormata kahe koondatud koormusega, mis peaksid paiknema nii, et tala keskel tekkiva konstantse momendi mõjuala jääks vahemikku 0,2- kuni 0,33-kordne ava pikkus [9]. Katsekeha pikkusest lähtuvalt peaks tala keskel tekkiva konstantse momendi mõjuala jääma vahemikku

$$\begin{cases} 0,2 * 3750 \text{ mm} = 750 \text{ mm} \\ 0,33 * 3750 \text{ mm} = 1250 \text{ mm} \end{cases}$$

Saadud tulemustes lähtudes valin konstantse momendi mõjualaks 1250 mm, tänu millele on katsekeha jagatud piltlikult kolmeks võrdeks osaks.

Koormuste siht peaks läbima ristlõike väändeakeset [9]. Paljud külm-vormimise teel toodetud profiilid, seal hulgas ka C-profiil, on monosümmeetrilised ja nende väändeakese on ekstsentriline raskuskeskmest. Seega väändeteljest ekstsentrilisel koormamisel tekib lisaks paindele profiilis ka väändumine. Selleks, et vältida väändumist tuleb koormata väändetelje suhtes tsentriliselt [6]. Sellest lähtuvalt kasutan katsekehana kahte C-profiili, mis on asetatud teineteise suhtes peegelpildis ning kahe profiili väändeakese asub nende omavahelisest vahekaugusest hoolimata kahe profiili keskel. Valin kahe profiili omavaheliseks kauguseks 180 mm. Katsekeha kirjeldab Joonis 3.1 Katsetava katsekeha ristlõige. Sellise ülesehitusega katsekeha väldib väändeakesme ekstsentrilisusega kaasnevat probleemi [14].



Joonis 3.1 Katsetava katsekeha ristlõige

Ristlõiget tuleks koormamiskohtades toetada väände suhtes. Koormuste rakenduskohtades tuleks vajaduse korral takistada kohalikku mõõkumist, et purunemine toimuks ava keskel [9]. Punktkoormuse või toereaktsiooni esinemiskohtades on paigaldatud kahte profiili ühendav kanttoru ristlõikega 180x180x5, mis hoiab ära seina moondumise. Seina kohalikku tugevdust põikkoormusele ei ole vaja arvesse võtta [6].

3.4 Koormuste spetsifikatsioon

Selleks, et saaksin leida profiili vastupanumomendi pean koormama profiili purunemiseni ehk selle hetkeni kuni profiil enam koormust vastu ei võta. Standardi EVS-EN-1993-1-3:2006 järgi arvutatud profiili vastupanumomendi ja materjali voolepiiri järgi on võimalik leida maksimaalne moment, mida antud ristlõige on võimeline vastu võtma. Teades maksimaalset momenti ja katsekeha pikkust on võimalik leida maksimaalsed punktkoormused, mida katsekeha on teoreetiliselt võimeline vastu võtma. Teoreetiline arvutus on tagavara kasuks, seega võib eeldada katseliselt natukene suuremaid koormuseid, kuid teoreetiliselt. Valem maksimaalse punktkoormuse leidmiseks on (2.53), mis on tuletatud valemite (2.50) kuni (2.52) abiga.

$$\begin{cases} M_{max} = W_{eff} * f_{yb} / \gamma \\ M_{max} = F * \xi * L \end{cases} \quad (2.50)$$

$$W_{eff} * \frac{f_{yb}}{\gamma} = F * \xi * L \quad (2.51)$$

$$F = \frac{W_{eff}}{\xi * L} * \frac{f_{yb}}{\gamma} \quad (2.52)$$

$$\xi = \frac{1-x}{2}, \quad (2.53)$$

kus x – kahe punktkoormuse vaheline kaugus, mis sõltub katsekeha pikkusest, mm

L – katsekeha pikkus, mm

3.4.1 Katsekeha

Katsekeha on profiiliga 250x50x12x1,5 ning esimese arvutuskäigu järgi arvatult on profiili vastupanumoment $W_{eff} = 18206 \text{ mm}^3$.

Katsekeha on profiiliga 250x50x12x1,5 ning teise arvutuskäigu järgi arvatult on profiili vastupanumoment $W_{eff} = 18878 \text{ mm}^3$.

Katsekeha pikkuseks on 3750 mm ja eelnevalt valitud keskele tekkiva konstantse momendi mõjuala on 1250 mm, seega maksimaalne punktkoormus esimese arvutuskäiguga on leitud järgnevalt.

$$\xi = \frac{1-x}{2} \quad \xi = \frac{1-\frac{1250}{3750}}{2} = 0,333$$

$$F_d = \frac{18206}{0,333 \cdot 3750} \cdot \frac{35}{1,0} = 5,09 \text{ kN}$$

Teise arvutuskäiguga maksimaalne arvutuslik punktkoormus:

$$\xi = \frac{1-x}{2} \quad \xi = \frac{1-\frac{1250}{3750}}{2} = 0,333$$

$$F_d = \frac{18878}{0,333 \cdot 3750} \cdot \frac{35}{1,0} = 5,29 \text{ kN}$$

Saadud tulemused on arvutuslikud punktkoormused katsekehale. Silindril tuleb arvutuslik koormus on $F_d = 21,16 \text{ kN}$, saadud koormus sisaldab endas varutegureid. Tegelik purustava koormuse saamiseks arvestan 2-kordset suuremat koormust, seega tuleb purustavaks koormuses $F_{purustav} = 42,32 \text{ kN}$.

3.5 Katsekorraldus

Katsekeha koosneb kahest peegelpildis asuvast C-profiilist, mis on omavahel ühendatud iga 300 mm tagant 50x70x5 nurkraudadega. Nurkraud kinnitatakse külmevormitud profiilide külge M6 poltidega. Poltide tarbeks on nurkrauda ette puuritud 7 mm diameetriga avad nurkrauda pikemasse külge ning 7 mm avad ka katsetavasse profiili. Joonis 3.2 kujutab avadega nurkraudasid. Nurkraudade eesmärk on ära hoida katsekeha külgsuunalist väändumist [15].



Joonis 3.2 Nurkraud 70x50x5

Lisaks nurkraudadele ühendatakse kaks katsetatavat C-profiili oma vahel ka diagonaalidega. Diagonaalide eesmärgiks on tagata kahe profiili vaheline stabiilsus. Diagonaalideks kasutatakse ribasid 50x290x3, milles asuvad avad. Joonis 3.3 kirjeldab, kuidas nurkraud ja diagonaalid kinnitatakse külmpainutatud profiilide külge.



Joonis 3.3 Nurkraud on kinnitatud roovide külge koos diagonaalidega

Nagu eelnevalt on mainitud peatükis 3.2 Katsetulemuste prognoos, siis tugelele ja koormuserakenduspunktidesse on profiili seina tugevdamiseks ja koormuse ülekandmiseks paigaldatud 180x180x5 gabariitidega profiilid. Tugevusdetailide paigaldamine väldib seina kohalikku purunemist põikkoormusele. 180x180x5 profiilide alapinda on keevitatud 5 mm paksune plaat, mis jagab tekkiva koormuse kõigi profiili seinte vahel ning tasandab pinda, mis kannab koormust üle. Profiilide ühendus ja seina tugevusdetailide on kirjeldatud Joonis 3.4.



Joonis 3.4 Profiilide ühendus- ja seinatugevdusdetailid

Profiilid ja koormuse ülekandedetailid on omavahel ühendatud 6 suurkruviga. 3 suurkruvi asetsevad profiili survetsoonis ja 3 suurkruvi asetsevad profiili tõmbetsoonis. Joonis 3.5 kirjeldab ühendusdetailide ja profiilide ühendust omavahel.



Joonis 3.5 Ühendusdetailid ja profiili ühendus suurkruviga

Joonis 3.5 kirjeldab profiili ja ühendusdetaili ühendust tala servades, kuid tala mõlemast toepunktist 1250 mm kaugusel asuvad kaks samasugust koormuse ülekandedetaili, kuid detailid on 180° pööratud asendis. Koormuse ülekandetalalt tuleva koormuse edasi kandmiseks profiilidele ühendusdetaili abil kirjeldab Joonis 3.6.



Joonis 3.6 Koormuse ülekande punktis olev ühendusdetail

Katsekeha on toetatud mõlemast otsast tugedele. Ühes otsas on jäikkinnitus ning teises otsa on liigendkinnitus. Liigendkinnitus loodi keermelati abil, millel oli võimalus toel liikuda ning liigendtuge iseloomustab Joonis 3.7. Jäiktugi oli oma ülesehituselt nagu liigendtugi, kuid keermelatt fikseeriti plastiliiniga toe külge ning jäika tuge kirjeldab Joonis 3.8.



Joonis 3.7 Liigendtugi



Joonis 3.8 Jäiktugi

Toed on betoonpõrandasse kinnitatud kahe betoonikruviga M10. Tugedel on koormus survest ning tugesid on seetõttu oluline ainult fikseerida põranda külge. Joonis 3.9 iseloomustab liigendtuge koos katsetatava profiiliga.



Joonis 3.9 Liigendtugi koos katsetatava profiiliga

Koormatakse kahe punktkoormusega tekitades talale konstantse momendi piirkonna, mille pikkuseks on 1250 mm. Jõusilindrit kantakse koormus üle koormust jagavale talale, milleks kasutatakse 180x180x5 profiili. Koormust jagavat tala on kirjeldatud Joonis 3.10.



Joonis 3.10 Koormust jagav tala

Jõusilindriks kasutatakse Enerpac RC-506 hüdraulilist silindrit, mille maksimaalne rõhk on 700 bar-i ning koormamissilindri efektiivpindala on $71,2 \text{ cm}^2$ [16]. Silinder on kinnitatud kahe plaadi vahele M12 keermelattidega, kus alumises plaadis asub 90 mm-se diameetriga ava, et koormust edasiandev silinder saaks kanda koormust üle koormust jagavale talale. Joonis 3.11 iseloomustab hüdraulilist silindrit.



Joonis 3.11 Hüdrauliline silinder

Hüdraulilist silindrit peab koormamise ajal ka toetama pealt poolt, et silinder saaks korralikult töötada ja koormust edasi anda koormustalale. Silindri korralikuks töötamiseks on vajalik jäik ja stabiilne raam kogu konstruktsioonile. Joonis 3.12 kirjeldab jäika raami, mis on valmistatud 150x150x5 profiilist.



Joonis 3.12 Jäik raam

Raam on kinnitatud betoonpõrandasse Hilti HAS M10x65 kiilankrutega. Raami kinnitamisel betoonpõrandasse on arvestatud maksimaalse arvutusliku koormusega, mida peab roovidele katse käigus rakendama ning tagavara kasuks on antud väärtus korrutatud 2-ga.

$$F = 42,32 \text{ kN}$$

Hilti kataloogist lähtudes on arvatud kiilankrute kandevõime [17]. Kui ankru efektiivne sügavus $h_{ef} = 40 \text{ mm}$, siis arvutuslik tõmbejõud on $N_{Rd} = 8,5 \text{ kN}$.

M10 ankrutel on kahe kiilankru vaheline minimaalne kaugus 50 mm ning tänu sellele sai kasutada ühes kinnitusdetailis kahte kiilankrut [17].

Raamil asetseb neli kinnitusplaati, milles igas ühes on 2 ava ankrute kinnitamiseks. Seega on raam kinnitatud 8 Hilti HAS M10x65 kiilankruga betooni ning kiilankrud võtavad vastu järgivat koormust.

$$N_{Rd} = 8 * 8,5 \text{ kN} = 68 \text{ kN}$$

Kiilankru tarbeks puuritava augu sügavuseks on Hilti kataloogi järgi 58 mm [17]. Joonis 3.13 kirjeldab kiilankrute kinnitust betooni.



Joonis 3.13 Kiilankrute kinnitus betooni

Kogu katsekonstruktsiooni kirjeldab Joonis 3.14, kus on esindatud jäik raam ning toed, mis on kinnitatud betoonpõrandasse.



Joonis 3.14 Katsekonstruktsioon

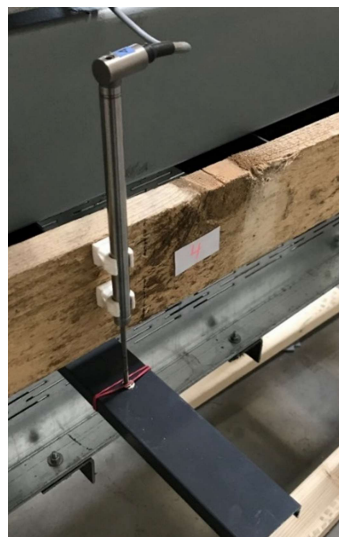
3.6 Mõõtmised

Siirdeid peab mõõtma tugede kohal, koormuste kohal ja silde keskel [9]. Antud katses koosneb katsekeha kahest C-profiilist, seega täpsema läbipainde leidmiseks mõõdetakse silde keskel siirdeid mõlemalt poolt katsekeha ning nende tulemuste põhjal on võimalik leida keskmine maksimaalne läbipaine.

Siirete mõõtmiseks on kasutatud siirdeandureid HBM WA50 ja WA100. Siirdeandurite kalibreeritud mõõteulatus on WA50 puhul 0..50 mm ja WA100 puhul 0..100mm. Näidud fikseeriti iga 0,05 sekundi järel [18]. Joonis 3.15 Joonis 3.15 Siirdeandur number 5 tala keskel ja Joonis 3.16 kirjeldavad siirdeandurite paiknemist tala silde keskel ning jooniselt on näha ka, et kaks siirdeandurit mõõdavad katsekeha läbipainet silde keskel mõlemalt poolt profiili.



Joonis 3.15 Siirdeandur number 5 tala keskel



Joonis 3.16 Siirdeandur number 4 tala keskel

Koormuse jaotuspunktides on siirdeid mõõdetud koormust jagava tala pealt ning kahe katsetava profiili keskelt. Koormuse jaotuspunktides ja tala silde keskelt siirde mõõtmisel on kasutatud siirdeandureid HBM WA100. Eelpool kirjeldatud punktides asuvaid siirdeandureid kirjeldab Joonis 3.17 ja Joonis 3.18.



Joonis 3.17 Siirdeandur number 6 koormust jagava tala servas



Joonis 3.18 Siirdeandur number 8 koormust jagava tala servas

Katsetava tala tugegelt mõõtmiseks kasutati siirdeandureid HBM WA50 ning tugegelt läbipaine mõõtmist iseloomustab Joonis 3.19 ja Joonis 3.20.



Joonis 3.19 Liigendoelt läbipaine mõõtmine



Joonis 3.20 Jäigalt toelt läbipainde mõõtmine

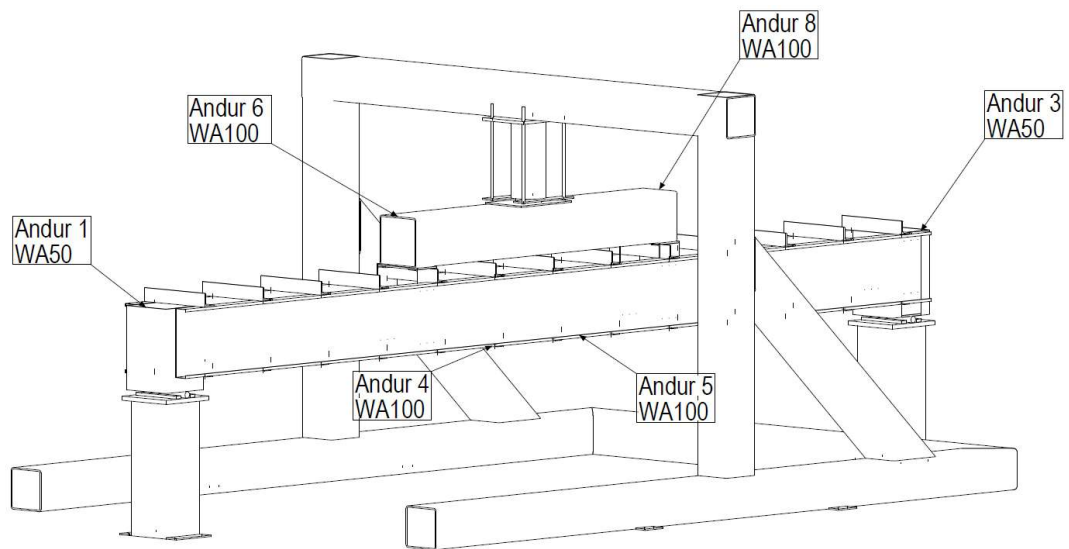
Jõuandurina oli kasutuses Joonis 3.11 näidatud jõusilinder. Jõu- ja siirdeandurid ühendati mõõteseadmega HBM Quantum MX840B, millest üks kanal registreeris jõu väärtusi ja kuus kanalit siirdeid [19]. Mõõtetulemuste registreerimiseks kasutati tarkvara Catman Easy, mille võimekus on salvestada katseandmeid 100MB/s [20].

Siirdeandurite kinnitamiseks moodustatakse raam, mida on näha Joonis 3.21.



Joonis 3.21 Puidust raam siirdeandurite kinnitamiseks

Siirdeandurite üldine paiknemisskeem koos siirdeandurite numbrite ja siirdeandurite markidega on Joonis 3.22 Siirdeandurite üldskeem.



Joonis 3.22 Siirdeandurite üldskeem

4. KATSETULEMUSTE ARUANNE

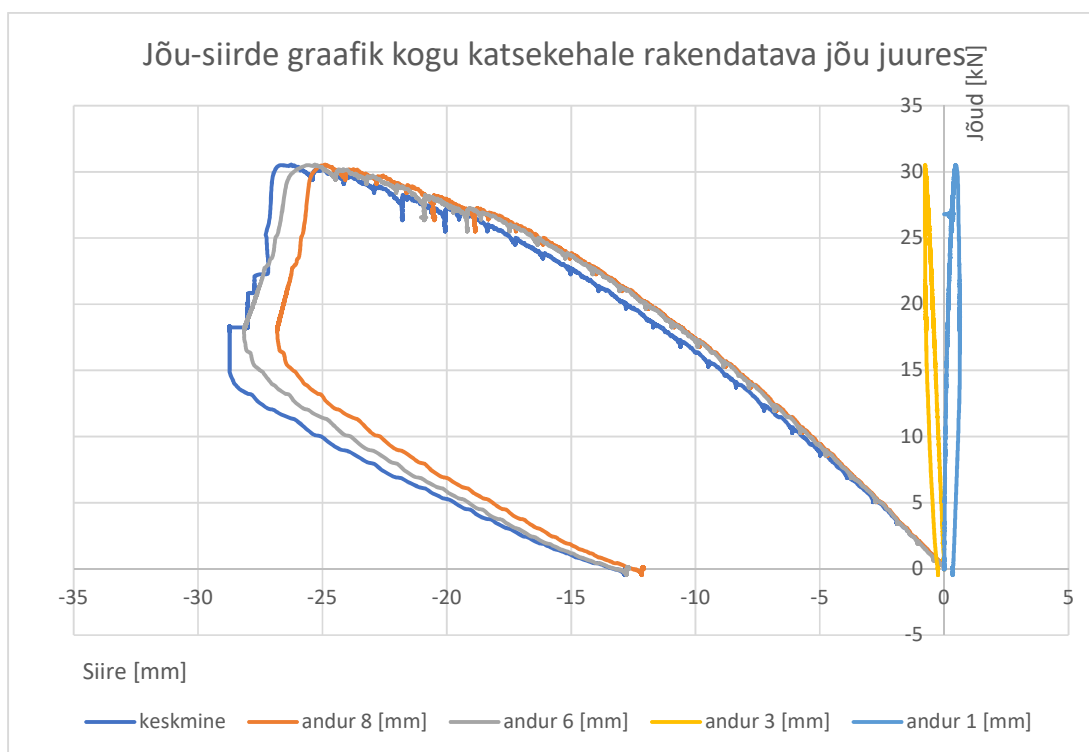
Katsetulemuste aruandes on välja toodud ebatäiused konstruktsioonis enne katsetamist, katsetulemused ja nende analüüs.

4.1 Katsekeha ebatäiused enne katsetamist

Kahe profiili ühendamisel ühtseks katsekehaks nurkraudade abil mõjutas C-profiilide perforeeringut ning tekitas seinas alghälbe. Ühendades kaks profiili omavahel jäikade nurkraudadega tekkis perforeeringusse laine, lainesügavusega 1-2 mm.

4.2 Profiili töötamine katsel

Profiili töötamist katsel on vaadeldud mitmes erinevas osas. Eraldi on analüüsitud profiili töötamist enne purunemist ning purunemise hetkel, lisaks on välja toodud ka katsekeha muutus pärast koormuse eemaldamist. Koormamisel tehti kaks pikemat pausi, mida on näha ka Joonis 4.1, kus pause väljendavad suuremad astmed koormuste juures, kus sooritati paus. Esimene paus tehti hetkel kui koormust oli peal kogu katsekehal 26,9 kN ja teine paus tehti kui koormus oli 27,9 kN. Pauside eesmärgiks oli vaadelda ja analüüsida konstruktsiooni ja tekkinud muudatusi vahetult enne purunemist. Täieliku siirde-jõu graafiku ning katselt kogutud tulemuste analüüs on peatükis 4.3 Katseandmete analüüs.



Joonis 4.1 Jõu-siirde graafik kogu katsekehale rakendatava jõu juures

4.2.1 Katsekeha töötamine

Kahe profiili ühendamisel katsekehaks nurkraudade abil mõjutas juba enne katsetamist profiilide seinu. Nagu eelpool kirjeldatud hakkas profiili sein lainetama lainesügavusega 1-2 mm. Sellist seinä käitumist enne katsetamist oli keeruline ära hoida, kuna perforering vähendab seinä jäikust ning iga väiksemgi pinge konstruktsioonis mõjutab profiili. Esialgne lainesügavus sõltus nurkraudade sammust, milleks oli 300 mm.

Flantsil ei esinenud lokaalset mõlkumist, mis oleks eeldanud flantsi servapunktide paigale jäämist ning mõlke tekkimist ainult flantsi pealispinda. Flantsi deformeerumisel liikus kaasa ka flantsi jäikuripoolne serv, mis näitab, et flantsi deformeerumisel oli tegemist moondumisest tingitud stabiilsuse kaotusega. Joonis 4.2 kuni Joonis 4.9 kirjeldavad mõlema profiili flantsi lainesügavuse muutusi koormuse suurenedes, kust on näha, et flantsi jäikuripoolne serv koos jäikuriga liikus flantsi deformeerumisega kaasa ning koormuse kasvades kasvas ka lainesügavus. Joonistelt tundub nagu parempoolne flants oleks palju väiksema lainesügavusega kui vasakpoolne flants, kuid erinevate kaameranurkade tõttu on tekkinud selline efekt. Tegelikuses olid mõlema profiili lainesügavused suhteliselt võrdsed. Lainesügavus flantsi deformeerumisel oli seotud nurkraudade sammuga, milleks oli 300 mm. Konstantse momendi alast väljapoole jäävad flantsi osad deformeerusid mitmeid kordi väiksema lainesügavusega kui konstantse momendi alas survetsoonis asuv flants. Sellest käitumisest võib järeldada, et momendi suurenemine ja sellest sõltuvalt ka pinge suurenemine katsekehal mõjutab flantsi deformeerumist. Mida suuremaks kasvab pinge flantsis, seda suuremaks muutub lainesügavus.

Seinal esines enne katset alghälve, mis visuaalselt jälgitavaks muutus pärast 15 kN suurust koormust katsekehale, lainesügavuseks oli 500 mm. Seinä lainetus oma lainesügavuses esines kogu katsetava profiili pikkuses ühtlaselt. Koormuse suurenedes jäi lainesügavus samaks, kuid muutuma hakkas lainesügavus. Joonis 4.2 kuni Joonis 4.9 kirjeldavad seinä deformatsiooni muutust koormuse suurenedes ning joonistelt on näha lainesügavuse kasvamist koormuse kasvades. Seinä deformeerus kohaliku mõlkumise tagajärjel.

Joonis 4.10 kuni Joonis 4.12 kirjeldavad seinä lainesügavust koormuse 27,9 kN juures kogu katsekehale. Joonistelt on vaadeldav ühtlane lainesügavus, milleks oli 500 mm ning lainesügavuse suurus on paremini eristatav.



Joonis 4.2 Vasakpoolne profiil kui katsekehal oli 26,9 kN



Joonis 4.3 Parempoolne profiil kui koormus 26,9 kN



Joonis 4.4 Vasakpoolne profiil 27,9 kN koormuse juures



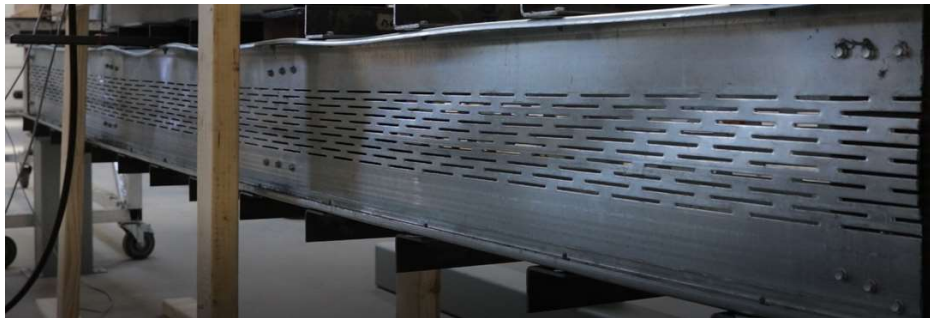
Joonis 4.5 Parempoolne profiil kui koormus on 27,9 kN



Joonis 4.6 Vasakpoolne profiil 30 kN koormuse juures



Joonis 4.7 Parempoolne profiil kui koormus on 30 kN



Joonis 4.8 Vasakpoolne profiil hetk enne purunemist



Joonis 4.9 Parempoolne profiil hetk enne purunemist



Joonis 4.10 Seinä välja mõlkumise lainesügavus



Joonis 4.11 Seinä välja mõlkumise lainesügavus



Joonis 4.12 Seinä välja mõlkumise lainesügavus

4.2.2 Kandeõime kaotus

Parempoolsel ja vasakpoolsel profiil toimus kandeõime kaotus samaaegselt. Parempoolne profiil kaotas oma kandeõime kui seinä ülemine osa ja samas piirkonnas asuv flants deformeerusid samaaegselt. Mõlke tekkimine seinä ja flantsi deformeerumine liigitub moonumisest tingitud

stabiilsuse kaotuse alla. Kohaliku mõlke asukohta on kirjeldatud Joonis 4.14, kus on ära märgistatud kohaliku mõlke tekkimise asukoht parempoolsel profiilil.



Joonis 4.13 Parempoolse profiili kandeõime kaotus



Joonis 4.14 Parempoolse profiili kandeõime kaotus märgistusega

Joonis 4.15 Parempoolne profiil kaotatud kandeõimega kirjeldabki seina ülemise osa mõlkumist profiili raskuskeskme poole ning flantsi välja mõlkumist ristlõike gabariitidest väljapoole.



Joonis 4.15 Parempoolne profiil kaotatud kandeõimega

Vasakpoolsel profiilil toimus kandevõime kaotus sarnaselt parempoolse profiiliga, et seinä ülemisse osasse tekkis üksik lokaalne mõlk ja samaaegselt moondus ka flants. Suurim erinevus kahe profiili kandevõime kaotuse puhul oli see, et vasakpoolse profiili ülemine seinäosa mõlkus välja teisele poole kui parempoolse profiilil. Vasakpoolse profiilil tekkis mõlge ristlõike gabariitidest väljapoole, ristlõike väändekeskme poole. Tänu sellisele seinä mõlkumisele mõlkus flants ristlõike raskuskeskme poole. Samuti nagu parempoolse profiil oli kandevõime kaotuseks moondumisest tingitud stabiilsuse kaotus oli ka vasakpoolse profiilil.



Joonis 4.16 Vasakpoolse profiil kandevõime kaotus



Joonis 4.17 Vasakpoolne profiil kaotatud kandevõimega

Mõlemal profiilil toimus kandevõime kaotus tänu seina ülemises osas ja flantsil tekkinud lokaalsele mõlkumisele, mis toimus mõlemal profiil y-telje positiivses suunas. Esmaste eelduste kohaselt oleks ennustanud, et kui profiilid asetsevad üksteise suhtes peegelpildis, siis toimub ka purunemine peegelpildis. Samas suunas mõlkumist võis tekitada natukene ebaühtlane koormustala asetus, mis katse hetkel ei ole tuvastatav.

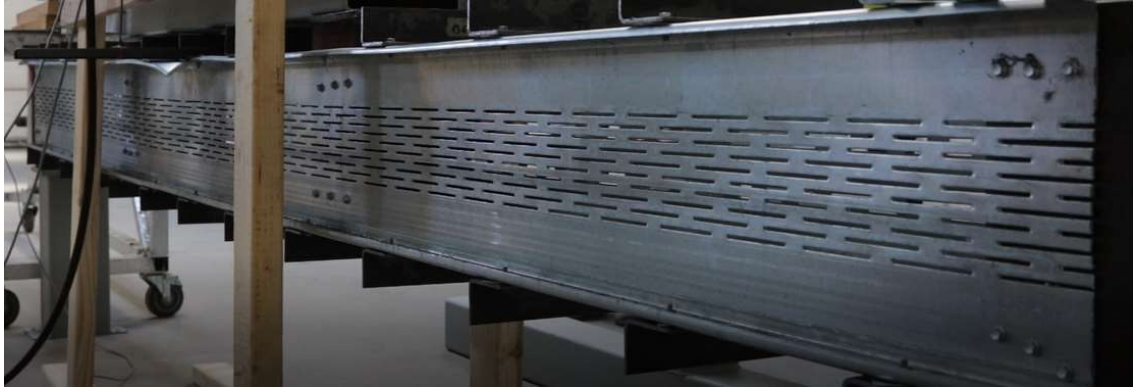
Kandevõime kaotusest järeldubki, et külm-vormitud profiil suudab vastu võtta ühtlaselt tekkinud deformatsiooni, nagu ühtlaselt tekkiv ning koormuse suurenedes süvenev seina ja flantsi deformatsioon. Kui koormuse suurenedes ja seeläbi pingete kasvades profiil ei suuda tekkivaid pingeid ühtlaselt jagada toimubki kandevõime kaotus.

4.2.3 Pärast koormuse eemaldamist

Pärast koormuse eemaldamist vähenes läbipaine 50,7% ning mööda seinapinda tekkiva laine lainesügavus vähenes märgatavalt. Joonis 4.18 ja Joonis 4.19 kirjeldavad mõlemat katsetavat profiili pärast koormuse eemaldamist. Mõlemal profiili purunemist põhjustanud mõlkumine oma algset vormi ei taastanud, millest võib järeldada, et antud punktis materjal jõudis oma plastsesse olekusse. Katsekeha käitumisest pärast koormuse eemaldamist võib järeldada, et enne purunemist töötas profiil elastses ja poolelastses piirkonnas ning profiili ühes punktis plastsesse piirkonda jõudes toimus purunemine.



Joonis 4.18 Parempoolne profiil pärast koormuse eemaldamist



Joonis 4.19 Vasakpoolne profiil pärast koormuse eemaldamist

4.2.4 Muudatused järgnevatele katsetele

Katsekäigus selgunud kitsaskohad on antud peatükis välja toodud ja antud soovitusi katsekonstruktsiooni parendamiseks järgmisteks katseteks.

Tugede ja katsekeha servade vahel koormuse ülekande kohaks olid keermelatid, mis juhtisid koormust läbi ühe kindla punkt. Samasugused keermelatid oleksid pidanud olema ka koormust jagava tala ja koormusdetailide vahel, et koormuse ülekande koht oleks täpselt määratletud olnud.

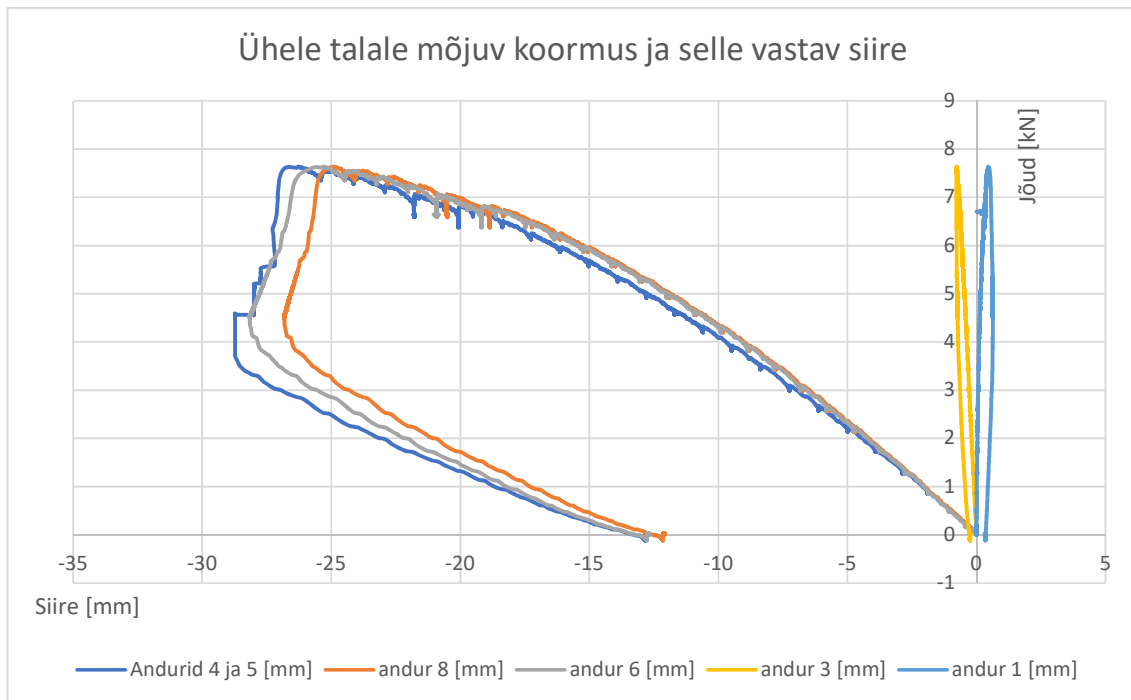
Katsel mõõdeti keskmist läbipainet kahe profiili peale asetatud abipulga abil. Profiili ülemine vöö on surutud ning selle tõttu toimub seal deformeerumine, mis ei pruugi anda tõest läbipainde väärtust. Profiili alumine vöö on aga tõmmatud, mis tähendab, et selles profiili osas deformeerumisi ei toimu. Sellest lähtuvalt oleks võinud läbipainet mõõta profiili alumisest servast, mis oleks andnud täpse läbipainde väärtuse.

4.3 Katseandmete analüüs

Katseandmete analüüsi juures on lähtutud standardis EN 1993-1-3:2006 lisa A antud juhistest ning katsel saadud siirde-jõu graafikutest.

4.3.1 Siirde-jõu graafikute analüüs

Kogu katsekeha siirde-jõu graafik on näidatud Joonis 4.1 Jõu-siirde graafik kogu katsekehale rakendatava jõu juures. Katsekeha koosnes kahest peegelpildis asuvast C-profiilist ning mõlemal profiilil oli kaks koormuspunkti. Ühte koormuspunkti läbiva koormuse leidmiseks on silindril tulev koormus vaja ära jagada 4 koormuspunkti vahel, mis on kahel talal kokku. Edasises katsetulemuste analüüsis vaatlen ühte roovi ja sellel rakendatavat koormust eraldi. Joonis 4.20 kirjeldab kõigi kuue anduri katsetulemusi, mis mõjusid ühele profiilile.

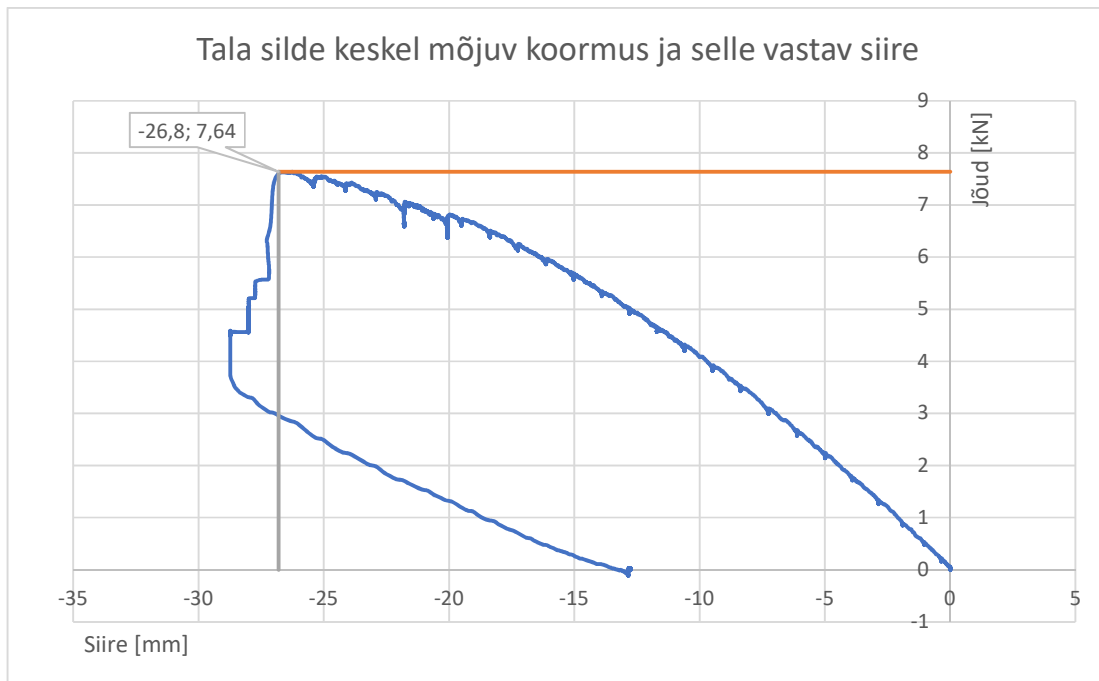


Joonis 4.20 Ühele talale mõjuv koormus ja sellel vastav siires

Andurite, mis asusid tugeudel, siire oli alla 1 mm. Anduril number 1, mis asus liigendtoe peal, maksimaalne siire oli 0,49 mm ning anduril number 3, mis asus jäiga toe peal, oli maksimaalne siire 0,76 mm. Lõpliku läbipainde määramisel tuleb arvestada kahe toe keskmist läbipainet. Toed siirdusid erinevatesse suundadesse ning seega keskmine läbipaine on 0,14 mm.

Andurite 6 ja 8, mis asusid koormust jaotava tala servades, siire sama koormuse juures võrreldes andurite 4 ja 5 keskmise siirdega oli alati väiksem, mis näitab, et siirdeandurid toimusid korrektselt. Andurid 4 ja 5 asusid katsetava tala silde keskel, seega peab antud punktis olema kõige suurem siire. Pärast koormuse eemaldamist käituvad andurid 6 ja 8 sarnase seaduspärasuse järgi, aga andurite 4 ja 5 keskmine tulem ei sarnane andurite 6 ja 8 registreeritud tulemile. Nagu varasemalt välja toodud, siis andurid 4 ja 5 oleksid pidanud katsekeha läbipainet mõõtma katsekeha alt, kus survetsoonis tekkivad deformatsioonid ei mõjuta katsekeha läbipainde tulemust. Toetudes sellele, et andureid 4 ja 5 mõjutas pärast koormuse eemaldamist katsekehal tekkinud deformatsioonid, eeldan, et andurid 6 ja 8 annavad korrektseid tulemusi katsekeha käitumise kohta pärast koormuse eemaldamist ning eeldan, et tala silde keskel käitus katsekeha sama seaduspärasuse kohaselt nagu andurid 6 ja 8 katsekeha käitumist kirjeldavad.

Edaspidises jõu- ja siirdegraafiku analüüsis on graafiku selguse huvides vaadeldud andurite 4 ja 5 keskmist jõu- ja siirdeväärtust.



Joonis 4.21 Tala silde keskel mõjuv koormus ja sellele vastav siire

Joonis 4.21 kirjeldab tala silde keskel mõjuvat koormust ja sellele vastavat siiret. Graafikult on näha, et kandevõime kaotati 7,64 kN juures ning sellel hetkel oli tala siirdeks silde keskel 26,8 mm. Arvestades tugeste siirdest läbipainde korrigeerimise suurust 0,1 mm, siis tala siirdeks silde keskel on 26,7 mm.

Vaadeldakse tala silde keskel mõjuva koormuse ja sellele vastava siirde graafikut, sest see graafik kirjeldab profiili paindejäikust ilma põikjõu mõjuta.

Graafik on mittelineaarne, mille põhjuseks võib olla materjali mittelineaarsus või geomeetriline mittelineaarsus. Arvestades profiili 4ndat ristlõikeklassi ning sellega kaasnevat ebaefektiivset alasid ristlõikes, siis järeldan, et graafiku mittelineaarsuse põhjuseks on geomeetriline mittelineaarsus. Graafikul koormuse ja siirde suhet väljendav punktide kogum kirjeldab profiili paindejäikust. Paindejäikust iseloomustab elastsusmomenti ja inertsimomendi korrutis. Seega ebaefektiivsete alade tekkimisel ristlõikesse hakkas vähenema ka inertsimoment, mis põhjustas ka graafiku mittelineaarsust.

Graafik käitus kokkuvõtlikult mittelineaarsena, kuid mittelineaarsuse moodustasid mitmed lineaarsed lõigud graafikul. Koormamise algusest kuni 6 kN suuruse koormuseni käitub graafik mitmete lineaarsete lõikudena, millest võib järeldada, et profiili mõlkumine toimus erinevate koormusetappide juures. Ristlõike mõlkumine toimus koormuste juures, kus toimus lineaarse joone nurga muutus graafikul.

Pärast 7 kN suuruse koormuse saavutamist käitub graafik täielikult mittelineaarselt, kus iga koormuskäigu juures toimuvad profiili deformatsioonid, mida toetab ka koormamisel suuremate koormuste juures pidev ja kiire deformatsioonide süvenemine.

Pärast katsekehalt koormuse eemaldamist vähenes profiili läbipaine 50,7%.

4.3.2 Arvutusliku koormuse määramine

Standardis EN 1993-1-3:2006 lisas 6 peatükis A.6.3.3 Normsuuruste leidmine väikeste katsete arvu puhul on öeldud, et kui tehakse ainult üks katse, siis sellele katsele vastav normatiivne kandevõime arvutatakse valemiga (2.54).

$$R_k = 0,9 * \eta_k * R_{adj} \quad (2.54)$$

Kus η_k suurus sõltub purunemisviisist. Antud katse juures oli purunemisviisiks kohalik stabiilsus, seega $\eta_k = 0,9$.

$$R_{adj,i} = R_{obs,i} / \mu_R \quad (2.55)$$

kus $R_{obs,i}$ – tegelik mõõdetud katsetulemus, kN

μ_R – kandevõime parandustegur, leitakse valemiga (2.56)

$$\mu_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \left(\frac{t_{obs,cor}}{t_{cor}} \right)^\beta \quad (2.56)$$

Astmenäitaja α valemis (2.56) määratakse valemitega (2.57) või (2.58)

$$- \text{ Kui } f_{yb,obs} \leq f_{yb}, \text{ siis } \alpha = 0 \quad (2.57)$$

$$- \text{ Kui } f_{yb,obs} > f_{yb}, \text{ siis } \alpha = 1 \quad (2.58)$$

Astmenäitaja β valemis (2.56) määratakse valemitega (2.59) või (2.60)

$$- \text{ Kui } t_{obs,cor} \leq t_{cor}, \text{ siis } \beta = 1 \quad (2.59)$$

$$- \text{ Kui } t_{obs,cor} > t_{cor}, \text{ siis varraste, konstruktsioonide ja konstruktsiooni elementide katsete puhul:} \quad (2.60)$$

$$\text{Kui } b_p/t \leq (b_p/t)_{lim}, \text{ siis } \beta = 1 \quad (2.61)$$

$$\text{Kui } b_p/t > 1,5(b_p/t)_{lim}, \text{ siis } \beta = 2 \quad (2.62)$$

Kui $(b_p/t)_{lim} < b_p/t < 1,5(b_p/t)_{lim}$, siis β leitakse lineaarse interpolatsiooni abil,(2.59)

$$\text{Kus } (b_p/t)_{lim} = 0,64 \sqrt{\frac{Ek_\sigma}{f_{yb}}} * \sqrt{\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} = 19,1\varepsilon \sqrt{k_\sigma} * \sqrt{\frac{f_{yb}/\gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} \quad (2.63)$$

Peatükis A.6.4 Arvväärtused on öeldud, et kandevõime arvvärtus R_d tuletatakse katseliselt leitud normväärtusest R_k valemiga (2.64).

$$R_d = \eta_{sys} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (2.64)$$

kus γ_M – kandevõime osavarutegur

η_{sys} – teisendustegur, mis arvestab katse- ja ekspluatatsioonitingimuste erinevust.

$$\eta_{sys} = 1,0$$

$$\gamma_M = 1,0$$

Saadud kandevõime arvutuslikust väärtusest R_d on võimalik välja arvutada ühele profiilile tekkinud momendi suurus ning saadud momendi väärtuse abil saab leida profiili katselise vastupanumomendi valemiga (2.65).

$$W_y = \frac{M}{f_y} \quad (2.65)$$

Kus M – katsekehal tekkinud arvutusliku momendi väärtus, kNm

4.3.3 Arvutuskäik arvutusliku koormuse määramiseks

$$t_{obs,cor} = 1,5 - 0,04 = 1,46 \text{ mm}$$

$$t_{cor} = 1,5 - 0,04 = 1,46 \text{ mm}$$

$$t_{obs,cor} = 1,46 \leq t_{cor} = 1,46 \text{ siis } \beta = 1$$

$$f_{yb,obs} = 350 \leq f_{yb} = 350, \text{ siis } \alpha = 0$$

$$\mu_R = \left(\frac{350}{350}\right)^0 \left(\frac{1,46}{1,46}\right)^1 = 1$$

$$R_{adj,i} = \frac{7,635}{1} = 7,635 \text{ kN}$$

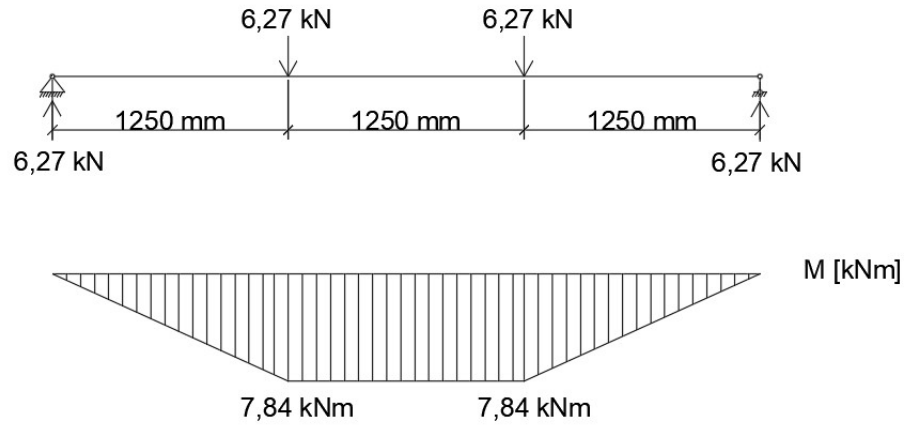
$$R_k = 0,9 * 0,9 * 7,64 = 6,184 \text{ kN}$$

$$R_d = 1,0 \frac{6,184}{1,0} = 6,184 \text{ kN}$$

Arvestada tuleb ka jäikurtala algse koormusega, mis on 0,09 kN ühele punktile.

$$R_d = 6,184 + 0,09 = 6,274 \text{ kN}$$

$$M = 6,27 * 1,25 = 7,84 \text{ kNm}$$



Joonis 4.22 Katselisest koormusest R_d tekkiv moment ühte profiili

$$W_{y,katse} = \frac{7,84 \cdot 10^6}{350} = 22400 \text{ mm}^3$$

5. JÄRELDUSED TEOREETILISEST JA KATSELISEST ANALÜÜSIST

Tabel 5.1 kirjeldab katselise ja arvutusliku vastupanumomendi võrdlust, kus on kirjeldatud ka protsendilist erinevust katselisest arvutuskäigust. Tabelist selgub mitu protsenti on arvutuslikult saadud tulemused katseliste tulemuste suhtes tagavara kasuks.

Tabel 5.1 Katselise ja arvutusliku vastupanumomendi võrdlus

	Esimene arvutusviis	Teine arvutusviis	Katseline analüüs
Vastupanumoment W_y	$W_{y,1} = 18206 \text{ mm}^3$	$W_{y,2} = 18878 \text{ mm}^3$	$W_{y,katse} = 22400 \text{ mm}^3$
%-line erinevus katselisest W_y -st	18,7%	15,7%	-

Esimese ja teise arvutusviisi puhul on katseliselt saadud tulemus vastavalt 18,7% ja 15,7% tagavara kasuks. Katselt saadud tagavara kasuks tulemus on positiivne ning kinnitab, et antud arvutusviisi võib usaldada. Nagu eelnevalt järeldusele jõutud, siis esimene arvutusviis ei ole piisavalt standardile toetuv ning seega ei ole selle arvutusviisi kasutamine soovituslik. Sellest lähtuvalt on lähemalt analüüsitud teise arvutuskäiguga saadud arvutuslikku tulemust ja katselist analüüsi.

Teine arvutuskäik andis tulemuseks, et seina tekib 143 mm pikkune ebaefektiivne ala. Saadud ebaefektiivne ala oli leitud tulenevalt 4-da ristlõikeklassi omadustest ning 4-s ristlõikeklass arvestab kohalikust mõlkumisest tekitatud ebaefektiivsete aladega. Seega arvutuskäiku analüüsides selgub, et seina tekkinud ebaefektiivne ala oli põhjustatud kohalikust mõlkumisest. Sama tulemus selgus ka katsetamise käigus, kus seina survetsoonis olev osa lainetas kohalikust mõlkumisest põhjustatud deformatsioonide tagajärjel.

Teine arvutuskäik andis tulemuseks, et flantsi ristlõikeklass on 3, mis tähendab, et flantsi kohalikust mõlkumisest ebaefektiivseid alasid ei teki. Kontrolli eesmärgil sooritati ebaefektiivse ala arvestamine ning selle tulemusel siiski tekkis flantsi 1,3 mm suurune arvutuslik ebaefektiivne ala, kuid 1,3 mm pikkune ebaefektiivne ala on piisavalt väikene, et seda visuaalselt märgata või et see põhjustaks märgatavaid kohalikke mõlkeid flantsis. Seda tulemust kinnitas ka katse, kus katsetamisel flantsil kohalike mõlkeid ei esinenud.

Flantsi ja jäikuri efektiivse ristlõike pindala kalkuleerimisel võeti arvesse jäikuri vedrujäikus ning selle abil määrati moondumis-stabiilsuskao vähendustegur χ_d . Moondumis-stabiilsuskao vähendustegur võtab arvesse moondumisest tekkinud stabiilsuse kaotuse flantsil. Teise arvutuskäigu puhul esialgne materjali paksus 1,42 mm vähenes vähendusteguri χ_d tõttu 0,51 mm- ni, mis tõestab, et arvutuskäigus näidati, et flantsil toimub moondumisest tingitud stabiilsuse

kaotus. Katsetatud profiilidel mõlkus flants samuti moondumisest põhjustatud stabiilsuse kaotuse tõttu.

Eelnevalt tehtud analüüsist võib järeldada, et katsetamisel käitus profiil sarnaselt arvutuskäiguga, kuid arvutuskäigu põhjal ei ole võimalik määrata koormusi, mis põhjustavad kohalikku mõlkumist ja moondumisest tingitud stabiilsuse kaotust.

Arvutuslik koormus on 15,7% tagavara kasuks võrreldes katselise koormusega. Arvestades külmpainutatud profiilide keerukat käitumist koormamisel on tagavara piisava suurusega.

KOKKUVÕTE

Külmpanutatud perforeeritud seinaga profiile kasutatakse profiili soojuslike omaduste parendamiseks. Perforeering seinas pikendab soojuse liikumisteed, mis muudab omakorda profiili soojapidavamaks kui samade ristlõike mõõtmetega täisseinalise profiili. Uurimistöös vaadeldakse profiili töötamist painutatud olukorras ning selgitatakse välja, kuidas teoreetiliselt leida profiili tugevusparameetrid, mis oleksid kooskõlas kehtiva standardiga EN1993-1-3. Teoreetilisi arvutustulemusi võrreldakse katseliselt saadud tulemustega, et kontrollida arvutuskäigu õigsust.

Töös käsitletakse kahte erinevat arvutusviisi. Esimese arvutusviisi puhul on tugevusparameetrite arvutamisel arvestamata jäetud perforeeringuga seiniosa ning kogu profiili on vaadeldud kui jäigastamata elementidega ristlõiget.

Teise arvutusviisi puhul on tõmbetsooni jäävat perforeeritud ristlõikeosa arvesse võetud ning arvestatud on ka jääkuri jäigastava mõjuga. Jääkuri ja flantsi efektiivpindala on vähendatud läbi moonumis-stabiilsuskao vähendusteguri, mis on leitud jääkuri vedrujäikuse kaudu. Jääkuri vedrujäikus on arvatud läbi lõplike elementide mudeli, sest standardis puuduvad eeskirjad, kuidas arvestada perforeeringuga seinas.

Teise arvutuskäigu tulemusi on võrreldud ka sama ristlõikega täisseinalise profiili tugevusparameetritega. Antud võrdluse näitas, et perforeeritud seinaga profiili vastupanumoment oli 11,6% väiksem kui täisseinalise profiili vastupanumoment. Võrdluse tulemusel saab kinnitada, et perforeeringuga on oluline arvestada seinas.

Katselise analüüsi üheks eesmärgiks oli võrrelda teoreetilisi tulemusi katselt saadud tulemustega, et kontrollida arvutuskäikude korrektsust ning teiseks eesmärgiks oli kaardistada katsekehal ilmnevad deformatsioonid ja nende põhjused.

Teoreetiliste ja katseliste tulemuste analüüsis selgus, et standardiga on kooskõlas rohkem teine arvutusviis ning teise arvutusviisiga saadud tulemus oli katselise tulemusega võrreldes tagavara kasuks 15,7%. Teise arvutusviisiga ennustatud deformatsioonid esinesid ka katselisel profiilil, kuid arvutuskäiguga ei ole võimalik ennustada koormusi, mis tekitavad deformatsioone.

Lõputöö algul püstitatud eesmärk sai täidetud ning välja selgitati kahest arvutusviisist sobilikum variant külmpanutatud perforeeritud seinaga profiilide tugevusparameetrite arvutamiseks, milleks oli teine arvutusviis.

Lõputöös määrati ühe kindla profiili tugevusparameetrid ning kontrolliti neid katselise meetodiga, kuid laiapõhjalisemate järelduste tegemiseks, kui palju mõjutab perforeering täisseinalise profiili tugevusparameetreid tuleks uurimise alla võtta suurem hulk profiile ja katsekehasid.

SUMMARY

Cold-formed profiles with perforated webs are used to improve the thermal properties of the profile. Perforation in the web extends the heat paths in the web, which makes the profile more heat-resistant than the profile with no perforation in the web. Current research analyses the profile under bending and the main aim of the research is to find out the most suitable calculation form, which is in accordance with current standard EN1993-1-3. Theoretical results are compared with experimental results to verify the accuracy of the calculation.

The master thesis examines two different methods of calculation. In the first calculation the perforated part of the web is not taken into account in the calculations and the entire profile is viewed as a cross-section which consists of non-rigid elements.

In the second calculation, the perforated part of the cross-section is taken into account if it is in the tension zone and the stiffening effect of the stiffeners is also taken into account. The effective area of the stiffener and flange is reduced through the deformation-stability loss reduction factor, which is found through stiffness of the stiffener. The stiffness of the stiffener has been calculated through the FEM-model, because there are no prescriptions in the standard how to consider with the perforated web.

The calculation results are compared with the same profile but with no perforation in the web. Comparison showed that resistance moment of the profile with perforated web is 11,6% lower than the resistance moment of the profile with no perforation in the web. As a result of the comparison, it can be confirmed that perforation in the web is important to consider in the calculations.

One of the aims of the experimental approach was to compare the theoretical calculation results with the results obtained from the experiment to check the accuracy of the calculations and the second aim was to examine deformations of the profile.

Analysis of the theoretical and experimental results indicated that the second calculation method is more consistent with the standard and the result obtained with the second calculation method was 15,7% in favor of the experimental result. The deformations predicted by the second calculation method appeared in the experimental profile, but it is not possible to predict the loads that cause deformation with the calculation process.

The main aim which was set at the beginning of the master thesis was to find out the best option from the two calculation methods to calculate the strength parameters of the cold-formed profiles with perforated webs, which was the second calculation method.

In the master thesis the strength parameters of one particular profile were determined and tested with experimental method, but for general conclusion to know how much perforation affects the cold-formed profile there should be done more research.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Degtyareva N.V., Review of experimental studies of cold-formed steel channels with slotted webs under bending. – *Procedia Engineering*, 2017, 206, 875-880. ScienceDirect (26.03.2019)
- [2] Limnell, A., A cold-formed steel element as a roof of a power plant in arctic climate: magistriröö. Aalto: Aalto university, Aalto, 2015.
- [3] Moen, C. D., Schafer, B. W. Direct strength desing of cold-formed steel members with perforations. Baltimore: The Johns Hopkins Univeristy, 2008.
- [4] Yu, C., Schafer, B.W. Distortional buckling of cold-formed steel members in bending. Baltimore, Maryland: American Iron and Steel Institute, 2005.
- [5] Haidarali, M. R., Local and distortional buckling behaviour of cold-formed steel Z section beams:doctor of philosophy. London:Imperial College London, London, 2011
- [6] Dubina, D., Ungureanu V., Landolfo R. Desing of cold-formed steel structures. 1st ed. Euroopa: ECCS – European Convention for constructional steelwork, 2012.
- [7] Chu, X., Ye, Z., Kettle R.,Li L. Buckling behaviour of cold-formed channel sections Under uniformly distributed loads. – *Thin walled structures*, 2005, 43, 531-542. Sciencedirect
- [8] Young, B., Hancock, G.J. Web crippling tests of high strength cold-formed channels. – *Advaces in Steel Structures*, 1999, 1, 357-366. Sciencedirect
- [9] Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-3: Üldreeglid ja lisareeglid külmvormitud profiilidele ja profiilplekile. Eesti standard: EVS-EN 1993-1-3:2006+NA:2008.
- [10]Eurokoodeks 3: Teraskonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-5: Tasapinnalised konstruksioonielemendid. Eesti standard: EVS-EN 1993-1-5:2006+A1:2017+NA:2017
- [11]Pidevas kuumsukelprotsessis pinnatud leht- ja lintteras – Mõõtme- ja kujutolerantsid. Eesti standard: EVS-EN 10143:2006
- [12]<https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem> , 11.05.2019
- [13]Kesti J., Local and distortional buckling of perforated steel studs. Espoo: Otamedia Oy, 2000
- [14]Kesti J., Study of perforated steel wall studs. – *Rakenteiden mekaniikka*, 1998, 31, 3-14.
- [15]Behrooz H. Soroori Rad, Experiments on cold-formed steel beams with holes: magistriröö. Virginia: Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2010.
- [16] <https://www.enerpac.com/en-us/general-purpose-hydraulic-cylinders/general-purpose-cylinder/RC506>,18.05.2019
- [17]Anchor Fastening Tehnologu Manual HILTI. Liechtenstein, 2014.
- [18]<https://www.hbm.com/en/3059/wa-t-inductive-displacement-transducer-probe/> 18.05.2019

[19]<https://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal-amplifier/>
18.05.2019

[20]<https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/> 18.05.2019

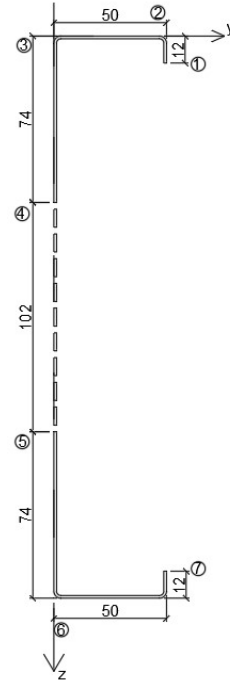
LISAD

LISA 1. ESIMENE ARVUTUSKÄIK

Perforeeritud osa on efektiivse ristlõike arvestamisel täielikult arvestamata jäetud.

L1.1 Ristlõike parameetrid

	Tähis	Nimiväärtus	
Materjali paksus	$t_{nom} =$	1,5	mm
Vähendustegur		0,8	
Materjali tegelik paksus	$t =$	1,2	mm
Vöö laius	$b =$	50	mm
Ristlõike kõrgus	$h =$	250	mm
Jäikuri kõrgus	$c =$	12	mm
Perforeeringu laius	$b_{termo} =$	102	mm
Sisemine ümardusraadius	$r =$	2	mm



L1.1.1 Paksus ja paksustolerantsid

Paksustolerantsidega arvutamisel kasutati paksuse vähendustegurit 0,8.

$$t = 0,8 * t_{nom}$$

$$t = 0,8 * 1,5 = 1,2 \text{ mm}$$

L1.1.2 Nurkade ümarduste mõju

$$r \leq 5t \quad 2 \leq 5 * 1,2 = 6,0 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud!

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad g_r = 2,6 \left(\tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) - \sin\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \right) = 0,762 \text{ mm}$$

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad r_m = 2 + \frac{1,2}{2} = 2,6 \text{ mm}$$

$$b_{p,sein} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,sein} = 250 - 1,2 - 2 * 0,762 = 247,28 \text{ mm}$$

$$b_{p,vöö} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,vöö} = 50 - 1,2 - 2 * 0,762 = 47,28 \text{ mm}$$

$$b_{p,jäikur} = b - \frac{t}{2} - g_r \quad b_{p,jäikur} = 12 - \frac{1,2}{2} - 0,762 = 10,64 \text{ mm}$$

$$r \leq 0,10b_{p,vöö}$$

$$2 \leq 0,10 * 47,28 = 4,73$$

Tingimus on täidetud!

Seega ei pea arvestama ristlõike kandevõime arvutamisel nurkade ümarduse mõju.

L1.1.3 Geomeetrilised proportsioonid

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad \frac{50}{1,42} = 35,21 \leq 60$$

$$\frac{c}{t} \leq 50 \quad \frac{12}{1,42} = 8,45 \leq 50$$

Tingimused on täidetud!

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

$$45^\circ \leq \phi = 90 \leq 90^\circ$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 * \sin \phi$$

$$\frac{250}{1,42} = 176,06 \leq 500 * \sin 90 = 500$$

Tingimused on täidetud!

$$0,2 \leq \frac{12}{50} = 0,24 \leq 0,6$$

Tingimus on täidetud!

L1.2 Jäigastamata tasapinnalised elemendid

L1.2.1 Netoristolõike parameetrid

$$A_1 = b_p * t \quad A_1 = 10,64 * 1,2 = 12,77 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b_p * t \quad A_2 = 47,28 * 1,2 = 56,74 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = t * \left(\frac{h}{2} - h_{perf} - g_r\right) \quad A_3 = 1,2 * (74 - 0,762) = 87,89 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = t * \left(\frac{h}{2} - h_{perf} - g_r\right) \quad A_5 = 1,2 * (74 - 0,762) = 87,89 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = b_p * t \quad A_6 = 47,28 * 1,2 = 56,74 \text{ mm}^2$$

$$A_6 = b_p * t \quad A_7 = 10,64 * 1,2 = 12,77 \text{ mm}^2$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{tot} = 12,77 + 56,74 + 87,89 + 87,89 + 56,74 + 12,77 = 314,8 \text{ mm}^2$$

Raskuskeskme arvutamine

$$y_1 = b - \frac{t}{2} \quad y_1 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{b}{2} \quad y_2 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_3 = \frac{t}{2} \quad y_3 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_4 = \frac{t}{2} \quad y_4 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_5 = \frac{b}{2} \quad y_5 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_6 = b - \frac{t}{2} \quad y_6 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_0 = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3 + A_4 * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{12,77 * 49,25 + 56,74 * 25 + 87,89 * 0,75 + 87,89 * 0,75 + 56,74 * 25 + 12,77 * 49,25}{314,8} = 13,43 \text{ mm}$$

$$z_1 = \frac{c}{2} \quad z_1 = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$z_2 = \frac{t}{2} \quad z_2 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$z_3 = \frac{h - h_{perf}}{4} \quad z_3 = \frac{250 - 1}{4} = 37 \text{ mm}$$

$$z_4 = h - \frac{h-h_{perf}}{4} \quad z_4 = 250 - \frac{250-102}{4} = 213 \text{ mm}$$

$$z_5 = h - \frac{t}{2} \quad z_5 = 250 - \frac{1,5}{2} = 249,25 \text{ mm}$$

$$z_6 = h - \frac{c}{2} \quad z_6 = 250 - \frac{12}{2} = 244 \text{ mm}$$

$$z_0 = \frac{A_1*z_1 + A_2*z_2 + A_3*z_3 + A_4*z_4 + A_5*z_5 + A_6*z_6}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{12,77*6 + 56,74*0,75 + 87,89*37 + 8,89*213 + 56,74*249,25 + 1,77*244}{314,8} = 125 \text{ mm}$$

L1.2.2 Ristlõike töötamine painde olukorras tugevama tasapinna suhtes

Kahest otsast toetatud vöö

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{47,28}{1,2} = 39,4$$

RK		
1	33ε	27,06
2	38ε	31,16
3	42ε	34,44

Seega C-profili vöö kuulub 4-sse ristlõikeklassi.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = 1$$

$$\bar{b} = 47,28 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = \rho * \bar{b}$$

$$b_{e1} = 0,5 * b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,5 * b_{eff}$$

Mõlktegur $k_\sigma = 4,0$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{47,28/1,2}{28,4 * 0,82 * \sqrt{4}} = 0,846$$

$$\rho = \frac{0,846 - 0,055(3 + 1)}{0,846^2} = 0,875$$

$$b_{eff} = 0,875 * 47,35 = 41,43 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,5 * 41,43 = 20,715 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5 * 41,43 = 20,715 \text{ mm}$$

$$b_{auk} = 47,35 - 41,43 = 5,92 \text{ mm}$$

Konsoole surutud seinosa ristlõikeklassi määramine

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$c = \frac{b-b_{termo}}{2} - g_r \quad c = \frac{250-102}{2} - 0,762 = 73,24 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{73,24}{1,2} = 61,03$$

RK		
1	9ε	7,38
2	10ε	8,20
3	14ε	11,48

Seega C-profiili sein kuulub 4-sse ristlõikeklassi.

1. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingajaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst } (250-102/2)= 74 \text{ mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2}-b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2}-74}{\frac{250}{2}} = 142,8 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{142,8}{350} = 0,408$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi+0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,408+0,34} = 0,773$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{73,24/1,2}{28,4*0,82*\sqrt{0,773}} = 2,981$$

$$\rho = \frac{2,981-0,188}{2,981^2} = 0,314$$

C-profiili sein efektiivlaidus paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,314 * 73,24 = 23,0 \text{ mm}$$

2. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst 23,0 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 2}{\frac{250}{2}} = 285,6 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{285,6}{350} = 0,816$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,816 + 0,34} = 0,5$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{23,0/1,2}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,5}} = 1,16$$

$$\rho = \frac{1,16 - 0,188}{1,16^2} = 0,722$$

C-profiili seina efektiivlaius paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,722 * 23,0 = 16,61 \text{ mm}$$

3. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst 16,61 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 16,61}{\frac{250}{2}} = 303,49 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{303,49}{350} = 0,867$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,867 + 0,34} = 0,479$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{16,61/1,2}{28,4*0,82*\sqrt{0,479}} = 0,859$$

$$\rho = \frac{0,859 - 0,188}{0,859^2} = 0,909$$

C-profiili seinä efektiivlause paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,909 * 16,61 = 15,10 \text{ mm}$$

4. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst } 15,10 \text{ mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 15,10}{\frac{250}{2}} = 307,72 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{307,72}{350} = 0,879$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,879 + 0,34} = 0,474$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{15,10/1,2}{28,4*0,82*\sqrt{0,474}} = 0,785$$

$$\rho = \frac{0,785 - 0,188}{0,785^2} = 0,969$$

C-profiili seinä efektiivlause paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,969 * 15,10 = 14,63 \text{ mm}$$

5. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst 14,63 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 14,63}{\frac{250}{2}} = 309,0 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{309,0}{350} = 0,883$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,883 + 0,34} = 0,473$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{14,63/1,2}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,473}} = 0,761$$

$$\rho = \frac{0,761 - 0,188}{0,761^2} = 0,989$$

C-profiili seina efektiivlaius paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,989 * 14,63 = 14,47 \text{ mm}$$

6. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst 14,47 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 14,47}{\frac{250}{2}} = 309,5 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{309,5}{350} = 0,884$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,884 + 0,34} = 0,472$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{14,47/1,2}{28,4*0,82*\sqrt{0,472}} = 0,754$$

$$\rho = \frac{0,754 - 0,188}{0,754^2} = 0,996$$

C-profiili seinä efektiivlause paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,996 * 14,47 = 14,41 \text{ mm}$$

7. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst } 14,41 \text{ mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 14,41}{\frac{250}{2}} = 309,7 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{309,7}{350} = 0,885$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,885 + 0,34} = 0,472$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{14,41/1,2}{28,4*0,82*\sqrt{0,472}} = 0,751$$

$$\rho = \frac{0,751 - 0,188}{0,751^2} = 0,998$$

C-profiili seinä efektiivlause paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 0,998 * 14,41 = 14,38 \text{ mm}$$

8. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Vööst 14,38 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 14,38}{\frac{250}{2}} = 309,7 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{309,7}{350} = 0,885$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,885 + 0,34} = 0,472$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{14,38/1,2}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,472}} = 0,749$$

$$\rho = \frac{0,749 - 0,188}{0,749^2} = 1,0$$

C-profiili seina efektiivlaius paindel tugevamas tasapinnas $b_{eff} = \rho * b_{p,h}$

$$b_{eff} = 1,0 * 14,38 = 14,38 \text{ mm}$$

Seega lõplik C-profiili seina efektiivlaius paindel tugevamas tasapinnas on $b_{eff} = 14,38 \text{ mm}$

Konsoolse surutud jäikuri ristlõikeklassi määramine

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \epsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{10,64}{1,2} = 8,87$$

RK		
1	9ε	7,38
2	10ε	8,20
3	14ε	11,48

Seega C-profiili jäikur kuulub 3-sse ristlõikeklassi ning jäikurisse ebaefektiivset ala ei teki.

C-profiili efektiivpindala painde korral, kaasatöötavate ristlõikeosade summana

$$A_{eff} = [2 * b_{jäikur} + b_{vöö,1} + b_{vöö,2} + b_{sein,h1} + b_{sein,h2}]t$$

$$A_{eff} = [2 * 10,64 + 47,28 + 41,43 + 14,38 + 73,24] * 1,2 = 237,13 \text{ mm}^2$$

C-profiili painutatud sein ebaefektiivsete osade laius

$$b = 247,28 - 73,24 - 14,38 = 159,66 \text{ mm}$$

L1.3 Efektiivristlõike ristlõike parameetrid

$$A_1 = b_p * t \quad A_1 = 10,64 * 1,2 = 12,77 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.1} = b_p * t \quad A_{2.1} = 20,715 * 1,2 = 24,858 \text{ mm}^2$$

$$A_{2.2} = b_p * t \quad A_{2.2} = 20,715 * 1,2 = 24,858 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = t * b_h \quad A_3 = 1,2 * 14,38 = 17,26 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = t * \left(\frac{h}{2} - h_{perf} - g_r \right) \quad A_5 = 1,2 * (74 - 0,762) = 87,89 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = b_p * t \quad A_6 = 47,28 * 1,2 = 56,74 \text{ mm}^2$$

$$A_6 = b_p * t \quad A_2 = 10,64 * 1,2 = 12,77 \text{ mm}^2$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{tot} = 12,77 + 24,858 + 24,858 + 17,26 + 87,89 + 56,74 + 12,77 = 237,13 \text{ mm}^2$$

Raskuskeskme arvutamise

$$y_1 = b - \frac{t}{2} \quad y_1 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{b}{2} \quad y_2 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_3 = \frac{t}{2} \quad y_3 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_4 = \frac{t}{2} \quad y_4 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_5 = \frac{b}{2} \quad y_5 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_6 = b - \frac{t}{2} \quad y_6 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_0 = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3 + A_4 * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{12,77 * 49,25 + 24,858 * 25 + 24,858 * 0,75 + 17,26 * 0,75 + 87,89 * 0,75 + 56,74 * 25 + 12,77 * 49,25}{237,13} = 16,86 \text{ mm}$$

$$z_1 = \frac{c}{2} \quad z_1 = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$z_2 = \frac{t}{2} \quad z_2 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$z_3 = \frac{h_{3,eff} + g_r}{2} \quad z_3 = \frac{14,38 + 0,762}{2} = 7,57 \text{ mm}$$

$$z_4 = h - \frac{h-h_{perf}}{4} \quad z_4 = 250 - \frac{250-102}{4} = 213 \text{ mm}$$

$$z_5 = h - \frac{t}{2} \quad z_5 = 250 - \frac{1,5}{2} = 249,25 \text{ mm}$$

$$z_6 = h - \frac{c}{2} \quad z_6 = 250 - \frac{12}{2} = 244 \text{ mm}$$

$$z_0 = \frac{A_1*z_1 + A_2*z_2 + A_3*z_3 + A_4*z_4 + A_5*z_5 + A_6*z_6}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{12,77*6 + 49,72*0,75 + 17,26*7,57 + 8,89*213 + 1,74*249,25 + 1,77*244}{237,13} = 152,75 \text{ mm}$$

$$I_y = \sum_n^i \frac{h_i^3 * b_i}{12} + b_i h_i * (z_{c0} - z_i)^2$$

$$I_y = \left[\frac{10,5^3 * 0,441}{12} + 10,5 * 0,441 * (159,78 - 6)^2 \right] + \left[\frac{0,441^3 * 0,441}{12} + \frac{1,42^3 * 22,84}{12} + 42,8 * (159,78 - 0,75)^2 \right] + \left[\frac{24,96^3 * 1,42}{12} + 24,96 * 1,42 * (159,78 - 13,23)^2 \right] + \left[\frac{5,11^3 * 1,42}{12} + 5,11 * 1,42 * (159,78 - 167,89)^2 \right] + \left[\frac{73,2^3 * 1,42}{12} + 73,2 * 1,42 * (159,78 - 213)^2 \right] + \left[\frac{1,42^3 * 46,99}{12} + 1,42 * 46,99 * (159,78 - 249,25)^2 \right] + [114,55 + 13,67 * (159,78 - 244)^2] = 2780825 \text{ mm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z_{c0}}$$

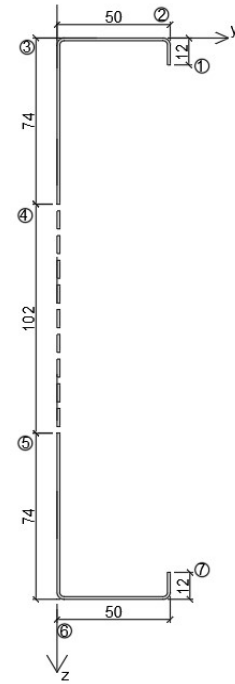
$$W_y = \frac{2780825}{152,75} = 18205,35 \text{ mm}^3$$

LISA 2. TEINE ARVUTUSKÄIK

Perforeeritud osa on efektiivse ristlõike arvestamisel arvestatud ning jäikuri vedrujäikus on leitud profiili modelleerimisel lõplike elementide arvutusprogrammis RFEM.

L2.1 Ristlõike parameetrid

	Tähis	Nimiväärtus	
Materjali paksus	$t_{nom} =$	1,5	mm
Materjali tegelik paksus	$t =$	1,42	mm
Vöö laius	$b =$	50	mm
Ristlõike kõrgus	$h =$	250	mm
Jäikuri kõrgus	$c =$	12	mm
Perforeeringu laius	$b_{termo} =$	102	mm
Sisemine ümardusraadius	$r =$	2	mm



L2.1.1 Paksus ja paksustolerantsid

$$t = t_{cor} \text{ kui } tol \leq 5\%$$

$$t = t_{cor} * \frac{100 - tol}{95} \text{ kui } tol > 5\%$$

$$t_{cor} = t_{nom} - t_{metallic \ coatings}$$

Tol – tolerants miinustolerantsi protsentides (%)

$$tol = \frac{0,11}{1,5} * 100\% = 7,33\% \quad tol > 5\%$$

$$t_{cor} = 1,5 - 0,04 = 1,46 \text{ mm}$$

$$t = 1,46 * \frac{100 - 7,33}{95} = 1,42 \text{ mm}$$

L2.1.2 Nurkade ümarduste mõju

$$r \leq 5t \quad 2 \leq 5 * 1,42 = 7,1 \text{ mm} \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad g_r = 2,71 \left(\tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) - \sin\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \right) = 0,794 \text{ mm}$$

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad r_m = 2 + \frac{1,42}{2} = 2,71 \text{ mm}$$

$$b_{p,sein} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,sein} = 250 - 1,42 - 2 * 0,794 = 246,99 \text{ mm}$$

$$b_{p,vöö} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,vöö} = 50 - 1,42 - 2 * 0,794 = 46,99 \text{ mm}$$

$$b_{p,jäikur} = b - \frac{t}{2} - g_r \quad b_{p,jäikur} = 12 - \frac{1,42}{2} - 0,794 = 10,50 \text{ mm}$$

$$r \leq 0,10b_{p,sein} \quad 2 \leq 0,10 * 246,99 = 24,70 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

$$r \leq 0,10b_{p,vöö} \quad 2 \leq 0,10 * 46,99 = 4,70 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

$$r \leq 0,10b_{p,jäikur} \quad 2 \leq 0,10 * 10,50 = 1,05 \quad \text{Tingimus ei ole täidetud!}$$

Seega ei pea arvestama ristlõike kandevõime arvutamisel nurkade ümarduse mõju seinal ja vööl, kuid peab arvestama nurkade ümardamise mõju jäikuril.

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta)$$

$$I_g \approx I_{g,sh}(1 - 2\delta), \text{ kus } I_g \text{ on brutoristlõike inertsimoment}$$

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad \delta = 0,43 \frac{2 * \frac{90}{90}}{10,50} = 0,0819$$

$$A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$I_g \approx \frac{10,50^3 * 1,42}{12} (1 - 2 * 0,0819) = 114,55 \text{ mm}^4$$

L2.1.3 Geomeetriselised proportsioonid

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad \frac{50}{1,42} = 35,21 \leq 60$$

$$\frac{c}{t} \leq 50 \quad \frac{12}{1,42} = 8,45 \leq 50$$

Tingimused on täidetud!

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad 45^\circ \leq \phi = 90 \leq 90^\circ$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 * \sin \phi \quad \frac{250}{1,42} = 176,06 \leq 500 * \sin 90 = 500$$

Tingimused on täidetud!

$$0,2 \leq \frac{12}{50} = 0,24 \leq 0,6 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

L2.2 Ristlõike pindala ja raskuskeskme asukoht

Ristlõikeosade pindala

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b_p * t \quad A_2 = 46,99 * 1,42 = 66,73 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = t * \left(\frac{h}{2} - h_{perf} - g_r\right) \quad A_3 = 1,42 * (74 - 0,794) = 103,95 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = h_{perf} * t - 10 * d_{perf} * t \quad A_4 = 102 * 1,42 - 10 * 3 * 1,42 = 102,24 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = t * \left(\frac{h}{2} - h_{perf} - g_r\right) \quad A_5 = 1,42 * (74 - 0,794) = 103,95 \text{ mm}^2$$

$$A_6 = b_p * t \quad A_6 = 46,99 * 1,42 = 66,73 \text{ mm}^2$$

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{tot} = 13,67 + 66,73 + 103,95 + 102,24 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 470,94 \text{ mm}^2$$

Raskuskeskme arvutamine

$$y_1 = b - \frac{t}{2} \quad y_1 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{b}{2} \quad y_2 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_3 = \frac{t}{2} \quad y_3 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_4 = \frac{t}{2} \quad y_4 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_5 = \frac{t}{2} \quad y_5 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_6 = \frac{b}{2} \quad y_6 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_7 = b - \frac{t}{2} \quad y_7 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_0 = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3 + A_4 * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{13,67 * 49,25 + 66,73 * 25 + 103,95 * 0,75 + 102,24 * 0,75 + 103,95 * 0,75 + 66,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{470,94} = 10,44 \text{ mm}$$

$$z_1 = \frac{c}{2} \quad z_1 = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$z_2 = \frac{t}{2} \quad z_2 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$z_3 = \frac{h-h_{perf}}{4} \quad z_3 = \frac{250-1}{4} = 37 \text{ mm}$$

$$z_4 = \frac{h}{2} \quad z_4 = \frac{250}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$z_5 = h - \frac{h-h_{perf}}{4} \quad z_5 = 250 - \frac{250-102}{4} = 213 \text{ mm}$$

$$z_6 = h - \frac{t}{2} \quad z_6 = 250 - \frac{1,5}{2} = 249,25 \text{ mm}$$

$$z_7 = h - \frac{c}{2} \quad z_7 = 250 - \frac{12}{2} = 244 \text{ mm}$$

$$z_0 = \frac{A_1*z_1 + A_2*z_2 + A_3*z_3 + A_4*z_4 + A_5*z_5 + A_6*z_6 + A_7*z_7}{A_{tot}}$$

$$z_0 = \frac{13,67*6 + 66,73*0,75 + 1,95*37 + 10,24*125 + 103,95*213 + 0,73*249,25 + 13,67*244}{470,94} = 125 \text{ mm}$$

L2.3 Ristlõike efektiivpindala painde olukorras tugevama tasapinna suhtes

Tegemist on esmase arvutusega, et määrata ühikkoormuse u asukoht flantsil, et leida jäikuri vedrujäikus K. Täpsemad tulemused saadakse iteratsioonide abil.

Seina ülaosa efektiivlaius:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{73,2}{1,42} = 51,55$$

RK		
1	9ε	7,38
2	10ε	8,2
3	14ε	11,48

Seega C-profiili vöö kuulub 4-sse ristlõikeklassi.

$$\text{Esmasel arvutusel kehtib eeldus: } \sigma_{c,max} = f_{yb} \quad \sigma_{t,max} = -f_{yb}$$

Esmalt vaatlen seinaga osa, mis jääb perforatsioonist üles poole, piirkonda, mis on surve all:

$$h_3 = \frac{h-h_{perf}}{2} - g_r \quad h_3 = c = \frac{250-102}{2} - 0,794 = 73,2 \text{ mm}$$

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\text{Flantsist 73,2 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \sigma_1 * \frac{\frac{h}{2} - b_h}{h/2} \quad \sigma_2 = 350 * \frac{\frac{250}{2} - 74}{\frac{250}{2}} = 142,8 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{142,8}{350} = 0,408$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,408 + 0,34} = 0,773$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{73,2/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,773}} = 2,52 > 0,748$$

$$\rho = \frac{2,52^{-0,188}}{2,52^2} = 0,367$$

$$\text{Vaadeldava koha efektiivne laius: } b_{eff} = 0,367 * 73,2 = 26,86 \text{ mm}$$

$$\text{Mittekandva osa laius } b - b_{eff} = 73,2 - 26,86 = 46,34 \text{ mm}$$

Esialgu eeldatakse, et perforeeritud osa on täielikult surves ning võetakse efektiivpindalaks 0.

Hilisemas arvutuskäigus täpsustakse surves oleva perforeeritud osa suurust.

L2.3.1 Ülemise flantsi efektiivpindala

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{46,99}{1,42} = 33,09$$

RK		
1	33ε	27,06
2	38ε	31,16
3	42ε	34,44

Seega C-profiili ülemine flants kuulub 3-sse ristlõikeklassi. Teoreetiliselt ei tohiks ebaefektiivset ala tekkida, aga kontrollin seda arvutusega.

$$\bar{b} = 46,99 \text{ mm}$$

$$\psi = 1$$

$$b_{eff} = \rho * \bar{b}$$

$$b_{e1} = 0,5 * b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,5 * b_{eff}$$

Mõlketegur $k_\sigma = 4,0$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,672$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,672 \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \bar{\lambda}_p = \frac{46,99/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{4}} = 0,710 > 0,672 \text{ seega}$$

$$\rho = \frac{0,710 - 0,055(3 + 1)}{0,710^2} = 0,972$$

Efektiivne laius:

$$b_{eff} = 0,972 * 46,99 = 45,67 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,5 * 45,67 = 22,84 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5 * 45,67 = 22,84 \text{ mm}$$

Mittekandva osa laius $b - b_{eff} = 46,99 - 45,67 = 1,32 \text{ mm}$

L2.3.2 Jäikuri efektiivne laius

Leitakse standardi EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 järgi, kus on antud valem lihtsa äärejäikuri efektiivlaiuse leidmiseks $c_{eff} = \rho * b_{p,c}$

Kus ρ leitakse jaotise 5.5.2 kohaselt, kasutades see juures järgmisi mõlketegur k_σ väärtusi:

- Kui $b_{p,c}/b_p \leq 0,35$, siis $k_\sigma = 0,5$
- Kui $0,35 < b_{p,c}/b_p \leq 0,6$, siis $k_\sigma = 0,5 + 0,83 \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2}$

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{10,5}{46,99} = 0,223 \leq 0,35$$

$$k_\sigma = 0,5$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{10,5/1,42}{28,4*0,82*\sqrt{0,5}} = 0,449 \leq 0,748$$

$$\rho = 1$$

Vaadeldava koha efektiivne laius: $c_{eff} = 1 * 10,5 = 10,5 \text{ mm}$

L2.3.3 Ülemise flantsi jäikuri poolse efektiivse ristlõike osa ja jäikuri efektiivse ristlõike osa raskuskeskme leidmine

$$A_s = 1,42 * 10,5 + 1,42 * 22,84 = 47,34 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t * b_{e2} * (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2}) + t * c_{eff} * y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42 * 22,84 * (50 - 7,94 - \frac{22,84}{2}) + 1,42 * 10,5 * 49,25}{47,34} = 41,4 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t * (b_{e2} * z_2 + c_{eff} * z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42 * (22,84 * 0,75 + 10,5 * 6)}{47,34} = 2,4 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t * c_{eff}^3}{12} + A_{s1} * (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2} * t^3}{12} + A_{s2} * (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42 * 10,5^3}{12} + 1,42 * 10,5 * (2,4 - 6)^2 + \frac{22,84 * 1,42^3}{12} + 22,84 * 1,42 * (2,4 - 0,6)^2 = 440,75 \text{ mm}^4$$

L2.4 Flantsi deformatsioon

$$u = 0,1 \text{ kN/m} = 0,1 \text{ N/mm}$$

$$\delta = 1,5 \text{ mm}$$

$$K = \frac{u}{\delta} \quad K = \frac{0,1}{1,5} = 0,066 \text{ N/mm}^2$$

Leitud vedrujäikuse abil on võimalik määrata moondumis-stabiilsuskao vähendustegur χ_d (jäikuri paindenõtkel), mida võib leida kasutades väärtust $\sigma_{cr,s}$.

EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.1 punkt 7 on kirjas, et moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d (stabiilsusteguri) jäikuri paindenõtkel võib leida tingsaleduse $\bar{\lambda}_d$ funktsioonina:

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{0,066 * 210000 * 440,75}}{47,34} = 104,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{104,4}} = 1,83 \geq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{1,83} = 0,361$$

EN1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 punkt 10 on öeldud, et kui $\chi_d < 1$, võib selle väärtuse leida iteratiivselt.

$$\sigma_{com,Ed,1} = \frac{\chi_d * f_{yb}}{\gamma_{MO}} \quad \sigma_{com,Ed,1} = \frac{0,361 * 350}{1,0} = 126,35 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad \bar{\lambda}_{p,red} = 0,710 \sqrt{0,361} = 0,427$$

$\bar{\lambda}_p = 0,710$, mis on ülemise flantsi tingsaledus

Flantsi vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,427 \leq 0,672$, seega $b_{e2} = 23,5 \text{ mm}$

Jäikuri vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,427 \leq 0,748$, seega $c_{eff} = 10,5 \text{ mm}$

Seega leian uuesti $\sigma_{cr,s}$ väärtuse uute flantsi ja jäikuri efektiivlaiustega, et saaksin leida järgmise moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d .

$$A_s = 1,42 * 10,5 + 1,42 * 23,5 = 48,28 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t * b_{e2} (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2}) + t * c_{eff} * y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42 * 23,5 * (50 - 0,794 - \frac{23,5}{2}) + 1,42 * 10,5 * (50 - \frac{1,42}{2} - 0,794)}{48,28} = 40,87 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t * (b_{e2} * z_2 + c_{eff} * z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42 * (23,5 * 0,6 + 10,5 * 6)}{48,28} = 2,27 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t * c_{eff}^3}{12} + A_{s1} * (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2} * t^3}{12} + A_{s2} * (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42 * 10,5^3}{12} + 1,42 * 10,5 * (2,27 - 6)^2 + \frac{23,5 * 1,42^3}{12} + 23,5 * 1,42 * (2,27 - 0,6)^2 = 443,1 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{0,066 * 210000 * 443,1}}{48,28} = 102,66 \text{ N/mm}^2$$

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{102,66}} = 1,85 \geq 1,38$$

$$\chi_{d,1} = \frac{0,66}{1,85} = 0,357$$

2. Iteratsioon

Moondumis-stabiilsuskao vähendustegurina χ_d kasutan eelmisest iteratsioonist saadud väärtust, $\chi_{d,1} = 0,357$.

$$\sigma_{com,Ed,1} = \frac{\chi_d * f_{yb}}{\gamma_{MO}} \quad \sigma_{com,Ed,1} = \frac{0,357 * 350}{1,0} = 124,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad \bar{\lambda}_{p,red} = 0,710 \sqrt{0,357} = 0,424$$

$\bar{\lambda}_p = 0,710$, mis on ülemise flantsi tingsaledus

Flantsi vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,424 \leq 0,672$, seega $b_{e2} = 23,5 \text{ mm}$

Jäikuri vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,424 \leq 0,748$, seega $c_{eff} = 10,5 \text{ mm}$

Seega leian uuesti $\sigma_{cr,s}$ väärtuse uute flantsi ja jäikuri efektiivlaiustega, et saaksin leida järgmise moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d .

$$A_s = 1,42 * 10,5 + 1,42 * 23,5 = 48,28 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t * b_{e2} * (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2}) + t * c_{eff} * y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42 * 23,5 * (50 - 0,794 - \frac{23,5}{2}) + 1,42 * 10,5 * (50 - \frac{1,42}{2} - 0,794)}{48,28} = 40,87 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t * (b_{e2} * z_2 + c_{eff} * z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42 * (23,5 * 0,6 + 10,5 * 6)}{48,28} = 2,27 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t * c_{eff}^3}{12} + A_{s1} * (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2} * t^3}{12} + A_{s2} * (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42 * 10,5^3}{12} + 1,42 * 10,5 * (2,27 - 6)^2 + \frac{23,5 * 1,42^3}{12} + 23,5 * 1,42 * (2,27 - 0,6)^2 = 443,1 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{0,066 * 210000 * 443,1}}{48,28} = 102,66 \text{ N/mm}^2$$

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{102,66}} = 1,85 \geq 1,38$$

$$\chi_{d,1} = \frac{0,66}{1,85} = 0,357$$

$\chi_{d,1} = \chi_{d,2}$, seega edasised iteratsioonid ei ole vajalikud ning $\chi_d = 0,357$.

Lõplik efektiivriistlõige määratakse väärtuste b_{e2} , c_{eff} ja väärtuste $\chi_{d,n}$ vastava redutseeritud paksuse t_{red} põhjal.

$$\bar{\lambda}_{p,red} = 0,710\sqrt{0,357} = 0,424$$

$\sigma_{com,Ed}$ on efektiivristlõike põhjal leitud survepinge jäikuri keskpinnas

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{h-z_0-(z_{s,cg}-\frac{t}{2})}{h-z_0} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad \sigma_{com,Ed} = \frac{250-125-(2,27 \cdot \frac{1,42}{2})}{250-1} * \frac{350}{1,0} = 345,63 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{s,red} = \chi_d * A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad A_{s,red} = 0,357 * 48,28 * \frac{350}{345,63} = 17,45 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = t * A_{s,red}/A_s \quad t_{red} = 1,42 * \frac{17,45}{48,28} = 0,513$$

$$A_{1,eff} = c_{eff} * t_{red} \quad A_{1,eff} = 10,5 * 0,513 = 5,38 \text{ mm}^2$$

$$A_{2,eff} = b_{e1} * t + b_{e2} * t_{red} \quad A_{2,eff} = 22,84 * 1,42 + 23,5 * 0,513 = 44,49 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 38,14 + 0 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 272,36 \text{ mm}^2$$

Arvutan efektiivristlõike raskuskeskme nullpunktide asukohad

$$y_{c0} = \frac{A_{1,eff} * y_1 + A_{2,eff} * y_2 + A_{3,eff} * y_3 + A_{4,eff} * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_3 + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$y_{2,eff} = \frac{b_{e1} * t * \frac{b_{e1}}{2} + b_{e2} * t_{red} * (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2})}{b_{e1} * t + b_{e2} * t_{red}}$$

$$y_{2,eff} = \frac{22,84 * 1,42 * \frac{22,84}{2} + 2,5 * 0,513 * (50 - 0,794 - \frac{23,5}{2})}{44,49} = 18,47 \text{ mm}$$

$$z_{3,eff} = \frac{h_{3,eff} + g_r + \frac{t}{2}}{2} \quad z_{3,eff} = \frac{26,86 + 0,79 \cdot \frac{1,42}{2}}{2} = 14,18 \text{ mm}$$

Kuna esmases arvutuses eeldasin, et kogu perforeeritud osa on surves, siis esialgu panen $A_{4,eff} = 0$ ning hiljem on iteratsioonide kaudu võimalik täpsustada survetsooni jääva perforeeritud osa pikkust.

$$y_{c0} = \frac{5,38 * 49,25 + 44,49 * 18,47 + 38,14 * 0,75 + 0 * 0,75 + 103,95 * 0,75 + 66,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{272,36} = 12,98 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 44,49 * 0,75 + 14 * 14,18 + 0 * 125 + 103,95 * 213 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{272,36} = 156,84 \text{ mm}$$

Arvutan välja uute raskuskeskme koordinaatide põhjal, et kui suur osa perforeeritud seinast on tõmbetsoonis ja mida saaksin kalkulatsioonides arvestada.

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0})}{2} \quad z_{4,eff} = 156,84 + \frac{(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 156,84)}{2} = 166,42 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0} \right) * t - n * d_{perf} * t \right]$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 156,84 \right) * 1,42 - 2 * 3 * 1,42 \right] = 18,69 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 38,14 + 18,69 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 291,05 \text{ mm}^2$$

1. Iteratsioon

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38*6+44,49*0,75+38,14*14,18+1,69*166,42+103,95*213+6,73*249,25+13,67*244}{291,05} = 157,5 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 157,5 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,5\right)}{2} = 166,75 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perf} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,5\right)\right] * 1,42 - 2 * 3 * 1,42 = 17,75 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 38,14 + 17,75 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 290,11 \text{ mm}^2$$

2. Iteratsioon

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38*6+44,49*0,75+38,14*14,18+17,75*166,75+103,95*213+66,73*249,25+13,67*244}{290,11} = 157,44 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 157,44 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,44\right)}{2} = 166,72 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perf} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,44\right)\right] * 1,42 - 2 * 3 * 1,42 = 17,84 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 38,14 + 17,84 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 290,2 \text{ mm}^2$$

3. Iteratsioon

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38*6+44,49*0,75+38,14*14,18+17,84*166,72+103,95*213+66,73*249,25+1,67*244}{290,2} = 157,44 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 157,44 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,44\right)}{2} = 166,72 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perf} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 157,44\right)\right] * 1,42 - 2 * 3 * 1,42 = 17,84 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 38,14 + 17,84 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 290,2 \text{ mm}^2$$

Iteratsioon 3 ja iteratsiooni 4 $z_{4,eff,1} = z_{4,eff,2}$ ning $z_{c0,1} = z_{c0,2}$, siis on efektiivse ristlõike raskuskeskme koordinaadid üheselt määratud.

$$h_{4,eff} = \left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2}\right) - z_{c0} \quad h_{4,eff} = \left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2}\right) - 157,44 = 18,56 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = \frac{5,38*49,25+44,49*18,47+3,14*0,75+17,84*0,75+10,95*0,75+66,73*25+1,67*49,25}{290,2} = 12,23 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = 12,23 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = 157,44 \text{ mm}$$

$$A_{eff,tot} = 290,2 \text{ mm}^2$$

L2.5 Seinä ülemise osa efektiivpindala

$$h_3 = \frac{h-h_{perf}}{2} - g_r \quad h_3 = \frac{250-102}{2} - 0,794 = 73,2 \text{ mm}$$

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{\text{mm}^2} = \sigma_1$$

$$\text{Flantsist 73,2 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \frac{350*(157,44-7)}{157,44} = 185,5 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{185,5}{350} = 0,53$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi+0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,53+0,34} = 0,664$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{73,2/1,42}{28,4*0,82*\sqrt{0,664}} = 2,72 > 0,748$$

$$\rho = \frac{2,72-0,188}{2,72^2} = 0,342$$

Vaadeldava koha efektiivne laius: $b_{eff} = 0,342 * 73,2 = 25,03 \text{ mm}$

$$A_{3,eff} = 25,03 * 1,42 = 35,54 \text{ mm}^2$$

$$\text{Mittekandva osa laius } b - b_{eff} = 73,2 - 25,03 = 48,17 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{3,eff} = \frac{h_{3,eff} + g_r + \frac{t}{2}}{2}$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 17,84 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 287,6 \text{ mm}^2$$

$$z_{3,eff} = \frac{25,03 + 0,794 + \frac{1,42}{2}}{2} = 13,27 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 44,49 * 0,75 + 35,54 * 13,27 + 17,84 * 166,72 + 103,95 * 213 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{287,6} = 158,63 \text{ mm}$$

2. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{\text{mm}^2} = \sigma_1$$

$$\text{Flantsist 73,2 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \frac{350 * (158,63 - 74)}{158,63} = 186,7 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{186,7}{350} = 0,533$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,533 + 0,34} = 0,662$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{73,2 / 1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,662}} = 2,72 > 0,748$$

$$\rho = \frac{2,73^{-0,188}}{2,73^2} = 0,342$$

$$\text{Vaadeldava koha efektiivne laius: } b_{eff} = 0,342 * 73,2 = 25,03 \text{ mm}$$

$$A_{3,eff} = 25,03 * 1,42 = 35,54 \text{ mm}^2$$

$$\text{Mittekandva osa laius } b - b_{eff} = 73,2 - 24,96 = 48,24 \text{ mm}$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{3,eff} = \frac{h_{3,eff} + g_r + \frac{t}{2}}{2}$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 17,84 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 287,6 \text{ mm}^2$$

$$z_{3,eff} = \frac{25,03 + 0,794 + \frac{1,42}{2}}{2} = 13,27 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 44,49 * 0,75 + 35,54 * 13,27 + 1,84 * 166,72 + 1,95 * 213 + 0,73 * 249,25 + 1,67 * 244}{287,6} = 158,63 \text{ mm}$$

Seega on ülemise seinosa efektiivnelaius määratud.

L2.6 Perforeeritud osa täpsustatud efektiivne laius

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perff}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 158,63 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 158,63\right)}{2} = 167,32 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perff}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perff} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 167,32\right)\right] * 1,42 - 1 * 3 * 1,42 = 8,07 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 8,07 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 277,83 \text{ mm}^2$$

1. Iteratsioon

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 44,49 * 0,75 + 3,54 * 13,27 + 8,07 * 167,32 + 1,95 * 213 + 0,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{277,83} = 158,36 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perff}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 158,36 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 158,36\right)}{2} = 167,18 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perff}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perff} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 167,18\right)\right] * 1,42 - 1 * 3 * 1,42 = 8,26 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 8,26 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 278,02 \text{ mm}^2$$

2. Iteratsioon

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 4,49 * 0,75 + 35,54 * 13,27 + 8,26 * 167,18 + 1,95 * 213 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{278,02} = 158,36 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = z_{c0} + \frac{\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)}{2} \quad z_{4,eff} = 158,36 + \frac{\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 158,36\right)}{2} = 167,18 \text{ mm}$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{h}{2} + \frac{h_{perf}}{2} - z_{c0}\right)\right] * t - n * d_{perf} * t$$

$$A_{4,eff} = \left[\left(\frac{250}{2} + \frac{102}{2} - 167,18\right)\right] * 1,42 - 1 * 3 * 1,42 = 8,26 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 8,26 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 278,02 \text{ mm}^2$$

Eelneva iteratsiooni abil on täpsustatud perforeeritud seinosa efektiivset pindala.

L2.7 Seinä ülemise osa täpsustatud efektiivne laius

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{\text{mm}^2} = \sigma_1$$

$$\text{Flantsist 73,2 mm kaugusel on pinge } \sigma_2 = \frac{350 * (158,36 - 74)}{158,36} = 186,45 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{186,45}{350} = 0,533$$

$$b_{eff} = \rho * b_{p,h}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = \frac{0,578}{\psi + 0,34} \quad k_\sigma = \frac{0,578}{0,533 + 0,34} = 0,662$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{73,2/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{0,662}} = 2,72 > 0,748$$

$$\rho = \frac{2,72 - 0,188}{2,72} = 0,342$$

$$\text{Vaadeldava koha efektiivne laius: } b_{eff} = 0,342 * 73,2 = 25,03 \text{ mm}$$

$$A_{3,eff} = 25,03 * 1,42 = 35,54 \text{ mm}^2$$

$$\text{Mittekandva osa laius } b - b_{eff} = 73,2 - 25,03 = 48,17 \text{ mm}$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_{4,eff} + A_5 + A_6 + A_7$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{3,eff} = \frac{h_{3,eff} + g_r + \frac{t}{2}}{2}$$

$$A_{eff,tot} = 5,38 + 44,49 + 35,54 + 8,26 + 103,95 + 66,73 + 13,67 = 278,02 \text{ mm}^2$$

$$z_{3,eff} = \frac{25,03 + 0,794 + \frac{1,42}{2}}{2} = 13,27 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{5,38 * 6 + 44,49 * 0,75 + 3,54 * 13,27 + 8,26 * 167,18 + 103,95 * 213 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{278,02} = 158,36 \text{ mm}$$

$$z_{4,eff} = 167,18 \text{ mm ning sellele vastab } z_{c0} = 158,36 \text{ mm}$$

$$z_{3,eff} = 13,27 \text{ mm ning sellele vastab } z_{c0} = 158,36 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = \frac{5,38 * 49,25 + 44,49 * 18,47 + 3,54 * 0,75 + 8,26 * 0,75 + 103,95 * 0,75 + 66,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{278,02} = 12,73 \text{ mm}$$

Mõlema iteratsiooni tulemusena saadud $z_{c0} = 158,36 \text{ mm}$, seega on ristlõike raskuskeskme koordinaadid määratud.

L2.8 Lõplikud tulemused

$$z_{c0} = 158,36 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = 12,73 \text{ mm}$$

$$A_{eff,tot} = 278,02 \text{ mm}^2$$

$$I_y = \sum_n^i \frac{h_i^3 * b_i}{12} + b_i h_i * (z_{c0} - z_i)^2$$

$$I_y = \left[\frac{10,5^3 * 0,513}{12} + 10,5 * 0,513 * (158,36 - 6)^2 \right] + \left[\frac{0,513^3 * 23,5}{12} + \frac{1,42^3 * 22,84}{12} + 44,49 * (158,36 - 0,75)^2 \right] + \left[\frac{25,03^3 * 1,42}{12} + 25,03 * 1,42 * (158,36 - 13,27)^2 \right] + \left[\frac{5,82^3 * 1,42}{12} + 5,82 * 1,42 * (158,36 - 167,18)^2 \right] + \left[\frac{73,2^3 * 1,42}{12} + 73,2 * 1,42 * (158,36 - 213)^2 \right] + \left[\frac{1,42^3 * 46,99}{12} + 1,42 * 46,99 * (158,36 - 249,25)^2 \right] + [114,55 + 13,67 * (158,36 - 244)^2] = 2989347 \text{ mm}^4$$

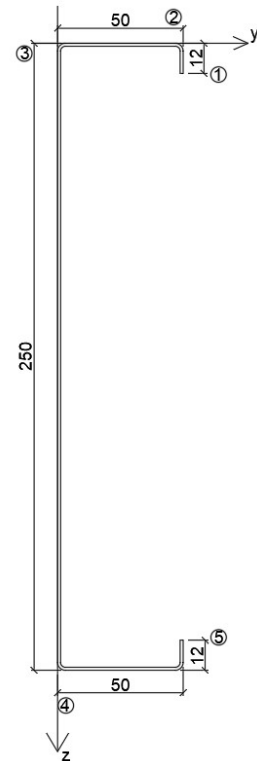
$$W_y = \frac{I_y}{z_{c0}}$$

$$W_y = \frac{2989347}{158,35} = 18877,7 \text{ mm}^3$$

LISA 3. TEINE ARVUTUSKÄIK – TÄISSEINALINE PROFIIIL

L3.1 Ristlõike parameetrid

	Tähis	Nimiväärtus	
Materjali paksus	$t_{nom} =$	1,5	mm
Materjali tegelik paksus	$t =$	1,42	mm
Vöö laius	$b =$	50	mm
Ristlõike kõrgus	$h =$	250	mm
Jäikuri kõrgus	$c =$	12	mm
Sisemine ümardusraadius	$r =$	2	mm



L3.1.1 Paksus ja paksustolerantsid

$$t = t_{cor} \text{ kui } tol \leq 5\%$$

$$t = t_{cor} * \frac{100 - tol}{95} \text{ kui } tol > 5\%$$

$$t_{cor} = t_{nom} - t_{metallic\ coatings}$$

Tol – tolerants miinustolerantsi protsentides (%)

EVS-EN 10143:2006 peatükk 6 tabel 2 – Tolerantsid teraseklassidele, mille spetsifitseeritud minimaalne tinglik voolavuspiir on suurem kui 260 MPa ja väiksem kui 360MPa $\pm 0,11$

$$tol = \frac{0,11}{1,5} * 100\% = 7,33\% \quad tol > 5\%$$

$$t_{cor} = 1,5 - 0,04 = 1,46 \text{ mm}$$

$$t = 1,46 * \frac{100 - 7,33}{95} = 1,42 \text{ mm}$$

Märkus standardist 3.2.4 punkt (3) Traditsioonilise tsinkpinnakatte Z275 puhul $t_{zink} = 0,04 \text{ mm}$.

L3.1.2 Nurkade ümarduste mõju

$$r \leq 5t \quad 2 \leq 5 * 1,42 = 7,1 \text{ mm}$$

Tingimus on täidetud!

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad g_r = 2,71 \left(\tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) - \sin\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \right) = 0,794 \text{ mm}$$

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad r_m = 2 + \frac{1,42}{2} = 2,71 \text{ mm}$$

$$b_{p,sein} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,sein} = 250 - 1,42 - 2 * 0,794 = 246,99 \text{ mm}$$

$$b_{p,vöö} = b - t - 2 * g_r \quad b_{p,vöö} = 50 - 1,42 - 2 * 0,794 = 46,99 \text{ mm}$$

$$b_{p,jäikur} = b - \frac{t}{2} - g_r \quad b_{p,jäikur} = 12 - \frac{1,42}{2} - 0,794 = 10,50 \text{ mm}$$

$$r \leq 0,10b_{p,sein} \quad 2 \leq 0,10 * 246,99 = 24,70 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

$$r \leq 0,10b_{p,vöö} \quad 2 \leq 0,10 * 46,99 = 4,70 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

$$r \leq 0,10b_{p,jäikur} \quad 2 \leq 0,10 * 10,50 = 1,05 \quad \text{Tingimus ei ole täidetud!}$$

Seega ei pea arvestama ristlõike kandevõime arvutamisel nurkade ümarduse mõju seinal ja vöö, kuid peab arvestama nurkade ümardamise mõju jäikuril.

Nurkade ümarduste mõju ristlõikeparameetritele võib arvesse võtta vähendades samasuguse ümardamata nurkadega ristlõike parameetreid ligikaudsete valemitega

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta)$$

$$I_g \approx I_{g,sh}(1 - 2\delta), \text{ kus } I_g \text{ on brutoristlõike inertsimoment}$$

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad \delta = 0,43 \frac{2 * \frac{90}{90}}{10,50} = 0,0819$$

$$A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$I_g \approx \frac{10,50^3 * 1,42}{12} (1 - 2 * 0,0819) = 114,55 \text{ mm}^4$$

L3.1.3 Geomeetrilised proportsioonid

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad \frac{50}{1,42} = 35,21 \leq 60$$

$$\frac{c}{t} \leq 50 \quad \frac{12}{1,42} = 8,45 \leq 50$$

Tingimused on täidetud!

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad 45^\circ \leq \phi = 90 \leq 90^\circ$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 * \sin \phi \quad \frac{250}{1,42} = 176,06 \leq 500 * \sin 90 = 500$$

Tingimused on täidetud!

$$0,2 \leq \frac{12}{50} = 0,24 \leq 0,6 \quad \text{Tingimus on täidetud!}$$

L3.2 Ristlõike pindala ja raskuskeskme asukoht

Ristlõikeosade pindala

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b_p * t \quad A_2 = 46,99 * 1,42 = 66,73 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = t * h_p \quad A_3 = 1,42 * 246,99 = 350,73 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = b_p * t \quad A_6 = 46,99 * 1,42 = 66,73 \text{ mm}^2$$

$$A_g \approx A_{g,sh}(1 - \delta) \quad A_g \approx (1,42 * 10,50) * (1 - 0,0819) = 13,67 \text{ mm}^2$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

$$A_{tot} = 13,67 + 66,73 + 350,73 + 66,73 + 13,67 = 511,53 \text{ mm}^2$$

Raskuskeskme arvutamine

$$y_1 = b - \frac{t}{2} \quad y_1 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{b}{2} \quad y_2 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_3 = \frac{t}{2} \quad y_3 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$y_4 = \frac{b}{2} \quad y_4 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$y_5 = b - \frac{t}{2} \quad y_5 = 50 - \frac{1,5}{2} = 49,25 \text{ mm}$$

$$y_0 = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3 + A_4 * y_4 + A_5 * y_5}{A_{tot}}$$

$$y_0 = \frac{13,67 * 49,25 + 66,73 * 25 + 350,73 * 0,75 + 66,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{511,53} = 9,67 \text{ mm}$$

$$z_1 = \frac{c}{2} \quad z_1 = \frac{12}{2} = 6 \text{ mm}$$

$$z_2 = \frac{t}{2} \quad z_2 = \frac{1,5}{2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$z_3 = \frac{h}{2} \quad z_3 = \frac{250}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$z_4 = h - \frac{t}{2} \quad z_4 = 250 - \frac{1,5}{2} = 249,25 \text{ mm}$$

$$z_5 = h - \frac{c}{2} \quad z_5 = 250 - \frac{12}{2} = 244 \text{ mm}$$

$$z_0 = \frac{A_1 * z_1 + A_2 * z_2 + A_3 * z_3 + A_4 * z_4 + A_5 * z_5}{A_{tot}}$$

$$z_0 = \frac{13,67 * 6 + 66,73 * 0,75 + 35,73 * 125 + 6,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{511,53} = 125 \text{ mm}$$

L3.3 Ristlõike efektiivpindala painde olukorras tugevama tasapinna suhtes

Tegemist on esmase arvutusega, et määrata ühikkoormuse u asukoht flantsil, et leida jäikuri vedrujäikus K. Täpsemad tulemused saadakse iteratsioonide abil

Seina efektiivlaius:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{246,99}{1,42} = 173,94$$

RK		
1	72ε	59,04
2	83ε	68,06
3	124ε	101,68

Seega C-profiili sein kuulub 4-sse ristlõikeklassi.

$$\text{Esmasel arvutusel kehtib eeldus: } \sigma_{c,max} = f_{yb} \quad \sigma_{t,max} = -f_{yb}$$

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\sigma_2 = -350 \frac{N}{mm^2}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{-350}{350} = -1$$

$$b_{eff} = \rho * b_c = \frac{\rho * \bar{b}}{1 - \psi}$$

$$b_{e1} = 0,4 * b_{eff}$$

$$b_{e1} = 0,6 * b_{eff}$$

$$\text{Mõlktegur } k_\sigma = 23,9$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,672$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,672 \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{246,99/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{23,9}} = 1,53 > 0,672$$

$$\rho = \frac{1,53 - 0,055(3 - 1)}{1,53^2} = 0,607$$

Vaadeldava koha efektiivne laius: $b_{eff} = 0,607 * 246,99 / (1 + 1) = 74,96 \text{ mm}$

$$\text{Augu laius } b_c - b_{eff} = 125 - 0,794 - \frac{1,42}{2} - 74,96 = 48,54 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 * 48,54 = 19,42 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 * 48,54 = 29,12 \text{ mm}$$

$$A_{3,eff} = b_h * t$$

$$A_{3,eff} = (124,2 + 19,42 + 29,12) * 1,42 = 245,3 \text{ mm}^2$$

$$y_3 = \frac{A_{3,1} * y_{3,1} + A_{3,2} * y_{3,2}}{A_{3,eff}}$$

$$y_3 = \frac{1,42 * 19,42 * 11,21 + 1,33 * 171,83}{245,3} = 153,78 \text{ mm}$$

L3.3.1 Ülemise flantsi efektiivpindala

Flantsi efektiivlaius:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,82$$

$$\frac{c}{t} = \frac{46,99}{1,42} = 33,09$$

RK		
1	33ε	27,06
2	38ε	31,16
3	42ε	34,44

Seega C-profiili ülemine flants kuulub 3-sse ristlõikeklassi. Teoreetiliselt ei tohiks ebaefektiivset ala tekkida, aga kontrollin seda arvutusega.

$$\bar{b} = 46,99 \text{ mm}$$

$$\psi = 1$$

$$b_{eff} = \rho * \bar{b}$$

$$b_{e1} = 0,5 * b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,5 * b_{eff}$$

$$\text{Mõlketegur } k_{\sigma} = 4,0$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,672$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,672 \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}} \quad \bar{\lambda}_p = \frac{46,99/1,42}{28,4*0,82*\sqrt{4}} = 0,710 > 0,672 \text{ seega}$$

$$\rho = \frac{0,710 - 0,055(3 + 1)}{0,710^2} = 0,972$$

Efektivne laius:

$$b_{eff} = 0,972 * 46,99 = 45,67 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,5 * 45,67 = 22,84 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5 * 45,67 = 22,84 \text{ mm}$$

$$\text{Mittekandva osa laius } b - b_{eff} = 46,99 - 45,67 = 1,32 \text{ mm}$$

L3.3.2 Jäikuri efektiivne laius

Leitakse standardi EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 järgi, kus on antud valem lihtsa äärejäikuri efektiivlause leidmiseks $c_{eff} = \rho * b_{p,c}$

Kus ρ leitakse jaotise 5.5.2 kohaselt, kasutades see juures järgmisi mõlketegur k_{σ} väärtusi:

- Kui $b_{p,c}/b_p \leq 0,35$, siis $k_{\sigma} = 0,5$
- Kui $0,35 < b_{p,c}/b_p \leq 0,6$, siis $k_{\sigma} = 0,5 + 0,83 \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2}$

$$\frac{b_{pc}}{b_p} = \frac{10,5}{46,99} = 0,223 \leq 0,35$$

$$k_{\sigma} = 0,5$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{10,5/1,42}{28,4*0,82*\sqrt{0,5}} = 0,449 \leq 0,748$$

$$\rho = 1$$

Vaadeldava koha efektiivne laius: $c_{eff} = 1 * 10,5 = 10,5 \text{ mm}$

L3.3 Ülemise flantsi jäikuri poolse efektiivse ristlõike osa ja jäikuri efektiivse ristlõike osa raskuskeskme leidmine

$$A_s = 1,42 * 10,5 + 1,42 * 22,84 = 47,34 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t*b_{e2}(b-g_r-\frac{b_{e2}}{2})+t*c_{eff}*y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42*22,84*(50-0,794-\frac{22,84}{2})+1,42*10,5*49,25}{47,34} = 41,4 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t*(b_{e2}*z_2+c_{eff}*z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42*(22,84*0,75+1,5*6)}{47,34} = 2,4 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t*c_{eff}^3}{12} + A_{s1} * (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2}*t^3}{12} + A_{s2} * (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42*10,5^3}{12} + 1,42 * 10,5 * (2,4 - 6)^2 + \frac{22,84*1,42^3}{12} + 22,84 * 1,42 * (2,4 - 0,6)^2 = 440,75 \text{ mm}^4$$

L3.4 Flantsi deformatsioon

$$K_1 = \frac{E*t^3}{4(1-\nu^2)} * \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 b_1 b_2 h_w k_f}$$

$$K_1 = \frac{210000*1,42^3}{4(1-0,30^2)} * \frac{1}{41,4^2*246,99+4,4^3} = 0,334 \text{ N/mm}^2$$

Leitud vedrujäikuse abil on võimalik määrata moondumis-stabiilsuskao vähendustegur χ_d (jäikuri paindenõtkel), mida võib leida kasutades väärtust $\sigma_{cr,s}$.

EN 1993-1-3 peatükis 5.5.3.1 punkt 7 on kirjas, et moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d (stabiilsusteguri) jäikuri paindenõtkel võib leida tingsaleduse $\bar{\lambda}_d$ funktsioonina:

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

EN 1993-1-3 peatüki 5.5.3.2 punkt 7 äärejäikuri elastsusteooria kohane kriitiline pinge:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,334 \cdot 210000 \cdot 440,75}}{47,34} = 234,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{234,9}} = 1,22 \quad 0,65 < 1,22 \leq 1,38$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,22 = 0,588$$

EN1993-1-3 peatükis 5.5.3.2 punkt 10 on öeldud, et kui $\chi_d < 1$, võib selle väärtuse leida iteratiivselt.

$$\sigma_{com,Ed,1} = \frac{\chi_d \cdot f_{yb}}{\gamma_{MO}} \quad \sigma_{com,Ed,1} = \frac{0,588 \cdot 350}{1,0} = 205,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad \bar{\lambda}_{p,red} = 0,710 \sqrt{0,588} = 0,544$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,710, \text{ mis on ülemise flantsi tingsaledus}$$

Flantsi vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,544 \leq 0,672$, seega $b_{e2} = 23,5 \text{ mm}$

Jäikuri vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,544 \leq 0,748$, seega $c_{eff} = 10,5 \text{ mm}$

Seega leian uuesti $\sigma_{cr,s}$ väärtuse uute flantsi ja jäikuri efektiivlaiustega, et saaksin leida järgmise moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d .

$$A_s = 1,42 \cdot 10,5 + 1,42 \cdot 23,5 = 48,28 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t \cdot b_{e2} \left(b - g_r - \frac{b_{e2}}{2} \right) + t \cdot c_{eff} \cdot y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42 \cdot 23,5 \cdot \left(50 - 0,794 - \frac{23,5}{2} \right) + 1,42 \cdot 10,5 \cdot \left(50 - \frac{1,42}{2} - 0,794 \right)}{48,28} = 40,87 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t \cdot (b_{e2} \cdot z_2 + c_{eff} \cdot z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42 \cdot (23,5 \cdot 0,6 + 10,5 \cdot 6)}{48,28} = 2,27 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t \cdot c_{eff}^3}{12} + A_{s1} \cdot (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + A_{s2} \cdot (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42 \cdot 10,5^3}{12} + 1,42 \cdot 10,5 \cdot (2,27 - 6)^2 + \frac{23,5 \cdot 1,42^3}{12} + 23,5 \cdot 1,42 \cdot (2,27 - 0,6)^2 = 443,1 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,334 \cdot 210000 \cdot 443,1}}{48,28} = 234,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{234,9}} = 1,22 \quad 0,65 < 1,22 \leq 1,38$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * 1,22 = 0,588$$

2. Iteratsioon

Moondumis-stabiilsuskao vähendustegurina χ_d kasutan eelmisest iteratsioonist saadud väärtust, $\chi_{d,1} = 0,588$.

$$\sigma_{com,Ed,1} = \frac{\chi_d * f_{yb}}{\gamma_{MO}} \quad \sigma_{com,Ed,1} = \frac{0,588 * 350}{1,0} = 205,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad \bar{\lambda}_{p,red} = 0,710 \sqrt{0,588} = 0,544$$

$\bar{\lambda}_p = 0,710$, mis on ülemise flantsi tingsaledus

Flantsi vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,544 \leq 0,672$, seega $b_{e2} = 23,5 \text{ mm}$

Jäikuri vähendustegur $\rho = 1,0$ kui $\bar{\lambda}_p = 0,544 \leq 0,748$, seega $c_{eff} = 10,5 \text{ mm}$

Seega leian uuesti $\sigma_{cr,s}$ väärtuse uute flantsi ja jäikuri efektiivlaiustega, et saaksin leida järgmise moondumis-stabiilsuskao vähendusteguri χ_d .

$$A_s = 1,42 * 10,5 + 1,42 * 23,5 = 48,28 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{t * b_{e2} (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2}) + t * c_{eff} * y_1}{A_s} \quad y_{s,cg} = \frac{1,42 * 23,5 * (50 - 0,794 - \frac{23,5}{2}) + 1,42 * 10,5 * (50 - \frac{1,42}{2} - 0,794)}{48,28} = 40,87 \text{ mm}$$

$$z = \frac{t * (b_{e2} * z_2 + c_{eff} * z_1)}{A_s} \quad z_{s,cg} = \frac{1,42 * (23,5 * 0,6 + 1,5 * 6)}{48,28} = 2,27 \text{ mm}$$

$$I_{z,s} = \frac{t * c_{eff}^3}{12} + A_{s1} * (z_{s,cg} - z_1)^2 + \frac{b_{e2} * t^3}{12} + A_{s2} * (z_{s,cg} - z_2)^2$$

$$I_{z,s} = \frac{1,42 * 10,5^3}{12} + 1,42 * 10,5 * (2,27 - 6)^2 + \frac{23,5 * 1,42^3}{12} + 23,5 * 1,42 * (2,27 - 0,6)^2 = 443,1 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_{z,s}}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{0,334 * 210000 * 443,1}}{48,28} = 234,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\chi_d = 1 \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad \text{kui } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{kui } \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$\text{Kus } \bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{350}{234,9}} = 1,22 \quad 0,65 < 1,22 \leq 1,38$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * 1,22 = 0,588$$

$\chi_{d,1} = \chi_{d,2}$, seega edasised iteratsioonid ei ole vajalikud ning $\chi_d = 0,588$.

Lõplik efektiivristlõike määratakse väärtuste b_{e2} , c_{eff} ja väärtuste $\chi_{d,n}$ vastava redutseeritud paksuse t_{red} põhjal.

$$\bar{\lambda}_{p,red} = 0,710 \sqrt{0,588} = 0,544$$

$\sigma_{com,Ed}$ on efektiivristlõike põhjal leitud survepinge jäikuri keskpinnas

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{h-z_0 - (z_{s,cg} - \frac{t}{2})}{h-z_0} * \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad \sigma_{com,Ed} = \frac{250-125 - (2,27 - \frac{1,42}{2})}{250-125} * \frac{350}{1,0} = 345,63 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{s,red} = \chi_d * A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad A_{s,red} = 0,588 * 48,28 * \frac{\frac{350}{1,0}}{345,63} = 28,75 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = t * A_{s,red}/A_s \quad t_{red} = 1,42 * \frac{28,75}{48,28} = 0,846$$

$$A_{1,eff} = c_{eff} * t_{red} \quad A_{1,eff} = 10,5 * 0,846 = 8,88 \text{ mm}^2$$

$$A_{2,eff} = b_{e1} * t + b_{e2} * t_{red} \quad A_{2,eff} = 22,84 * 1,42 + 23,5 * 0,846 = 52,31 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_4 + A_5$$

$$A_{eff,tot} = 8,88 + 52,31 + 245,3 + 66,73 + 13,67 = 386,89 \text{ mm}^2$$

Arvutan efektiivristlõike raskuskeskme nullpunktide asukohad

$$y_{c0} = \frac{A_{1,eff} * y_1 + A_{2,eff} * y_{2,eff} + A_{3,eff} * y_3 + A_{4,eff} * y_4 + A_5 * y_5 + A_6 * y_6 + A_7 * y_7}{A_{eff,tot}}$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_{4,eff} * z_4 + A_5 * z_5 + A_6 * z_6 + A_7 * z_7}{A_{eff,tot}}$$

$$y_{2,eff} = \frac{b_{e1} * t * \frac{b_{e1}}{2} + b_{e2} * t_{red} * (b - g_r - \frac{b_{e2}}{2})}{b_{e1} * t + b_{e2} * t_{red}}$$

$$y_{2,eff} = \frac{22,84 * 1,42 * \frac{22,84}{2} + 23,5 * 0,846 * (50 - 0,794 - \frac{23,5}{2})}{52,31} = 21,32 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = \frac{8,88 * 49,25 + 52,31 * 21,32 + 245,3 * 0,75 + 6,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{386,89} = 10,54 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{8,88 * 6 + 52,31 * 0,75 + 24,3 * 153,78 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{386,89} = 149,35 \text{ mm}$$

L3.5 Seina efektiivpindala

1. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{mm^2} = \sigma_1$$

$$\sigma_2 = \frac{350 \cdot (250 - 1,35)}{149,35} = 235,9 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{-235,9}{350} = -0,674$$

$$b_{eff} = \rho * b_c = \frac{\rho * \bar{b}}{1 - \psi}$$

$$b_{e1} = 0,4 * b_{eff}$$

$$b_{e2} = 0,6 * b_{eff}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 * (-0,674) + 9,78(-0,674)^2 = 16,49$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,672$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,672 \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{246,99/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{16,49}} = 1,84 > 0,672$$

$$\rho = \frac{1,84 - 0,055(3 - 0,674)}{1,84^2} = 0,506$$

$$\text{Vaadeldava koha efektiivne laius: } b_{eff} = 0,506 * 246,99 / (1 + 0,674) = 74,67 \text{ mm}$$

$$\text{Mittекandva osa laius } b_c - b_{eff} = 125 - 0,794 - \frac{1,42}{2} - 74,67 = 48,83 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 * 48,83 = 19,53 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 * 48,83 = 29,30 \text{ mm}$$

$$A_{3,eff} = b_h * t$$

$$A_{3,eff} = (124,2 + 19,53 + 29,30) * 1,42 = 245,7 \text{ mm}^2$$

$$Z_3 = \frac{A_{3,1} * y_{3,1} + A_{3,2} * y_{3,2}}{A_{3,eff}}$$

$$Z_3 = \frac{1,42 * 19,53 * 11,27 + 1,51 * 171,74}{245,7} = 153,63 \text{ mm}$$

$$Z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * Z_1 + A_{2,eff} * Z_2 + A_{3,eff} * Z_3 + A_4 * Z_4 + A_5 * Z_5}{A_{eff,tot}}$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_4 + A_5$$

$$A_{eff,tot} = 8,88 + 52,31 + 245,7 + 66,73 + 13,67 = 387,29 \text{ mm}^2$$

$$Z_{c0} = \frac{8,88 * 6 + 52,31 * 0,75 + 245,7 * 153,63 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{387,29} = 149,26 \text{ mm}$$

2. Iteratsioon

Arvestan maksimaalse lubatava pingega $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$ ja lineaarse pingeaotusega.

$$\text{Suurim lubatav pinge on seega } \sigma_{com,Ed} = \frac{350}{1,0} = 350 \frac{N}{\text{mm}^2} = \sigma_1$$

$$\sigma_2 = \frac{350 * (250 - 149,26)}{149,26} = 236,2 \text{ MPa}$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \psi = \frac{-236,2}{350} = -0,675$$

$$b_{eff} = \rho * b_c = \frac{\rho * \bar{b}}{1 - \psi}$$

$$b_{e1} = 0,4 * b_{eff}$$

$$b_{e1} = 0,6 * b_{eff}$$

$$\text{Mölktegur } k_\sigma = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 * (-0,675) + 9,78(-0,675)^2 = 16,51$$

$$\rho = 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p \leq 0,672$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kui } \bar{\lambda}_p > 0,672 \text{ kusjuures } (3 + \psi) \geq 0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{246,99/1,42}{28,4 * 0,82 * \sqrt{16,51}} = 1,84 > 0,672$$

$$\rho = \frac{1,84 - 0,055(3 - 0,674)}{1,84^2} = 0,506$$

Vaadeldava koha efektiivne laius: $b_{eff} = 0,506 * 246,99 / (1 + 0,674) = 74,67 \text{ mm}$

$$\text{Mittekandva osa laius } b_c - b_{eff} = 125 - 0,794 - \frac{1,42}{2} - 74,67 = 48,83 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 * 48,83 = 19,53 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 * 48,83 = 29,30 \text{ mm}$$

$$A_{3,eff} = b_h * t$$

$$A_{3,eff} = (123,5 + 19,53 + 29,30) * 1,42 = 244,7 \text{ mm}^2$$

$$z_3 = \frac{A_{3,1} * y_{3,1} + A_{3,2} * y_{3,2}}{A_{3,eff}}$$

$$z_3 = \frac{1,42 * 19,53 * 11,27 + 15,2,8 * 1,42 * 171,74}{244,7} = 153,56 \text{ mm}$$

$$z_{c0} = \frac{A_{1,eff} * z_1 + A_{2,eff} * z_2 + A_{3,eff} * z_{3,eff} + A_4 * z_4 + A_5 * z_5}{A_{eff,tot}}$$

$$A_{eff,tot} = A_{1,eff} + A_{2,eff} + A_{3,eff} + A_4 + A_5$$

$$A_{eff,tot} = 8,88 + 52,31 + 244,7 + 66,73 + 13,67 = 386,3 \text{ mm}^2$$

$$z_{c0} = \frac{8,88 * 6 + 52,31 * 0,75 + 244,7 * 153,56 + 66,73 * 249,25 + 13,67 * 244}{386,3} = 149,4 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = \frac{8,88 * 49,25 + 52,31 * 21,32 + 244,7 * 0,75 + 66,73 * 25 + 13,67 * 49,25}{386,3} = 10,56 \text{ mm}$$

Seega on seina efektiivlaius määratud.

L3.6 Lõplikud tulemused

$$z_{c0} = 149,4 \text{ mm}$$

$$y_{c0} = 10,56 \text{ mm}$$

$$A_{eff,tot} = 386,30 \text{ mm}^2$$

$$I_y = \sum_n^i \frac{h_i^3 * b_i}{12} + b_i h_i * (z_{c0} - z_i)^2$$

$$I_y = \left[\frac{10,5^3 * 0,846}{12} + 10,5 * 0,846 * (149,4 - 6)^2 \right] + \left[\frac{0,846^3 * 23,5}{12} + \frac{1,42^3 * 22,84}{12} + 52,31 * (149,4 - 0,75)^2 \right] + \left[\frac{19,53^3 * 1,42}{12} + 19,53 * 1,42 * (149,4 - 11,27)^2 \right] + \left[\frac{29,3^3 * 1,42}{12} + 29,3 * 1,42 * (149,4 - 110,35)^2 \right] + \left[\frac{123,5^3 * 1,42}{12} + 123,5 * 1,42 * (149,4 - 186,75)^2 \right] + \left[\frac{1,42^3 * 46,99}{12} + 1,42 * 46,99 * (149,4 - 249,25)^2 \right] + [114,55 + 13,67 * (149,4 - 244)^2] = 3190376 \text{ mm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z_{c0}}$$

$$W_y = \frac{3190376}{149,4} = 21354,8 \text{ mm}^3$$