



Kaspar Roov

KOLMEFRAKTSIOONILISE VIBROSÕELA TUGIKONSTRUKTSIOONI PROJEKTEERIMINE

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Masinaehituse õppekava

Juhendaja: Mart Tiidemann

Tallinn 2021

Mina, Kaspar Roov, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Mart Tiidemann.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaspar Roov

sünnikuupäev: 07.03.1997

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Kolmefraktsioonilise vibrosõela tugikonstruktsiooni projekteerimine

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

11.05.2021

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1 ETTEVÕTTE TUTVUSTUS.....	6
2 SEADME TUTVUSTUS	7
3 PROJEKTEERIMINE.....	9
3.1 Konstruktsiooni kuju valimine	9
3.2 Talade dimensioneerimine.....	10
3.3 Kuju optimeerimine.....	15
4 OMAVÕNKE ANALÜÜS	19
4.1 Lubatud sundvõnkumise piirkonnad	19
4.2 Uuendatud mudeli arvutamine.....	19
4.3 Vajaliku omavõnkesageduse saavutamine	20
5 PROJEKTEERIMINE.....	21
5.1 Nelikant-torust diagonaalide ühendamine	21
5.2 Talade ühendamine.....	22
5.3 Taldmiku disain	25
5.4 Sõela kinnitamine tugikonstruktsioonile	27
6 KEEVISÕMBLUSTE KONTROLLARVUTUSED	29
6.1 Diagonaali keevisõmbuse kontrollarvutus	30
6.2 Taldmiku keevisõmbuse kontrollarvutus	32
7 KINNITUSVAHENDID	34
8 MAJANDUSARVUTUSED.....	36
KOKKUVÕTE.....	37
SUMMARY	39
VIIDATUD ALLIKAD.....	41
LISAD	43
Lisa 1. Peakooistu joonis.....	44
Lisa 2. Diagonaaltõe koostejoonis	45
Lisa 3. Vertikaaltala koostejoonis	46

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on projekteerida tugikonstruktsioon Spaleck Flip-Flow 3d Combi Screen kolmefraktsioonilisele vibrosõelale. Vibrosõel on osa jäätmete purustus- ja sorteerimisliinist, mis hakkab käitlema ehitus- ja lammutusjäätmeid. Seade sõelub materjali vibreerivate sõelumismattidega, millest tulenevalt peab sõela tugikonstruktsioon vastu pidama seadmest tekkivatele jõududele ning mitte minema resonantsi.

Lõputöö koosneb kaheksast peatükist, mille käigus tutvustatakse algset ülesannet ning selgitatakse ülesande lahendamiseks läbitud etappe.

Konstruktsiooni projekteerimiseks tutvuti tehtud lahendustega ning otsutati, et konstruktsioon koosneb raskust kandvatest vertikaaltaladest, mis seotakse omavahel horisontaal- ja diagonaaltugedega. Talade dimensioneerimiseks kasutatakse tala vastupanumomenti ning dimensioneeritud talale teostatakse kontrollarvutus nõtkele.

Tagamaks konstruktsiooni maksimaalse jäikuse loodi HEB 120 taladest mudel, mille peal viidi läbi omavõnkeanalüüs ning arvutati ANSYS tarkvaras läbi konstruktsiooni erinevad konfiguratsioonid, leidmaks kõige jäigem geomeetria. Optimeeritud mudelis asendati HEB 120 talad peatükis 3.2 arvutatud HEB 140 taladega ning teostati omavõnkeanalüüs. Omavõnkeanalüüsi käigus muudeti konstruktsiooni jäigemaks, kuni konstruktsiooni omavõnkesagedus jäi lubatud vahemikku. Lõpliku mudeli vertikaaltaladeks osutusid HEB 160, horisontaaltaladeks HEB 140, diagonaaltaladeks HEB 120 talad ning 80x80x6 mm nelikanttorud.

Olles leidnud konstruktsiooni lõpliku kuju ja talad projekteeriti lõpuni kõik sõlmed. Sõela kinnitamiseks konstruktsioonile projekteeriti talade otsa taldmik, kuhu sõela tugijalad toetuma hakkavad ning poltliidetega kinnituvad. Konstruktsiooni muudeti täiendavalt jäigemaks tugevdusribide lisamisega.

Keevisarvutused teostati kõige ohtlikumatele sõlmedele, milleks on keevisõmblus tala ja alusplaadi vahel, kus keevisõmblusele mõjub nihkepinge; nelikanttoru keevisõmblus otsaflantsi külge, millele mõjub sõelast vertikaal- ja horisontaalsuunaline jõud, mis kandub 45° nurga all nelikant-torust diagonaali.

Läbi terve konstruktsiooni kasutati samu kinnitusvahendeid. Kontrollimaks nende sobivust teostati kontrollarvutus kõige ebasoodsamalt töötavale poltliitele, milleks on nelikant-torust diagonaali ja vertikaaltala ühendav üksik M16 polt, mis töötab lõikele.

Majandusarvutustest leiti seadme projekteerimisele kuluv aeg ja ajast tulenev omahind.

1 ETTEVÕTTE TUTVUSTUS

Lõputöö baasettevõtteks on TB Solutions OÜ. TB Solutions OÜ, varasem Technobalt Solutions, on 1994. aastal asutatud Eesti tehnoloogiaettevõte, mis on tänaseks päevaks juba üle 25 aasta pakkunud lahendusi materjalikäitluseks. Ettevõtte tegutseb üksikute seadmete, kui ka terviklike „võtmed kätte“ lahenduste müümisega. [1]

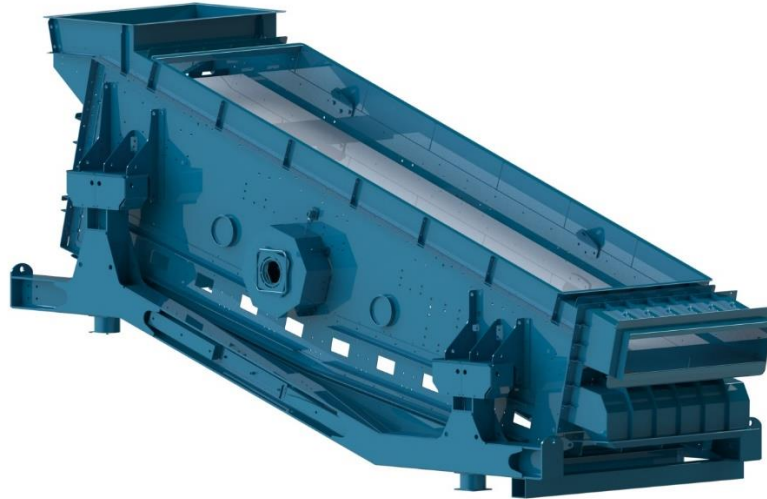
Põhitegevusalaks on konveiersüsteemide ja tervikliinide müük. Omatoodete kataloogi kuuluvad erinevat tüüpi sõelad, doseerimislahendused ning lint-, kett-, lint- ja kraapkonveierid. Samuti on toodetud erinevaid mobiilseid lahendusi materjalide transpordiks ja käitluseks.

Ettevõtte on projekteerinud lahendusi jäätmekäitlusesse, kaevandustesse ja karjääridesse, sadamatesse ja vagunite terminalidesse, paberi- ja puidutööstusesse ning energeetikasektoris. Kodumaiste klientide hulka kuuluvad Ragn-Sells, Viru Keemia Grupp, Kiviõli Keemiatööstus, lisaks on mitmeid kliente Euroopast ning Skandinaaviast.

Ettevõttes töötab kokku 15 töötajat (31.03.2021 seisuga), 2021. aasta I kvartali maksustatav käive oli ca 860 000 eurot. [2]

2 SEADME TUTVUSTUS

Antud lõputöö eesmärgiks on projekteerida tugikonstruktsioon Spaleck Flip-Flow 3d Combi Screen kolmefraktsioonilisele vibrosõelale (Sele 1.) Tegemist on sõeluriga, millel on kaks sõelumispinda, mis sorteerivad materjali kolme väljundisse: ülegabariidne-, keskmine-, ja peenfraktsioon. Ülegabariidne ja keskmine fraktsioon väljuvad sõela otsast kolude kaudu, peenfraktsioon laetakse välja sõela põhjast.



Sele 1. SPALECK Flip-Flow 3D Combi-Screen

Vibrosõel on osa liinist, mille eesmärgiks on C&D ehk ehitus- ja lammutusjätmete sorteerimine. C&D jätmed moodustavad üle kolmandiku Euroopas tekkivatest jätmetest ning koosnevad betoonist, tellistest, klaasist, puidust, erinevatest metallidest ja plastikust [3].

Kuna sõelur vibreerib, siis liinilt toitekolusse jõudnud materjal liigub mööda sõela pinda väljundkolude suunas, ülegabariidiline materjali liigub mööda ülemist sõelapinda; ülemisest, suurema avaga sõelast läbi kukkuv materjal sorteeritakse peenfraktsiooniks ning keskmiseks fraktsiooniks. Sõeluri harmooniline vibreerimine tekitab materjalis „laine“ efekti, mis tagab materjali pideva ja ühtlase liikumise. Ekstsentrilise keerlemisest tekkiv vibratsioon agiteerib materjali, mis liigutab seda mööda sõela pinda edasi, samas annab materjalile ka lisaenergiat, mis tagab parema sõelumise. [4]

Tulenevalt liini tehnoloogilisest lahendust on vajalik, et sõela sisendkolu krae asuks 7100 mm kõrgusel põrandapinnast, mistõttu on tugijalgade kõrgused vastavalt 4050 ja 2818 mm põrandast. Sõela tootja on koos mudeliga tarninud ka sõela joonised, millel on välja toodud tugijalgadele mõjuvad staatilised ja

dünaamilised koormused. Punktis A, kõrgemal tugijalal, on staatiliseks koormuseks 42100 N, dünaamilisteks koormusteks vertikaalsuunas 1800 N ja horisontaalsuunas 150 N. Punktis B, madalamal tugijalal, on staatiliseks koormuseks 40600 N, dünaamilisteks koormusteks vertikaalsuunas 1800 N ja horisontaalsuunas 150 N. Käivitusel võivad dünaamilised koormused suurened a hetkeliselt kuni seitsmekordseks. Staatilise koormuse muutus sõelutava materjali näol on nii väike, et seda arvutamisel ei arvestata.

Vibratsioonide summutamiseks toetub sõel vedrustatud puksidega alusraamile, mis on disainitud selliselt, et alusraami jalgadele mõjub teoreetiline töösagedus 11.33 Hz. Alusraam on projekteeritud HEA 320 talast ning vibratsiooni summutamiseks on sellele lisatud raami keskossa polditud lisaraskused.

3 PROJEKTEERIMINE

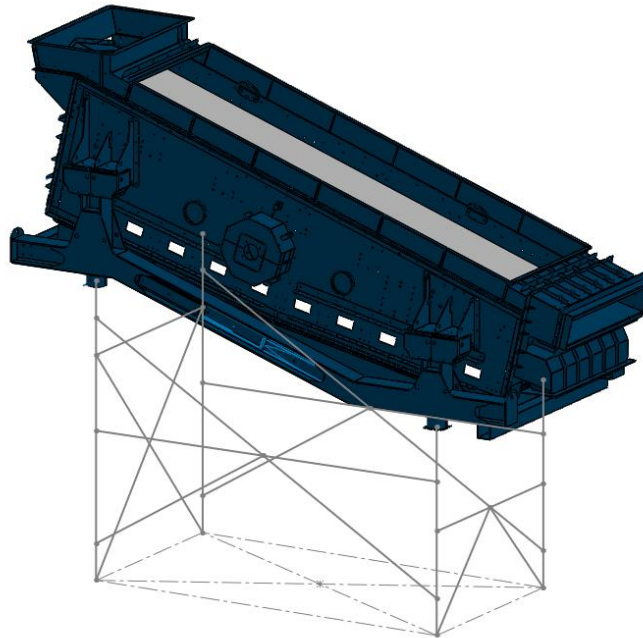
3.1 Konstruktsiooni kuju valimine

Enne konstruktsiooni projekteerimist tutvuti ettevõtte projektide arhiiviga ning otsiti, kuidas varasemalt seda tüüpi seadmeid on toetatud. Esines kolme tüüpi tugesid. Esimesena jäi silma sõela toetamine betoonist valatud või ehitusblokkidest laotud tugele, mis moodustasid sõela alla kolme seinaga punkri. Sel juhul toimus sõelas põhjast väljuva peene fraktsiooni ladustamine otse sõela alla. Selline lahendus antud liini kontekstis ei sobi, sest peen fraktsioon tuleb konveieritega tootmishoonest välja viia.

Teiseks olid individuaalsete sammastega toed, mis ei olnud omavahel seotud. Neid esines enamasti madalatel konstruktsioonidel, kus sõela madalam tugijalg oli kas maapinna lähedal või toetus sellele. Antud lahenduse puhul see ei sobi, sest sõela madalam tugijalg asub 2.8 meetri kõrgusel, ning ei ole otstarbekas nii kõrgeid talasid ilma toestamata püstitada, samuti on vajalik horisontaaltalade olemasolu peenfraktsiooni väljundkonveieri toestamiseks.

Kolmandat tüüpi tugikonstruktsioonid olid massiivsed teraskonstruktsioonid, mis olid omavahel horisontaal- ja diagonaaltaladega seotud ning võimaldasid sõelale ligipääsu mitmest küljest. Sellised konstruktsioonid olid valmistatud kas HE- või I-taladest polditavate koostudena.

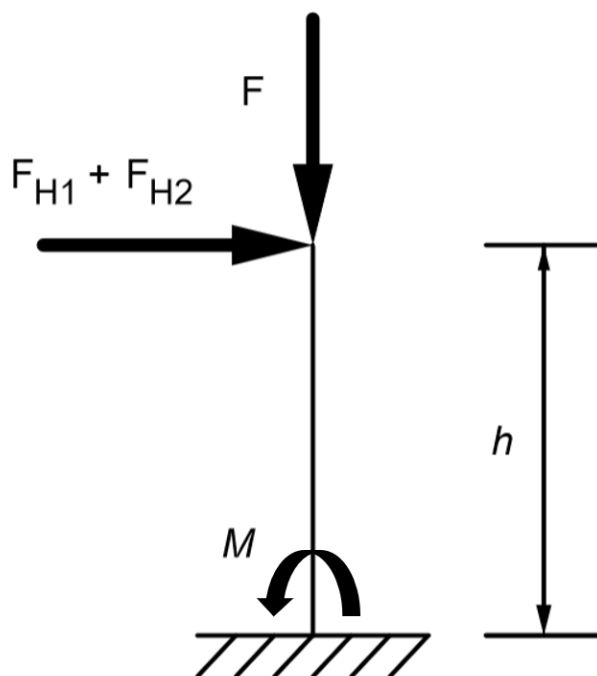
Peale konstruktsiooni lahendustega tutvumist projekteeriti tugikonstruktsiooni esmane traatmudel. Mudel koosneb neljast vertikaaltoest, mis on omavahel ühendatud horisontaalsete taladega. Sõela tugijalgade konstruktsioonist tulenevalt moodustavad vertikaaltalade keskteljed ristküliku mõõduga 2786x5140 mm. Jäikuse lisamiseks seotakse vertikaal- ja horisontaaltalad omavahel diagonaaltugedega. Konstruktsiooni projekteerimisel kasutatakse HEB-talasid vertikaal-, horisontaal- ja diagonaaltugede jaoks ning nelikanttorusid vertikaaltalade omavaheliseks sidumiseks diagonaalidega. Konstruktsiooni traatmudel on nähtav Sele 2.



Sele 2. Konstruksiooni traatmodel

3.2 Talade dimensioneerimine

Projekteerimise alustamiseks on vajalik teada milliseid talasid kasutatakse. Vertikaaltalad dimensioneeritakse lihtsustatud arvutusmodeli järgi individuaalsete postidena, mis võtavad üksi jõudu vastu. Arvutustega dimensioneeritakse vertikaaltalad kasutades talas tekkivat vastupanumomenti. Selleks leitakse talas tekkiv paindemoment, millest arvutatakse tala vastupanumoment tulenevalt materjali tõmbetugevusest ja kasutatavast varutegurist. Tala dimensioneeritakse maksimaalse teoreetilise momendiga. Maksimaalne moment mõjub materjali liikumise suunas, seda tekitab horisontaalsuunaline dünaamiline koormus ning konstruktsiooni hällbest tekkiv horisontaalkoormus. Võrreldes tekkinud vastupanumomenti HEB-talade vastupanumomentidega tala nõrgemas sihis valitakse tala, mille vastupanumoment on suurem talas tekkivast arvutuslikust vastupanumomendist. Peale tala dimensioneerimist tehakse kontrollarvutus nõtkekandevõimele, millega leitakse maksimaalne lubatud koormus, mida tala suudab kanda enne nõtkumist. Talas tekkiv paindemoment leitakse Joonis 1 kujutatud toereaktsiooniga.



Joonis 1. Toereaktsioon

Paindemomendi arvutamiseks kasutatakse valemit (1):

$$M = (F_{H1} + F_{H2}) \cdot h, \quad (1)$$

- kus F_{H1} - dünaamilisest koormusest tulenev horisontaalne koormus, N;
 F_{H2} - konstruktsiooni hõlbest tulenev horisontaalne koormus, N;
 h - tala pikkus, m.

Horisontaalsuunaline dünaamiline koormus on mõlemas punktis 150 N. Kuna käivitushetkel võivad dünaamilised koormused seitsmekordistuda on maksimaalseks horisontaaljõuks:

$$F_{H1} = 7 \cdot 150 = 1050 \text{ N}.$$

Konstruktsiooni hõlbest tulenev horisontaalne koormus leitakse valemiga (2) [5, p. 304]:

$$F_{H2} = \phi \cdot F, \quad (2)$$

- kus ϕ - konstruktsiooni üldhõlve;
 F - suurim punkti A ja B normaaljõust, N.

Normaaljõu leidmiseks arvutatakse punktides A ja B mõjuvad maksimaalsed allapoole suunatud jõud. Tootjapoolsetel joonistel on punktis A, pikema toe otsas, märgitud mõjuvaks staatiliseks jõuks 42100 N ning vertikaalsuunaliseks dünaamiliseks koormuseks 1800 N. Käivitusemomendil võivad dünaamilised

jõud seitsmekordistuda, punktis A mõjuv allapoole suunatud jõud leitakse maksimaalsete jõudude kokku liitmisega:

$$F_A = 42100 + 7 \cdot 1800 = 54700 \text{ N.}$$

Punktis B, lühema toe otsas, on märgitud mõjuvaks staatiliseks koormuseks 40600 N ning vertikaalsuunaliseks dünaamiliseks koormuseks 1800 N. Punktis B allapoole mõjuv jõud leitakse maksimaalsete jõudude kokku liitmisega:

$$F_B = 40600 + 7 \cdot 1800 = 53200 \text{ N.}$$

Arvutamisel kasutatakse punkti A koormusi, kuna need on suuremad ning tala on pikem, tala pikkus on 4.05 meetrit.

Kuna keeviskonstruktsioonidel tekivad koostamise käigus sisepinged ei pruugi keevitatud talad alati täiesti sirged olla. Arvutamisel tuleb arvestada erinevate hälvetega. Üldhälbega (3) [6, p. 13] leitakse tala kõverus teoreetilise positsiooni suhtes:

$$\phi = \phi_o \cdot a_h \cdot a_m, \quad (3)$$

kus ϕ_o - hälbe (algkalde) põhiväärtus = 1/200;
 a_h - kõrgusest h sõltuv vähendustegur;
 a_m - vähendustegur, mis arvestab postide arvu reas.

Kõrgusest sõltuv vähendustegur leitakse valemiga (4) [6, p. 13]:

$$a_h = \frac{2}{\sqrt{h}}. \quad (4)$$

Postide arvu arvestav vähendustegur leitakse valemiga (5) [6, p. 13]:

$$a_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right)}, \quad (5)$$

kus m - Postide arv reas.

Järgnevalt leitakse valemiga (4) kõrgusest sõltuv vähendustegur:

$$a_h = \frac{2}{\sqrt{4.05}} \approx 1.$$

Järgnevalt leitakse valemiga (5) vähendustegur, mis arvestab postide arvu:

$$a_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{1}\right)} = 1.$$

Järgnevalt leitakse valemiga (3) konstruktsiooni üldhälve:

$$\phi = \frac{1}{200} \cdot 1 \cdot 1 = 0.005.$$

Konstruktsiooni üldhälvet võib arvesse võtta kas ekstsentrilisusena või horisontaalse koormusena [5, p. 304]. Antud juhul arvestatakse hälvet horisontaalse jõuga, mis leitakse valemiga (2):

$$F_{H2} = 0.005 \cdot 54700 = 274 \text{ N}.$$

Paindemoment koos konstruktsioonihälvete mõjuga leitakse valemiga (1):

$$M = (1050 + 247) \cdot 4,05 = 5253 \text{ Nm}.$$

Valides konstruktsiooni materjaliks S355 terase on voolavuspiiriks $R_{eH} = 355 \text{ MPa}$. Kuna konstruktsioonile mõjuvad lisaks staatilistele ka dünaamilised koormused valitakse varuteguriks 4 [7, p. 44]. Võttes tegelikud maksimaalsed paindepinged võrdseks lubatuga, saab avaldada tala nõutava vastupanumomendi valemisse (6) [7, p. 47]:

$$W_z = \frac{M}{[\sigma]}, \quad (6)$$

kus W_z - tala nõutav vastupanumoment, cm^3 ;
 $[\sigma]$ - lubatud normaalpinge, N.

Lubatud normaalpinge leitakse valemiga (7) [7, p. 45]:

$$[\sigma] = \frac{R_{eH}}{v}, \quad (7)$$

kus R_{eH} - metalli voolepiir, N/mm^2 ;
 v - varutegur.

Järgnevalt leitakse valemiga (7) lubatud normaalpinge:

$$[\sigma] = \frac{355}{4} = 88,8 \text{ N/mm}^2.$$

Järgnevalt leitakse valemiga (6) tala vastupanumoment nõrgemas, z-teljelises sihis:

$$W_z = \frac{5253}{88,8} = 59,2 \text{ cm}^3$$

Võrreldes leitud vastupanumomenti tabelist HEB talade omadega, osutub valituks HEB 140 tala, mille vastupanumoment nõrgemas sihis on 79 cm^3 [6, p. 204]. Kontrollimaks kas antud tala sobib teostatakse kontrollarvutus nõtketele kasutades valemit (8) [5, p. 434]. Nõtkearvutus teostatakse tala nõrgemas, z-teljelises sihis [6, p. 204]. Tala sobib, kui on täidetud tingimus $F_u > F_B$. Nõtkekandevõime leitakse valemiga (8) [5, p. 434]:

$$F_{bu} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (8)$$

kus $N_{b,Rd}$ - arvutuslik nõtkekandevõime, N;
 χ - nõtketegur;
 f_y - terase voolepiir, MPa;
 γ_{M1} - osavarutegur.

Nõtketegur leitakse valemiga (9) [5, p. 434]:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad (9)$$

kus ϕ - abisuurus;
 $\bar{\lambda}$ - tingsaledus.

Kuna HEB140 tala kuulub ristlõikeklassi 1, siis leitakse tingsaledus valemiga (10) [5, p. 434]:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad (10)$$

kus λ - varda saledus.

Tala saledus leitakse valemiga (11) [5, p. 434]:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}, \quad (11)$$

kus i - ristlõike inertsraadius, mm.

Abisuurus ϕ leitakse valemiga (12) [5, p. 434]:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2], \quad (12)$$

kus α - häälbetegur, 0,49.

Järgnevalt leitakse tala saledus valemiga (11):

$$\lambda = \frac{8100}{35.8} = 226.2.$$

Järgnevalt leitakse tala tingsaledus valemiga (10):

$$\bar{\lambda} = \frac{226.2}{\pi} \sqrt{\frac{355}{210000}} = 2.96.$$

Järgnevalt leitakse abisuurus ϕ valemiga (12):

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0.49(2.96 - 0.2) + 2.96^2] = 5.56.$$

Järgnevalt leitakse nõtketegur valemiga (9):

$$\chi = \frac{1}{5.56 + \sqrt{5.56^2 - 2.96^2}} = 0.097.$$

Järgnevalt leitakse nõtkekandevõime valemiga (8):

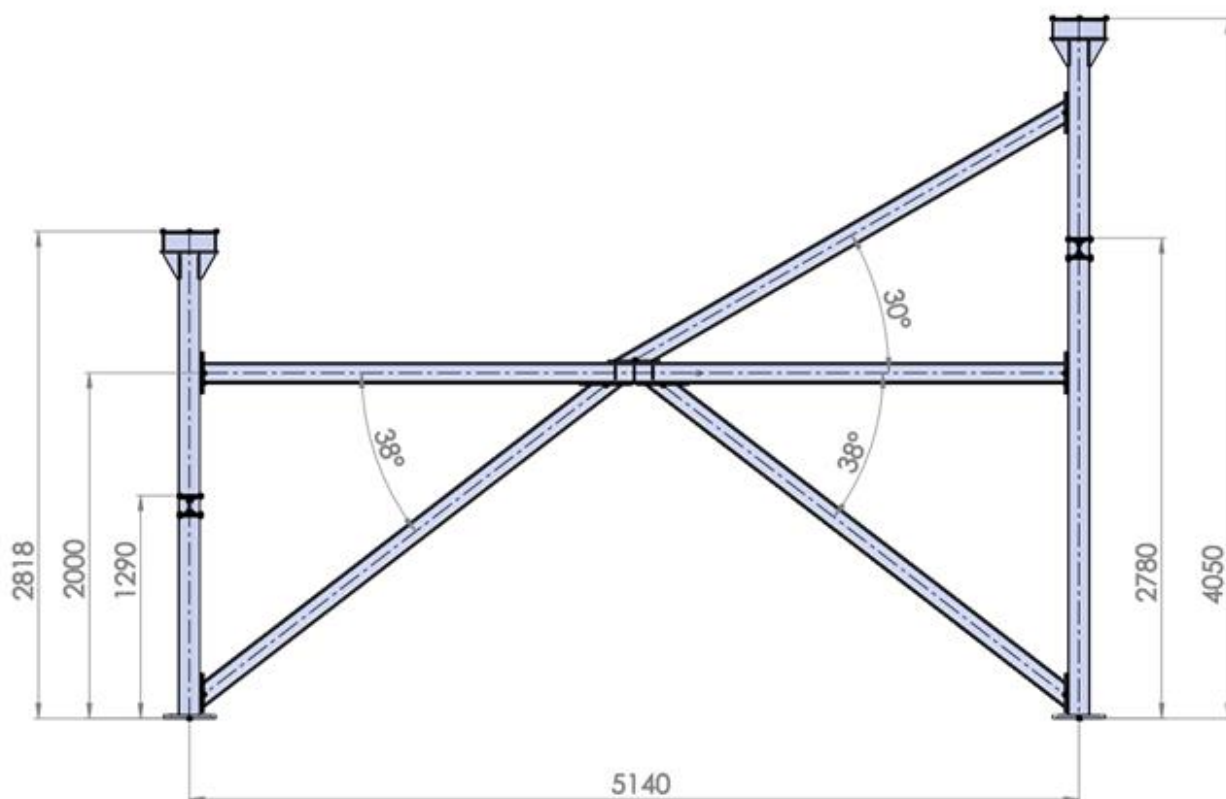
$$F_{bu} = \frac{0.097 \cdot 4300 \cdot 355}{1.25} = 118456 \text{ N}.$$

Kuna on täidetud tingimus $F_u > F_B$, siis arvutatud tala sobib. Konstruktsioonis kasutatakse vertikaalsete taladena minimaalselt HEB 140 talasid. Kuna ristlõike suurenedes suureneb ka nõtkekandevõime, siis võib töö käigus talad vahetada suuremate vastu, kui selleks tekib vajadus.

3.3 Kuju optimeerimine

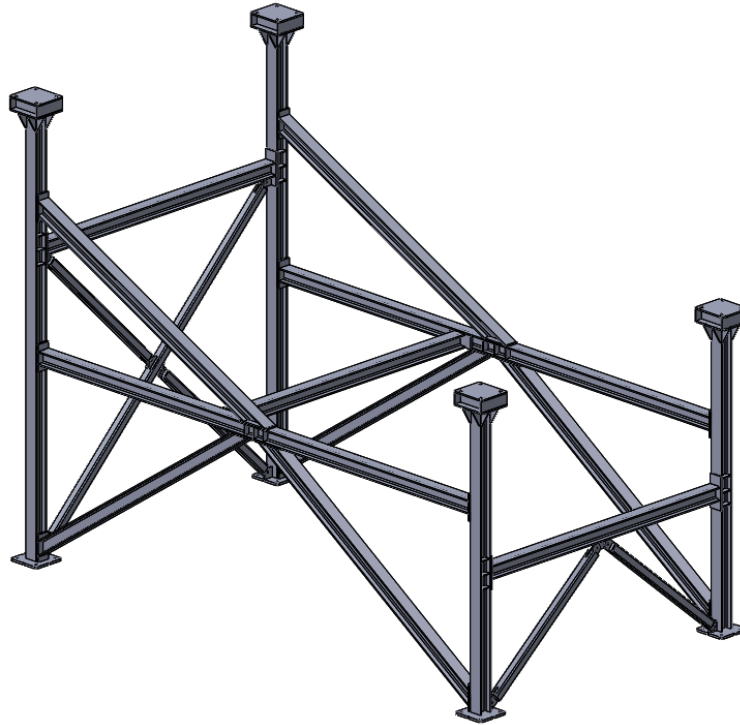
Kuna projekteeritav konstruktsioon hakkab tööle dünaamiliste koormuste all, siis optimeeritakse kuju selliselt, et konstruktsioon oleks võimalikult jäik ja omavõnkesagedus võimalikult suur. Konstruktsiooni kuju optimeerimiseks kasutatakse SolidWorks modelleerimistarkvara, milles mudel joonestatakse, ja Ansys Workbench tarkvara, millega teostatakse arvutused. Ansyse ühildavus SolidWorksigi võimaldab viia mudelis sisse muudatusi ning korrata arvutusi, ilma et peaks arvutusmudelit uuesti üles seadma. Workbenchis teostatakse „Static structural“ analüüs saamaks teada konstruktsiooni algseisundit, st kui sellele on rakendunud seadme raskus ja konstruktsiooni omaraskus, ning seejärel teostatakse selle analüüsi tulemustest „Modular“ analüüs, millega leitakse konstruktsiooni omavõnkesagedus.

Sõlme (sõelur, tugikonstruktsioon ja sõela-alune konveier) lahendusest tingituna on otsmiste horisontaaltugede asukohad teada, seega optimeerida saab vaid vertikaaltalasid pikisuunas ühendavat horisontaaltala ning selle diagonaalseid tugesid. Konstruktsiooni algsed mõõtmed on toodud Joonis 2.



Joonis 2. Konstruktsiooni algsed mõõdud

Kuju optimeerimiseks projekteeriti kogu konstruktsioon HEB 120 taladest, et konstruktsioon oleks vähem jäik ning konstruktsiooni muutmisest tulenevad muutused jäikuses ja omavõnkesageduses oleksid märgatavamad. Mudeli erinevates konfiguratsioonides muudeti horisontaaltala kõrgust, millest tulenevalt muutusid ka alumiste diagonaalide nurgad, samuti muudeti ülemise diagonaali nurka. Konstruktsiooni algne kuju on toodud Sele 3.



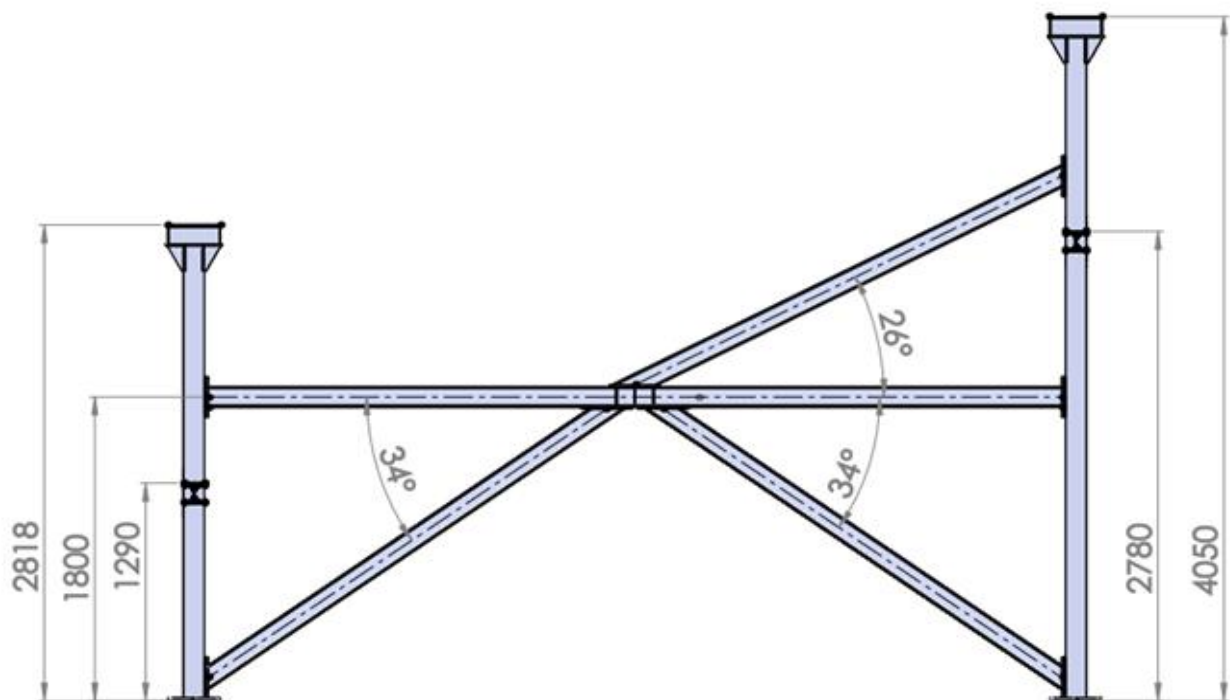
Sele 3. Konstruktsiooni algne kuju

Esmases disainis oli horisontaaltala kesktelg taldmiku põhjast 2000 mm kõrgusel. Optimeerimise käigus selgus, et ei ole mõtet horisontaaltala kõrgemale viia, sest see tõi kaasa omavõnkesageduse vähenemise, st konstruktsioon muutus vähem jäigaks. Järgnevalt vähendati horisontaaltala kõrgust 100 mm kaupa ning igas asendis arvutati läbi kaks konfiguratsiooni, üks kus diagonaali ülemise otsa asend oli sama, mis algsel mudelil ning teine, kus selle telje otsa toodi 300 mm mööda tala allapoolt. Kokku arvutati läbi 10 erinevat konfiguratsiooni, mille seast valiti välja kõige jäigem disain, millega hakati edasi töötama. Konstruktsiooni arvutatud mõõtmed ja leitud omavõnkesagedus on toodud Tabel 1.

Tabel 1. Mudeli läbiarvutatud konfiguratsioonid

Hor. tala kõrgus, mm	Alumise diagonaali nurk, kraadi	Ülemise diagonaali nurk, kraad	Omaõõõkesagedus, hz
1600	32	36	12.91
1700	32	34	12.69
1800	34	34	13.42
1800	34	26	13.49
1900	36	28	13.21
1900	36	32	13.00
2000	38	25	12.24
2000	38	30	12.00
2100	40	28	11.56

Võrreldes leitud omaõõõkesagedusi selgub, et kõige suurema omaõõõkesagedusega ja seega kõike jäigemaga konstruktsioonil on horisontaaltala kesktelg 1800 mm kõrgusel taldmiku põhjast ning ülemine diagonaal on 26° nurga all. Optimeeritud konstruktsiooni mõõtmed on toodud Joonis 3.



Joonis 3. Optimeeritud konstruktsiooni mõõtmed

4 OMAVÕNKE ANALÜÜS

4.1 Lubatud sundvõnkumise piirkonnad

Sõelur, mida konstruktsioon toestab, sõelub materjali vibratsiooni teel. Selleks läbib sõela völli, mille mõlemas otsas on ekstsentrisk. Sõela alusraam on disainitud selliselt, et suur osa sõelumisest tekitatud vibratsiooni summutatakse. Sellest tulenevalt on tala otstesse mõjuv teoreetiline töösagedus 11.33 Hz. Selleks, et vältida konstruktsiooni resonantsi sattumist, tuleb tugikonstruktsioon projekteerida selliselt, et omavõnkesagedus ei ühtiks seadme töösagedusega. Lubatud sundvõnkumise piirkonnad on välja toodud võnkesageduste suhtena valemis (13) ja (14) [8, p. 338];

$$\frac{\omega_0}{\omega} = 0.6 \dots 0.75; \quad (13)$$

$$\frac{\omega_0}{\omega} = 1.25 \dots 1.4, \quad (14)$$

kus ω_0 - seadme töösagedus, Hz;
 ω - konstruktsiooni omavõnkesagedus, Hz.

Lähtuvalt valemist (13) ja (14) leitakse omavõnkesagedused, mis on lubatud:

$$\frac{\omega_0}{\omega} = 0.6 \dots 0.75 \rightarrow \omega = \frac{\omega_0}{0.6 \dots 0.75} = \frac{11.33}{0.6 \dots 0.75} = 15.1 \dots 18.9 \text{ Hz};$$

$$\frac{\omega_0}{\omega} = 1.25 \dots 1.4 \rightarrow \omega = \frac{\omega_0}{1.25 \dots 1.4} = \frac{11.33}{1.25 \dots 1.4} = 8.1 \dots 9.1 \text{ Hz}.$$

4.2 Uuendatud mudeli arvutamine

Optimeeritud kujuga mudeli analüüs andis omavõnkesageduse esimeseks harmoonikuks 13.49 Hz, kuid mudelis kasutati arvutamise eesmärgil HEB 120 talasid. Asendades vertikaaltalad peatükis 3.2 dimensioneeritud HEB 140 taladega tuleb teostada uus arvutus. Konstruktsiooni omavõnkesageduse esimeseks harmoonikuks saadi 14.9 Hz ja teiseks 15.5 Hz. Kuna leitud omavõnkesagedus ei jää soovitud vahemikku, siis tuleb mudelit muuta selliselt, et omavõnkesagedus jääks kas vahemikku 8.1 kuni 9.1 Hz või 15.1 kuni 18.9 Hz. See tähendab et konstruktsiooni tuleb muuta jäigemaks või vähem jäigaks.

Eelistatum oleks viia suhe $\omega/\omega_0 > 1$, sest juhul kui $\omega/\omega_0 < 1$, tuleb seadme käivitamisel läbida resonantsipiirkond. Samuti on omavõnkesageduse vähendamiseks vajalik konstruktsiooni jäikuse vähendamine või liikuva massi suurendamine. [8, p. 338]

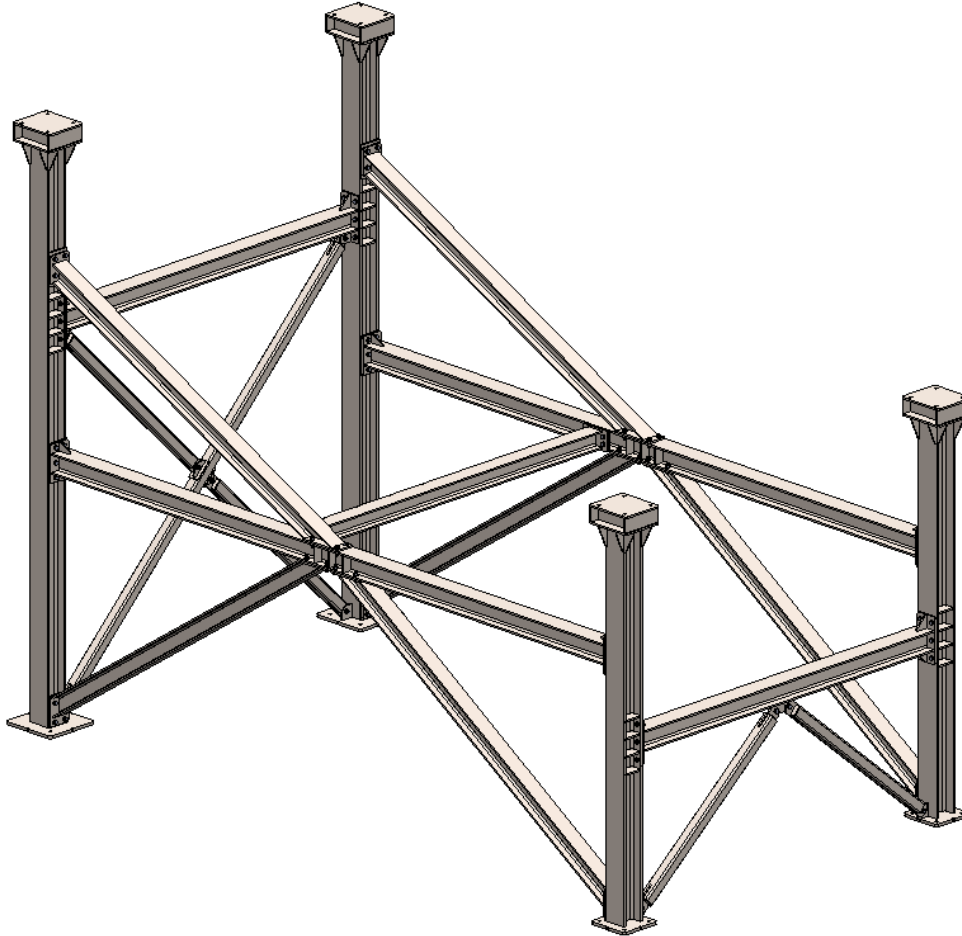
Kuna jäikuse vähendamine ei ole konstruktsiooni püsivuse pärast võimalik, tuleb konstruktsiooni muuta piisavalt jäigaks, et omavõnkesagedus jääks vahemikku 15.1 kuni 18.9 Hz. See saavutatakse mudeli talade vahetamisega suurema ristlõikega variantide vastu.

4.3 Vajaliku omavõnkesageduse saavutamine

Konstruktsiooni edasisel jäigemaks muutmisel asendati vertikaaltalad HEB 160-ga, horisontaaltalad HEB 140-ga ja nelikanttorud 80x80x6 mm torudega. Teostades omavõnkesageduse analüüs saadakse omavõnkesageduse esimeseks harmoonikuks 17.17 Hz ja teiseks 17.94 Hz. Kuna mõlemad väärtused jäävad vahemikku 15.1 kuni 18.9 Hz, siis võib mudeli omavõnkesageduse ja jäikuse lugeda sobilikuks.

5 PROJEKTEERIMINE

Projekteerimise käigus lahendati kõik sõlm-ühendused, projekteeriti lõpuni kinnitusplaadid, lisati talade koostudesse ribisid ning valmistati tööjoonised. Konstruktsiooni lõplik mudel on nähtav Sele 4. Peakoostu joonis on nähtav Lisa 1. Konstruktsiooni lõplikud gabariitmõõtmed on 3166x5540x4050 mm. Konstruktsiooni lõplikuks massiks on 2085 kg.



Sele 4. Konstruktsiooni lõplik mudel

5.1 Nelikant-torust diagonaalide ühendamise

Diagonaalsed toed valmistatakse nelikant-torust mõõtudega 80x80x6 mm ning kinnitatakse põhikonstruktsiooni külge poltliidetega. Selleks on toru otsa keevitatud plaat, millega diagonaal

põhikonstruktsiooniga liidetakse. Nelikant-torule otsa keevitatud plaadi keevisõmbluse miinimumpikkus on defineeritud valemiga (15) [9, p. 116]:

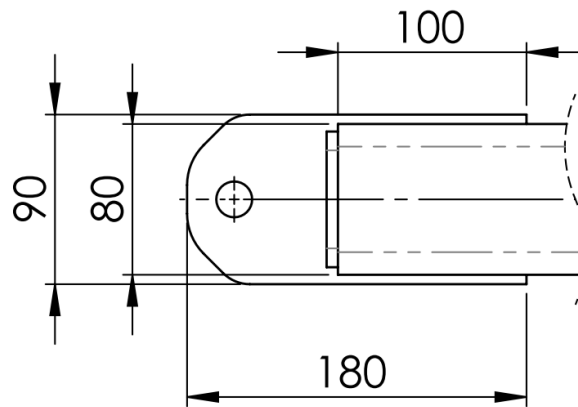
$$l \geq 1.2 \cdot d_1, \quad (15)$$

kus l - Keevisõmbluse pikkus, mm;
 d_1 - Toru läbimõõt, mm.

Arvestades, et diagonaalide jaoks kasutatakse 80x80x6 mm toru leitakse keevisõmbluse miinimumpikkus valemiga (15):

$$l \geq 1.2 \cdot 80 = 96 \text{ mm}.$$

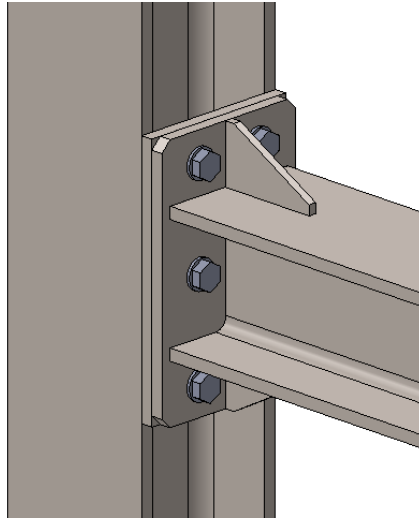
Kuna keevisõmbluse pikkus peab olema suurem või võrdne 96 millimeetrist, siis otsaflants disainitakse selliselt, et keevise pikkus on 100 mm. Nelikanttõru ja otsaflantsi ühendamine on näha Joonis 4.



Joonis 4. Flantsi mõõtmed

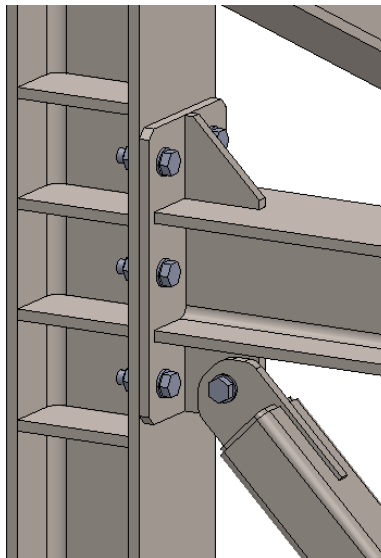
5.2 Talade ühendamine

Horisontaaltalad, mille külge kinnituvad diagonaaltoed, ühendatakse vertikaaltalade külge poldliidetega. Selleks keevitatakse horisontaalse HEB 140 tala otsa plaat mõõtudega 260x160x12 mm ning samas mõõdus, kuid piklike avadega plaat keevitatakse HEB 160 tala külge peale. Koos taldmikuga on horisontaalse tala külge keevitatud ka ribi, mis muudab plaadi ja tala liidet jäigemaks. Ühendus on näidatud Sele 5.



Sele 5. Horisontaaltala ühendamine

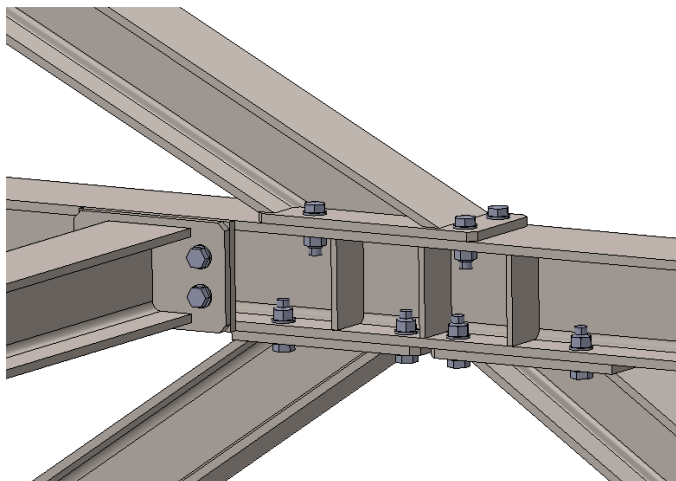
Horisontaaltalad, mille külge polditakse nelikant-torust diagonaalid, ühendatakse vertikaalse HEB tala külge sinna puuritud avade kaudu. Horisontaaltala HEB 140 külge on keevitatud plaat mõõtudega 320x160x12 mm. Diagonaaltoe kinnitamiseks on plaadi ja tala vahele keevitatud avaga ribi, mis muudab ka taldmiku ja tala vahelist liidet jäigemaks. Samal eesmärgil on tala teisele küljele ning poldiaukude vahele vertikaaltalal keevitatud ribad. Sõlm on näidatud Sele 6.



Sele 6. Diagonaali ja horisontaaltala ühendamine

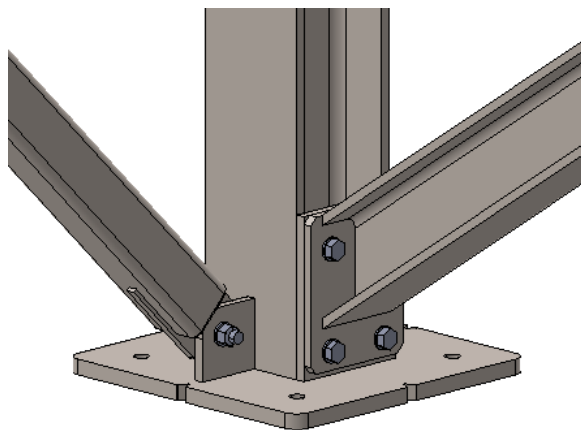
Diagonaaltalade ja horisontaaltalade ühendus on toodud Sele 7. Horisontaaltalad ühendatakse omavahel 220x140x12 mm taldmikuga. Ümarate avadega taldmik keevitatakse HEB 120 tala otsa ning samade mõõtmetega piklike avadega plaat keevitatakse HEB 140 tala küljele. Diagonaaltalad

ühendatakse talade otsa keevitatud taldmike ja talasse puuritud poldiavade kaudu. Sõlme on jäigemaks muudetud poldiavade vahele keevitatud ribidega.



Sele 7. Diagonaaltalade ühendmine

Diagonaaltoed on disainitud selliselt, et maksimaalselt pingeid otse posti alusplaati kanda. Selleks on diagonaaltugede alumine ots viidud kas otse alusplaadi peale, nagu nelikanttorust diagonaalide korral, või võimalikult lähedale, nagu HEB talast diagonaaltugede korral. Väiksema diagonaali ühendamiseks on alusplaadi peale keevitatud 90x90x12 mm mõõtudega ribi, HEB talast toe jaoks on keevitatud vertikaaltala külge plaat mõõtudega 210x160x12, mille alumine ots keevitatakse otse alusplaadi külge. Diagonaaltala otsa keevitatakse plaat mõõtmetega 200x160x12 ning plaadi alumise otsa ja alusplaadi vahele on jäetud 10 mm ruumi keevisõmbluse jaoks. Sõlm nähtaval Sele 8.



Sele 8. Diagonaaltugede kinnitamine alusplaadile

5.3 Taldmiku disain

Posti taldmik peab olema disainitud selliselt, et postile mõjuvad jõud kanduksid üle aluspinnale, ilma et need ületaksid aluspinna arvutustugevust [5, p. 450]. Ettevõtte mudelite raamatukogus on taldmikke mõõtmatega 300x300x20 mm, 350x350x20 mm, 400x400x20 mm jne. Antud projekti jaoks kasutatakse taldmikku mõõtmatega 400x400x20 mm, sest see on väikseim tugijalg, millele mahub diagonaaltoe kinnitamise ribi täielikult plaadile. Selleks et veenduda, kas antud taldmik tagab jõudude ülekandmise aluspinnale teostatakse kontrollarvutus, kus leitakse alusplaadi arvutuslik paindekandevõime. Alusplaadi tugevus on küllaldane, kui on täidetud tingimus (16) [5, p. 451]:

$$m_{Ed} \leq m_{Rd}, \quad (16)$$

kus m_{Ed} - arvutuslik paindemoment alusplaadis ühislaiuse kohta
Nmm/mm;

m_{Rd} - alusplaadi paindekandevõime ühiklaiuse kohta, Nmm/mm.

Alusplaadi paindekandevõime leitakse valemiga (17) [5, p. 451]:

$$m_{Rd} = \frac{f_y \cdot t^2}{6 \cdot \gamma_{M0}} \quad (17)$$

kus t - alusplaadi paksus, mm.

Kuna alusplaadi paksus $t=20$ mm > 16 mm, on S355 terase voolavuspiir $f_y= 345$ N/mm² [6, p. 11].

Järgnevalt leitakse alusplaadi paindekandevõime valemiga (17):

$$m_{Rd} = \frac{345 \cdot 20^2}{6 \cdot 1.25} = 18.4 \text{ Nmm/mm}$$

Alusplaadile mõjuva paindemomendi leidmise valem sõltub vundamendi survetsooni laiusest ja alusplaadi töötava tsooni laiusest. Survetsooni laius leitakse valemiga (18) [5, p. 451]:

$$z_b = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 \cdot M_a}{f_j \cdot B_{eff}}}, \quad (18)$$

kus z_b - vundamendi survetsooni laius, mm;

d - tõmmatud ankrupoltide telje kaugus alusplaadi servast, mm;

M_a - moment ankrupoltide suhtes, Nmm;

f_j - aluspinna arvutustugevus, N/mm²;

B_{eff} - alusplaadi töötav laius, mm.

Moment ankrupoltide telje suhtes leitakse valemiga (19) [5, p. 451]:

$$M_a = F \cdot a + M, \quad (19)$$

kus a - tõmmatud ankrupoltide telje kaugus posti teljest, m.

Aluspinna arvutustugevus leitakse valemiga (21) [5, p. 451]:

$$f_j = \frac{2}{3} \cdot f_c, \quad (20)$$

kus f_c - vundamendi betooni arvutustugevus, N/mm².

Alusplaadi töötav laius leitakse valemiga (21) [5, p. 451]:

$$B_{eff} = b_{post} + 2 \cdot c, \quad (21)$$

kus b_{post} - posti laius, mm;

c - alusplaadi töötava pinna kaugus talast, mm.

Alusplaadi töötava pinna kaugus talast leitakse valemiga (22) [5, p. 451]:

$$c = t \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot f_i \cdot \gamma_{M0}}}, \quad (22)$$

kus b_{post} - vundamendi survetsooni laius, mm;

c - alusplaadi töötava pinna kaugus talast, mm.

Järgnevalt leitakse moment ankrupoltide telje suhtes valemiga (19):

$$M_a = 54700 \cdot 0.135 + 5253 = 12638 \text{ Nm}.$$

Aluspinna minimaalne normtugevus on 40 N/mm². Järgnevalt leitakse valemiga (20) aluspinna arvutustugevus:

$$f_j = \frac{2}{3} \cdot 40 = 26.7 \text{ N/mm}^2.$$

Järgnevalt leitakse alusplaadi töötav laius valemiga (21):

$$B_{eff} = 160 + 2 \cdot 37.1 = 234.2 \text{ mm}.$$

Järgnevalt leitakse alusplaadi töötava pinna kaugust talast valemiga (22):

$$c = 20 \cdot \sqrt{\frac{345}{3 \cdot 26.7 \cdot 1.25}} = 37.1 \text{ mm.}$$

Alusplaat on 400x400x20 plaat, mis on kahes suunas telgsümmeetriline. Avade vahekaugus on 270 mm, sellest tulenevalt tõmmatud ankrupoltide kaugus plaadi vastasservast $d=335$ mm. Survetsooni laius leitakse valemiga (18):

$$z_b = 335 - \sqrt{335^2 - \frac{2 \cdot 12.6 \cdot 10^6}{26.7 \cdot 234.2}} \approx 6 \text{ mm.}$$

Kuna on täidetud tingimus (23), siis leitakse alusplaadi arvutuslik paindemoment valemiga (24) [5, p. 452].

$$\begin{aligned} z_b < c < c_1 \\ 6 < 37.1 < 120 \end{aligned} \tag{23}$$

kus c_1 - kaugus tala äärest alusplaadi ääreni, mm.

$$m_{Ed} = f_j \cdot z_b \left(c - \frac{z_b}{2} \right), \tag{24}$$

Järgnevalt leitakse alusplaadi arvutuslik paindemoment ühiklaiuse kohta valemiga (24):

$$m_{Ed} = 26.7 \cdot 6 \left(37.1 - \frac{6}{2} \right) = 5.5 \cdot 10^3 \text{ Nmm/mm.}$$

Järgnevalt kontrollitakse tingimuse (16) täitumist:

$$m_{Ed} \leq m_{Rd},$$

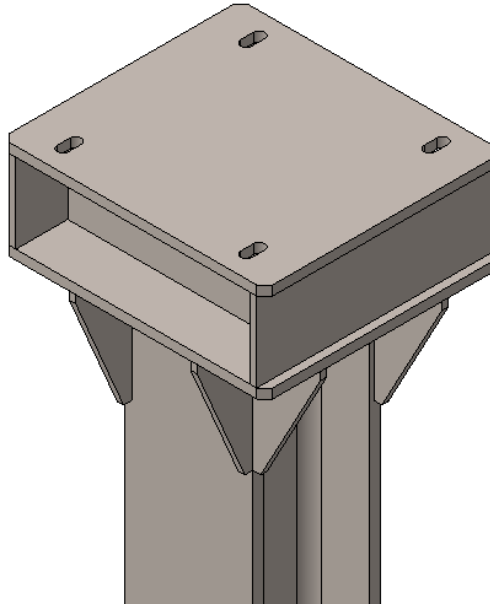
$$5.5 \cdot 10^3 \text{ Nmm/mm} \leq 18.4 \cdot 10^3 \text{ Nmm/mm.}$$

Kuna tingimus on täidetud, siis on alusplaat õigesti dimensioneeritud.

5.4 Sõela kinnitamine tugikonstruktsioonile

Sõela jalad kinnitatakse taldmikele, mis on toodud Sele 9. Taldmikuks on plaat mõõtudega 330x300x12 mm. Sõel ühendatakse tugikonstruktsiooniga M12 poltidega, mida on iga tugijala kohta neli. Tagamaks sõela tugijalgade poldiavade kattumine konstruktsiooni avadega on taldmikus kasutatud piklike avasid mõõduga 14x16 mm. Piklikud avad on paigutatud selliselt, et nende kesktelg oleks risti

suurema dünaamilise koormuse suunaga, st risti materjali liikumise suunaga. Taldmik toetub 100 mm kõrgustele ja 8 mm seinapaksusega tugiplaatidele, millest ühed on paigutatud taldmiku äärest 5 mm sissepoole, võimaldamaks keevitamist, ning teised on paigutatud taldmiku äärest 65 mm sissepoole, et oleks võimalik polte pingutada. Tugede all on plaat mõõtudega 330x300x12, mis koos 8 mm paksuste ribidega viib taldmikule mõjuvad jõud üle talale.



Sele 9. Sõela jala kinnitusplaat

6 KEEVISÕMBLUSTE KONTROLLARVUTUSED

Selles peatükis teostatakse keevisõmbluste kontrollarvutused kõige suuremate koormustega õmblustel. Kontrollitavad keevisõmblused on nurkõmblus taldmiku ja HEB tala vahel, millele mõjub nihkepinge, ning nurkõmblus nelikanttoru ja otsaflantsi vahel, millele mõjub seadme normaaljõust talasse kanduv jõud. Kontrollarvutusi teostatakse lubatud pingetele. Keevisõmblus on sobivalt dimensioneeritud, kui on täidetud tingimus (25) [10, p. 53]:

$$\tau \leq [\tau], \quad (25)$$

kus τ - keevisõmbluses esinev pinge, N/mm²;
 $[\tau]$ - maksimaalne lubatud pinge, N/mm².

Maksimaalne lubatud pinge leitakse valemiga (26). Valemis kasutatakse liidetavate detailide madalama voolavuspiiriga metalli voolavuspiiri, samuti arvestatakse varuteguri ja keevituse liigiga [10, p. 53].

Kuna antud konstruktsioonis on kasutusel vaid S355 teras, mille voolepiir on materjali paksusel kuni 16 mm 355 N/mm², siis kasutatakse arvutamisel voolepiiri 355 N/mm² [6, p. 11]. Kuna tegu on dünaamilisel koormusel töötava konstruktsiooniga kasutatakse varutegurit 4, kuna keevistatakse poolautomaatsete keevitusmasinatega, siis korrutatakse leitud suurus teguriga 0.65 [7, p. 44], [10, p. 53]. Järgnevalt leitakse lubatud pinge:

$$[\tau] = \frac{R_{eH}}{v} \cdot 0.65, \quad (26)$$

$$[\tau] = \frac{355}{4} \cdot 0.65 = 57.7 \text{ N/mm}^2.$$

Keevisõmbluses esinev pinge leitakse valemiga (27) [10, p. 51]:

$$\tau = \frac{F}{0.7 \cdot z \cdot l_w}, \quad (27)$$

kus F - õmblusele mõjuv jõud, N/mm²;
 z - keevisõmbluse kaateti pikkus, $z=a \cdot \sqrt{2}$ mm;
 l_w - keevisõmbluse arvutuslik pikkus, mm.

Arvutustes kasutatakse keevise jõudu üle kandva osa arvutuslikku pikkust. Arvutuslikuks pikkuseks on õmbluse kogupikkus miinus kahekordne õmbluse kõrgus, mis leitakse valemiga (28) [6, p. 155]:

$$l_w = l - 2 \cdot a, \quad (28)$$

- kus l - Keevisõmbuse pikkus, mm;
 a - Keevisõmbuse kõrgus, mm.

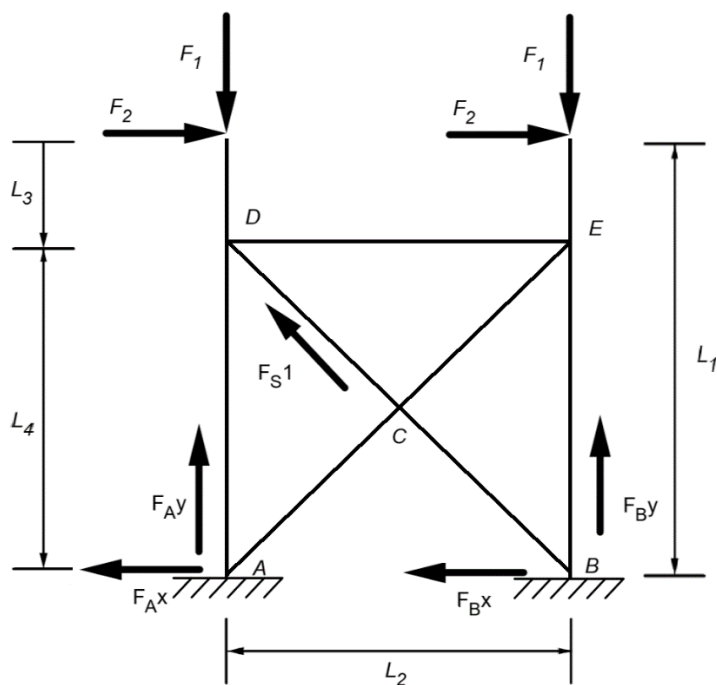
Seejuures peab olema täidetud tingimus (29) [6, p. 155]:

$$l_w \geq \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 6 \cdot a \end{cases}. \quad (29)$$

6.1 Diagonaali keevisõmbuse kontrollarvutus

Diagonaali kontrollarvutuse käigus kontrollitakse nelikanttoru ja otsaflantsi vahelise keevisõmbuse vastupidavust sellele mõjuvatele jõududele. Keevis on sobilik, kui esinevad pinged jäävad alla valemiga (26) leitud väärtusele 57.7 MPa. Keevitamisel kasutatakse täisõmblust pikkusega 100 mm ning keevisõmblust kõrgusega 4 mm.

Keevisõmbuse dimensioneerimiseks on esmalt vajalik diagonaalile mõjuva jõu leidmine. Diagonaalile mõjuv jõud leitakse Joonis 5 toodud toereaktsiooniga. Jõu leidmiseks kasutatakse Ritteri meetodit [11, p. 20].



Joonis 5. Diagonaaltoele mõjuva jõu F_{S1} leidmise toereaktsioon

Algandmed on järgnevad:

$$F_1 = 54700 \text{ N};$$

$$F_2 = 1050 \text{ N};$$

$$L_1 = 4050 \text{ mm};$$

$$L_2 = 2786 \text{ mm};$$

$$L_3 = 1319 \text{ mm};$$

$$L_4 = 2731 \text{ mm}.$$

Selleks, et leida vertikaalreaktsioon toele A koostatakse momentide tasakaaluvõrrand ümber konstruktsiooni parema toe punkti B:

$$\Sigma M_B = 0,$$

$$F_{Ay} \cdot L_2 + F_2 \cdot L_1 + F_2 \cdot L_1 - F_1 \cdot L_2 = 0,$$

$$F_{Ay} = \frac{-F_2 \cdot L_1 - F_2 \cdot L_1 + F_1 \cdot L_2}{L_2} = \frac{-1050 \cdot 4050 - 1050 \cdot 4050 + 54700 \cdot 2786}{2786} = 51647 \text{ N}.$$

Vertikaalreaktsioon toele B:

$$\Sigma M_A = 0,$$

$$-F_{By} \cdot L_2 + F_2 \cdot L_1 + F_2 \cdot L_1 + F_1 \cdot L_2 = 0,$$

$$F_{By} = \frac{F_2 \cdot L_1 + F_2 \cdot L_1 + F_1 \cdot L_2}{L_2} = \frac{1050 \cdot 4050 + 1050 \cdot 4050 + 54700 \cdot 2786}{2786} = 57753 \text{ N}.$$

Võrrandite õigust kontrollitakse võrrandiga:

$$\Sigma Y = 0,$$

$$F_{Ay} - F_1 - F_1 + F_{By} = 51674 - 54700 - 54700 + 57753 = 0.$$

Projektsioonide võrrand horisontaalteljele:

$$\Sigma X = 0,$$

$$F_{Ax} + F_2 + F_2 = 0,$$

$$F_{Ax} = -F_2 - F_2 = -1050 - 1050 = -2100 \text{ N}.$$

Negatiivne tulemus näitab, et toereaktsiooni suund on x-telje positiivsele suunale vastassuunas ehk suunatud vasakule.

Diagonaalvarda sisejõu leidmiseks koostatakse momentide võrrand ümber punkti E, mis paikneb horisontaalse tala parempoolses otsas. Valitakse antud punkt, sest seda läbib kaks tundmatut jõudu. Jõu leidmiseks tehakse punktist C vasakule mõtteline lõige ning vaadeldakse sõrestiku lõikest vasakule jäävale osale rakendunud jõudude tasakaalu. Tinglikult oletatakse, et varras on tõmmatud. Negatiivse tulemuse korral on varras surutud.

$$\begin{aligned}\Sigma M_E &= 0, \\ -F_{S1} \cdot \cos 45^\circ \cdot L_2 + F_2 \cdot L_3 - F_1 \cdot L_2 + F_{Ay} \cdot L_2 + F_{Ax} \cdot L_2 &= 0, \\ F_{S1} &= \frac{F_2 \cdot L_3 - F_1 \cdot L_2 + F_{Ay} \cdot L_2 + F_{Ax} \cdot L_4}{\cos 45^\circ \cdot L_2} = \\ &= \frac{1050 \cdot 1319 - 54700 \cdot 2786 + 51647 \cdot 2786 + 2100 \cdot 2731}{0.707 \cdot 2786} = -703 \text{ N}.\end{aligned}$$

Kuna vastus oli negatiivne, siis on diagonaalvarras surutud jõuga 703 N.

Kuna flants keevitatakse nelja erineva õmblusega, siis keevisõmbluse arvutuslik pikkus leitakse valemiga (29) ja korrutatakse keevisõmbluste arvuga:

$$l_w = (100 - 2 \cdot 4) \cdot 4 = 368 \text{ mm}.$$

Järgnevalt leitakse keevisõmbluses esinev pinget valemiga (27):

$$\tau = \frac{703}{0.7 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 368} = 0.5 \text{ N/mm}^2$$

Järgnevalt kontrollitakse tingimuse (25) täitumist:

$$\begin{aligned}\tau &\leq [\tau] \\ 0.5 \text{ N/mm}^2 &\leq 57.7 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Kuna tingimus on täidetud, siis keevisõmblus on korrektselt dimensioneeritud. Diagonaaltoe keeviskoostu joonis on nähtaval Lisa 2.

6.2 Taldmiku keevisõmbluse kontrollarvutus

Taldmiku keevisarvutus teostatakse peatükis 6.1 leitud nihkejõule F_{ax} , mille suuruseks on 2100 N. Kuna tala keevitatakse taldmiku külge kogu kontuuri ulatuses on keevisõmbluse pikkuseks 459 mm. Kuna sihiliselt mõjuva jõu korral ei tööta keevisõmblus kogu ulatuses tuleb kontrollida kas

maksimaalne töötav pikkus on väiksem või suurem keevisõmbluse reaalsest pikkusest. Töötava keevisõmbluse pikkus leitakse valemiga (30) [10, p. 51]:

$$l_w \leq 50 \cdot a, \quad (30)$$

kus l_w - Keevisõmbluse töötav pikkus, mm.

Järgnevalt leitakse keevisõmbluse töötav pikkus valemiga (30):

$$l_w \leq 50 \cdot 6 \leq 300 \text{ mm}.$$

Kuna maksimaalne töötava õmbluse pikkus on 300 mm, kuid reaalne õmbluse pikkus on 459 mm, siis kasutatakse keevisõmbluses esinevate pingete arvutamisel õmbluse pikkust 300 mm.

Järgnevalt leitakse keevises esinevad pinged leitakse valemiga (27):

$$\tau = \frac{2100}{0.7 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} \cdot 300} = 1.2 \text{ N/mm}^2.$$

Järgnevalt kontrollitakse tingimuse (25) täitumist:

$$\tau \leq [\tau],$$

$$1.2 \text{ N/mm}^2 \leq 57.7 \text{ N/mm}^2.$$

Tingimus on täidetud ning keevisõmblus on korrektselt dimensioneeritud. Taldmiku keevitamine on nähtav vertikaaltala keeviskoostu joonisel Lisa 3.

7 KINNITUSVAHENDID

Kogu konstruktsiooni ulatuses kasutatakse samu kinnitusvahendeid. Kirjanduses on toodud, et M14, M18, M22 ja M27 poltide kasutamist tuleks proovida vältida [6, p. 12]. Sellest lähtuvalt on valida M12, M16 ja M20 vahel. Kuna M20 poltide puhul võib tekkida probleeme nende pingutamise ja HEB tala ja plaadi vahel, siis kasutatakse M16 polte. Kontrollimaks kas valitud M16 8.8 klassi polt sobib, teostatakse arvutus kõige ebasoodsamas sõlmes, nelikanttorust diagonaaltala ja vertikaaltala vahel. Kõige ebasoodsam on sõlm sellepärast, et korraga töötab ainult üks polt ning see töötab lõikele. Teistes sõlmedes töötavad neli või kuus polti kas osaliselt või täielikult tõmbele. Kasutatava poldi tõmbetugevus $f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$ ja voolavuspiir $f_u = 640 \text{ N/mm}^2$ [6, p. 12]. Poldile mõjuv lõikejõud on peatükis 6.1 toereaktsiooniga juba leitud ning selleks on $F=703 \text{ N}$. Polt on õigesti dimensioneeritud, kui on täidetud tingimus (31) [6, p. 148]:

$$F_{v,Rd} > F_{S1}, \quad (31)$$

kus $F_{v,Rd}$ - poldi lõikekandevõime, N/mm^2 ;
 F_{S1} - poldile mõjuv lõikejõud, N/mm^2 .

Poldi lõikekandevõime leitakse valemiga (32) [6, p. 148]:

$$F_{v,Rd} = \frac{a_v \cdot f_{ub} \cdot A}{v}, \quad (32)$$

kus a_v - tegur, kuna töötav ristlõige asub poldi keermestamata osas, $a_v=0.6$;
 f_{ub} - poldi normatiivne tõmbetugevus, N/mm^2 ;
 A - poldi keermestamata osa brutoristlõikepindala, mm^2 .

Järgnevalt leitakse poldi arvutuslik lõiketugevus valemiga (32):

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \cdot 800 \cdot 201}{4} = 24120 \text{ N}.$$

Järgnevalt kontrollitakse tingimuse (31) täitmist:

$$F_{v,Rd} > F_{S1}, \\ 24120 \text{ N} > 703 \text{ N}.$$

Kuna tingimus on täidetud, siis on polt õigesti dimensioneeritud. Talade ühendamiseks kasutatakse ümmargusi avasid läbimõõduga 19 mm ning piklike avasid mõõtudega 19x25 mm.

Standardi EVS-EN 1090-2:2018 kohaselt tuleb vibratsiooni ja tsüklilise koormuse mõjul poltliidete lõtvumise vastu kasutada standarditele EVS-EN ISO 7040, EVS-EN ISO 7042, EVS-EN ISO 7719 või EVS-EN ISO 10511 vastavaid mutreid. Sobilikud mutrid on kas mitte-metallist lukustusmehhanismiga või koonilise kujuga, mis lukustub samasuguse geomeetriaga avasse. [12, p. 32], [13], [14], [15], [16]

Antud konstruktsiooni puhul on talade kinnitusplaadid disainitud selliselt, et neid oleks võimalik plasma- või laserlõikusega lõigata ning need ei vajaks täiendavat töötlemist. Sellest tulenevalt ei sobi standardites EVS-EN ISO 7719 ja EVS-EN ISO 10511 käsitletud täismetallist isefikseeruvad mutrid, kuna need nõuaksid plaatide täiendavat töötlemist avade faasimise näol. Konstruktsioonis kasutatakse DIN 985 M16 mutreid, mille sees olev nailon kattub EN ISO 7040 standardis nõutud mitte-metalse lukustusmehhanismiga. Seega valitud mutrid sobivad standardis EVS-EN 1090-2:2018 seatud kriteeriumitele.

8 MAJANDUSARVUTUSED

Antud peatükis leitakse konstruktsiooni projekteerimisele kulunud summaarne aeg ning selle rahaline kulu. Arvestamata jäetakse konstruktsiooni valmistamise kulud, sest käesolevas lõputöös keskenduti ainult konstruktsiooni projekteerimisele.

Konstruktsiooni projekteerimiseks eskiisist tööjoonisteni kulus 158 tundi. Aeg jaotus laias laastus kolmeks: projekteerimine pluss joonised; ANSYS analüüs; käsitsi arvutamine. Täpsem tundide jaotus on toodud tabelis Tabel 2.

Tabel 2. Projekteerimise ajakulu

Tegevus	Ajakulu, h.
Lähteülesande läbitöötamine + eskiismudel	4
Esmase mudeli projekteerimine	10
Talade dimensioneerimine	24
Kuju optimeerimine	16
Omavõnkeanalüüs + lõplik mudel	24
Lõpliku mudeli projekteerimine	26
Keeviste ja kinnitusvahendite kontrollarvutused	8
Tööjooniste valmistamine	46
Kokku	158

Töötunni omahinnaks arvestatakse põhinedes varasematele projektidele ja kogemusele 30 eurot, kulu projekteerimisele on leitav järgnevalt:

$$C_o = T \cdot C_h = 30 \cdot 158 = 4740 \text{ eurot.} \quad (33)$$

- kus
- | | |
|-------|-------------------------|
| C_o | - omahind, euro. |
| T | - tööle kulunud aeg, h; |
| C_h | - tunnihind, euro/h. |

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli projekteerida tugikonstruktsioon Spaleck Flip-Flow 3d Combi Screen kolmefraktsioonilisele vibrosõelale. Vibrosõel on osa jäätmete purustus- ja sorteerimisliinist, mis hakkab käitlema ehitus- ja lammutusjäätmeid.

Konstruktsiooni projekteerimiseks tutvuti tehtud lahendustega ning otsutati, et konstruktsioon projekteeritakse HEB taladest, mis ühendatakse omavahel horisontaal- ja diagonaaltugedega. Kuju leidmiseks loodi esmane traatmudel. Seejärel asuti talasid dimensioneerima.

Vertikaalsete talade dimensioneerimiseks kasutati talale mõjuvat paindemomenti, millele lisati konstruktsiooni algkõverusest tulenev horisontaalne jõud ning tala vastupandumomendiks arvutati 59.2 cm^3 . Vertikaaltaladeks valiti HEB140 tala, mille vastupanumoment nõrgemas sihis oli 79 cm^3 . Seejärel teostati kontrollarvutus nõtketele, kus leiti tala maksimaalne nõtkekandevõime. Leitud nõtkekandevõime 118456 N oli suurem talale mõjuvast vertikaaljõust 54700 N ning tala sobis.

Järgnevalt joonestati konstruktsioon SolidWorks keskkonnas nõrgestatud mudelina HEB120 taladest, et geomeetriast tulenevad muutused kergemini märgatavad oleks. Seejärel asuti kuju optimeerima. Kuju optimeerimiseks kasutati ANSYS keskkonda, milles arvutati läbi mudeli erinevad konfiguratsioonid ning leiti kõige suurema omavõnkesagedusega ehk kõige jäigema geomeetriaga mudel.

Vältimaks konstruktsiooni resonantsi sattumist leiti seadme töösagedusest 11.33 Hz tulenevalt konstruktsioonile lubatud omavõnkesagedused. Lubatud vahemikeks oli $15.1...18.9 \text{ Hz}$ ja $8.1...9.1 \text{ Hz}$. Optimeeritud kujuga konstruktsiooni omavõnkesagedus oli 13.49 Hz , asendades vertikaaltalad peatükis 3.2 dimensioneeritud HEB140 taladega ning teostades uus arvutus saadi omavõnkesageduseks 14.9 Hz . Järgnevalt muudeti konstruktsiooni jäigemaks asendades vertikaaltalad HEB160, horisontaaltalad HEB140 ning muutes diagonaaltalades nelikant-toru $80 \times 80 \times 3$ torult $80 \times 80 \times 6$ toru vastu. Mudeli omavõnkesageduseks tuli 17.17 Hz .

Olles leidnud konstruktsiooni lõpliku kuju ja talad, projekteeriti lõpuni kõik sõlmed. Erinevad talad ühendati poltliidetega, selleks keevitati talade otsa plaat, liidet muudeti jäigemaks tugevdusribi kasutamisega. Konstruktsioonis kasutati kinnitusvahenditena M16 8.8 klassi polte. Poltide sobivuse

kontrolliks teostati kontrollarvutus kõige ohtlikumale sõlmele - nelikant-torust diagonaali ja vertikaaltala vahel. Leiti poldile mõjuv jõud 703 N ning poldi lõikekandevõime, milleks oli 24120 N. Kuna lõikekandevõime oli suurem, kui mõjuvad jõud, siis M16 poldid sobivad. Sõela kinnitamiseks konstruktsioonile projekteeriti talade otsa taldmik, kuhu sõela tugijalad toetuma hakkavad ning M12 poltidega kinnituvad.

Tagamaks keevisliidete sobivus teostati kontrollarvutus kõige ohtlikematele sõlmedele, milleks olid keevisõmblus tala ja alusplaadi vahel ning nelikanttoru keevisõmblus otsaflantsi külge. Leiti keevisõmbluses maksimaalne lubatud pinge, milleks oli 57.7 N/mm^2 . Pinged mõlemas keevisõmbluses jäid alla lubatu, taldmikul esines maksimaalne pinge 1.2 N/mm^2 ja diagonaaltoel 0.5 N/mm^2 .

Majandusarvutustest leiti seadme projekteerimisele kuluv aeg ja ajast tulenev omahind. Projekteerimisele kulus 158 tundi ning projekteerimise hinnaks oli 30 eurot/tund. Omahinnaks kujunes 4740 eurot.

SUMMARY

The aim on this thesis was to design a support structure for Spaleck Flip-Flow 3d Combi screen. The screen separates material into three different fractions, of which oversize and medium fraction will unloaded from chutes at the end of the screen and fine fraction will be unloaded under the screen. The screen is part of a sorting and crushing line which will is designed to handle construction and demolition waste.

To begin the designing process of the structure, previous designs of similar supports were examined and a design, where the structure consists of vertical load-bearing beams joined by horizontal and diagonal supports was chosen. To visualize the design, a wire-frame model was created.

To dimension needed beams a series of calculations were made to find the bending moment acting on the vertical beam. In this calculation horizontal forces from dynamic loads and forces from beam's initial deviation were taken into account. Based on the safety factor of 4 and material's elasticity modulus, vertical beam's elastic section modulus was calculated to be 59.2 cm^3 . Based on that HEB 140 beam was chosen, which had a elastic section modulus of 79 cm^3 . A buckling-calculation for buckling was carried out and it showed that HEB 140 beam at 4.05 meter length has a maximum buckling load capacity of 118456 N, which is more than the 54700 N acting on the beam.

To optimize the geometry of the model, the construction was drawn using HEB 120 beams, so that changes in natural oscillation frequency of the construction and therefore rigidity would be more apparent. The natural oscillation frequency was found using ANSYS Workbench software, where different configurations of the model were calculated and the most rigid geometry was found.

To avoid resonance, the natural oscillation frequency of the construction needs to be different from the working frequency of the screen at 11.33 Hz. Allowed frequency range was determined to be 15.1...18.9 Hz and 8.1...9.1 Hz. The model with optimized geometry, using HEB 120 beams, had a natural oscillation frequency of 13.49 Hz, having replaced the vertical beams with HEB 140 beams, the natural oscillation frequency rose up to 14.9 Hz, which still wasn't sufficient. To make the construction more rigid, vertical beams were replaced with HEB 160 beams, horizontal beams with HEB 140 beams and diagonal supports were made from HEB 120 beams and 80x80x6 mm square hollow sections. The natural oscillation frequency of the final model was 17.17 Hz.

Having found the final geometry and beams the model was designed to completion. Beam assemblies were designed to be assembled using M16 bolts, joints between beams and end flanges were made more rigid using reinforcement ribs. To ensure the bolts are suitable a control-calculation was conducted in the most unfavorable joint, the joint between the square hollow section diagonal support and the vertical beam, where a single bolt is working against shear forces. The shear capacity of 24120 N was calculated and a shear force of 703 N acting upon the bolt. Since the shear capacity is bigger than the acting force, the bolts are suitable. To connect the screen to the construction, a footing was designed where the screen legs will be bolted on to the construction using M12 bolts.

To ensure that welded joints are strong enough to withstand forces acting upon them control calculations were made. Two joints were chosen for the calculation, weld between the vertical beam and the base plate and the weld between the square hollow section diagonal support and its end flange. It was determined that maximum allowable stress on the weld is 57.7 N/mm^2 . The maximum stress on the weld between the beam and the base plate was calculated to be 1.2 N/mm^2 and in the weld between the diagonal support and end flange plate was calculated to be 0.5 N/mm^2 . So the designed welds are suitable for their purpose.

In the economical calculation, the design cost of the support structure was found. A total of 158 hours were spent designing, calculations and drawing process of this structure. With an hourly cost of 30 euro, the cost came to 4740 euros.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „TB Solutions,“ TB Solutions OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tbsolutions.ee/>. [Kasutatud 27. aprill, 2021].
- [2] „TB SOLUTIONS OÜ,“ e-krediidiinfo, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.e-krediidiinfo.ee/14866128-TB%20SOLUTIONS%20O%C3%9C>. [Kasutatud 27. aprill, 2021].
- [3] European Commission, „Construction and demolition waste,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en. [Kasutatud 25. aprill, 2021].
- [4] „SPALECK 3D COMBI FLIP FLOW SCREEN,“ Spaleck Gruppe, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.spaleck.eu/screening-machines/3d-combi-recycling-waste-flip-flow-screen/>. [Kasutatud 25. aprill, 2021].
- [5] T. Masso jt, Ehituskonstruktori käsiraamat, Tallinn: EHITAME, 2013.
- [6] K. Loorits, Teraskonstruksioonide arvutus Eurokoodes 3 järgi, Tallinn: As Printon Trükikoda, 2008.
- [7] P. Kulu jt, МЕХАНИКА И СЕНЕРИ КÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012, p. 44.
- [8] K. Laigna, Tugevusõpetus, Tallinn: Eesti Mereakadeemia, 2000.
- [9] D. Dutta, Structures with Hollow Sections, Berliin: Ernst & Sohn, 2002.
- [10] М. И. Фролов, ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА Детали машин, Москва: Высшая школа, 1990.
- [11] A. Jablonski, Teoreetilise mehaanika kursusetööde ülesannete kogu, Tallinn: Valgus, 1972.
- [12] *EVS-EN 1090-2:2018 Teras- ja alumiiniumkonstruktsioonide valmistamine. Osa 2: Tehnilised nõuded teraskonstruktsioonidele*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2018.
- [13] *EVS-EN ISO 7040:2012 Isefikseeruvad (mittemetallist siseosaga) kuuskantmutrid (tüüp 1). Materjaliklassid 5, 8 ja 10 (ISO 7040:2012)*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
- [14] *Isefikseeruvad täismetall-kuuskantmutrid. Materjaliklassid 5, 8, 19 ja 12 (ISO 7042:2012)*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
- [15] *Isefikseeruvad täismetall-kuuskantmutrid (tüüp 1). Materjaliklassid 5, 8 ja 10 (ISO 7719:2012)*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.

- [16] *Isefikseeruvad madalad (mittemetallist siseosaga) kuuskantmutrid (ISO 10511:2012)*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.

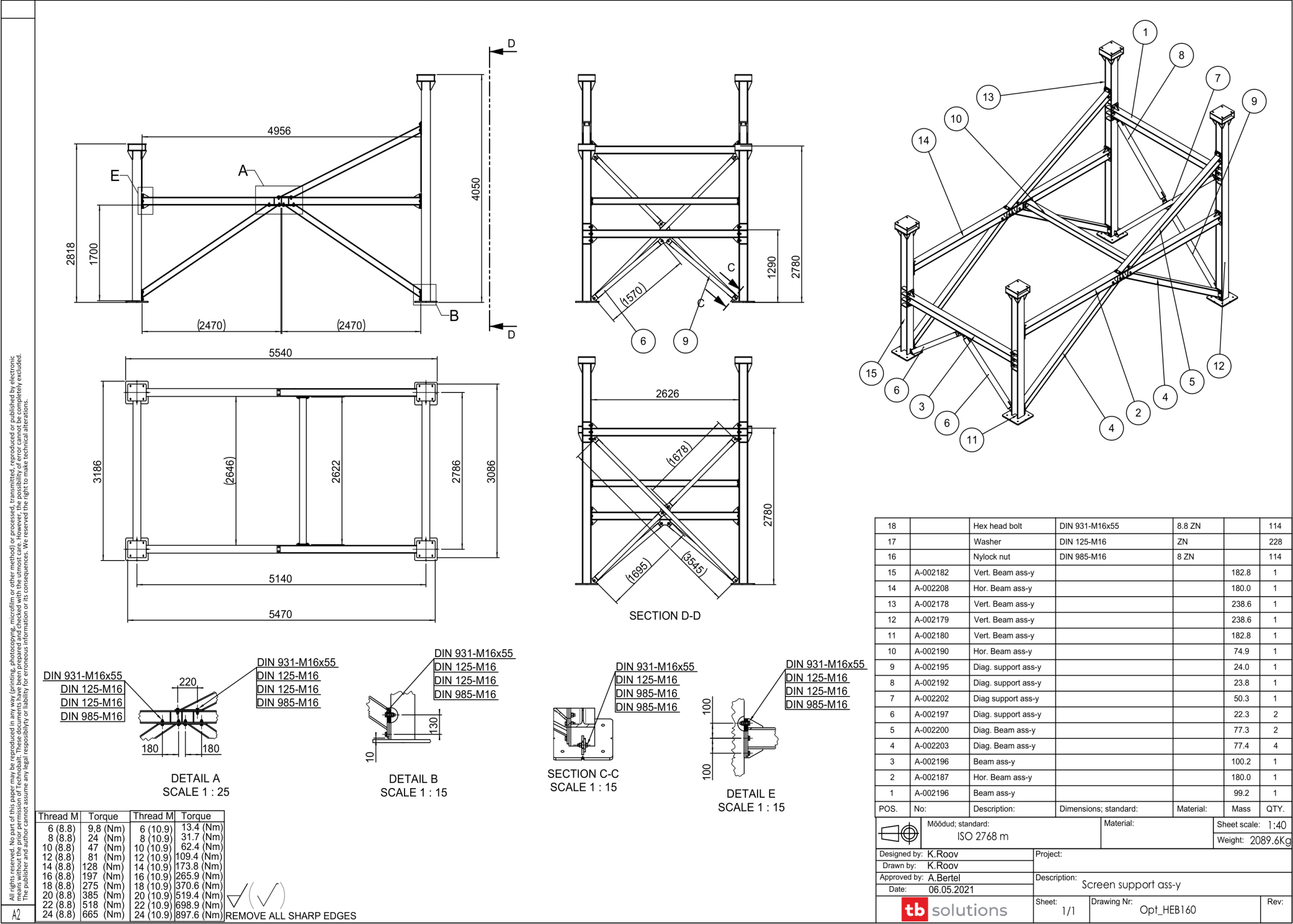
LISAD

Lisa 1. Peakostu joonis

Lisa 2. Diagonaaltõe koostejoonis

Lisa 3. Vertikaaltala koostejoonis

Lisa 1. Peakoostu joonis



Lisa 2. Diagonaaltoe koostejoonis

All rights reserved. No part of this paper may be reproduced in any way (printing, photocopying, microfilm or other method) or processed, transmitted, reproduced or published by electronic means without the prior permission of Technobalt. These documents have been prepared and checked with the utmost care. However, the possibility of error cannot be completely excluded. The publisher and author cannot assume any legal responsibility or liability for erroneous information or its consequences. We reserved the right to make technical alterations.

Unspecified tolerances according to
DIN EN ISO 13920 (1996-11)

Permissible deviations for linear dimensions					
Unmarked tolerance class: B					
Nominal		Tolerance class			
>	≤	A	B	C	
2	30	± 1	± 1	± 1	
30	120	± 1	± 2	± 3	
120	400	± 1	± 2	± 4	
400	1000	± 2	± 3	± 6	
1000	2000	± 3	± 4	± 8	
2000	4000	± 4	± 6	± 11	
4000	8000	± 5	± 8	± 14	

Weldings without specifications	
Welding class: ISO 5817 - C	
All joints are full welded unless otherwise indicated on drawing	
Butt weldings are to be filled up	
Fillet weldings:	
Welded from one side: a = 0,7 x smallest thickness of the parent material	
Welded from both sides: a = 0,4 x smallest thickness of the parent material	

SCALE 1 : 5

3	P-008583	Hollow section	80x80x6-1568	S355	20.5	1		
2	P-008590	Cap	Sheet 6-72x30	S355	0.1	4		
1	P-008580	Flange	Sheet 12-180x90	S355	1.4	2		
POS.	No:	Description:	Dimensions; standard:	Material:	Mass	QTY.		
		Mõõdud; standard: ISO 2768 m		Material:	Sheet scale: 1:10 Weight: 23.8Kg			
Designed by: K.Roov			Project:					
Drawn by: K.Roov			Description:					
Approved by: A.Bertel			Diag. support ass-y					
Date: 06.05.2021								
			Sheet: 1/1	Drawing Nr: A-002192		Rev:		

REMOVE ALL SHARP EDGES

Lisa 3. Vertikaaltala koostejoonis

