



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

MES70LT

*Reino Seli*

## **INDUKTORI SIDERAUAD**

Magistritöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn

2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Martin Eerme juhendamisel

“.....” .....2015.a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....2015 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....2015 a.

..... allkiri

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Reino Seli, 132633 (nimi, kood)

Õppekava: MATM02/11

Eriala: Tootearendus

Juhendaja: professor Martin Eerme (amet, nimi)

Konsultandid: Ville Kourusuo, disainijuht, (nimi, amet, telefon)  
+358 40 689 7802

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles)

(inglise keeles)

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Täitmise tähtaeg</b>
<b>1.</b>	Induktori sideraudade valimine. Materjalide uuring.	13.02.2015
<b>2.</b>	Poltliite eelpingutusjõu ja –momendi arvutuste tegemine.	06.03.2015
<b>3.</b>	Koostada plaan tugevusanalüüsi läbiviimiseks simulatsiooni tarkvaras.	27.03.2015
<b>4.</b>	Lõplike elementide meetodi tarkvara abil sideraudade lihtsustatud mudelite tugevusanalüüsi läbiviimine ja tulemuste analüüs.	10.04.2015
<b>5.</b>	Laborikatse läbiviimiseks mudelite valmistamine ning katsete teostamine. Laborikatsete tulemuste võrdlemine arvutisimulatsiooni tulemustega.	02.05.2015

### **Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

Töö eesmärgiks on leida valitud induktori ülemistele sideraudadele sobivad poltide eelpingutusmomentid. Teostada sideraudade tugevusanalüüs, võttes arvesse poltide eelpingutusmomenti ja induktori raskusest tulenevat koormust induktori tõstmisel. Laborikatsete teel analüüsida vaigu ainega immutatud ja vaigu ainega immutamata sideraudade mudelite tulemusi.

**Töö keel:** Eesti

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.05.2015

**Töö esitamise tähtaeg** .....

Üliõpilane Reino Seli /allkiri/ .....

kuupäev.....

Juhendaja Martin Eerme /allkiri/ .....

kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

<b>MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE</b>	3
<b>EESSÕNA</b>	6
<b>SISSEJUHATUS</b>	7
<b>1. SIDERAUDADE VALIK</b>	11
1.1. Siderauad	12
1.2. Materjalide analüüs	16
1.3. Ülevaade uuritavatest sideraudadest	18
<b>2. POLDI EELPINGUTUSMOMENDI ARVUTUS</b>	19
2.1. Hõõrdetegurite valimine	19
2.2. Arvutusvalemid	20
2.3. M6 poldi arvutus	22
<b>3. ARVUTISIMULATSIOONID</b>	24
3.1. Kasutatavamad mõisted	24
3.2. Lihtsustatud 3D-mudelid	25
3.3. Katsete läbiviimis meetoodika	26
3.4. Simulatsiooniprogrammi ANSYS seadistamine	29
3.5. Simulatsioonid	32
3.5.1. Sideraua 1 simulatsioon	32
3.5.2. Sideraua 2 simulatsioon	35
3.5.3. Sideraua 3 simulatsioon	38
3.5.4. Sideraua 4 simulatsioon	41
3.5.5. Sideraua 5 simulatsioon	44
3.5.6. Sideraua 6 simulatsioon	47
3.5.7. Sideraua 7 simulatsioon	50
3.5.8. Sideraua 8 simulatsioon	53
3.5.9. Sideraua 9 simulatsioon	56
3.5.10. Sideraua 10 simulatsioon	59
3.6. Kokkuvõtte simulatsioonidest	62
<b>4. LABORIKATSED</b>	63
4.1. Katseskeem	63
4.2. Laborikatsete tulemused	66
4.3. Kokkuvõtte laborikatsetest	68

<b>KOKKUVÕTE</b> -----	70
<b>SUMMARY</b> -----	73
<b>KASUTATUD KIRJANDUS</b> -----	76
<b>LISAD</b> -----	77
Lisa 1. Graafiline osa-----	77

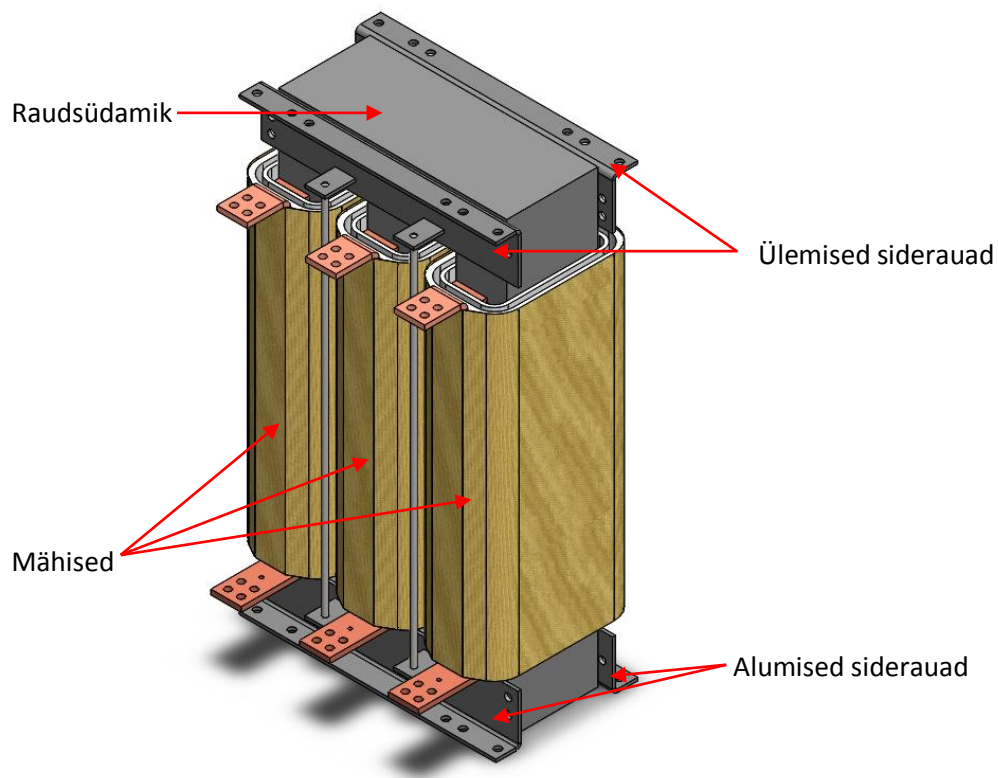
## EESSÕNA

Lõputöö teema sai välja pakutud Trafotek AS disainijuhi Ville Kourusuo poolt. Algandmete kogumine toimus Trafotek ASis, kus disainijuht Ville Kourusuo oli abiks juhendamisel. Magistritöö teostamisel abistasid lisaks veel järgmised isikud: professor Martin Eerme, kelle juhendamise abiga sai lõputöö probleeme lahendatud, ning tehnik Endel Esinurm, kes abistas laborikatsete läbiviimisel.

## SISSEJUHATUS

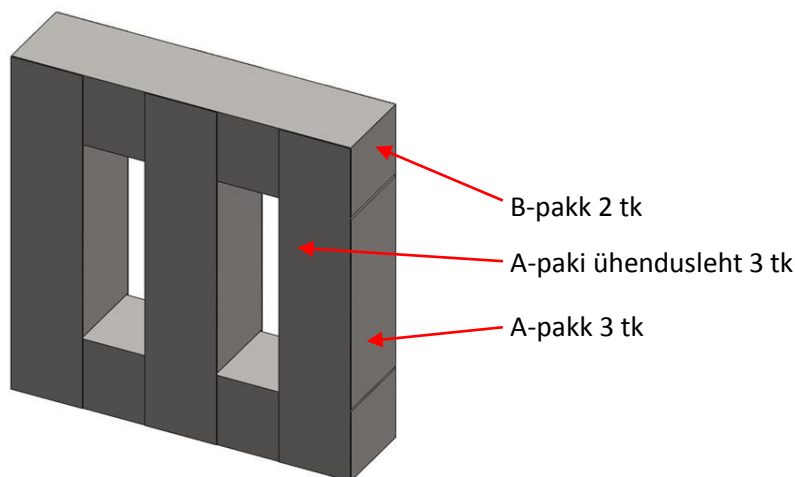
Magistritöö teemaks sai valitud induktori sideraudad. Lõputöö teema oli siiani uurimata Trafotek ASis, mis tegeleb induktorite ja transformaatoreite tootmisega. Induktoriks ehk induktiivpooliks on elektriseade, mille abil saab takistada ettenähtud sagedusest suurema sageduse edasipääsu või saab vähendada koormusahelas vahelduvvoolu komponenti [5]. Sagedust tõkestavate induktorite teiseks nimetuseks on drossel [5]. Tootmises olevad induktorid erinevad üksteisest põhiliselt suuruse, induktori südamikust või mähise tüübi poolest. Kasutusvaldkond on seetõttu laiaulatuslik: alates väiksematest induktiivpoolidest, mida kasutatakse elektroonikaseadmetes, kuni suurte induktoriteni, mis on kasutusel suurte laevadel ja taastuvenergiaseadmetes, nagu näiteks tuulegeneraatorid. Lihtsate ning väikeste induktorite puhul ei kasutata sideraudasid, mida käesolev magistritöö käsitleb.

Selleks, et seletada induktori sideraudade ülesandeid edasi, saab kõige pealt kirjeldatud induktori konstruktsiooni koos põhiliste osadega. Keskmise suurusega induktorite konstruktsioon koosneb südamikust, mähisest ja sideraudadest (sele 1). Siinkohal on vaatluse all 1- ja 3-faasilised induktorid ning neil kasutatavad sideraudad.



Sele 1. 3-faasilise induktori põhiosad

Lühidalt kirjeldades toimub induktori valmistamine kolmest etapist: südamiku lõikamisest, mähiste valmistamisest ja induktori osade kokkupanekust. Töös käsitletavate induktorite puhul kasutatakse lamineeritud magnetsüdamikke. Nende magnetsüdamike osad valmistatakse õhukestest elektrotehnilise terase lehtedest paksusega 0,35 mm või 0,5 mm [8]. Südamiku vertikaalseid sambaid nimetatakse A-pakkideks, millele keritakse mähis peale. Sammassüdamikud koostatakse kolmefaasilise induktori puhul kolmest sambast ja ühefaasilise induktori puhul kahest sambast. Südamiku ülemisi ja alumisi horisontaalseid elektrotehnilise terase lehtedest valmistatud pakke nimetatakse B-pakkideks. B-pakid koos A-pakkidega moodustavad täieliku induktori sammassüdamiku (sele 2). Südamiku sammaste välimised ühenduslehed on pikemad ning on mõeldud südamiku osade ühendamiseks.



Sele 2. Lamineeritud magnetsüdamik 3-faasilisele induktorile

Ennem sammaste ühendamist alumise ja ülemise pakiga koostatakse mähis igale sambale töölehe instruksioonide järgi. Mähkimise järgselt alustatakse induktori kokkupanekuga. Induktori magnetsüdamiku osade omavahel koos hoidmiseks kinnitatakse ülemise ja alumise B-paki külge siderauad mõlemale poole südamikku. Siit tulebki välja sideraudade esmane ülesanne hoida südamiku osasid omavahel koos. Sideraudasid on kahe kinnitamisviisiga. Esimeseks variandiks on keevitusega ühendatavad siderauad, mida selle magistritöö raames ei käsitleta. Teiseks variandiks on poltliitega ühendatavad siderauad, mis kinnitatakse väiksemate sideraudade puhul sideraua paksusele tehtud keerme ja poldi abil, või siis suuremate sideraudade puhul mutri ja poldi abil. Siinkohal vaadeldakse ainult viimase nimetatud liitega ühendamist.



Lõputöös uurimise all olevate sideraudade induktorite raskused on paarikümnest kilogrammist kuni mitmesaja kilogrammini. Sideraudade teiseks peamiseks ülesandeks on suurtest raskustest tingituna induktori transportimise võimaldamine, kuna operaatoritel pole füüsiliselt võimalik raskeid induktoreid käsitsi tõsta. Induktori tõstmiseks kasutatakse tõstemasinat, mille kett-tropi konksud kinnitatakse kas ülemiste sideraudade kinnitusavade külge või ülemistele sideraudadele kinnitatud tõstesilmade külge.

Kolmandaks vähemtähtsamaks sideraudade ülesandeks on induktori hilisemat paigaldamist võimaldav funktsioon. Induktoreid valmistatakse väga erinevatele tellijatele ning tuleb arvestada kliendi nõudeid paigaldamiseks, mistõttu varieerub sideraudade kuju.

Eelnevate nimetatud sideraua funktsioonide järgi saab alustada magistritöö teema defineerimist. Lõputöö vaatluse alla lähevad poltliitega ühendatavad ülemised induktori siderauad. Varasemalt pole Trafotek ASis uuritud poltliite kinnitusjõu suuruse mõju sideraudade kandevõimele, samuti on teadmata informatsioon sideraudade tugevuse kohta tõstmisel. Raskemate induktorite puhul on toimunud õnnetusi, kus induktori tõstmisel, kasutades ettenähtud tõstekohtasid ülemistel sideraudadel, on induktori südamik sideraudade vahelt ära libisenud.

Magistritöö peamiseks ülesandeks on poltliite eelpingestusmomentide leidmine ja sideraudade tugevusanalüüsi teostamine. Siiani on induktorite sideraua poltliiteid tunde järgi kinni keeratud ning visuaalselt kontrollitud, et sideraudadel puuduksid deformatsioonid.

Esimeses peatükis valitakse siderauad, millele sobivat poldi eelpingestusmomenti leitakse ja tugevusanalüüsi teostatakse. Kirjeldatakse iga siderauda iseloomustavalt: kujutüübi, materjali, teraslehe paksuse, poldi suuruse ja mõõtmete järgi. Samuti tehakse uuring sideraua materjalide mehaanilistele omadustele, mida hiljem on tarvis simulatsiooni parameetrite paika panemisel. Peatüki lõpus on tehtud kokkuvõtte uurimise all olevatest sideraudadest.

Järgmises peatükis leitakse arvutuste teel sobivad poldi eelpingutusjõu ja –momendi väärtused kõikidele lõputöös käsitletavatele poldi suurustele. Samuti määratletakse selles peatükis hõõrdetegurid erinevatele kontaktpindadele vastavalt sellele, kas tegemist on staatilise või dünaamilise hõõrdumisega.

Simulatsioonide osa alguses toimub lihtsustatud simulatsiooni mudelite projekteerimise kirjeldus ning lõplike elementide meetodit kasutatava simulatsiooni tarkvara ANSYS eelseadistamine, mis hõlmab materjali omaduste, kontaktpindade ja simulatsiooni mudelite rajatingimuste defineerimist. Simulatsioonide põhiosas leitakse katsetulemuste analüüsi teel sobiva poldi eelpingestusmomendiga tulemused ning kirjeldatakse tugevusanalüüsi. Peatüki lõpus on kokkuvõtte simulatsioonide tulemustest.

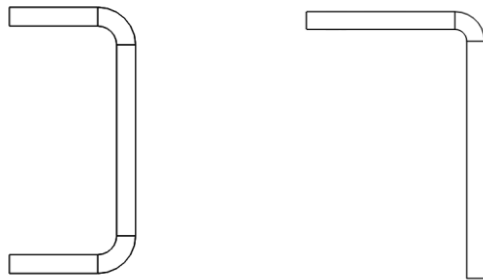
Viimase peatüki raames tehakse laborikatsed ühele sideraua variandile. Eesmärgiks on laborikatsete tulemusi katsete järgselt võrrelda arvutisimulatsiooni tulemustega ning teha järeldus simulatsioonide paikapidavuses. Lisaks sellele võrreldakse vaigu ainega immutatud ning vaigu ainega immutamata sideraudade katsemudeleid. Eesmärgiks on leida, kuidas mõjutab vaiguga immutamine sideraudade kandevõimet võrreldes vaigu ainega immutamata mudelitega. Seda on vaja teada, kuna kuivtüüpi induktorite kokkupaneku järgselt kastetakse induktorid epoksiidvaigu sisse ning läbivad seejärel vaakumkambris termotöötluste.

# 1. SIDERAUDADE VALIK

Sissejuhatuses sai ära seletatud sideraudade ülesanded. Selleks, et uurida sideraudade tugevust poldi eelpingutusmomendile ning sideraudadele rakenduvale koormusele, tuleb eelkõige valida sobivad ülemised sideraudad analüüsimiseks. Valimise kriteeriumiteks on:

- 1) kasutussagedus;
- 2) kujutüüp;
- 3) sideraua paksus;
- 4) sideraua suurus.

Vaatluseks oli eesmärk leida võimalikult erinevate parameetritega sideraudu, et välja selgitada probleemsed variandid ning leida nendele sobiv lahendus. Suurema kaaluga oli valiku tegemisel standardsemate sideraudade valimine. Seda eelkõige seetõttu, et tugevusanalüüsist saadud andmeid oleks võimalik induktorite disainimisel arvesse võtta. Kujutüübi erinevuse koha pealt on valikus kahte erinevat versiooni. Nendeks on L-tüüpi ja U-tüüpi kujuga sideraudad (sele 1.1).



Sele 1.1. U-tüüpi kaju vasakul ja L-tüüpi paremal

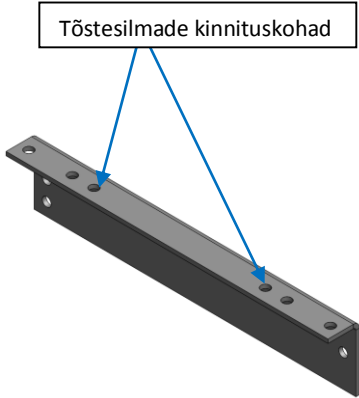
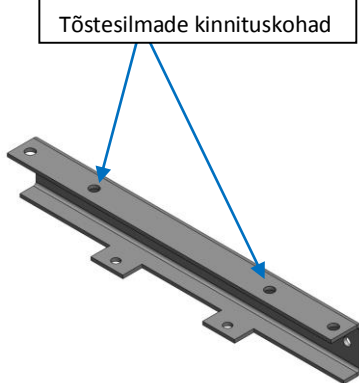
Uurimise all olevate sideraudade paksused varieeruvad 3 mm kuni 6 mm. Selle järgi on üldiselt valitud ka sideraudadele materjalid. Kui paksus on  $\leq 3$  mm, siis valitakse materjaliks DC01+ZE25/25 APC teras. Paksuse  $\geq 3$  mm korral on levinumaks valikuks S235J2+N teras. 3 mm paksuse korral on olemas induktori massist, kas valitakse halvemate tugevusnäitajatega DC01+ZE25/25APC teras või paremate tugevusnäitajatega S235J2+N teras. Materjalide tugevusnäitajad on toodud peatükis 1.2.

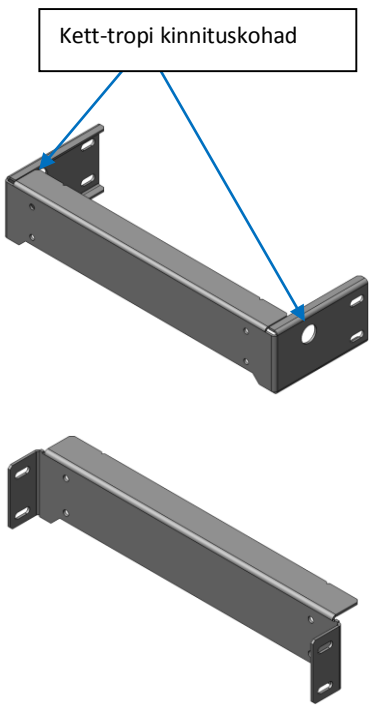
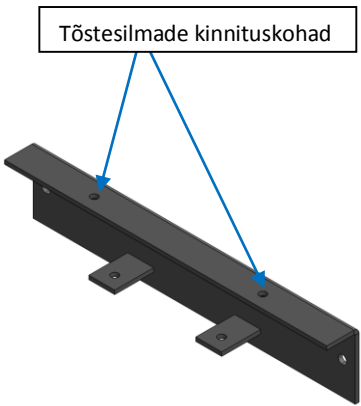
Sideraudade variatsiooni suurendamiseks sai jälgitud lisaks eelnevatele punktidele ka sideraudade suuruse erinevust, et oleks esindatud erinevas mõõdus sideraua variandid.

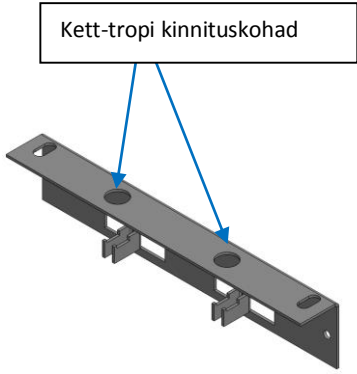
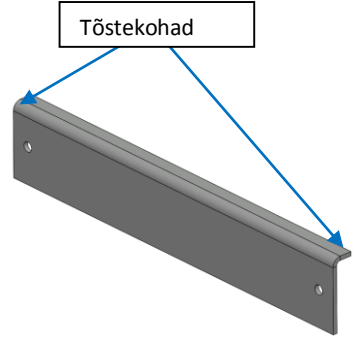
## 1.1. Siderauad

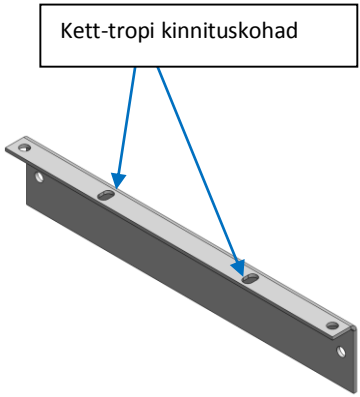
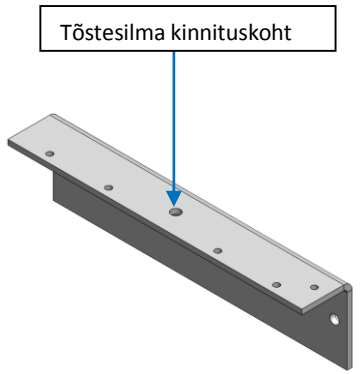
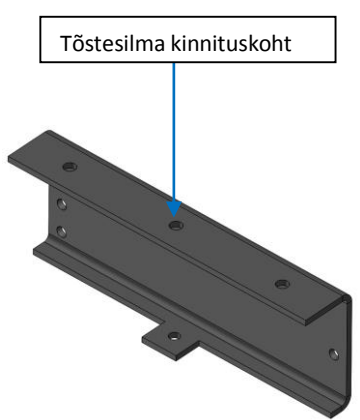
Eelnevalt nimetatud kriteeriumite järgi sai valitud 10 erinevat induktori ülemist siderauda, millel magistritöö analüüs ja ülesannete lahendamine põhineb. Sideraudade valikust annab ülevaate tabel 1.1.

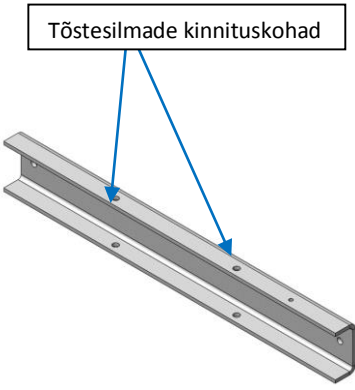
Tabel 1.1. Valitud siderauad

Sideraava versioon	Kirjeldus
<p>Sideraud 1</p> 	<p>Sideraud 1 on laialdaselt kasutatav õhkjahutusega induktoritel, mille B-paki kõrgus on 100 mm ja pikkus 450 mm. Tegemist on L-tüüpi siderauaga, mille materjaliks on S235J2+N teras lehepaksusega 6 mm. Suuremad induktorid kaaluvad 250 kg. Poltliite suurus on M12.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse töstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Levinum kinnitusviis on kasutades ühte töstesilma ühe sideraava kohta ning kinnitamine toimub diagonaalselt induktori pealt vaadates. Niimoodi tagatakse koormuse ühtlane jaotus.</p>
<p>Sideraud 2</p> 	<p>Teist siderauda kasutatakse vedelikjahutusega induktoritel, mille südamik B-paki kõrgus on 100 mm ja pikkus 450 mm. U-tüüpi kujuga sideraava materjaliks on S235J2+N teras lehepaksusega 5 mm. Induktoreid kinnitatakse ka üksteise otsa. Sel juhul on suurim sideraudade poolt kantav raskus kuni 500 kg. Poltliite suurus on M12.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse töstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Kinnitamine sarnaselt esimesele siderauale. Eripäraks võrreldes teiste sideraudadega on see, et siderauad on südamiku asemel kontaktis hoopis alumiiniumsulamist jahutusprofiilidega. Seetõttu on staatiline hõõrdetegur madalam ja sideraudade vahelt libisemise tõenäosus suurem.</p>

<p>Siderauad 3</p> 	<p>Sideraudade komplekt koosneb kahest erinevast siderauast. Tagumisel sideraual asuvad kett-tropi konksu kinnituskohad. Eesmine sideraud kinnitatakse tagumise külge. Siderauad on ühendatud omavahel nelja M10 poltliitega.</p> <p>Südamiku B-paki kõrgus on 100 mm ja pikkus 450 mm. Tegemist on L-tüüpi sideraudadega, mille materjaliks on S235J2+N teras lehepaksusega 4 mm.</p> <p>Sellist tüüpi sideraudadega on esinenud probleeme tõstmisel. Induktori südamik on libisenud sideraudade vahelt. Seetõttu sai teistest sideraudadest ebatavalisema konstruktsiooniga sideraua komplekt uurimise alla võetud. Raskemate induktorite massid on kuni 500 kg.</p>
<p>Sideraud 4</p> 	<p>Tegemist on standardse 3-faasilise induktori ülemise siderauaga, mille B-pakk on kõrgusega 100 mm ja pikkusega 450 mm. Tegemist on L-tüüpi siderauaga, mille materjaliks on S235J2+N teras lehepaksusega 6 mm. Sideraudade ühendamiseks kasutatakse kahte M12 suurusega poltliidet. Suurim induktori raskus on 400 kg.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse tõstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Kinnitamine sarnaselt esimesele sideraualle.</p>

<p>Sideraud 5</p> 	<p>Standardne 3-faasiliste induktorite L-tüüpi kujuga sideraud, mille B-pakk on kõrgusega 70 mm ja pikkusega 350 mm. Materjaliks on S235J2+N teras lehepaksusega 3 mm. Sideraudade ühendamiseks kasutatakse kahte M8 suurusega poltliidet. Suurim induktori raskus on 200 kg.</p> <p>Tõstmiseks kasutatakse selleks ettenähtud tõsteavasid sideraua peal, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Levinuim kinnitamisviis on kasutades ühel sideraual ühte kinnitusava. Kinnitamine toimub diagonaalselt pealt vaadates.</p>
<p>Sideraud 6</p> 	<p>Standardne 3-faasiliste induktorite L-tüüpi kujuga sideraud, mille B-paki kõrgus on 50 mm ja pikkus 250 mm. Materjaliks on DC01+ZE25/25APC teras lehepaksusega 3 mm. Sellel terasel on tugevusnäitajad halvemad võrreldes S235J2+N terasega. Kasutatakse M6 poltliidet.</p> <p>Erinevalt eelmistest L-tüüpi kujuga sideraudadest on nende ülemiste sideraudade pealmised painutatud osad suunatud induktori südamikule poole. Teiste uurimise all olevad L-tüüpi sideraudade painutatud pinnad on suunatud väljapoole induktori südamikust, v.a sideraua 3 komplekt.</p> <p>Raskemate induktorite raskused on 50-100 kg vahemikus. Enamasti jäävad selliseid sideraudu kasutavate induktorite raskused alla 50 kg. Simulatsioonides tuleb aga arvestada kõige ohtlikuma olukorraga. Väikesest raskusest tingituna tõstetakse selliseid induktoreid käsitsi sideraua servadest.</p>

<p>Sideraud 7</p> 	<p>Standardne 3-faasiliste induktorite L-tüüpi kujuga sideraud, mille B-paki kõrgus 60 mm ja pikkus 300 mm. Suurim induktori raskus on 100 kg. Sideraua materjaliks on DC01+ZE25/25APC lehepaksusega 3 mm. Südamikule kinnitamiseks kasutatakse kahte M8 poltliidet.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse tõstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Kinnitamine sarnaselt esimesele siderauale. Sideraua 7 katsemudelile on peatükis 4 teostatud laborikatsed.</p>
<p>Sideraud 8</p> 	<p>Standardne sideraud 1-faasiliste induktorite koostamiseks, mille B-paki kõrgus on 100 mm ja pikkus 300 mm. L-tüüpi kujuga sideraua materjaliks on teras S235J2+N teras lehepaksusega 6 mm. Induktorite maksimaalseks raskuseks on 300 kg. Kasutatakse M10 poltliidet.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse tõstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Tõstesilma kinnituskoht on näidatud vasakpoolsel illustratsioonil.</p>
<p>Sideraud 9</p> 	<p>1-faasiliste induktorite U-tüüpi ülemine sideraud. B-paki kõrgus on 100 mm ja pikkus 300 mm. Materjaliks on teras S235J2+N teras lehepaksusega 6 mm. Suurim induktorite raskus on 200 kg. Kasutatakse M10 poltliidet.</p> <p>Tõstesilmad kinnitatakse keskmiste sideraua kinnitusavade külge. Tõstesilmade külge pannakse kett-tropi konksud. Tõstesilma kinnituskoht on näidatud vasakpoolsel illustratsioonil.</p>

Sideraud 10	U-tüüpi sideraud on kasutusel induktoritel, mille B-paki
	<p>kõrgus on <math>\geq 85</math> mm ja pikkus 560 mm. Materjaliks on teras S235J2+N teras lehepaksusega 6 mm. Suurim induktorite raskus on 300 kg. Kasutatakse M10 poltliidet.</p> <p>Induktori tõstmiseks kasutatakse tõstesilmasid, mille külge kett-tropi konksud kinnitatakse. Kinnitamine toimub sarnaselt esimesele siderauale.</p>

## 1.2. Materjalide analüüs

Materjali analüüs on oluline tugevusanalüüsi sooritamisel. Seetõttu on detailselt uuritud eelmises peatükis valitud sideraudade materjale. Neid andmeid rakendatakse edasistes simulatsioonides materjali parameetritena ning nende järgi toimub edasine katse tulemuste analüüsimine, samuti sobivate tulemuste valimine. Eelkõige on tähtis teada uurimise all olevate teraste mehaanilisi omadusi. Põhiline mehaaniline omadus, mida katsetejärgsel analüüsil vaja läheb on tugevus. Plastsuse ja elastsuse andmeid saab kasutada simulatsioonide eelseadistamisel.

Tugevuseks nimetatakse materjali omadust purunemata vastu pidada koormusele. Tugevusnäitajad, mida magistritöös jälgitakse on metalli voolepiir  $R_e$  ja tugevuspiir  $R_m$ . Metall voolepiir näitab piiri, millest väiksema pinge väärtuse korral toimub elastne deformatsioon, suurema pinge väärtuse korral toimub metallis plastne deformatsioon, mistõttu jõudude ära võtmisel detail ei taastu varasemale kujule ega mõõtmetele. Elastse deformatsiooni puhul taastab detail oma esialgsed kuju ning mõõtmed peale jõudude taandumist. Kui pinged materjalis ületavad tugevuspiiri, siis toimub materjali purunemine. [10]

Valitud kümne sideraua materjalide hulgas esineb kaks terasemarki:

- 1) DC01+ZE25/25 APC - pehmeterasest külmaltsitud lehtteras. Kasutatakse lehepaksuste  $\leq 3$  mm korral.
- 2) S235J2+N - kuumvaltsitud mittelegeeritud konstruktsiooniteras. Kasutatakse lehepaksuste  $\geq 3$  mm korral.

Märkus. Lehepaksuse 3 mm korral on induktori mass määravaks, mille järgi vaadatakse, kas on vajadus paremate tugevusnäitajatega S235J2+N terase valimiseks.



Esimese sideraaua materjali DC01+ZE25/25 APC standardi EN10130 järgi on tegemist külmvormitava teraslehega. Tähistuses kasutatavate tähtede seletuse saab standardist DIN EN 10152. Tähistuses sümbolite tähendus on järgmine:

- DC01 – margitähis;
- A - pinna tüübi tähis;
- PC - fosfaaditud ja keemiliselt töödeldud pind;
- ZE - nominaalselt tsingitud mõlemalt teraslehe poolelt. [6]

Margitähise järgi saab teada, et tegemist külmaltsitud lehttootega. Antud terase nominaalseks tsingikihi paksuseks mõlemal teraslehe poolel on 2,5 µm. Lisaks sellele on pinda keemiliselt töödeldud ja fosfaaditud. Fosfaaditud pind on samuti korrosioonikindlust tõstva toimega. Lehe paksuse sortiment on 0,25-3 mm. Pinna tüübi tähise A kirjeldus on välja toodud „Mehaanikainseneri käsiraamatus“, mis kirjeldab, et defektid ei mõjuta otseselt töödeldavust ja pinnete adhesioonitugevust. Defektideks on näiteks materjali poorsus ja rebendid. Pinna tüübi järgi on määratud terase voolepiir  $R_e=140$  MPa ja maksimaalne tõmbetugevus  $R_m=270$  MPa. Näiteks pinna tüübi B puhul on vastavad näitajad oluliselt kõrgemad  $R_e=280$  Mpa ja  $R_m=410$  MPa. [6]

Teiseks sideraaua materjaliks on S235J2+N. Tegemist on kuumvaltsitud mittelegeeritud konstruktsiooniterasega standardi EN 10025-2 järgi. Tähistuses sümbolite tähendus on järgmine:

- S - konstruktsiooniteraste tähis;
- 235 - voolepiir  $R_e$  minimaalse toote paksuse korral.
- J2 - purustustöö  $J$  °C, kus J on 27 J juures ja 2 tähendab -20 °C temperatuuri juures.
- N - normaliseeritud või normaliseerimisega valtsitud. [7]

Antud teras on sobiv külmvormimiste jaoks, nagu painutamine. Kasutatakse kergelt koormatud ehitus- ja masinaehituskeeviskonstruktsioonides, poltide, võllide ja telgede valmistamisel. Ülevaade eelpool kirjeldatud terastest koos vajalike tugevusnäitajatega on näidatud tabelis 1.2. [3]

Tabel 1.2. Sideraudade materjalid

Terase mark		Voolepiir R <sub>e</sub> , MPa	Tugevuspäir R <sub>m</sub> , MPa	Elastsus- moodul E, GPa	Katkevenivus A, %
Margitähis	Tunnus- number				
DC01+ZE25/25 APC	1.0330	140	270	165	28
S235J2+N	1.0117+N	235	360-510	200	26

### 1.3. Ülevaade uuritavatest sideraudadest

Magistritöös uurimise all olevatest sideraudadest annab ülevaate tabel 1.3. Selle järgi on näha, et sideraudade kujutüüpide järgi on valikus kolm U-tüüpi ja seitse L-tüüpi kujuga siderauda. S235J2+N terast kasutavad 8 siderauda ja DC01+ZE25/25 APC terast 2 siderauda. Suurimad induktori raskused on alates 100 kg-st kuni 500 kg-ni. Lisaks on B-paki pikkus vahemikus 250-560 mm. Nende andmete põhjal võib järeldada, et valik on piisavalt mitmekesine, et magistritöö tulemused oleks hilisemalt ulatuslikumad.

Tabel 1.3. Sideraudade spetsifikatsioonid

Sideraua variant	Kuju-tüüp	Sideraua paksus, mm	B-paki pikkus, mm	B-paki kõrgus, mm	Suurim induktori raskus, kg	Sideraua materjal	Poltiide
Sideraud 1	L	6	450	100	250	S235J2+N	M12
Sideraud 2	U	5	450	100	500	S235J2+N	M12
Sideraud 3	L	4	450	100	500	S235J2+N	M10
Sideraud 4	L	6	450	100	400	S235J2+N	M12
Sideraud 5	L	3	350	70	200	S235J2+N	M8
Sideraud 6	L	3	250	50	100	DC01+ZE 25/25APC	M6
Sideraud 7	L	3	300	60	100	DC01+ZE 25/25APC	M8
Sideraud 8	L	6	300	100	300	S235J2+N	M10
Sideraud 9	U	6	300	100	200	S235J2+N	M10
Sideraud 10	U	6	560	85	300	S235J2+N	M10

## 2. POLDI EELPINGUTUSMOMENDI ARVUTUS

Sideraudade valiku järgselt toimub poldi suurusest olenevalt eelpingutusjõu arvutamine. Siderauad kinnitatakse omavahel poltühendusega, mis koosneb kahest seibist, mutrist ja poldist ühe liite kohta. Pingutusjõud peab olema piisav, et hoida sideraudade vahelist raskust hõõrdejõu abil. Eelpingutusmomendid saab arvutada teades pingutusjõudu ning lisaks poldi ja seibi vahelist hõõrdetegurit. Sellest lähtuvalt alustatakse hõõrdetegurite leidmisega.

### 2.1. Hõõrdetegurite valimine

Magistritöös on vaatluse all oleva ülesande täitmiseks vajalik lisaks materjali mehaanilistele omadustele ka teada kontaktpindade vahelisi hõõrdetegureid. Esiteks on see vajalik parameetrite sisestamisel kontaktpindade seadete defineerimisel simulatsiooni tarkvaras. Teiseks on vaja poldi ja seibi vahelise dünaamilise hõõrdeteguri väärtust, et arvutada mutrivõtme eelpingutusmomendi ja -jõu väärtused. Siinkohal määratakse lisaks veel teiste kontaktpindade hõõrdetegurid.

Hõõrdeteguril pole ühikut. Hõõrdetegurit mõjutavad peamiselt kontaktpindade karedus, materjal ja materjali ebatasasused. Materjali hõõrdetegurid on määratud varasemalt katseliselt ning on üldtuntud väärtustega. Hõõrdetegurite leidmiseks on välja toodud kaks hõõrdejõu liiki, mis siin lihtsustavad tööd. Esiteks seisuhõõrdejõud ehk staatiline hõõrdejõud, mis tekib siis, kui keha seisab statsionaarselt. Antud hõõrdejõu puhul on hõõrdetegur  $\mu$  seisuhõõrdetegur. Teiseks liugehõõrdejõud, mis tekib siis, kui keha on liikumises aluspinna peal. Sellisel korral on hõõrdetegur  $\mu$  liugehõõrdetegur. Tuleb teada, et seisuhõõrdetegur on oluliselt suurem liugehõõrdetegurist. Seega hõõrdetegurite väärtuste määramisel on vajalik jälgida:

- 1) kas tegemist on liugehõõrdumisega või seisuhõõrdumisega;
- 2) millised on kontaktpindade materjalid;
- 3) kas pinnad on kuivad või määrdega. [15]

Kõige pealt analüüsitakse sideraua kontaktpindasid, kus hõõrdetegureid vaja määrata. Tähtsamad uurimise all olevad kontaktpinnad on:

- 1) südamikuga ja sideraudade vaheline kontaktpind;
- 2) poldi ja seibi vaheline kontaktpind.

Esimesena valitakse südamiku ja sideraudade vahelise kontaktpinna vaheline hõõrdetegur. Teada on, et südamiku ja sideraudade materjaliks on teras. Ühe uurimise all oleva sideraaua mudeli puhul on sideraauad kontaktis alumiiniumsulamist jahutusprofiilidega mitte südamikuga. Seda on hõõrdeteguri valimisel arvesse võetud. Kuna sideraauad on püsivalt kinnitatud poltliite abil südamiku vastu, siis nende vahel esineb seisuhõõrdejõud. Hõõrdetegur on seega seisuhõõrdetegur. Teraspindade omavahelisel kontaktil on staatiliseks hõõrdeteguriks 0,5-0,8. Kontaktpinnad on kuivad ning määrleta. Seetõttu võetakse magistritöös seisuhõõrdeteguri väärtuseks 0,8. Erandiks oleva jahutusprofiilide ja sideraudade vahelise hõõrdeteguri väärtuseks võetakse alumiiniumi ja terase vahelise seisuhõõrdeteguri väärtus 0,6. [9]

Poltliitel vaadeldakse poldi ja seibi vahelist kontakti hõõrdeteguri määramisel. Pingutusmomendi ja -jõu arvutustes on vaja liugehõõrdetegurit, sest polt liigub seibi kui aluspinna peal kinni keeramise ajal. Valitud sideraudade kinnitamiseks kasutatakse poltliites järgmisi kinnitusvahendeid: poldi jaoks DIN 933 ZN, mutri jaoks DIN 934 ZN, seibi jaoks DIN 125 ZN. Sellest järeldub, et kinnitusvahendite pinnad on tsingitud. Lisaks sellele on teada, et kinnitusvahendite pinnad on määrdeaineta. Kõike eelnevat arvesse võttes valitakse teatmikust liugehõõrdeteguri keskmine väärtus 0,22 võtmemomendi arvutuste jaoks [1].

## 2.2. Arvutusvalemid

Keermesliidetes on detailid ühendatud poltide ja mutrite abil. Poltliite kinnitamise peamiseks elemendiks on keere. Keerme põhiparameetrid, mida kasutatakse pingutusjõu ja -momendi arvutustes: poldikeerme välisläbimõõt  $d$ , mutri keerme siseläbimõõt  $d_1$ , keerme keskläbimõõt  $d_2$ , keermeniidi tõusunurk  $\lambda$ , keerme samm  $S$ , keerme nurk  $\alpha$ . [16]

Kasutatakse meeterkeeret ning arvutustes kasutatakse meeterkeerme põhiparameetreid tabelist 2.1. Magistritöös on kasutusel järgmised meeterkeerme suurused: M6, M8, M10 ja M12.

Tabel 2.1. Poldide algandmed

	Poldi suurused			
	M6	M8	M10	M12
$d$ , mm	6	8	10	12
$d_2$ , mm	5,35	7,19	9,03	10,86
$A_T$ , mm <sup>2</sup>	20,1	36,6	58	84,3
$\alpha$ , °	60	60	60	60

Eelpingutusmomendi rakendamiseks kasutatakse momentvõtit, millega saab poldid pingutada pöördemomendini  $M_p$ . Pingutusmomendi saab tasakaalustada keermes oleva momendiga  $M_k$  ja poldi pea toetuspinna hõõrdemomendiga  $M_t$ . Pöördemoment  $M_p$  leitakse valemiga:

$$M_p = M_k + M_t \quad (2.1)$$

Keermes esineva momendi  $M_k$  valem:

$$M_k = 0,5 \cdot d_2 \cdot P, \quad (2.2)$$

kus  $M_k$  – keermes esinev moment (Nm),

$d_2$  - keeme keskläbimõõt (m),

$P$  - kolmnurkkeerme niidile mõjuv ringjõud (N). [2]

Hõõrdemoment  $M_t$  poldi pea tugipinnal arvutatakse valemiga 2.3. Hõõrdejõudude koguväärtus  $F_{ep} \cdot \mu$ , mis mõjub mutri otspinna ja ühendatava detaili vahel, peab olema rakendatud tugipinna keskmisel läbimõõdul  $d_k$ , et valem 2.3 kehtiks. Samuti on kasulik kasutada kinnituskeermetel välja toodud keskmisi väärtusi arvutuste lihtsustamiseks:  $\lambda \approx 2^\circ 30' = 2,5^\circ$ ,  $d_k = 1,4 \cdot d$ . [2]

$$M_t = F_{ep} \cdot \mu \cdot \frac{d_k}{2}, \quad (2.3)$$

kus  $M_t$  – hõõrdemoment poldi pea tugipinnal (Nm),

$F_{ep}$  - eelpingutusjõud (N),

$\mu$  - hõõrdetegur,

$d_k$  - tugipinna keskmine läbimõõt (m). [2]

Eelpingutusjõud arvutatakse, teades arvutusliku ristlõike pindala  $A_T$  ja suurimat poldile lubatud eelpinget  $\sigma_{ep \max}$ . Eelpingutusjõu valem:

$$F_{ep} = \sigma_{ep \max} \cdot A_T, \quad (2.4)$$

kus  $F_{ep}$  - eelpingutusjõud (N),

$\sigma_{ep \max}$  - suurim poldile lubatud eelpinge (MPa),

$A_T$  – poldi arvutuslik ristlõike pindala ( $\text{mm}^2$ ). [1]

Arvutuslikud ristlõike pindalad saadakse tabelist 2.1. Suurima lubatud eelpinge poldile  $\sigma_{ep \max}$  saab leida valemiga  $\sigma_{ep \max} = 0,6 \cdot R_e$ . Kasutatavad poldid on tugevusklass 8.8 järgi voolepiiriga  $R_e = 640$  MPa ja maksimaalse tõmbetugevusega  $R_m = 800$  MPa. [17]

Tulemus:  $\sigma_{ep \max} = 0,6 \cdot R_e = 0,6 \cdot 640 = 384$  MPa

Keermes esineva momendi  $M_k$  valemis 2.2 vajalik kolmnurkkeerme niidile mõjuv ringjõud leitakse valemiga:

$$P = F_{ep} \cdot \tan(\lambda + \varphi'), \quad (2.5)$$

kus  $P$  – ringjõud (N),

$F_{ep}$  - eelpingutusjõud (N),

$\varphi'$  - on taandatud hõõrdenurk ( $^\circ$ ),

$\lambda$  - keermeniidi tõusunurk ( $^\circ$ ). [2]

Taandatud hõõrdenurga  $\varphi'$  saab arvutada valemiga 2.7 kõikide poldi suuruste puhul, Võtmemomendi määramiseks tsingitud ning määrdeaineta poldi, mutri ja seibi pinna korral on hõõrdeteguri  $\mu$  väärtuseks 0,22. Taandatud hõõrdeteguri  $\mu'$  saame valemiga:

$$\mu' = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.6)$$

kus  $\mu$  – hõõrdetegur,

$\alpha$  – meeterkeerme nurk ( $^\circ$ ). [2]

Taandatud hõõrdenurga valem:

$$\varphi' = \arctan \mu', \quad (2.7)$$

kus  $\mu'$  – taandatud hõõrdetegur. [2]

$$\text{Tulemus: } \varphi' = \arctan \mu' = \arctan \left( \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) = \arctan \left( \frac{0,22}{\cos \frac{60^\circ}{2}} \right) = 12^\circ 57' = 12,95^\circ.$$

### 2.3. M6 poldi arvutus

Arvutusteks vajalikud valemid on välja toodud eelmises peatükis ja näidatud nende tuletamised. Näiteks on arvutatud M6 poldile vajalikud eelpingutusjõu ja- momendi väärtused. Ülejäänud poldi suurustele arvutatakse võtmemomendid sarnaselt ning kasutatakse Microsoft Exceli keskkonda arvutuste kordamiseks.

Järgnevalt arvutatakse võimalikult lihtsalt M6 poldile nutrivõtme suurim lubatud eelpingutusmoment:

1) Eelpingutusjõu  $F_{ep}$  arvutamine valemiga 2.4.

$$\text{Tulemus: } F_{ep} = \sigma_{ep \max} \cdot A_T = 384 \cdot 20,1 = 7718N \approx 7,7kN$$

2) Kolmnurkkeerme niidile mõjuv ringjõud  $P$  valemiga 2.5.

$$\text{Tulemus: } P = F_{ep} \cdot \tan(\lambda + \varphi') = 7718 \cdot \tan(2,5^\circ + 12,95^\circ) = 2324N$$

3) Keermes esinev moment  $M_k$  valemiga 2.2.

$$\text{Tulemus: } M_k = 0,5 \cdot d_2 \cdot P = 0,5 \cdot 0,00535 \cdot 2324 = 6,22Nm$$

4) Hõõrdemoment  $M_t$  poldi pea tugipinnal arvutatakse valemiga 2.3.

$$\text{Tulemus: } M_t = F_{ep} \cdot \mu \cdot \frac{d_k}{2} = F_{ep} \cdot \mu \cdot \frac{1,4 \cdot d}{2} = 7718 \cdot 0,22 \cdot \frac{1,4 \cdot 0,006}{2} = 7,13Nm$$

5) Võtmemoment  $M_p$  leitakse valemiga 2.1.

$$\text{Tulemus: } M_p = M_k + M = 6,22 + 7,13 = 13,35Nm \approx 13,3Nm$$

Eelpingutusjõudude ja –momentide väärtused kõikidele magistritöös kasutatavatele poldidele on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Suurimad lubatud eelpingestusjõud ja –momendid poldidele

Poldi suurus	$F_{ep}$ , kN	$M_p$ , Nm
M6	7,7	13,3
M8	14	32,5
M10	22	64,6
M12	32	112,7

### 3. ARVUTISIMULATSIOONID

Simulatsioonide eesmärgiks on leida igale sideraua versioonile sobiv poldi eelpingutusmoment, millega oleks tagatud sideraua tugevus ning induktori südamikku hoidmine sideraudade vahel ettenähtud jõu rakendamisel.

Simulatsioonide teostamise keskkonnaks sai valitud ANSYS 15.0 Workbench. ANSYS on lõplike elementide meetodi tarkvara, mida saab kasutada erinevate füüsikaliste ülesannete lahenduste leidmiseks. Kasutamine ulatub pingete uurimisest lihtkonstruktsioonides kuni keerukate süsteemide lahendamiseni, nagu seda on näiteks kosmosesüstikud. [4]

Eeliseks ANSYS programmi kasutamisel magistritöö analüüsi puhul on võimalus rakendada poldi eelpingestuse jõud (bolt pretension) mudelile vastavat funktsiooni kasutades staatilise struktuuri analüüsil. Lisaks võimaldab ANSYS uurida kontaktpindade vahelist olukorda peale koormuste rakendamist, mis on vajalik libisemisolukorra kindlaks tegemiseks.

#### 3.1. Kasutatavamad mõisted

Ekvivalent pinget (equivalent stress) - kasutatakse 3D-mudelite pingete analüüsimisel, kuna sellega on näha kõigi kolme mõõtme pinged ühe pinget väärtusena. Analüüsi käigus jälgitakse, et ekvivalent pinget väärtused jääksid alla poole materjali voolepiiri. Ühik on MPa. Tähtis on  $\sigma_v$ . [13]

Summaarne deformatsioon (total deformation) - keha osakeste omavaheline asendi muutus, mille tõttu toimub detaili kuju- ning mahumuutus. Deformatsiooni mõiste on tähtis: kui pinget deformatsiooni piirkonnas ületavad materjali voolepiiri väärtust, siis toimub püsiv kujumuutus ehk plastne deformatsioon, mis pole lubatud. Voolepiirist madalamate pinget väärtuste korral toimub elastne deformatsioon, mis on lubatud. Ühik on siinses süsteemis mm. [14]



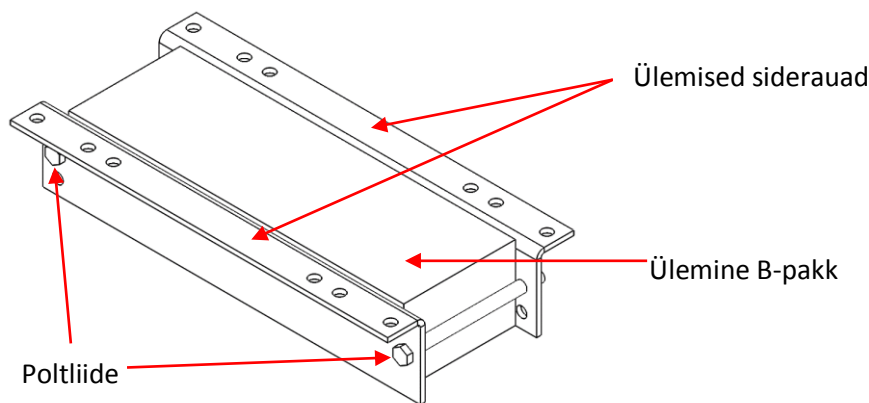
### 3.2. Lihtsustatud 3D-mudelid

Eeltööna tuleb lisaks materjali uuringule projekteerida simulatsiooni lihtsustatud mudelid. Kogu induktori konstruktsiooni juures on uurimise all ülemine induktori osa, mis koosneb järgmistest detailidest:

- 1) sideraudade paar,
- 2) ülemine B-pakk,
- 3) poltliited.

Simulatsiooni 3D-mudeli lihtsustamisel on vajalik ainult eelpool nimetatud osade kasutamine. Ülemised siderauad on induktori osadest otseses kontaktis ainult südamiku ülemise B-pakiga, seetõttu võib südamiku ülejäänud osad ära jätta modelleerimisel. Mudeli lihtsustamisel saab poltliitest ära jätta seibid ning asendada need pinnana sideraua peal. Hilisemalt saab neid pindu kasutada võrgustiku tihendamisel täpsemate tulemuste saamiseks kontaktpindade juures.

Sideraua 1 jaoks lihtsustatud mudel on näidatud seel 3.1. See annab üldpildi katse läbiviimiseks vajalikust mudelist. Sideraua mudelitel varieeruvad induktori tõstmiseks ettenähtud avad ning üldmõõtmed. Kett-tropi kinnituskohad on näidatud iga sideraua jaoks simulatsiooni peatükkide alguses. Samuti on lõputöö graafilises osas kõikide sideraua lihtsustatud konstruktsioonide koostejoonised koos detailide loeteluga.

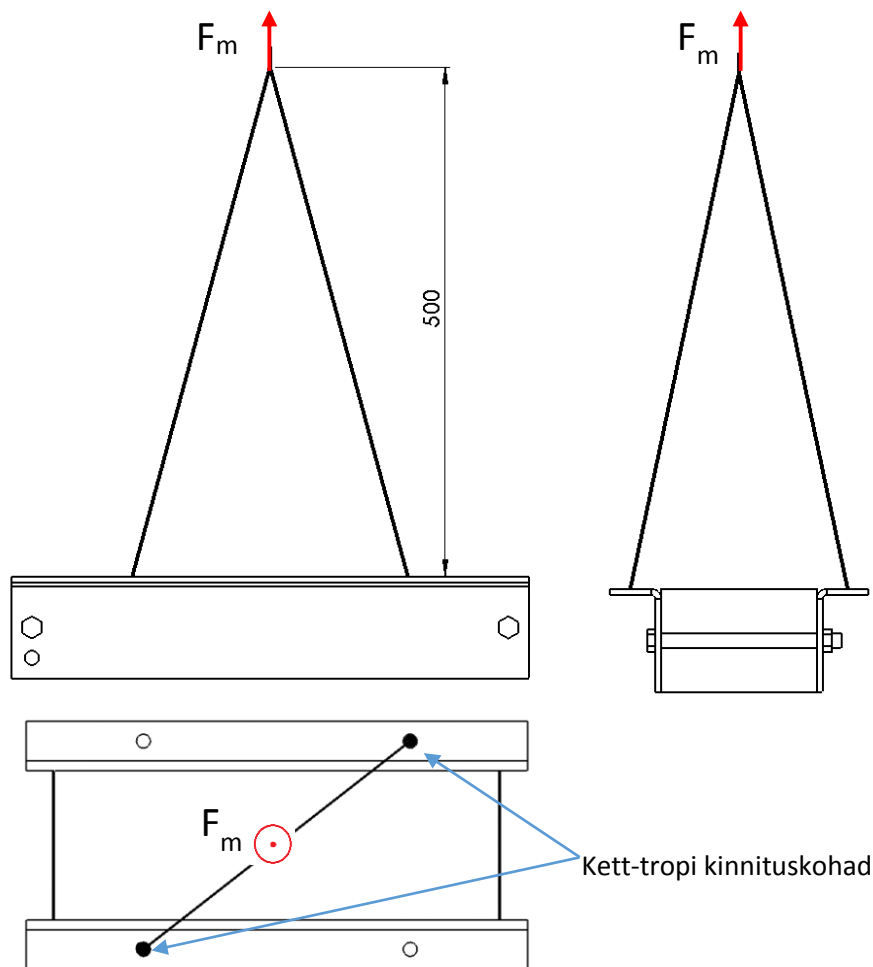


Sele 3.1. Lihtsustatud mudel siderauale 1

Üldiselt on sideraua enda ehitus piisavalt lihtne ja ei vaja lihtsustamist analüüsi teostamiseks. Erandiks on sideraudade 3 komplekt, mida tuli ka tugevusanalüüsi jaoks eelnevalt ka lihtsustada. Põhjuseks peatükis 1.1 mainitud probleemid.

### 3.3. Katsete läbiviimis metoodika

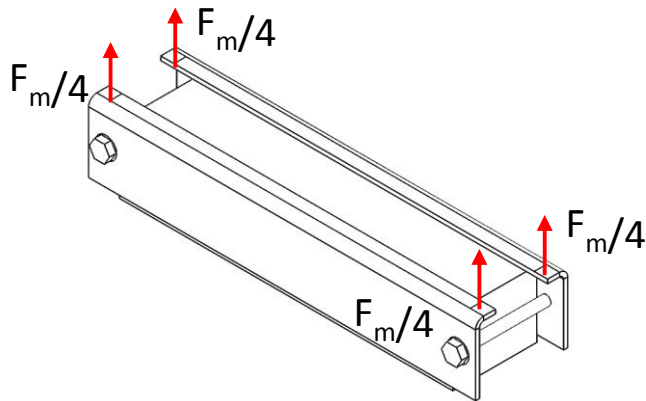
Simulatsioonidele eelnevalt tuleb ära selgitada, kuidas katseid teostatakse. Sideraua 1 lihtsustatud mudeli näitel on ära selgitatud üldine testimise skeem seel 3.2. Kõiki sideraua induktoreid v.a sideraua 6 induktorit tõstetakse kett-tropi abiga. Üldine tõstmisviis on kahte kinnituskoha kasutades, mis tähendab, et kett-tropi konksud ühendatakse diagonaalselt, kas sideraual ettenähtud kinnituskohadesse või tõstesilmade külge, mis on samuti sideraua kinnituskohadesse kinnitatud.



Sele 3.2. Üldine katseskeem

Kett-tropi kettide ühenduskohta mõjub kogu induktori raskus. Seetõttu on katse rajatingimustes asendatud induktori poolt tekitatav koormus sideraudadele keti tõmbejõuga  $F_m$ . Selleks saab kasutada ANSYS-s eemalt rakenduva jõu funktsiooni (remote force). Kettide ühenduskoha kõrgus on südamiku pinnalt 500 mm. Altpoolt kinnitatakse B-paki alumine pind liikumatult (fixed support). Katse toimub sideraudade tõmbamise teel südamiku vahelt rakendades keti tõmbamisjõudu.

Sideraua 6 mudeli tõstmis skeem on sarnane, kuid erinevalt teistest sideraua mudelitest tõstetakse selle induktoreid käsitsi. Tõstmis skeem on näidatud seel 3.3. Tõstmisel mõjuvad jõud nelja kohta sideraudadel näidatud kohtades.



Sele 3.3. Sideraua 6 katseskeem

Jõudude arvutamiseks saab kasutada tabelis 1.3 toodud andmeid suurimate induktorite raskuste kohta. Induktori massi teisendamine jõuks on arvutatav valemiga:

$$F = m \cdot g, \quad (3.1)$$

kus  $F$  - jõud njuutonites (N),  
 $m$  - keha mass kilogrammides (kg),  
 $g$  - raskuskiirendus ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Sideraua 1 näitel arvutatakse esimese tõmbejõu väärtus. Teades, et suurim induktori mass  $m_1 = 250 \text{ kg}$ .

$$\text{Tulemus: } F_1 = m_1 \cdot g = 250 \cdot 9,8 = 2450 \text{ N}$$

Märkus. Arvestades olukorda, et induktori raskus võib kanduda kettidega tõstes ühele poolele, siis on leitud jõud korrutatud varuteguriga  $S = 2$ .

Seega kett-tropi tõmbejõud sideraua 1 mudeli jaoks on:

$$F_{m1} = S \cdot F_1 = 2 \cdot 2450 = 4900 \text{ N} \approx 5 \text{ kN}$$

Ülejäänud tõmbejõu väärtused simulatsioonides kasutamiseks on toodud tabelis 3.1. Seal on näha, et tõmbejõu suurused on vahemikus 2-10 kN.

Tabel 3.1. Katsete teostamiseks alparameetrid

Sideraua variant	Poldi suurus	Suurim poldile lubatud pingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim poldile lubatud pingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN
Sideraud 1	M12	112,7	32	5
Sideraud 2	M12	112,7	32	10
Sideraud 3	M10	64,6	22	10
Sideraud 4	M12	112,7	32	8
Sideraud 5	M8	32,5	14	4
Sideraud 6	M6	13,3	7,7	2
Sideraud 7	M8	32,5	14	2
Sideraud 8	M10	64,6	22	6
Sideraud 9	M10	64,6	22	4
Sideraud 10	M10	64,6	22	6

Edasi teostatakse esimesed simulatsioonikatsed tabelis 3.1 suurimate poldile lubatud eelpingutusmomentidega. Võib eeldada, et suurima lubatud eelpingutusmomentiga võib sideraua tugevus jääda tagamata. Seetõttu on simulatsioonide esialgseks testimiseks võetud 6 eelpingutusmomenti väärtust, et oleks kontrollitud piisav vahemik ning näha mudeli käitumine eelpingestusmomenti muutmisel.

Momendi vahemikud tabelis 3.2 sai valitud selle järgi, et oleks võimalikult kerge leida sobiv poldi eelpingutusmoment, mis suudaks rakendatud tõmbejõu juures sideraudu B-paki küljes hoida. Sealhulgas on arvestatud vahemike suurusi nii, et sobivaim tulemus ei jääks kuskile vahele. Selle võimalikkust on arvestatud ning vajadusel tehtud lisakatsed, lisades märkused selle kohta.

Juhul kui viimase madalaima väärtusega eelpingutusmomenti puhul ei teki libisemist ning eelnevate testi tulemuste seas on sobiv tulemus, siis edasisi katseid ei tehta selle tõmbejõu juures. Järgnevate katsetena suurendatakse leitud sobiva eelpingutusmomenti väärtuse juures tõmbejõu suurust ning jälgitakse millise koormuseni on sideraua tugevus tagatud, s.t  $\sigma_v < R_e$ , ning sideraudade ja südamikü vaheline haarduvus tagatud, s.t ei toimu libisemist.

Katsetuskeemi selgeks tegemise järgselt on mõistlik täpsustada arvutisimulatsiooni katsete eesmärgid:

- 1) Sobiva poldi eelpingutusmomendi leidmine. Sealjuures, et oleks tagatud sideraua tugevus, s.t  $\sigma_v < R_e$ .
- 2) Uurida tõmbejõudu suurendades, kas tekib libisemist sideraudade ja südamikku vahel, kui sideraudade tugevus on tagatud.

Tabel 3.2. Katsete poldi pingutusmomendid ja -jõud

	M6		M8		M10		M12	
	F <sub>ep</sub> , N	M <sub>p</sub> , Nm	F <sub>ep</sub> , N	M <sub>p</sub> , Nm	F <sub>ep</sub> , N	M <sub>p</sub> , Nm	F <sub>ep</sub> , N	M <sub>p</sub> , Nm
Katse 1	7,7	13,3	14	32,5	22	64,6	32	112,7
Katse 2	5	8,3	10	22,3	16,5	46,1	24	80,5
Katse 3	3,5	5,8	5,5	12,3	11	30,7	16	53,7
Katse 4	2,5	4,2	2,7	6	5,5	15,4	8	26,8
Katse 5	1,5	2,5	1,8	4	3	8,4	6	20,1
Katse 6	0,5	0,8	1	2,2	1,5	4,2	4	13,4

### 3.4. Simulatsiooniprogrammi ANSYS seadistamine

Tugevusanalüüsi teostamiseks tuli valida tarkvaras uuritava süsteemi jaoks sobiv analüüsi keskkond. Kuna sideraudad peavad taluma staatilist koormust, siis sai valitud staatilise struktuuri analüüsi keskkond (static structural). See võimaldab näha, kuidas koormuse erinevad olukorrad ja koormuse muutus mõjutavad analüüsi tulemusi. Staatilise analüüsiga on võimalik materjali deformatsioone ja pingeid näha katsedetaili struktuuris, mida põhjustavad kasutaja poolt määratud jõud.

Katsete eesmärgiks on leida võimalikult täpne skeem, kuidas saada võimalikult ligilähedased tulemused võrreldes reaaleluliste katsetega. Sellega oleks võimalik nii ajaline võit kui ka ressursside säästmine. Ressursside kasutamise alla läheks ka inimressursside kasutamine, kuna mudelite ehitamine hõlmab ka näiteks ostuosakonna töötajate kaasamist.

Staatilise struktuuri analüüsi esimeseks sammuks on materjali parameetrite paikapane. Peatükis 1.2 tehtud materjali uuringu andmeid saab siin kasutada. Lisaks on lisatud alumiiniumsulami mehaanilised tugevusnäitajad tabelisse 3.3 [11].

Tabel 3.3. Materjali mehaaniliste omaduste näitajad

Margitähis	R <sub>e</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	E, GPa	Tihedus ρ, kg/m <sup>3</sup>
AW 7075	460	540	71	2800
S235J2+N	235	510	200	7850
DC01+ZE25/25 APC	140	270	165	7850

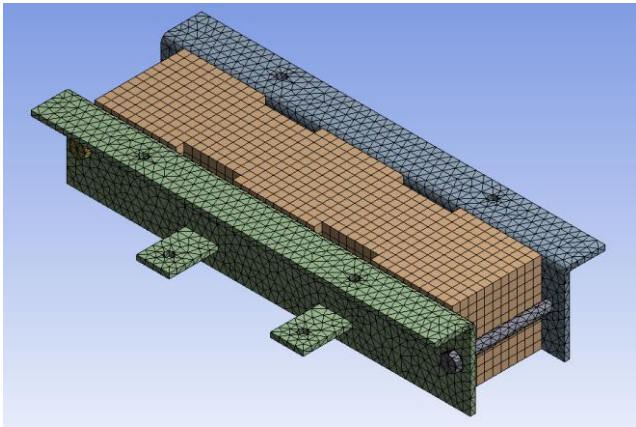
Need parameetrid sisestada materjali andmete mooduli (engineering data) kaudu analüüsikeskkonda. Teraste andmete seadistamiseks valida konstruktsiooniteras (structural steel), alumiiniumi sulami korral alumiinium sulam (aluminum alloy). Seejärel muuta tabeli 3.3 andmete põhjal materjalide parameetrid korrektseks.

Järgneva etapina lisatakse lihtsustatud sideraudade testmudelid ANSYS geomeetria keskkonda. Mudeli keskkonnas saab edasi täpsustada simulatsiooni parameetreid. Kuna töös esinevad ka hõõrdekontaktid, siis järgmiseks läbitavaks etapiks on seega kontaktpindade defineerimine. ANSYS saab kontakti konfliktide ettenägemiseks lasta kontaktide korrasoleku tööriistal (contact tool) kontrollida seadistatud kontakte enne simulatsioonide teostamist. Peamisi kontaktpinna tüüpe on neli:

- 1) Sideraua ja südamikü vaheline kontaktpind. Kontakti tüübiks on määratud hõõrdekontakt (frictional contact), mille hõõrde teguri väärtus on kõikide simulatsioonide (v.a sideraua 2 simulatsiooni) puhul 0,8. Sideraua 2 simulatsiooni puhul on määratud sideraua ja jahutusprofiilide vahelise hõõrde teguri väärtuseks 0,6.
- 2) Polt-seib ja mutter-seib vaheline kontaktpind. Kontakti tüübiks on hõõrdekontakt, mille hõõrde teguri väärtuseks sisestatakse 0,22.
- 3) Poldi varda kontakt, mis on määratud ilma eralduseta kontaktina (no separation).
- 4) Poldi ja mutri kontakt, mis on määratud siduvalt (bonded). [12]

Võrgustiku genereerimisel on kasutatud kõikidel simulatsioonimudelitel ühtseid seadeid. Elemendi tüübiks on valitud tetraeeder, mis on sobiv lihtsa süsteemi analüüsiks. Vähendatud on terve mudeli elementide suurus 15 mm peale (sele 3.4). Lisaks on hõõrdekontakti pindade elemendid vähendatud 5 mm suuruseks. Väiksem kui 15 mm elemendi suuruseks seadistamine

tervel mudelil ei ole vajalik, kuna probleemsed kohad on vähendatud elemendi suurustega ja nii on võimalik kiirendada tulemuste saamise protsessi.



Sele 3.4. Vähendatud võrgustikuga mudel

Analüüsi seadetes (analysis settings) tuleb seadistada analüüsi samm kahe peale. See on vajalik, kuna esimese sammu juures rakendatakse poldi eelpingus ning teise sammu ajal rakendatakse sideraudade kinnituskohtadesse mõjuv tõmbejõud.

Rajatingimused pannakse paika igale sideraua simulatsioonimudelile eraldi. Need on näidatud iga sideraua simulatsiooni peatüki alguses. Rajatingimused erinevad maksimaalse rakendatava tõmbejõu, tõstmisviisi ja kinnituskohtade asukohtade poolest. Simulatsiooni mudelis on püsivaks kinnituseks (fixed support) pandud B-paki alumine pind.

Jõu mõjumise kohaks on määratud kettide ülemine ühenduskoht, mis asub südamikü pealmisest pinnast 500 mm kaugusel (sele 3.2). Selle jõu saab määrata eemalt mõjuva jõuna (remote force). Poldi eelpingutuse saab määrata ANSYS-s Bolt Pretension funktsiooni kaudu, valides poldi silindrilise pinna ning sisestades varasemalt leitud poldi eelpingutusjõu tabelist 3.2.

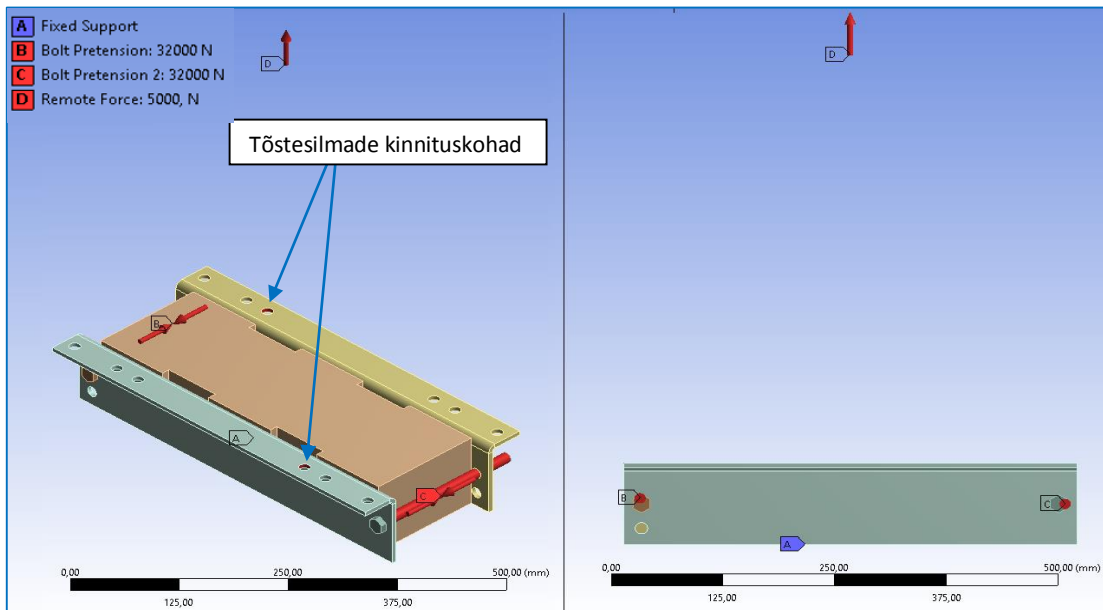
Tugevusanalüüsi lõpptulemustest on valitud:

- 1) summaarne deformatsioon (total deformation);
- 2) ekvivalent pinget (equivalent stress);
- 3) kontakti seisukord (contact status), millega on võimalik näha kas valitud kontakt-pindade vahel esineb haarduvus või libisemine.

### 3.5. Simulatsioonid

#### 3.5.1. Sideraua 1 simulatsioon

Sideraudade 1 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=5000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Need rajatingimused on näidatud seel 3.5 koos esimese katse poltide eelpingutusjõududega.



Sele 3.5. Sideraua 1 mudeli rajatingimused

Katseid alustati kõige suurema lubatud poldi eelpingutusjõu rakendamisega, milleks oli pold M12 puhul 32 kN. Kõikide induktorite sideraudade esialgne tõstmine toimub kahe kinnituspunkti kaudu diagonaalselt kett-troppi kinnitades, nagu eelnevalt peatükis 3.3 sai kirjeldatud. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=5000$  N

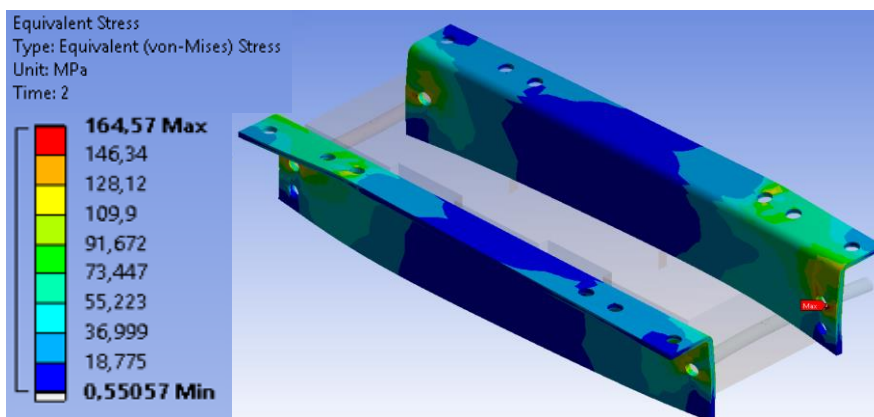
Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pingeline $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	32	112	536,6	1,4
2	24	80	432,9	1,18
3	16	53	297,4	0,92
4	8	26	164,6	0,65
5	6	20	133	0,59
6	4	13	120,6	0,52



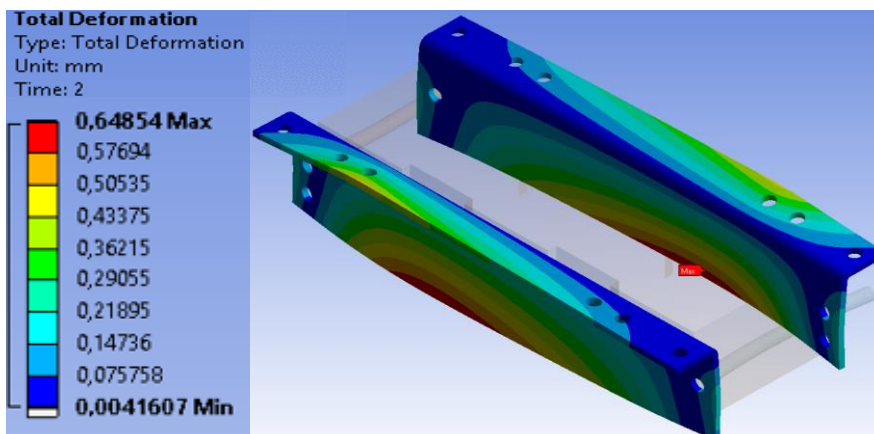
Analüüsid esimest katset 32 kN suuruse eelpingutusjõu juures on maksimaalne ekvivalent pinget  $\sigma_v=537$  MPa, mis asub poltliite ja sideraua kontaktpinna juures. Summaarne deformatsioon on sideraua keskmisel osal 1,4 mm, mis tekitab liialt suure vahe südamikü keskmise osaga. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

Poldi eelpingutusjõu 8 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:  
 $\sigma_v=164,6$  MPa <  $R_e=235$  MPa

Sellest järeldub, et sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.6 on pingete jaotus rahuldav. Lisaks sellele on tähtis, et koormuse hoidmiseks oleks rakendatud võimalikult suur poldi pingutusmoment, mis tagab suurema ohutuse, kui väiksema momendiga kinnitus. Suurim summaarne deformatsioon on 0,65 mm (sele 3.7). Südamikü ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.8).



Sele 3.6. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=8$  kN,  $F_m=5$  kN



Sele 3.7. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=8$  kN,  $F_m=5$  kN

Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südamikü kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.5.

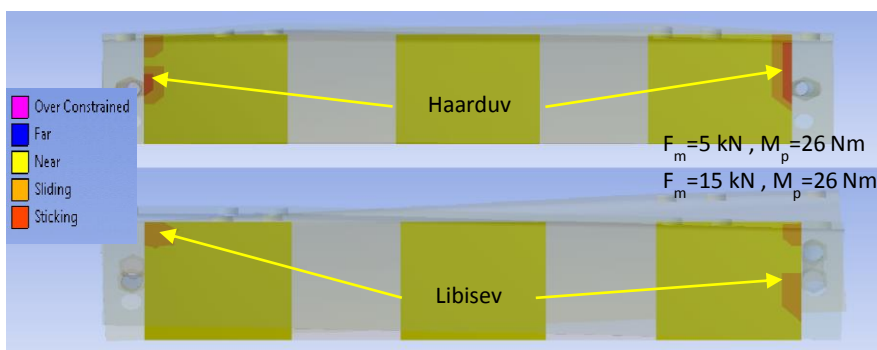
Tabel 3.5. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=8000\text{ N}$

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
<u>1</u>	<u>8</u>	<u>5</u>	<u>164,6</u>	<u>0,65</u>
<u>2</u>	<u>8</u>	<u>7,5</u>	<u>197,7</u>	<u>0,89</u>
3	8	10	286,1	1,21
4	8	12,5	375,5	1,55
5	8	15	-	-

Tabeli 3.5 tulemustest on näha, et viimane tulemus, millega on sideraudade ja südamikü vaheline haarduvus tagatud on  $F_m=12,5\text{ kN}$ . Siiski pole selle juures sideraaua tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v=375,5\text{ MPa} > R_e=235\text{ MPa}$ .

Sideraaua 1 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=26\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni  $7,5\text{ kN}$  tõmbejõu juures. Suurim summaarne deformatsioon on sel juhul  $0,89\text{ mm}$ .

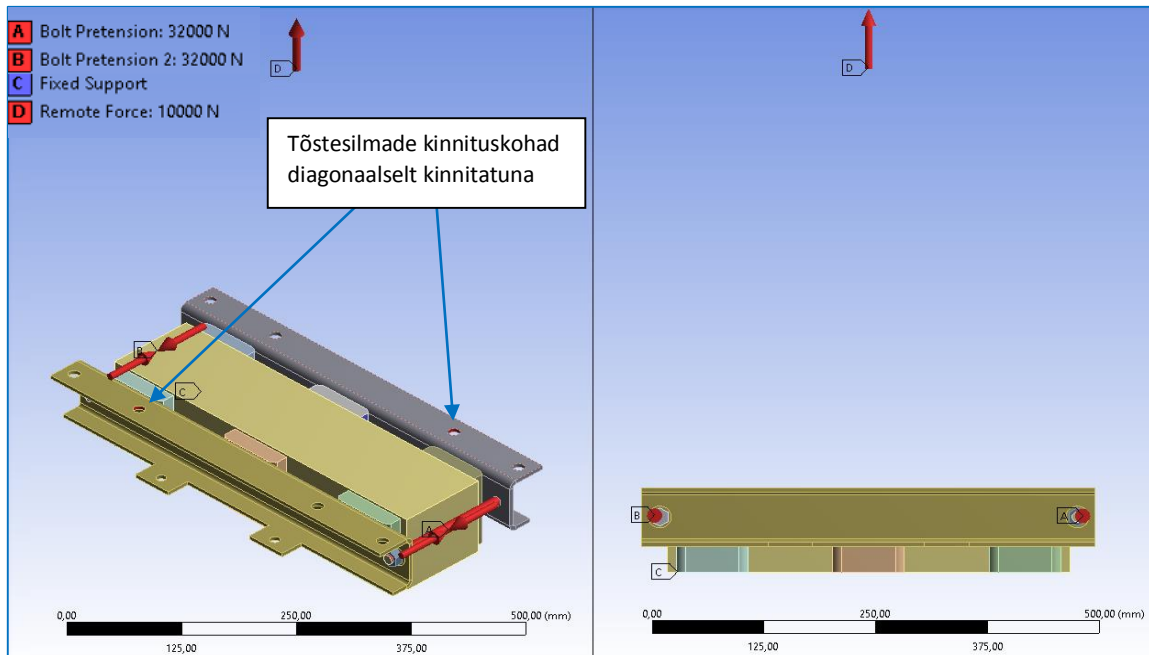
Illustreerivalt on näidatud, kuidas toimus tõmbejõu  $F_m=15\text{ kN}$  juures libisemine kontakti seisukorra funktsiooni (contact status) kasutades. Sele 3.8 näitab võrdlust tõmbejõudude  $5\text{ kN}$  ja  $15\text{ kN}$  vahel, kui poldi kinnitusemoment on  $26\text{ Nm}$ .



Sele 3.8. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.2. Sideraua 2 simulatsioon

Sideraudade 2 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=10000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Rajatingimused on näidatud seel 3.9 koos katse 1 poldi eelpingutusjõuga.



Sele 3.9. Sideraua 2 mudeli rajatingimused

Selle sideraua puhul ei ole siderauad kontaktis mitte südamikuga, vaid südamiku alumiiniumsulamist jahutusprofiilidega. Seetõttu on sideraua ja jahutusprofiilide kontakti hõõrdeteguriks 0,6. Katseid alustati kõige suurema lubatud poldi eelpingutusjõu rakendamisega, milleks oli pold M12 puhul 32 kN. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=10000$  N, kahte tõstekohta kasutades

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	32	112	1254,3	1,71
2	24	80	938,7	1,18
3	16	53	626,8	0,92
4	8	26	334,3	0,65
5	6	20	-	-
6	4	13	-	-

Tabeli 3.6 tulemustest järeldub, et sobiv tulemus kahte kinnitamispunkti kasutades puudub. Seetõttu muudetakse rajatingimusi nii, et rakendatud oleks kõik neli tõstmiskohta sideraual ehk kasutatakse nelja kett-tropi kinnitust. Uute katsete tulemused on tabelis 3.7.

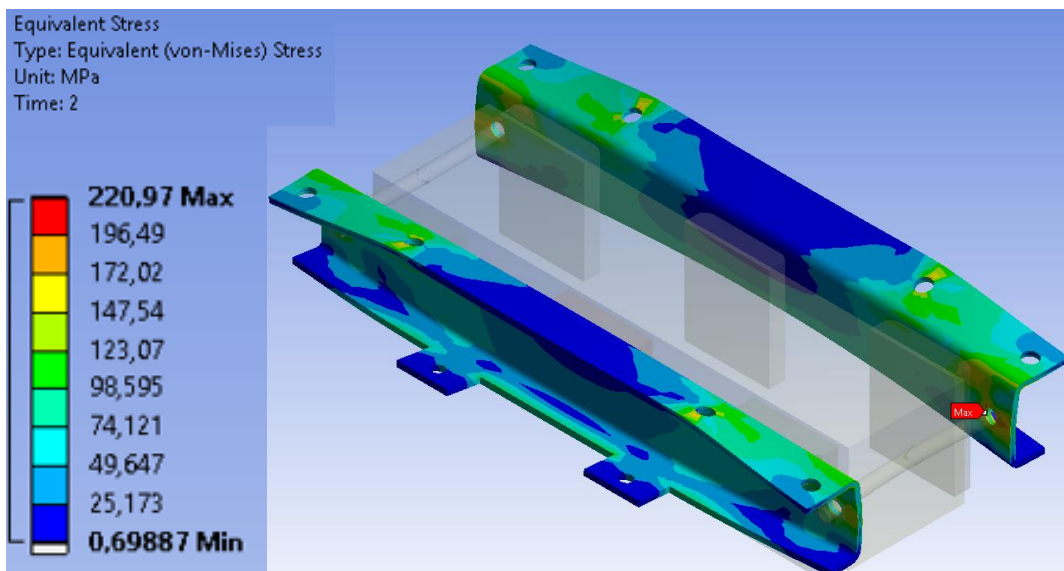
Tabel 3.7. Esimese katseosa uued tulemused,  $F_m=10000$  N, nelja tõstekohta kasutades

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	7	23,5	294,9	0,88
2	6	20,1	258,3	0,87
<u>3</u>	<u>5</u>	<u>16,8</u>	<u>221</u>	<u>0,72</u>
4	4	13,4	-	-

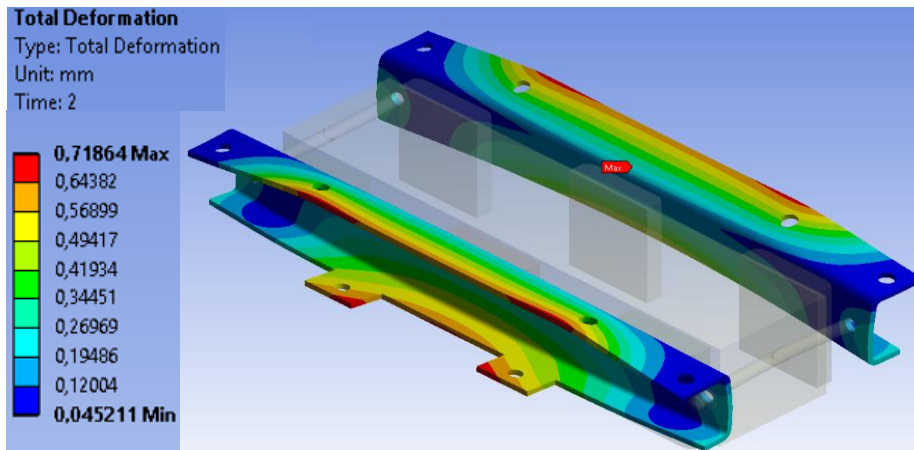
Poldi eelpingutusjõu 5 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v=221 \text{ MPa} < R_e=235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraaua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.10 on pingete jaotus rahuldav. Suurim summaarne deformatsioon on 0,72 mm (sele 3.11). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.12). 4 kN eelpingutusjõu juures toimub juba sideraudade ja südamiku vahel libisemine.



Sele 3.10. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=5$  kN,  $F_m=10$  kN



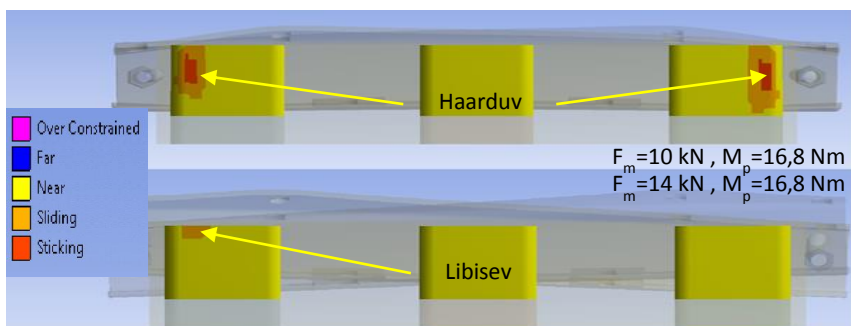
Sele 3.11. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=5$  kN,  $F_m=10$  kN

Teise katsete osa tulemused on toodud tabelis 3.8, kus otsitakse suurimat tõmbejõudu sobiva eelpingestusmomendi korral. Tulemustest järeldub sideraudade ja südamikü vahelist haarduvust tagav viimane tõmbejõud  $F_m=12$  kN. Selle juures on sideraua tugevus tagatud:  $\sigma_v=222,4$  MPa  $>$   $R_e=235$  MPa.

Tabel 3.8. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=5000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
<u>1</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>221</u>	<u>0,72</u>
<u>2</u>	<u>5</u>	<u>12</u>	<u>222,4</u>	<u>1,02</u>
3	5	14	-	-

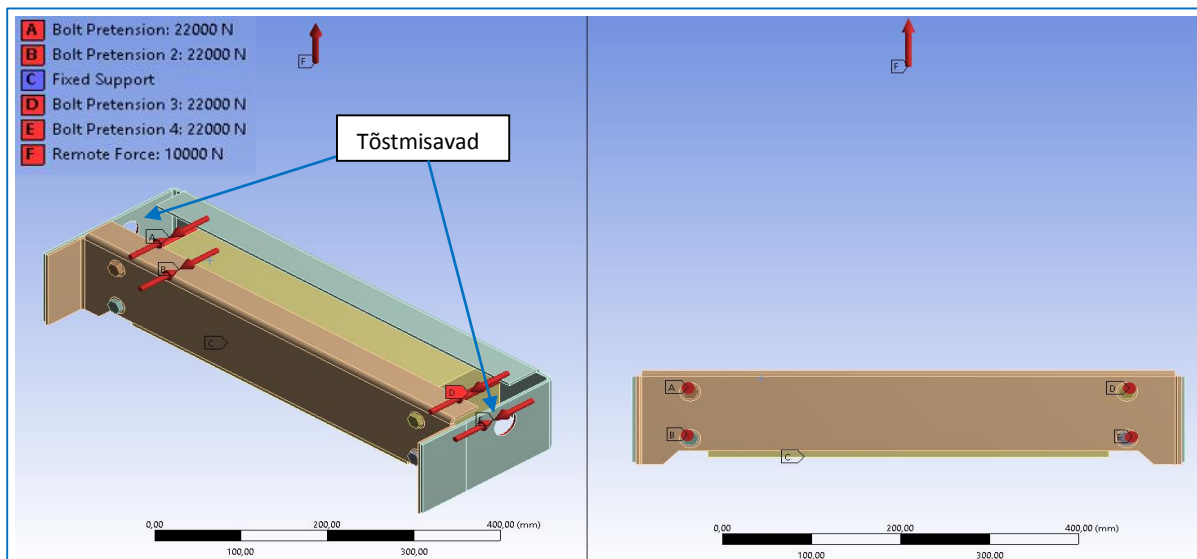
Sideraua 2 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=16,8$  Nm, millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 12 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 1,02 mm.



Sele 3.12. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.3. Sideraua 3 simulatsioon

Sideraudade 3 simulatsiooni püsivad rajatingimused esimesele katsete osale on sarnaselt eelmistele simulatsioonidele ning esimese katse rajatingimused on näidatud selal 3.13. Nende sideraudadega on tootmises juhtunud varasemalt õnnetusi, kus induktor on libisenud sideraudade vahelt. Simulatsioonidega võib sobiva tulemuse leidmine seetõttu olla keerulisem. Kasutatakse nelja M10 poltliidet. Samuti on eripäraks kinnituskohdade asukoht. Ühel sideraual on kaks kinnitusauku, kuhu saab kinnitada kett-tropi konksud.



Sele 3.13. Sideraua 3 mudeli rajatingimused

Katseid alustati kõige suurema lubatud poldi eelpingutusjõu rakendamisega, milleks oli polt M10 puhul 22 kN. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.9.

Tabel 3.9. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=10000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	22	64,6	1322	2,27
2	16,5	46,1	959,3	1,78
3	11	30,7	727,6	1,47
4	5,5	15,4	530,7	1,1
5	3	8,4	361,6	0,6
6	1,5	4,2	-	-

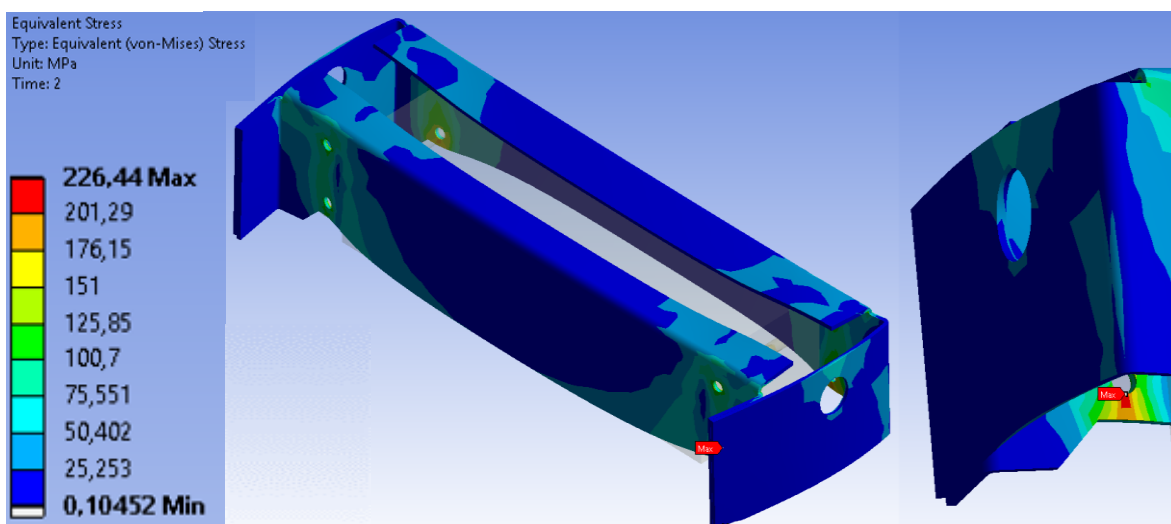
Esimese osa tulemuste hulgas polnud sobivat, sest kõik kinnitusemomendid tekitasid siderauas pinged, mis ületasid materjali tugevusnäitajaid. Samas oli sideraudade ja südamikuga vahel

haarduvus tagatud. 1,5 kN suuruse kinnitusjõuga tekkis juba libisemine. Seetõttu sai muudetud ülemiste poltide eelpingutusjõudu suuremaks, kuna oli näha, et alumiste poltide kohtades tekkisid kõige suuremad pinged. Sellest lähtudes sai ülemiste poltide eelpingutusjõuks 3 kN ja alumiste poltide jaoks 1,5 kN seadistatud. Katsete tulemused on tabelis 3.10.

Tabel 3.10. Uute katsete tulemused

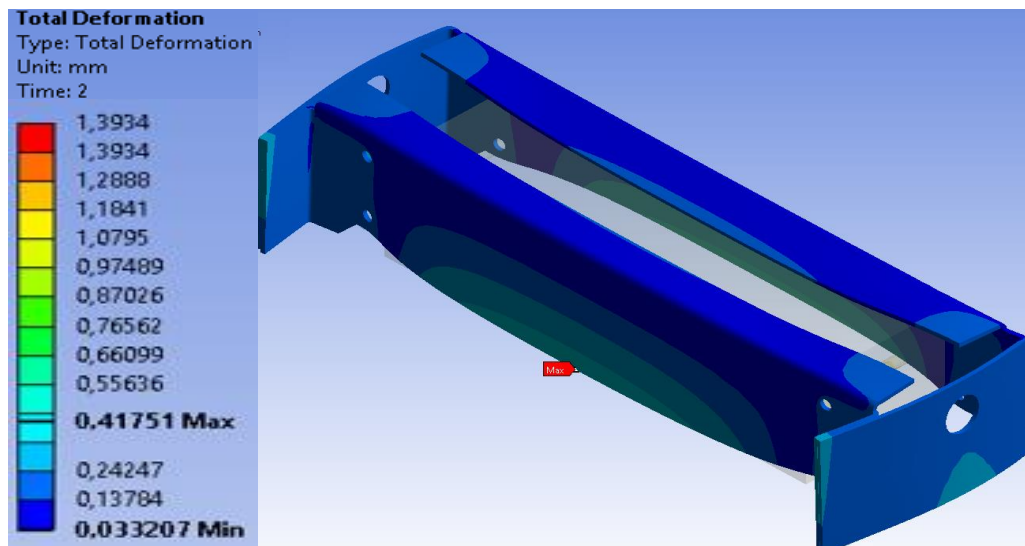
Nr	Eelpingutusjõud ülemistel poltidel $F_{ep1}$ , kN	Eelpingutusjõud alumistel poltidel $F_{ep2}$ , kN	Tõmbejõud, $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	3	1,5	10	226,5	0,42
2	3	1,5	12	257,4	0,64
3	3	1,5	14	-	-

Selline lähenemine oli edukas ning eelnevalt kirjeldatud seadistusega leiti sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:  $\sigma_v=226,5 \text{ MPa} < R_e=235 \text{ MPa}$ . Sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.14 on pingete jaotus rahuldav. Siiski on näha, et suurimad pinged tekivad ikkagi alumiste poltide kohtadesse. Suurim summaarne deformatsioon on 0,42 mm (sele 3.15). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.16).



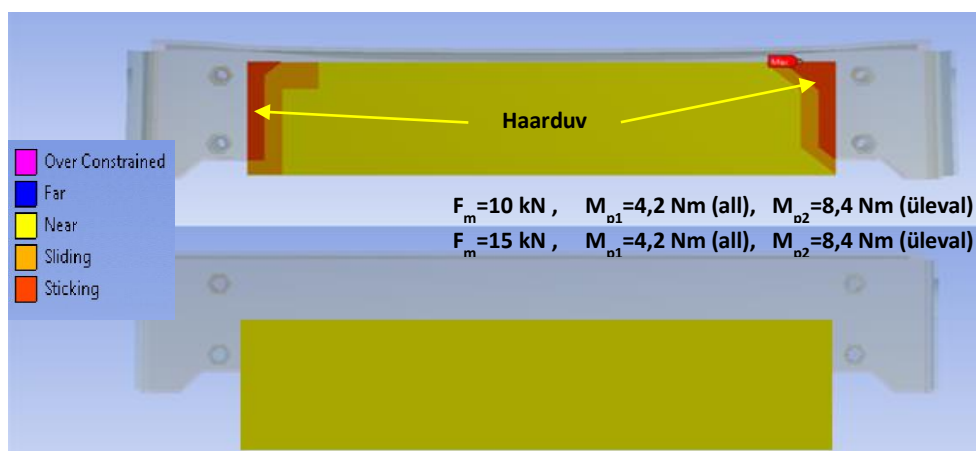
Sele 3.14. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=3 \text{ kN}$  (üleval),  $F_{ep}=1,5 \text{ kN}$  (all) ,  $F_m=10 \text{ kN}$





Sele 3.15. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=3$  kN (üleval),  $F_{ep}=1,5$  kN (all),  $F_m=10$  kN

Selet 3.16 näeb, kuidas toimus tõmbejõu  $F_m=10$  kN juures on tagatud B-paki kinni hoidmine kontakti seisukorra funktsiooni (contact status) kasutades. Tõmbejõu 15 kN juures haardumus puudub ning siderauad eemalduvad südamikust.

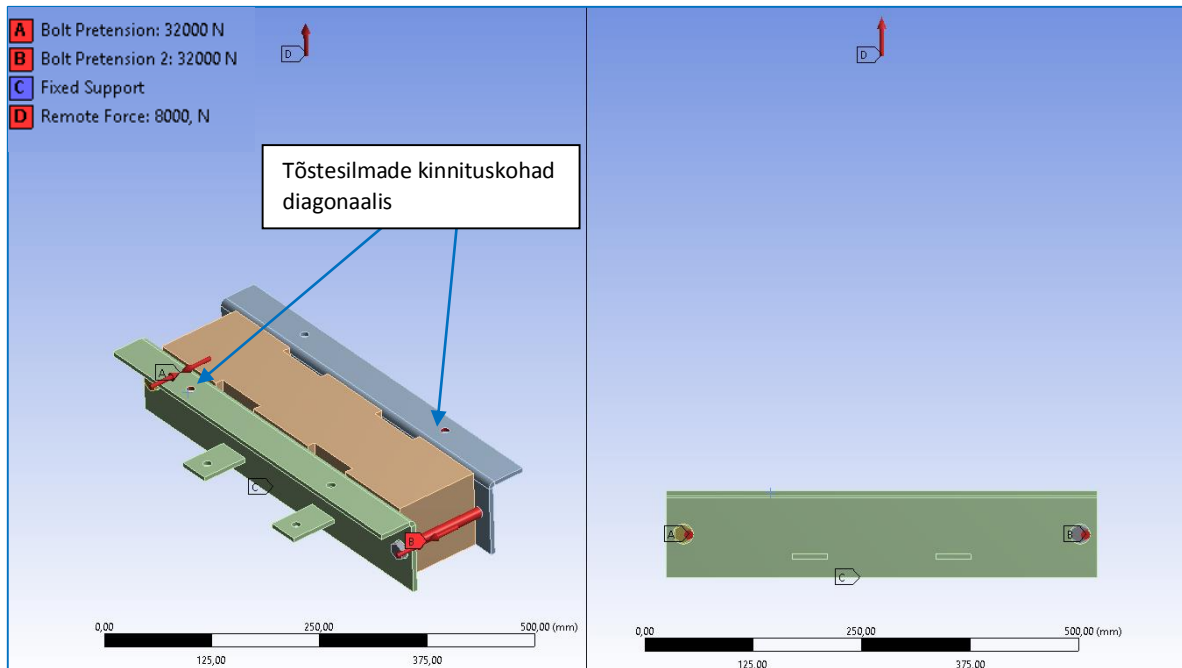


Sele 3.16. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine



### 3.5.4. Sideraua 4 simulatsioon

Sideraudade 4 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=8000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Rajatingimused on näidatud seel 3.17 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega.



Sele 3.17. Sideraua 4 mudeli rajatingimused

Esimese katse eelpingutusjõud on polt M12 puhul 32 kN. Katsete tulemused on näidatud tabelis 3.11. Analüüsis esimest katset 32 kN suuruse eelpingutusjõu juures on maksimaalne ekvivalent pinget  $\sigma_v=709,1$  MPa, millega toimub terase purunemine. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

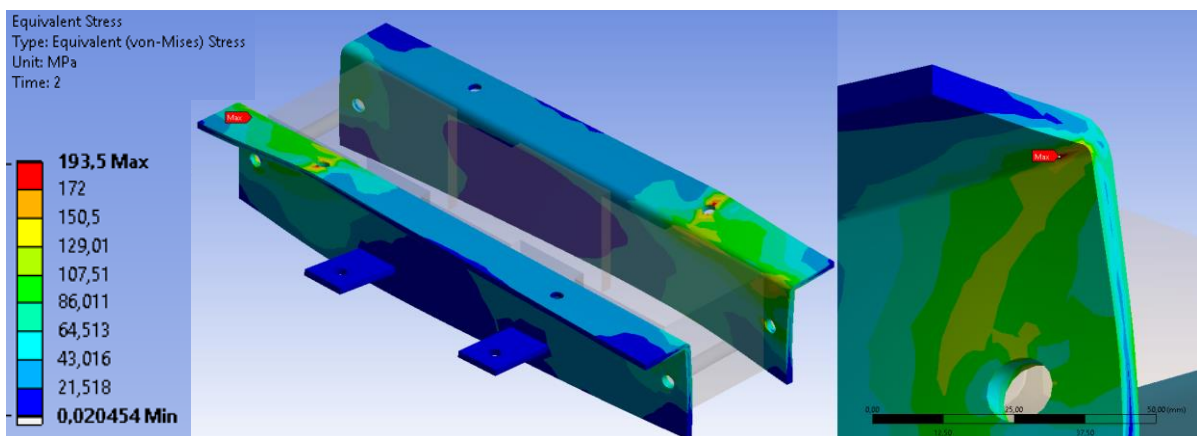
Tabel 3.11. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=6000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	32	112	709,1	1,52
2	24	80	523	1,23
3	16	53	353,8	1
4	8	26	214,1	0,79
<u>5</u>	<u>6</u>	<u>20</u>	<u>193,5</u>	<u>0,75</u>
6	4	13	-	-

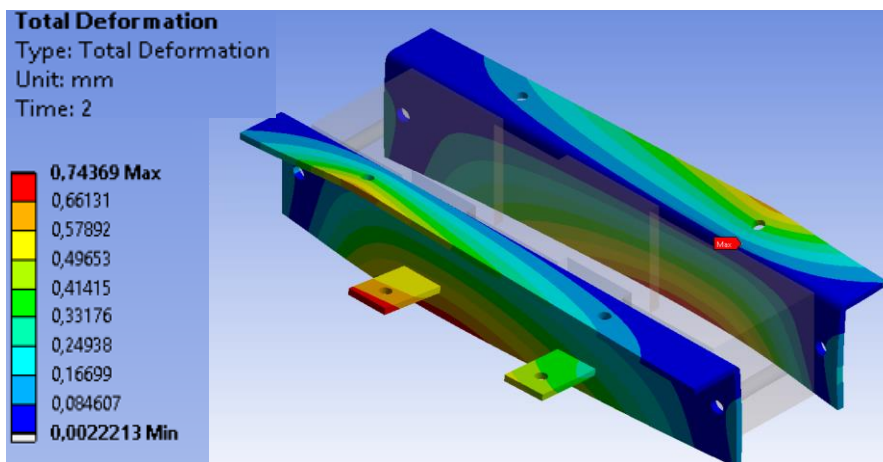
Poldi eelpingutusjõu 6 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 193,5 \text{ MPa} < R_e = 235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.18 on pingete jaotus rahuldav. Lisaks sellele on tähtis, et koormuse hoidmiseks oleks rakendatud võimalikult suur poldi pingutusmoment, mis tagab suurema ohutuse, kui väiksema momendiga kinnitus. Suurim summaarne deformatsioon on 0,65 mm (sele 3.19). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.20).



Sele 3.18. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=6 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$



Sele 3.19. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=6 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$

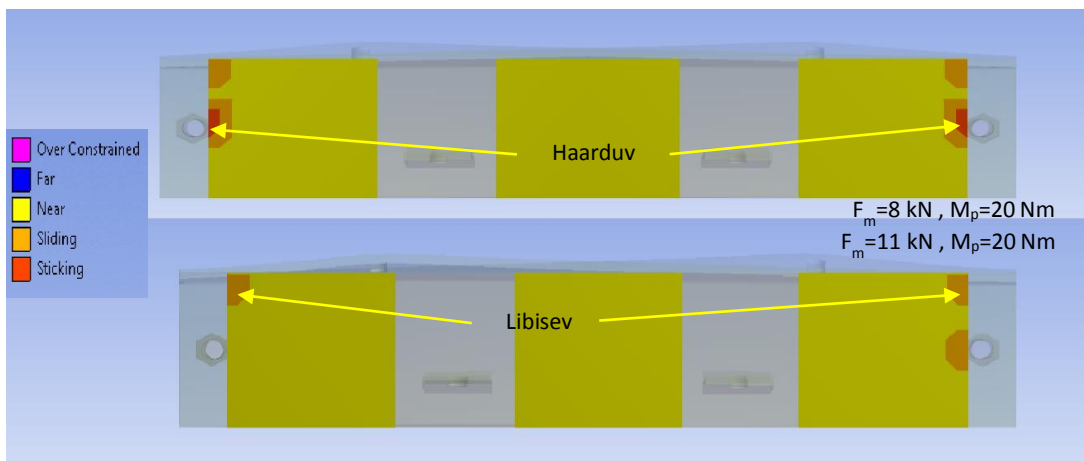
Teise katseosa tulemused on toodud tabelis 3.12. Tulemustest on näha, et sideraudade ja südramiku vaheline haarduvus on tagatud kuni tõmbejõu 10 kN juures. Siiski pole selle juures sideraua tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v = 238,7 \text{ MPa} > R_e = 235 \text{ MPa}$ .

Tabel 3.12. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=6000\text{ N}$

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	6	8	193,5	0,75
2	6	9	216,1	0,82
3	6	10	238,7	0,9
4	6	11	-	-

Sideraua 4 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=20\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 9 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 0,82 mm.

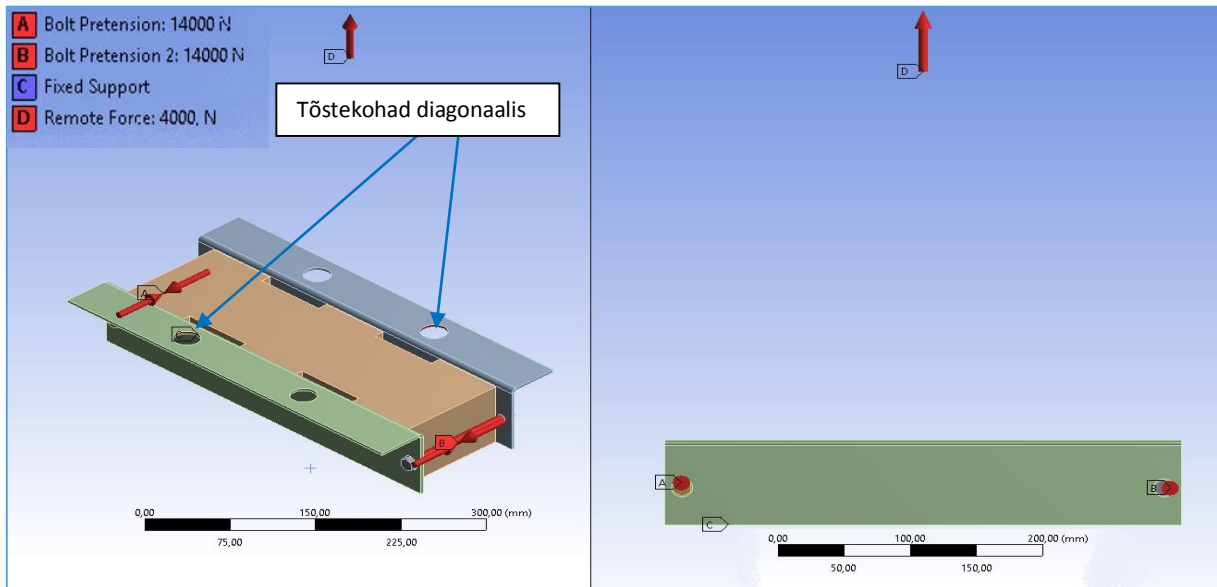
Illustreerivalt on näidatud, kuidas toimus tõmbejõu  $F_m=11\text{ kN}$  juures libisemine kontakti seisukorra funktsiooni kasutades (sele 3.20).



Sele 3.20. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.5. Sideraua 5 simulatsioon

Sideraudade 5 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=4000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Need rajatingimused on näidatud ka selel 3.21 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega.



Sele 3.21. Sideraua 5 mudeli rajatingimused

Esimese katse eelpingutusjõud on polt M8 puhul 14 kN. Katsete tulemused on näidatud tabelis 3.13. Analüüsis esimest katset 14 kN suuruse eelpingutusjõu juures on maksimaalne ekvivalent pinget  $\sigma_v=843,9$  MPa, millega toimub terase purunemine. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis otsitakse sobivat eelpingutusjõudu järgmiste katsete tulemuste hulgast.

Tabel 3.13. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=4000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	14	32,5	843,9	3,68
2	10	22,3	618,3	3,17
3	5,5	12,3	394	2,61
4	2,7	6	279,3	2,31
5	1,8	4	-	-
6	1	2,2	-	-

Tabelist 3.13 tulemustest on näha, et sobivat tulemust kahte kinnitamispunkti kasutades ei ole. Seetõttu muudetakse rajatingimusi nii, et rakendatud oleks kõik neli tõstmiskohta sideraual ehk kasutatakse nelja kett-tropi konksu. Teiste katsete tulemused on tabelis 3.14.

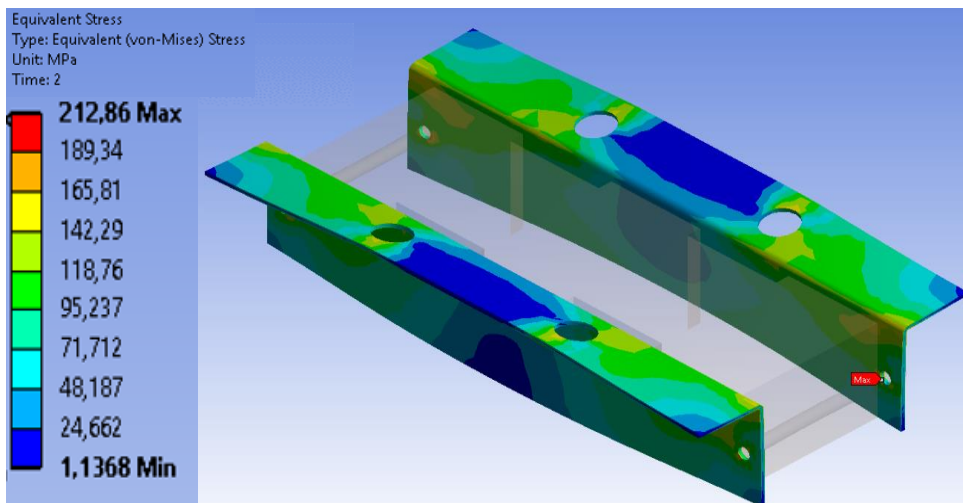
Tabel 3.14. Esimese katseosa uued tulemused,  $F_m=4000$  N, nelja tõstekohta kasutades

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	2,7	6	294,9	2,15
2	<u>1,8</u>	<u>4</u>	<u>212,9</u>	<u>2,11</u>
3	1	2,2	-	-

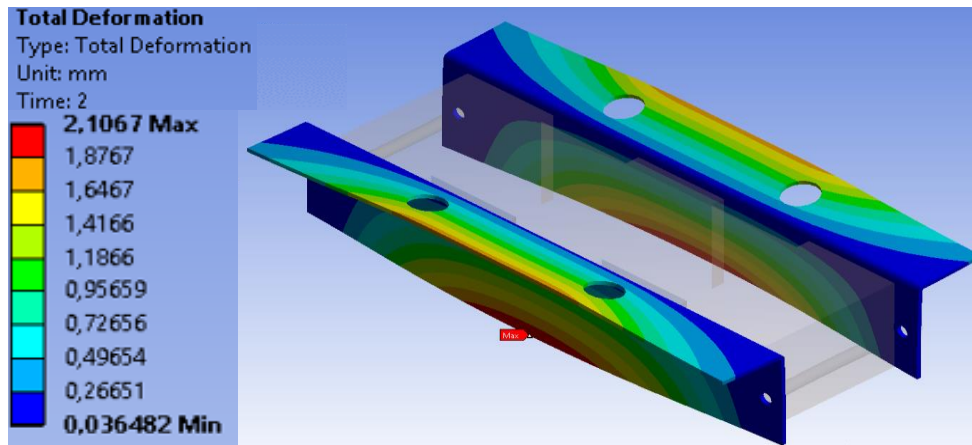
Poldi eelpingutusjõu 1,8 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 212,9 \text{ MPa} < R_e = 235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraaua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.22 on pingete jaotus rahuldav. Suurim summaarne deformatsioon on 2,11 mm (sele 3.23). Deformatsioon on suurem võrreldes teiste sideraaua mudelitega. Kujumuutus pole püsiv ning tõstmise järgselt taastub mingil määral. See on suuresti tingitud sideraaua 3 mm paksusest, mis on niivõrd suure koormuse jaoks piiripealne. Südramiku ja sideraude kontakt-pindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.24).



Sele 3.22. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=1,8$  kN,  $F_m=4$  kN



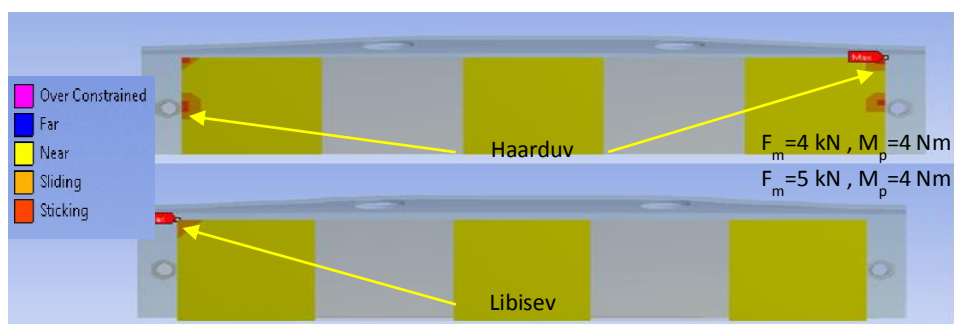
Sele 3.23. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=1,8$  kN,  $F_m=4$  kN

Teise katsete osa tulemused on toodud tabelis 3.15. Tulemustest on näha, et koormust  $F_m$  sideraudadele ei saa tõsta, kuna tõmbejõu 5 kN juures tekib sideraudade ja südamikü vahel libisemine.

Tabel 3.15. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=1800$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinge $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
<u>1</u>	<u>1,8</u>	<u>4</u>	<u>212,9</u>	<u>2,11</u>
2	1,8	5	-	-

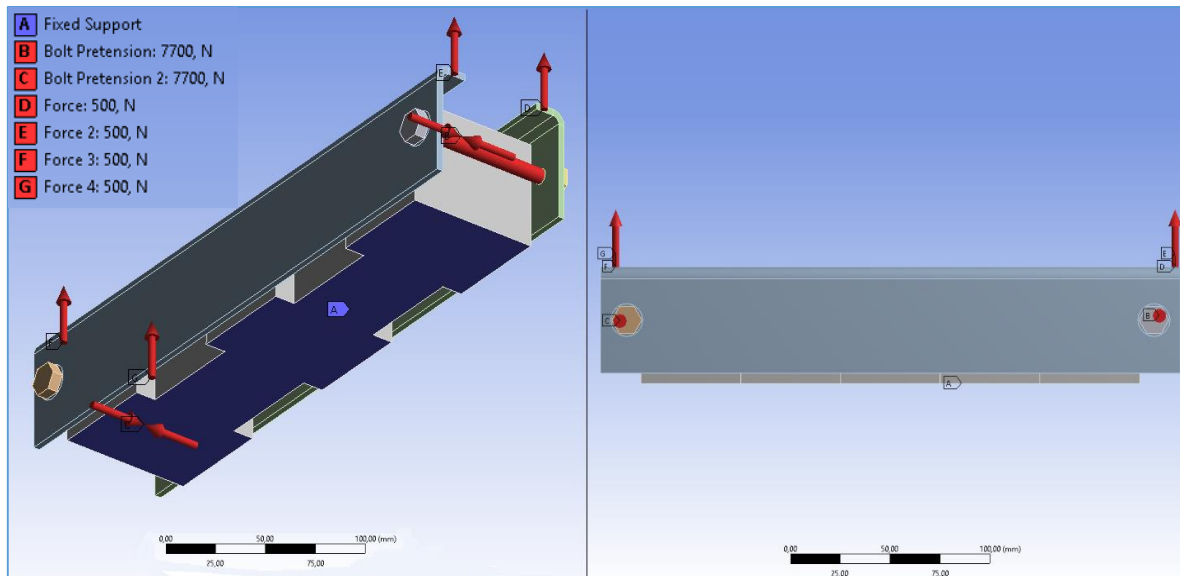
Sideraaua 5 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=4$  Nm, millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 4 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 2,11 mm. Tõmbejõu  $F_m=5$  kN juures toimub libisemine (sele 3.24).



Sele 3.24. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.6. Sideraua 6 simulatsioon

Sideraudade 6 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna koormused, mis mõjuvad sideraudade servadesse (sele 3.25). Iga jõu väärtus on tõmbejõu väärtusest  $F_m=2000$  N üks neljandik osa ehk 500 N. Rajatingimused on näidatud selel 3.25 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega. Induktorit tõstetakse käsitsi erinevalt teistest katsemudelitest.



Sele 3.25. Sideraua 6 mudeli rajatingimused

Katseid alustati kõige suurema lubatud poldi eelpingutusjõu rakendamisega, milleks oli pold M6 puhul 7,7 kN. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.16. Sobiva tulemuse ekvivalent pinge väärtus peab olema väiksem kui sideraua materjali voolepiir, s.t  $\sigma_v < R_e=140$  MPa. Materjali purunemiskiir  $R_m=270$  MPa.

Tabel 3.16. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=2000$  N

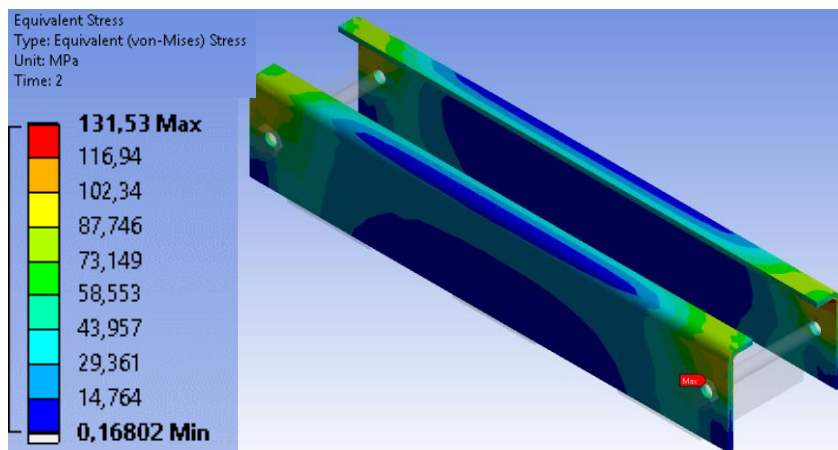
Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinge $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	7,7	13,3	350,3	1,48
2	5	8,3	316	0,89
3	3,5	5,8	236	0,6
4	2,5	4,2	184,2	0,44
5	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>131,6</u>	<u>0,26</u>
6	0,5	0,8	-	-



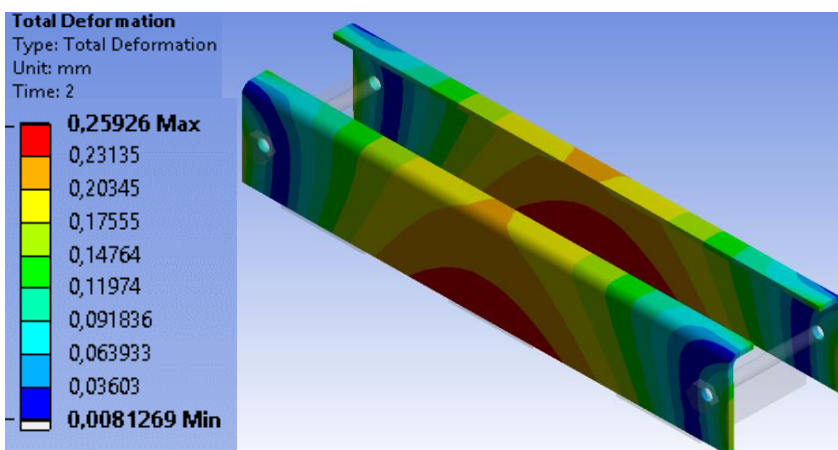
Esimese katse 7,7 kN suuruse eelpingutusjõu juures toimub sideraua materjali purunemine:  $\sigma_v=350,3 \text{ MPa} > R_m=270 \text{ MPa}$ . Ohtlikuks kohaks osutub sideraua painde sisenuurk poltliite juures. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

Poldi eelpingutusjõu 1,5 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:  $\sigma_v=131,6 \text{ MPa} < R_e=140 \text{ MPa}$ .

Sellest järeldub, et sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.26 on pingete jaotus rahuldav. Suurim summaarne deformatsioon on 0,26 mm (sele 3.27). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.28).



Sele 3.26. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=1,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=2 \text{ kN}$



Sele 3.27. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=1,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=2 \text{ kN}$



Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu 7,7 kN juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südamikü kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.17.

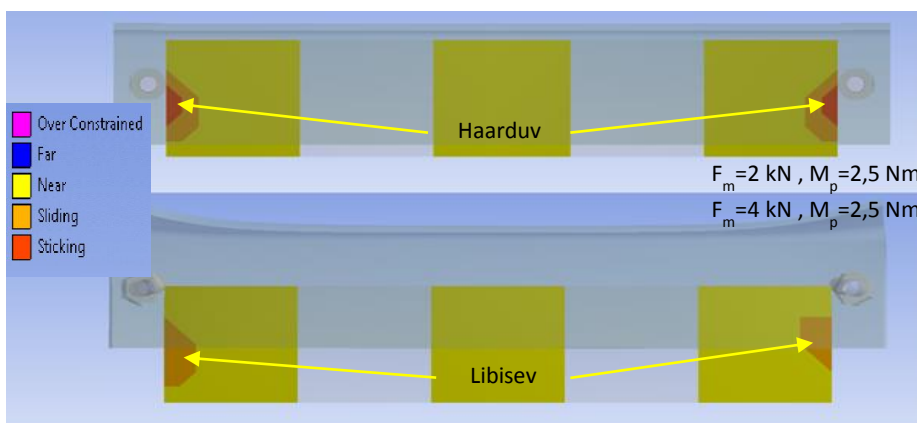
Tabel 3.17. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=1500\text{ N}$

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	1,5	2	131,6	0,26
2	1,5	3	198,9	0,27
3	1,5	4	258,1	0,29
4	1,5	5	-	-

Tabeli 3.17 tulemustest järeldub, et viimane tulemus, millega on sideraudade ja südamikü vaheline haardumus tagatud on  $F_m=4\text{ kN}$ . Siiski pole selle juures sideraia tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v=258,1\text{ MPa} > R_e=140\text{ MPa}$ .

Sideraia 6 simulatsioonidest selgub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=2,5\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 2 kN tõmbejõu juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 0,26 mm, mis on hea tulemus.

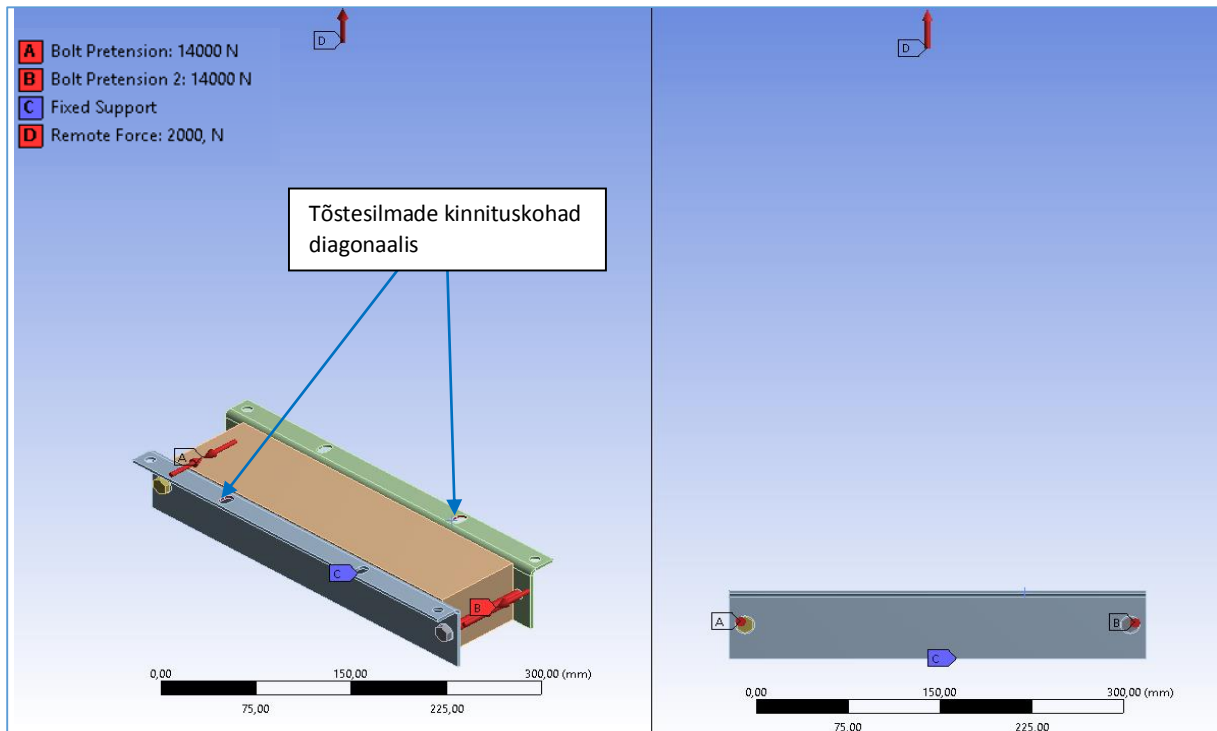
Selel 3.28 on näidatud, kuidas toimus tõmbejõu 4 kN juures libisemine. Lisaks on näha 2 kN koormuse juures haardumine. Mõlemal juhul on poldi kinnitusemoment 2,5 Nm.



Sele 3.28. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.7. Sideraua 7 simulatsioon

Sideraudade 7 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=2000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Need rajatingimused on näidatud seel 3.29 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega.



Sele 3.29. Sideraua 7 mudeli rajatingimused

Esimese katse eelpingutusjõud on polt M8 puhul 14 kN. Katsete tulemused on näidatud tabelis 3.18. Analüüsis esimest katset 14 kN suuruse eelpingutusjõu juures on suurim ekvivalent pinget  $\sigma_v=821,7$  MPa, millega toimub terase purunemine.

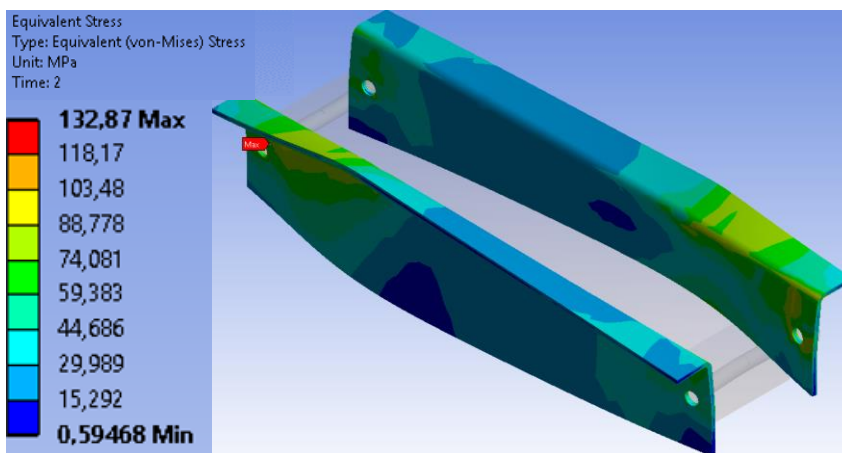
Tabel 3.18. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=2000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	14	32,5	821,7	1,97
2	10	22,3	596,6	1,54
3	5,5	12,3	337,4	0,86
4	2,7	6	180,6	0,64
<u>5</u>	<u>1,8</u>	<u>4</u>	<u>132,9</u>	<u>0,58</u>
6	1	2,2	130,8	0,42

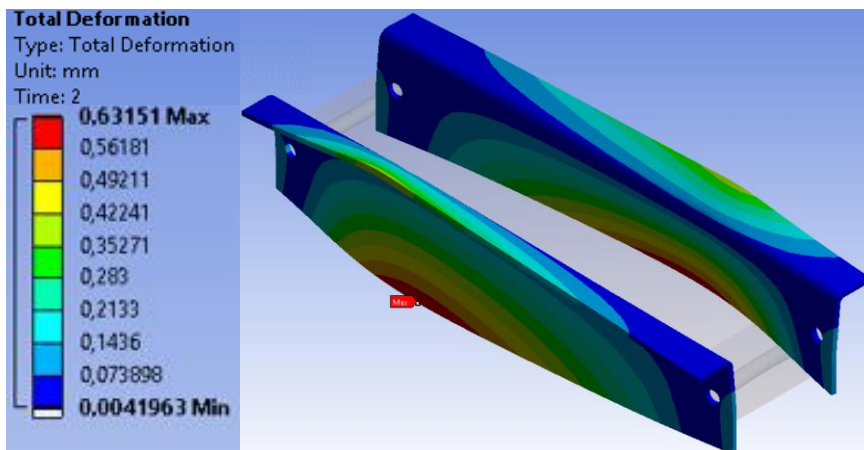
Poldi eelpingutusjõu 1,8 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille suurim ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 132,9 \text{ MPa} < R_e = 140 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.30 on pingete jaotus rahuldav. Lisaks sellele on tähtis, et koormuse hoidmiseks oleks rakendatud võimalikult suur poldi pingutusmoment, mis tagab suurema ohutuse, kui väiksema momendiga kinnitus. Suurim summaarne deformatsioon on 0,58 mm (sele 3.31). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.32).



Sele 3.30. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=1,8 \text{ kN}$ ,  $F_m=2 \text{ kN}$



Sele 3.31. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=1,8 \text{ kN}$ ,  $F_m=2 \text{ kN}$

Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südamiku kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.19.

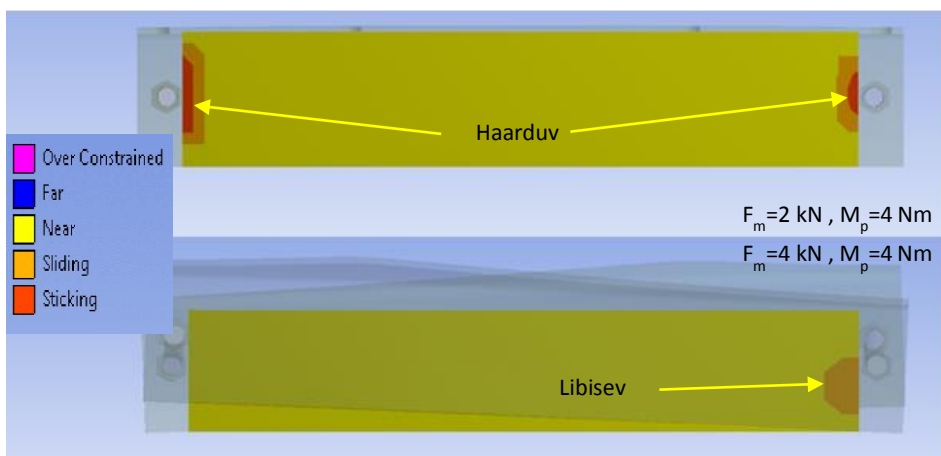
Tabel 3.19. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=1800\text{ N}$

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinge $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	1,8	2	132,9	0,58
2	1,8	3	170,4	0,78
3	1,8	4	182,6	0,93
4	1,8	5	-	-

Tabeli 3.19 tulemustest on näha, et viimane tulemus, millega on sideraudade ja südamikü vaheline haardumus tagatud on  $F_m=4\text{ kN}$ . Siiski pole selle juures sideraua tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v=182,6\text{ MPa} > R_c=140\text{ MPa}$

Sideraua 7 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=4\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 2 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 0,58 mm.

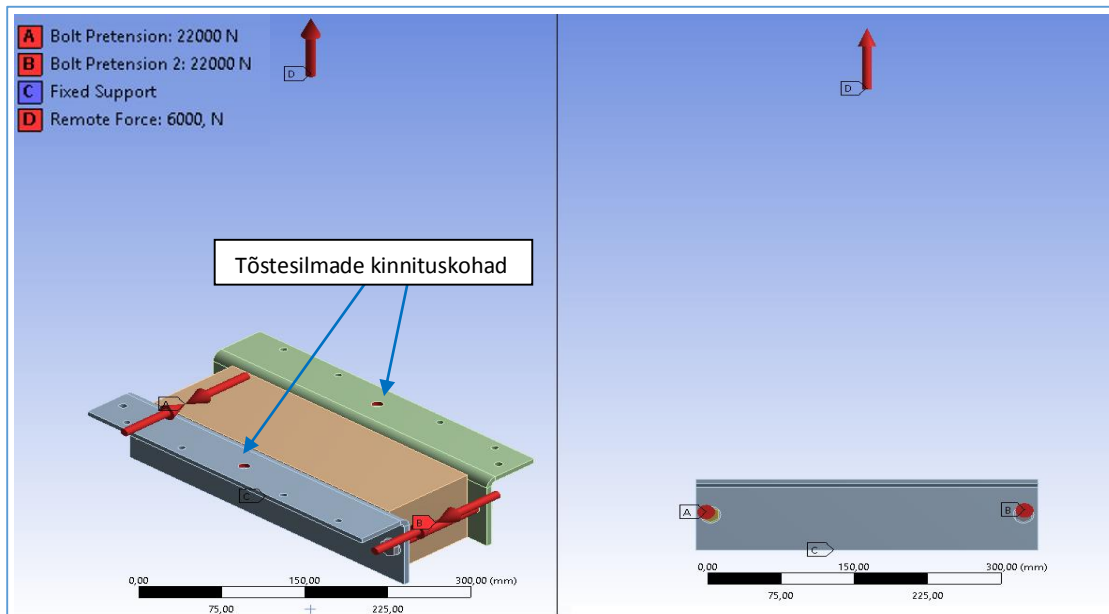
Illustreerivalt on näidatud, kuidas toimus tõmbejõu  $F_m=4\text{ kN}$  juures libisemine kontakti seisukorra funktsiooni (contact status) kasutades. Sele 3.32 näitab võrdlust tõmbejõudude 2 kN ja 4 kN vahel, kui poldi kinnitussmoment on 4 Nm.



Sele 3.32. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.8. Sideraua 8 simulatsioon

Sideraudade 8 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=6000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Need rajatingimused on näidatud seel 3.33 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega.



Sele 3.33. Sideraua 8 mudeli rajatingimused

Esimene katse viidi läbi polt M10 puhul 22 kN eelpingestusjõuga. Kõikide induktorite sideraudade esialgne tõstmine toimub kahe kinnituspunkti kaudu seel 3.33 näidatud kohtadest. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.20.

Analüüsisides esimest katset 22 kN suuruse eelpingutusjõu juures on maksimaalne ekvivalent pinged  $\sigma_v=526,1$  MPa  $>$   $R_m=510$  MPa. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

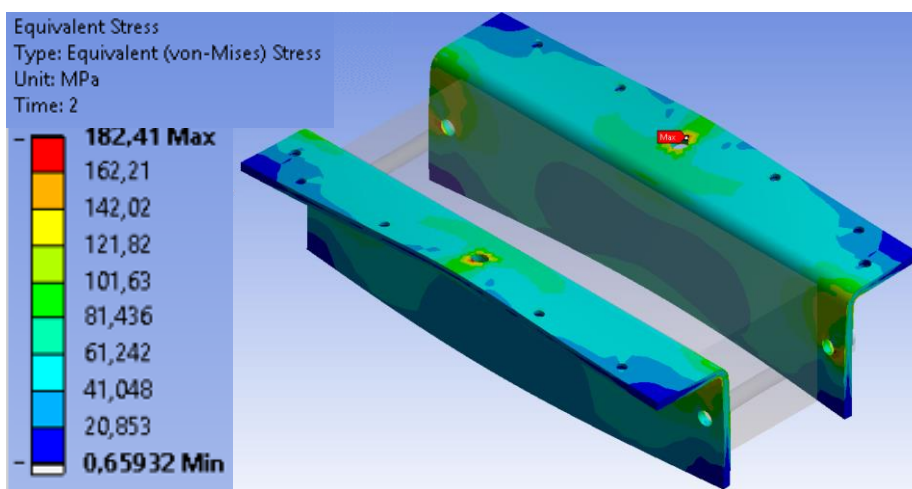
Tabel 3.20. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=6000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinged $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	22	64,6	526,1	1,08
2	16,5	46,1	382,1	0,91
3	11	30,7	269,6	0,75
4	5,5	15,4	182,5	0,67
5	3	8,4	-	-
6	1,5	4,2	-	-

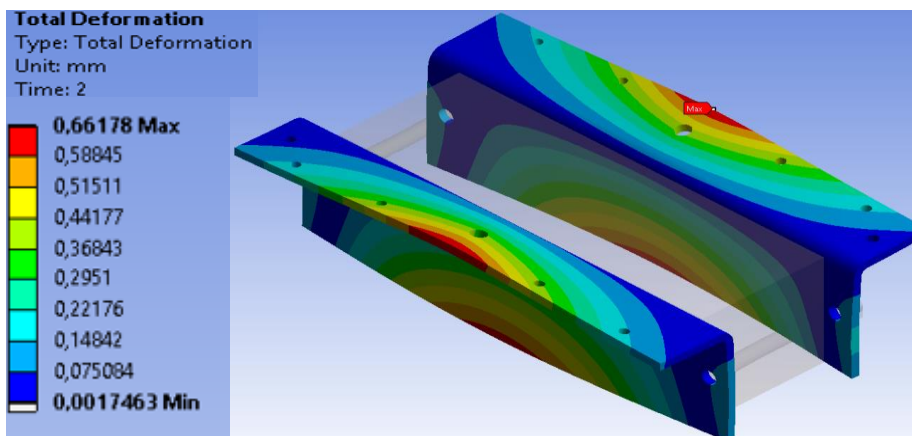
Poldi eelpingutusjõu 5,5 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 182,5 \text{ MPa} < R_e = 235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraaua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.34 on pingete jaotus rahuldav. Suurimad pinged tekivad tõstekohtade ja poldiavade servadesse, mille tõttu võib analüüsimisel neid arvestamata jätta. Lisaks sellele on tähtis, et koormuse hoidmiseks oleks rakendatud võimalikult suur poldi pingutusmoment, mis tagab suurema ohutuse, kui väiksema momendiga kinnitus. Suurim summaarne deformatsioon on 0,67 mm (sele 3.35). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.36).



Sele 3.34. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$



Sele 3.35. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$

Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südamiku

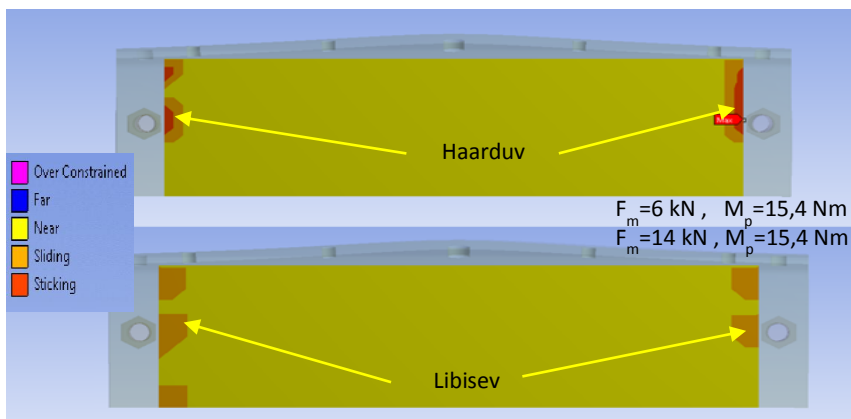
kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.21.

Tabel 3.21. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=5500\text{ N}$

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
<u>1</u>	<u>5,5</u>	<u>6</u>	<u>182,5</u>	<u>0,67</u>
<u>2</u>	<u>5,5</u>	<u>7</u>	<u>210,8</u>	<u>0,76</u>
3	5,5	8	239,3	0,87
4	5,5	10	296,2	1,07
5	5,5	12	353,1	1,27
6	5,5	14	370,5	1,46
7	5,5	16	-	-

Tabeli 3.21 tulemustest on näha, et viimane tulemus, millega on sideraudade ja südamikü vaheline haarduvus tagatud on  $F_m=14\text{ kN}$ . Siiski pole selle juures sideraaua tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v=370,5\text{ MPa} > R_e=235\text{ MPa}$ .

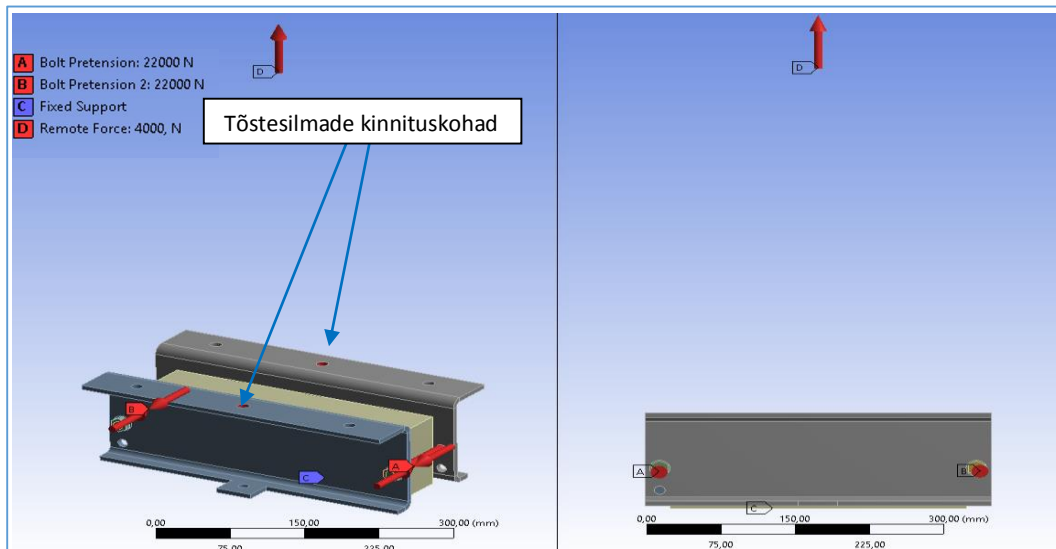
Sideraaua 8 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=15,4\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 7 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 0,76 mm. Tõmbejõu  $F_m=14\text{ kN}$  juures toimub libisemine (sele 3.36).



Sele 3.36. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.9. Sideraua 9 simulatsioon

Sideraudade 9 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=4000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Need rajatingimused on näidatud ka seel 3.37 koos katse 1 poldi eelpingutusjõu väärtusega.



Sele 3.37. Sideraua 9 mudeli rajatingimused

Esimene katse viidi läbi polt M10 puhul 22 kN eelpingestusjõuga. Kõikide induktorite sideraudade esialgne tõstmine toimub kahe kinnituspunkti kaudu seel 3.37 näidatud kohtadest. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.22.

Esimese katse tulemusena on maksimaalne ekvivalent pinget  $\sigma_v=500,1$  MPa  $>$   $R_e=235$  MPa. Toimub plastne deformatsioon. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

Tabel 3.22. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=4000$  N

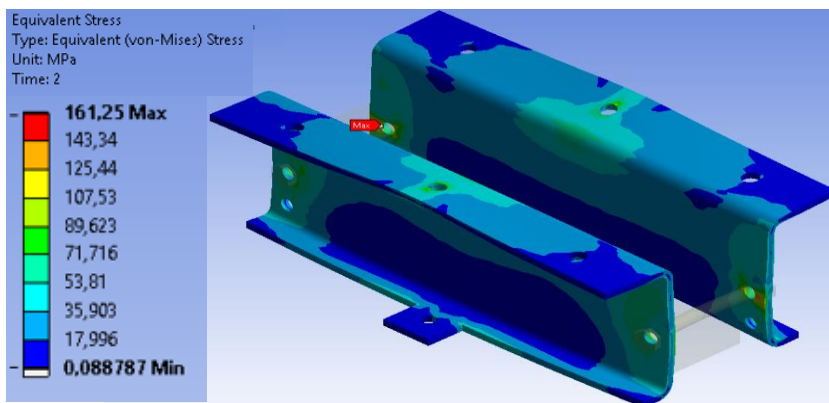
Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	22	64,6	500,1	0,38
2	16,5	46,1	381,1	0,37
3	11	30,7	262,6	0,37
4	<u>5,5</u>	<u>15,4</u>	<u>161,3</u>	<u>0,34</u>
5	3	8,4	122,4	0,34
6	1,5	4,2	103,5	0,34



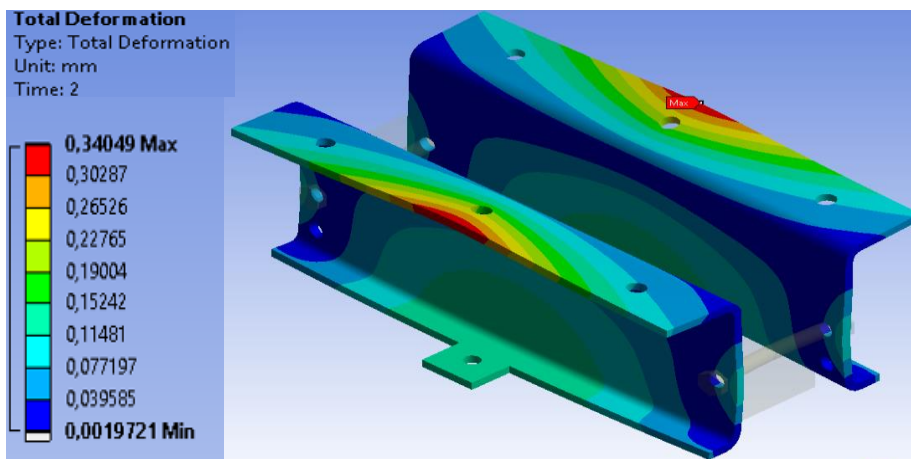
Poldi eelpingutusjõu 5,5 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 161,3 \text{ MPa} < R_e = 235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraua tugevus on tagatud. Samuti vaadates üldpilti selelt 3.38 on pingete jaotus rahuldav: keskmiselt jäävad pinged oluliselt materjali voolepiirist alla poole, mis on hea. Suurimad pinged tekivad poldiavade servadesse, mis võivad olla tekitatud pingete kontsentreerumisest. Suurim summaarne deformatsioon on 0,34 mm (sele 3.39). Südamiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.40).



Sele 3.38. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=4 \text{ kN}$



Sele 3.39. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=4 \text{ kN}$

Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südamiku kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.23.

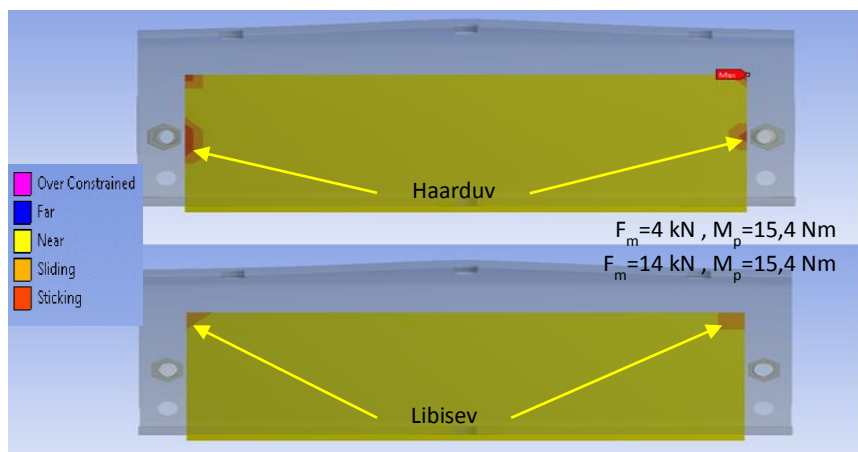
Tabel 3.23. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=5500\text{ N}$

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinge $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
<u>1</u>	<u>5,5</u>	<u>4</u>	<u>161,3</u>	<u>0,34</u>
<u>2</u>	<u>5,5</u>	<u>6</u>	<u>182,6</u>	<u>0,49</u>
<u>3</u>	<u>5,5</u>	<u>8</u>	<u>205,8</u>	<u>0,67</u>
4	5,5	10	258	0,83
5	5,5	12	310,1	1
6	5,5	14	-	-

Viimane tulemus, millega sideraudade ja südamikü vaheline haarduvus tagatud on tõmbejõud  $F_m=12\text{ kN}$ . Selle jõu juures pole sideraau tugevus tagatud:  
 $\sigma_v=310,1\text{ MPa} > R_e=235\text{ MPa}$ .

Sideraau 9 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=15,4\text{ Nm}$ , millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 8 kN koormuse juures. Maksimaalne summaarne deformatsioon on sel juhul 0,67 mm.

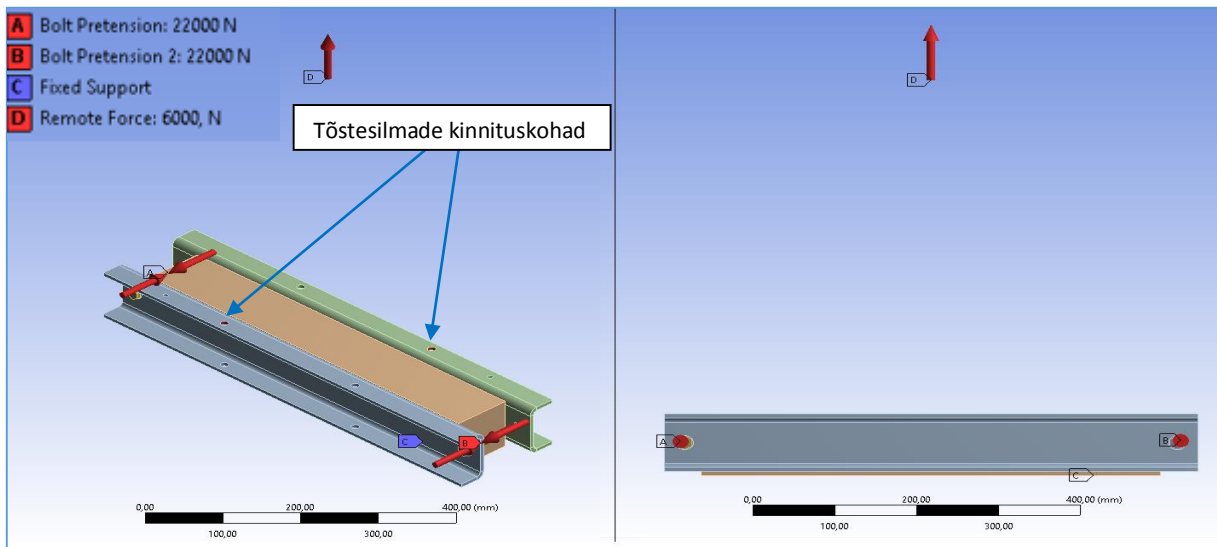
Selel 3.40 on näidatud, kuidas toimus tõmbejõu 14 kN juures libisemine. Lisaks on näha 4 kN koormuse juures haardumine. Mõlemal juhul on poldi kinnitismoment 15,4 Nm.



Sele 3.40. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.5.10. Sideraua 10 simulatsioon

Sideraudade 10 simulatsiooni rajatingimustes on esimeses katsete osas kõikide katsete puhul muutumatuna tõmbejõud  $F_m=6000$  N, tõmbejõu rakenduskohad ning püsiv kinnitus B-paki põhjal. Rajatingimused on näidatud seel 3.41 koos katse 1 poltide eelpingutusjõudude väärtustega.



Sele 3.41. Sideraua 10 mudeli rajatingimused

Esimene katse viidi läbi polt M10 puhul 22 kN eelpingestusjõuga. Kõikide induktorite sideraudade esialgne tõstmise toimub kahe kinnituspunkti kaudu seel 3.41 näidatud kohtadest. Sobiva eelpingutusjõu leidmiseks tehtud katsete tulemused on näidatud tabelis 3.24.

Esimese katse maksimaalne ekvivalent pinget  $\sigma_v=531,4$  MPa  $>$   $R_m=510$  MPa. Selle tagajärjel toimub materjali purunemine. Kuna pinged on oluliselt suuremad, kui sideraua materjali tugevusnäitajad, siis tuleb sobivat eelpingutusjõudu otsida järgmiste katsete tulemuste hulgast.

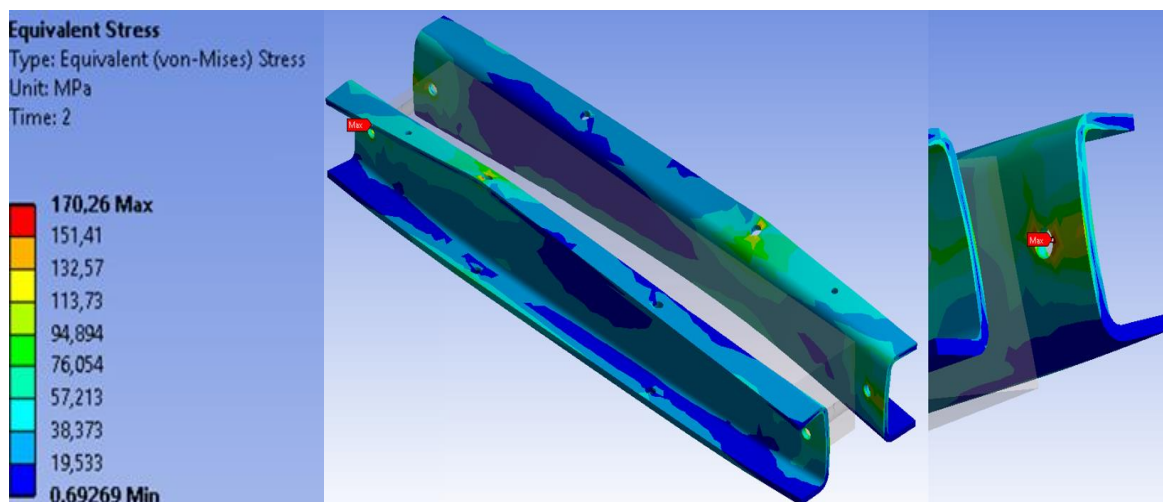
Tabel 3.24. Esimese katseosa tulemused,  $F_m=6000$  N

Katse Nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Suurim ekvivalent pinget $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	22	64,6	531,4	0,76
2	16,5	46,1	424,9	0,73
3	11	30,7	305,6	0,63
4	5,5	15,4	170,3	0,51
5	3	8,4	149,6	0,46
6	1,5	4,2	-	-

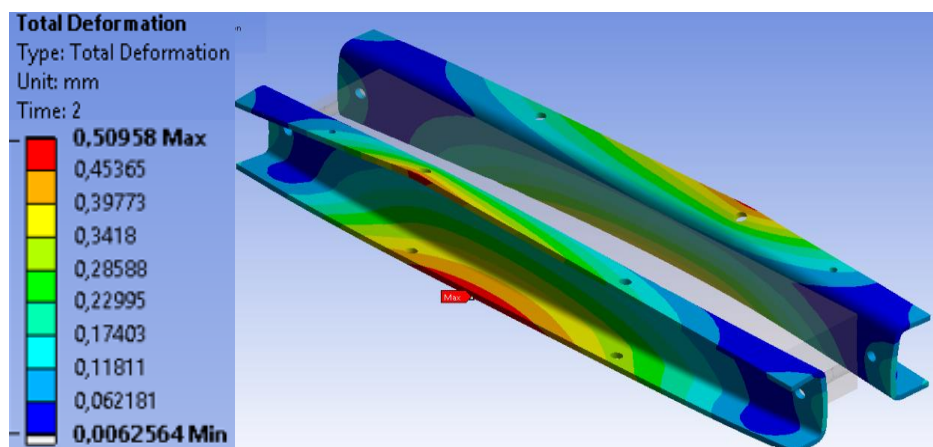
Poldi eelpingutusjõu 5,5 kN juures on leitud sobiv tulemus, mille ekvivalent pinget:

$$\sigma_v = 170,3 \text{ MPa} < R_e = 235 \text{ MPa}$$

Sellest järeldub, et sideraaua tugevus on tagatud. Selekt 3.42 näeb, et pingete jaotus on rahuldav: keskmiselt jäävad pinged oluliselt materjali voolepiirist alla poole, mis on hea. Suurimad pinged tekivad poldiavade servadesse, mis võivad olla tekitatud pingete kontsentreerumisest. Suurim summaarne deformatsioon on 0,51 mm (sele 3.43). Südramiku ja sideraudade kontaktpindade vahel on haarduvus ja libisemist ei esine (sele 3.44).



Sele 3.42. Ekvivalent pinget,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$



Sele 3.43. Summaarne deformatsioon,  $F_{ep}=5,5 \text{ kN}$ ,  $F_m=6 \text{ kN}$

Teises katsete osas uuritakse, kui suurt tõmbejõudu võib sideraudadele rakendada eelnevalt leitud sobiva poldi eelpingutusjõu 5,5 kN juures, et ei tekiks libisemist sideraudade ja südramiku kontakti vahel. Sealhulgas on oluline jälgida, et sideraudade materjali tugevusnäitajaid ei ületataks. Katsete tulemused on toodud tabelis 3.25.

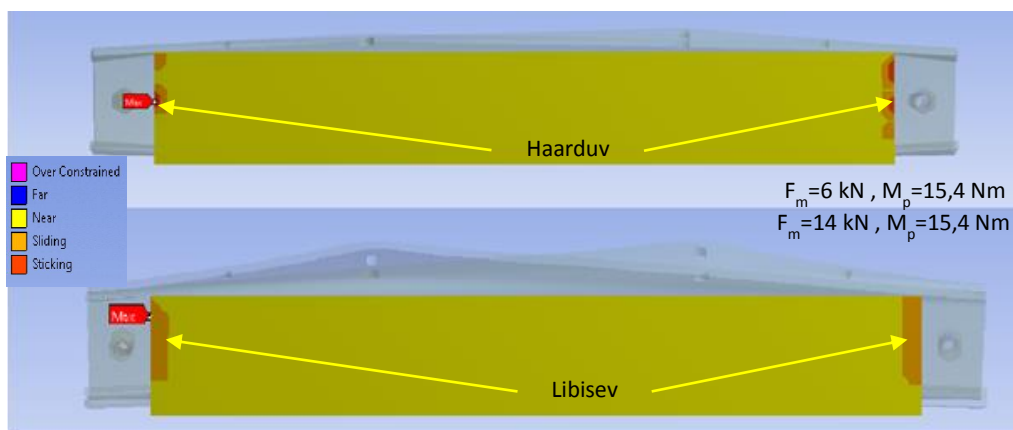
Tabel 3.25. Teise katseosa tulemused,  $F_{ep}=5500$  N

Katse nr	Eelpingutusjõud $F_{ep}$ , kN	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Suurim ekvivalent pinge $\sigma_v$ , MPa	Suurim summaarne deformatsioon, mm
1	5,5	6	170,3	0,51
2	5,5	8	205,7	0,65
3	5,5	10	249,9	0,78
4	5,5	12	298,3	0,93
5	5,5	14	-	-

Tabeli 3.25 tulemustest on näha, et viimane tulemus, millega on sideraudade ja südamikü vaheline haardumus tagatud on  $F_m=12$  kN. Siiski pole selle juures sideraaua tugevus tagatud, kuna:  $\sigma_v=298,3$  MPa >  $R_e=235$  MPa.

Sideraaua 10 simulatsioonidest järeldub, et sobivaks võtmemomendiks on  $M_p=15,4$  Nm, millega on kindlalt tagatud sideraudade tugevus kuni 8 kN tõmbejõu juures. Suurim summaarne deformatsioon on sel juhul 0,65 mm.

Sele 3.44 kirjeldab, kuidas toimub tõmbejõu  $F_m=14$  kN juures libisemine. Lisaks sellele on näidatud võrdlust tõmbejõudude 6 kN ja 14 kN vahel, kui poldi kinnituspõment on 15,4 Nm.



Sele 3.44. Kontaktpindade vaheline haardumine ja libisemine

### 3.6. Kokkuvõtte simulatsioonidest

Kõigile kümnele sideraua variandile leiti simulatsioonide analüüsi käigus sobivad mutrivõtme eelpingutusmomentid, mis tagavad ohutuse hetkel kasutuses olevate induktorite suurimate raskuste puhul. Lisaks sellele sai uuritud, kui palju võib ligikaudselt induktori raskusest tuletatud koormust tõsta, et leitud sobiv võtmemoment oleks ikkagi raskuse hoidmiseks piisav. Lahendustes oli mindud kindla peale ning valitud tulemused, mis ei tekitanud libisemist ning ei ületanud sideraua materjali tugevusnäitajaid.

Kokkuvõtte tulemustest on tabelis 3.26. Esialgselt määratud induktori poolt tekitavat koormust võib tõsta kuuel sideraua variandil. Kolmel sideraual tuli esialgselt määratud koormuse hoidmiseks kasutatud kinnitusavade arvu suurendada kahelt neljale. Kõigil juhtumitel aitas selline meetod suurendada sideraudade kandevõimet. Kujutüübi mõju on raske kindlaks teha analüüsist, kuna algarameetrid on kõigil simulatsioonidel erinevad. See polnud magistritöö eesmärgiks, kuna tähtis oli igale sideraual sobiv poldi võtmemoment leida, mida hiljem kasutada reaalselt.

Tabel 3.26. Simulatsioonide tulemused

	Sideraua nr									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Võtmemoment $M_p$ , Nm	26	16,8	8,4 Ü 4,2 A	20	4	2,5	4	15,4	15,4	15,4
Esialgne koormus, kN	5	10	10	8	4	2	2	6	4	6
Suurim lubatav koormus, kN	7,5	12	10	9	4	2	2	7	8	8
Max ekv. pinge $\sigma_v$ , MPa	164,6	221	226,5	193,5	212,9	131,6	132,9	182,5	161,3	205,7
Maksimaalne deformatsioon, mm	0,65	0,72	0,42	0,75	2,11	0,26	0,58	0,67	0,34	0,51
Kasutatud tõstekohtade arv	2	4	2	2	4	4	2	2	2	2
Terase voolepiir $R_e$ , MPa	235	235	235	235	235	140	140	235	235	235
Poldi suurus	M12	M12	M10	M12	M8	M6	M8	M10	M10	M10
Polthiivate arv	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2
Sideraua paksus, mm	6	5	4	6	3	3	3	6	6	6
Kujutüüp	L	U	L	L	L	L	L	L	U	U
B-paki pikkus, mm	450	450	450	450	350	250	300	300	300	560

Märkus. Sideraual 3 on märgitud ülemiste poltide kinnitusmoment tähisega Ü ja alumistel A.

## 4. LABORIKATSESED

Katsete läbiviimise kohaks sai valitud TTÜ katselabor, mille käsutuses on paljud Eesti tingimustes ainulaadsed katse- ja mõõteseadmed. Laborikatsete eesmärk:

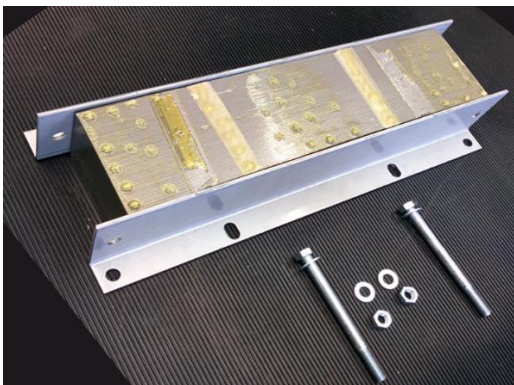
- 1) Analüüsida, milliste koormuste juures tekib sideraua mudelil südamikü ja sideraudade vaheline libisemine.
- 2) Vaigu ainega immutatud mudelite võrdlus immutamata mudelitega.
- 3) Võrrelda laborikatse tulemusi arvutisimulatsiooni tulemustega.

### 4.1. Katseskeem

Katsete läbiviimiseks kasutatakse tõmbe ja surve testimise masinat Instron 8802, mis võimaldab rakendada survet/tõmmet  $\pm 250$  kN. Tegemist on staatilisi ja dünaamilisi katseid tegeva masinaga ning on varustatud töölauga, millele saab kinnitada erinevaid rakiseid katsemudelite kinnitamiseks.

Testimiseks on valitud sideraua 7 lihtsustatud mudelite järgi koostatud mudelid. Mudelid sai tehtud graafilises osas sideraua 7 koostejoonise järgi (sele 4.1). Ühe mudeli koostamiseks oli vaja:

- 1) B-pakki mõõttudes 60 x 300 x 78 mm, mis on koostatud 0,5 mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest.
- 2) Kahte M8 suurusega DIN 933 ZN polti.
- 3) Kahte M8 suurusega DIN 934 ZN mutrit.
- 4) Nelja M8 suurusega DIN 125 ZN seibi.
- 5) Kahte siderauda variant 7.

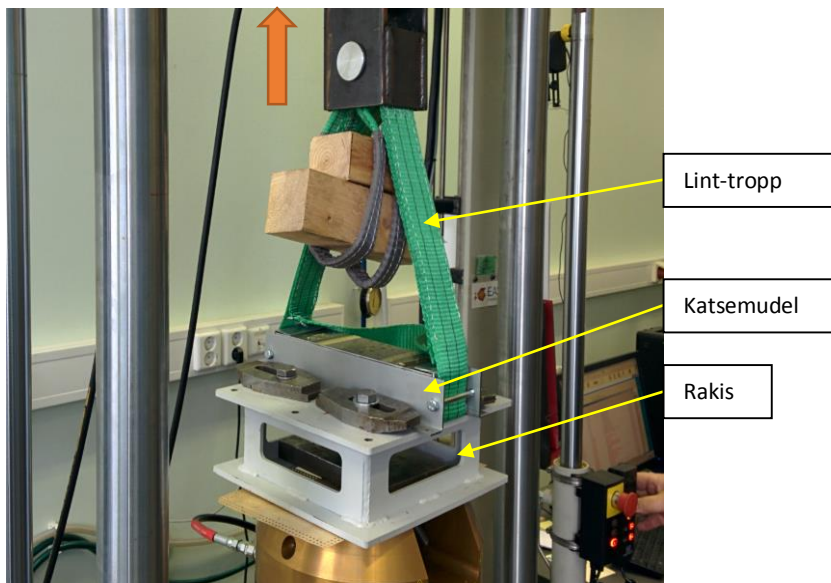


Sele 4.1. Katsemudel kokkupaneku eel



Katsemudeleid sai koostatud kahte eri versiooni. Esimesed olid vaigu ainega immutatud ning vaakumahjus termotöödeldud, teised olid vaiguga immutamata. Katsemudeleid sai mõlemale versioonile tehtud kolm, et oleks näha katsetulemuste hajuvus. Kõik mudelid pandi kokku poltliidetega peatükis 3.5.7 tabeli 3.18 tulemuste kaudu leitud sobivat võtmemomenti 4 Nm kasutades. Vaiguga immutamist vajavatele mudelitele teostati koostamise operatsioon ja polli eelpingutuse rakendamine enne immutamise operatsiooni.

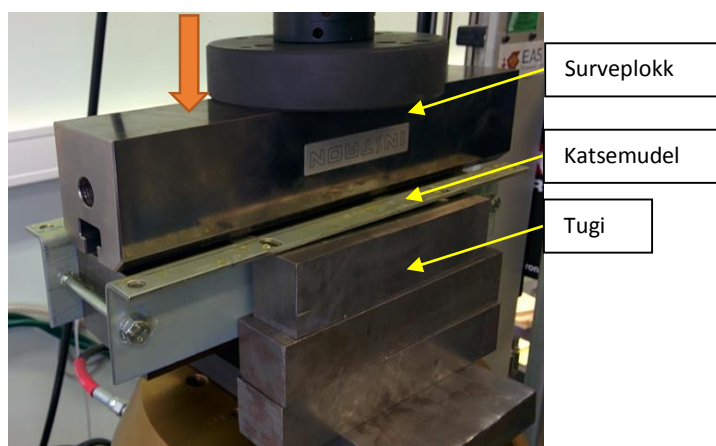
Järgmisena tuli paika panna katsetamise skeem. Esimese tõmbekatse järgselt selgus, et pole võimalik esialgselt plaanitud skeemi järgi katseid edasi teostada. Katsemudel tõmbekatse rakises on näidatud seel 4.2. Lühidalt kirjeldatult pidi lint-tropp tõmbama südamikü B-pakki sideraudade vahelt ära, et näha suuri tõmbejõudusid on vaja rakendada libisemise tekitamiseks. Lint-tropi pooltele jaotusid tõmbejõud väga erinevalt, mistõttu ühte B-paki poolt hakati tõmbama suurema jõuga.



Sele 4.2. Lint-tropiga tõmbekatse skeem

Järgmise töötava skeemina mõeldi katsetamine ümber survekatseks. See põhines survejõu rakendamises B-paki pealmisele pinnale, surudes sellele sideraudade vahel kinni olles. Mudelid pannakse püsivate tugede najale (sele 4.3). Masin surub pakki kiirusega 0,1 mm/s ning katse surumistekonna pikkus on 20 mm, et vältida poltliite surumist survemehhanismi poolt. Survepaki laius oli ligilähedane B-paki laiusele. Seega sai suruda tervet B-paki pinda ühtlaselt.





Sele 4.3. Survepakiga survekatse skeem

Toed toestasid kõiki nelja sideraua mudeli tõstekettide kinnituskohtha, mistõttu sai arvutisimulatsioonid läbiviidud sarnastele rajatingimustele neljast kinnitamiskohast koormatuna. Seda oli vaja teha, et näha laborikatsetustest saadud tulemuste kaudu, kas arvutisimulatsioonide tulemused on võrreldavad ning kinnitada simulatsioonide katseskeemi paikapidavust. Neljast kinnituskohast koormatuna viidi simulatsioonide katsed läbi 4 Nm poltide eelpingutusmomenti kasutades. Tulemused on tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Sideraua 7 simulatsiooni tulemused nelja tõstmiskohta kasutades

Katse Nr	Eelpingutusmoment $M_p$ , Nm	Tõmbejõud $F_m$ , kN	Maksimaalne ekvivalent pinget, MPa	Maksimaalne summaarne deformatsioon, mm
1	4	2	128,4	0,12
2	4	3	129,4	0,15
3	4	4	131	0,20
5	4	5	133,2	0,29
6	4	5,5	135,4	0,34
7	4	6	-	-

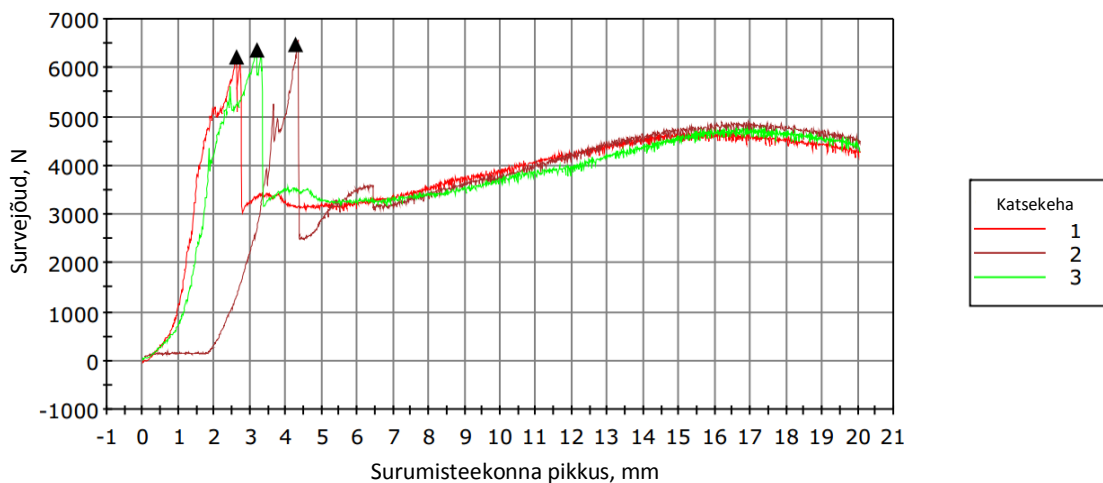
Sarnaselt simulatsioonide peatükis tehtud analüüsile on nendegi tulemuste analüüsimine sarnane. Esialgse tõmbejõu 2 kN rakendamisel on näha, et tugevus on tagatud:  $\sigma_v=128,4 \text{ MPa} < R_e=140 \text{ MPa}$ . 5,5 kN tõmbejõuni on südamiku ja sideraudade vaheline haarduvus tagatud, samuti on tagatud sideraua tugevus:  $\sigma_v=135,4 \text{ MPa} < R_e=140 \text{ MPa}$ . Tõmbejõu 6 kN juures toimub juba libisemine. Sellest saab järeldada, et laborikatsete survejõu tulemused võiks tulla vahemikus 5,5-6 kN, mille juures tekib südamiku ja sideraudade vahel libisemine.

## 4.2. Laborikatsete tulemused

Teostati kokku 3 katset vaiguga immutatud mudelitega ja 3 katset vaiguga immutamata mudelitega. Vaiguga immutatud mudelite katsete tulemused on vaadeldavad graafikult selel 4.4 ja tabelist 4.2. Vaiguga immutamata mudelite katsete tulemused on graafikul selel 4.5 ja suurima survejõu tulemused tabelis 4.3.

Tabel 4.2. Vaigu ainega immutatud mudelitele mõjunud suurimad survejõud

Katsekeha nr	Kiirus, mm/s	Maksimaalne survejõud, N
1	0,1	6224,32
2	0,1	6476,15
3	0,1	6369,79

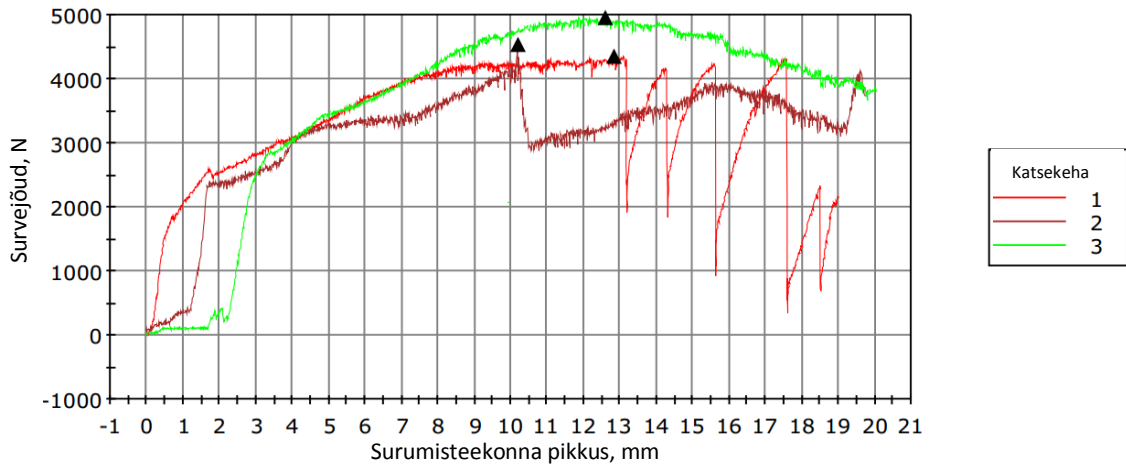


Sele 4.4. Vaigu ainega immutatud survekatsete graafik

Vaiguga immutatud tulemuste graafikult on näha, et esialgu takistab kuivanud vaigukiht sideraua ja südamiku vahelist libisemist ning alates 6000 N survejõu juures toimub vaigu purunemine. Seejärel väheneb oluliselt jõu suurus, mis on vajalik südamiku liigutamiseks sideraudade vahel. Peale vaigu purunemist langeb survejõud ligikaudu 3000 N juurde ning tõuseb seejärel tagasi kuni 5000 N.

Tabel 4.3. Vaigu ainega immutamata mudelitele mõjunud suurimad survejõud

Katsekeha nr	Kiirus, mm/s	Maksimaalne survejõud, N
1	0,1	4355,59
2	0,1	4529,01
3	0,1	4956,45



Sele 4.5. Vaigu ainega immutatamata survekatsete graafik

Vaiguga immutatamata tulemuste graafikult on näha, et esialgu läheb vaja ligikaudu 2500 N, et südamiku liigutada. Samas suureneb survejõud lõpuks 4000 ja 5000 N vahele ning selline graafiku joone liikumine on suhteliselt sarnane vaiguga immutatud mudelite graafikul nähtule peale vaigu purunemist.

Lisaks eelnevale analüüsile on tabelis 4.4 toodud kahe erineva mudeli katsete tulemuste hajuvusmõõdud. Keskväärtuste vahe on  $6356,7 - 4613,7 = 1743\text{N}$ . Dispersioon kirjeldab tulemuste hajuvust. On näha, et vaiguga immutatud mudelite tulemuste hajuvus on oluliselt väiksem võrreldes vaiguga immutatamata mudelite hajuvusest.

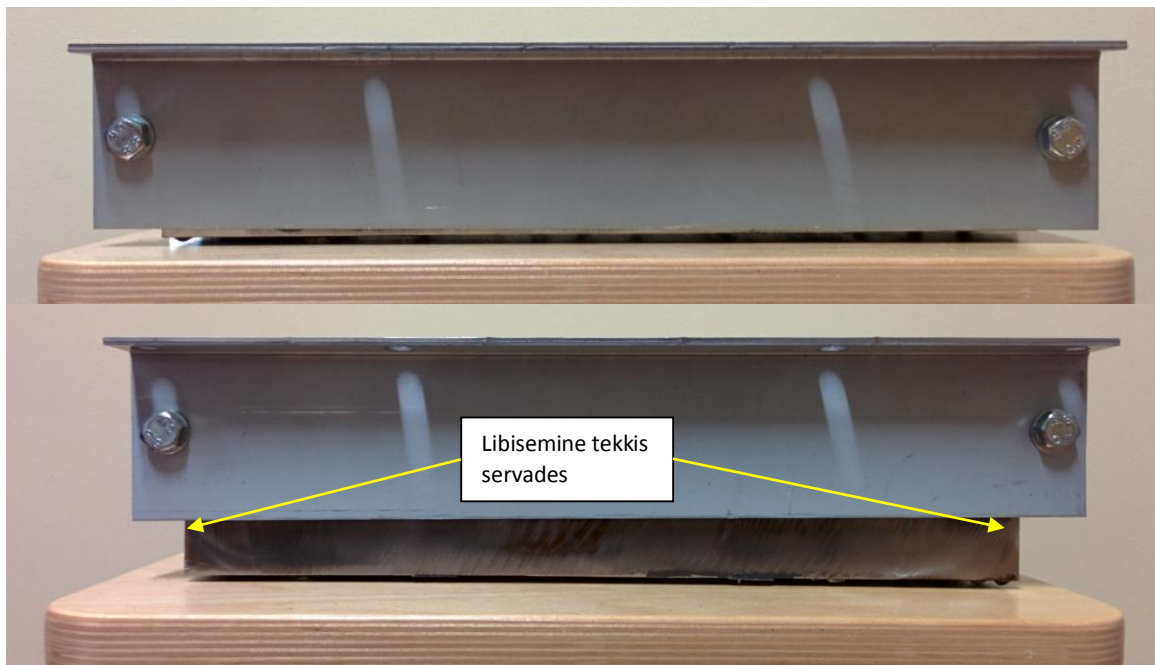
Tabel 4.4. Hajuvusmõõdud

	Suurim survejõud, N	Jõu keskvärtus, N	Dispersioon	Standardhälve
Vaiguga immutatud mudel	6476,15	6356,7	15982,1	126,4
Vaiguga immutatamata mudel	4956,45	4613,7	95635,4	309,3

### 4.3. Kokkuvõtte laborikatsetest

Laborikatsete tulemuste põhjal on võimalik anda järeldused peatüki alguses püstitatud eesmärkidele. Esiteks tuli leida jõud, mille juures B-pakk hakkab libisema sideraudade vahel.

Vaiguga immutamata katsemudelitel puhul oli suurim jõu väärtus, mida oli vaja rakendada südamiku liigutamiseks, katsetulemuste keskvaärtusena 4613,7 N. Sealhulgas oli näha, et libisemine tekib oluliselt madalamate koormuste juures. Libisemine tekkis alguses juba 3000-4000 N koormuse juures. Samas see võib olla tingitud näiteks kontaktpindade määrdumisest, mis vähendab hõõrdetegurit kontaktide vahel.



Sele 4.6. Tavaline katsemudel enne ja pärast katset

Vaigu ainega immutatud mudelite graafik on oluliselt paremini analüüsitav. Suurimate survejõudude keskvaärtuseks oli 6356,7 N, millega tekitati vaigu purunemine (sele 4.7) ning edasine südamiku liigutamine. Vaiguta mudelitega võrreldes saab leida, et katsete suurimate survejõudude keskvaärtuste vahe on 1743 N. Sellest järeldub, et vaiguga immutatud induktoritel töötamine on ohutum, kui vaiguga immutamata induktoritel.



Sele 4.7. Vaigu ainega immutatud mudel enne ja pärast katset

Arvutisimulatsiooni saab võrrelda vaiguga immutamata mudelite tulemustega. Eelnevate andmete põhjal tekkis sideraua 7 simulatsioonidel südamiku libisemine koormuste vahemikus 5500-6000 N. Laborikatsete suurimate jõudude keskväärts 4613,7 N on oluliselt väiksem sellest. Samas on esialgselt siderauale 7 määratud koormuse 2000 N hoidmine tagatud, seega võib julgelt öelda, et 4 Nm on piisav kasutatavate induktorite tõstmiseks. Reaalselt on selliste sideraudade induktorid maksimaalse massiga kuni 100 kg, mis teeb raskusjõuks ~1000 N. Katsetel sai raskuse poolt tekitatud jõu arvutamisel varuteguriks võetud  $S=2$ .

Suurim deformatsioon 0,34 mm saavutati arvutisimulatsioonidel koormusega 5500 N, mille puhul ei ületanud ekvivalent pinget terase voolepiiri. Võrdluseks ei tekkinud ühelgi katsemudeli sideraual püsivaid deformatsioone. Eelnevast järeldades võib öelda, et laborikatse eesmärgid said täidetud.

## KOKKUVÕTE

Magistritöö seisnes induktori ülemiste sideraudade uurimises. Esialgu selgitati induktori mõistet ning kirjeldati selle konstruktsiooni, et oleks lihtsasti arusaadav sideraudade ülesanded. Nendeks olid induktorite transportimise võimaldamine, induktori konstruktsiooni koos hoidmine ning koostamise järgse paigalduse võimaldamine. Raskete induktori transportimiseks kasutatakse sideraudadel asuvaid kinnituskohti, kuhu kinnitatakse kett-tropi konksud. Kergemaid induktoreid tõstetakse käsitsi, mille puhul võetakse sideraudade otstest kinni.

Esimeses peatükis toimus sideraudade valik. Magistritöösse valiti kümme erinevate omadustega siderauda. Sideraudade põhilisteks erinevusteks oli kuju erinevus, suurus ning sideraua paksus. Lisaks sellele oli hulka valitud ka mõned probleemsemad versioonid. Sideraua 3 puhul oli varasemalt juhtunud tõstmisel induktori kukkumist sideraudade vahelt. Sideraudade kujutüüpe oli kaks: L-tüüp ja U-tüüp. L-tüüpi kujuga oli 7 siderauda ja U-tüüpi kujuga 3 siderauda. Suurimad kasutusel olevate induktorite raskused neile sideraudadele jäid vahemikku 100-500 kg. Samuti oli sideraudade vahele pandava ülemise südamikuga osa ehk B-paki pikkus varieeruv: 250-560 mm. Samas peatükis tehti sideraudade materjalidele analüüs ning kirjeldati hiljem kasutatud tugevusnäitajaid, nagu materjali voolepiir  $R_e$  ja tugevuspiir  $R_m$ .

Magistritöö ülesannete lahendamise algas peale sideraudade valikut. Lõputöö esimeseks ülesandeks oli leida arvutuste teel töös käsitlevatele poltidele suurimad lubatavad eelpingutusmomentid, arvestades pindade vahelisi hõõrdetegureid. Hõõrdetegurid sai valitud ka südamikuga ning sideraudade vahelisele kontaktile. Suurimate eelpingutusmomentide leidmine oli vajalik, et teada, millisest võtmemomendist alates tuleks alustada simulatsioonikatseid. Suurim võtmemoment oli arvatud M12 poldile 112,7 Nm ja väiksem M6 poldile 7,7 Nm.

Järgnevas peatükis alustati arvutisimulatsioonideks ettevalmistusega. Selleks tuli projekteerida lihtsustatud 3D-mudelid, et katseskeemi oleks lihtsam koostada. Simulatsiooniprogrammiks sai valitud ANSYS 15.0, milles teostada staatilist struktuuri analüüsi sideraudade lihtsustatud mudelitele. Katsetamiseks sai välja mõeldud skeem, mis põhines sideraudade tõmbamisel eemalt mõjuva tõmbejõuga, imiteerides kett-tropiga tõmbamist. B-pakk on sel juhul kinnitatud püsiva kinnitusena. Katseskeemi paika panemise järgselt arvutati induktori maksimaalsete

raskuste kaudu igale sideraua mudelile tõmbejõud, millega alustati esialgseid katseid. Peale simulatsioonide tulemuste analüüsi sai leitud kõigile kümnele sideraua mudelile sobivad eelpingutusmomendid, millega oli tugevustingimused rahuldatud.

Viimases peatükis tehti laborikatset sideraua 7 mudeliga. Katsed teostati kolme vaigu ainega immutatud ja kolme vaiguga immutamata mudelitega, mis oli koostatud lihtsustatud mudeli koostejoonise põhjal. Iga sideraua mudeli poltliide kinnitati eelnevalt leitud sobiva võtmemomendiga 4 Nm.

Eesmärgiks oli leida, kui suurt koormust suudab simulatsioonides leitud sobiv eelpingestusmoment hoida, enne kui tekib libisemine sideraudade ja südamikku vahel. Teiseks ülesandeks oli võrrelda vaiguga immutatud ja vaiguga immutamata mudeleid omavahel, millest järeldus, et vaiguga immutamine tõstab oluliselt sideraudade hoidmisvõimet. Suurimate rakendatud jõu keskväärtus vaiguga immutatud katsemudelitel oli 6356,7 N, vaiguga immutamata katsemudelitel 4613,7 N. Katsetest järeldub, et koormust võib tõsta peale vaiguga immutamist 1743 N. Sellest saab teada, et vaiguga immutatud induktoreid on ohutum transportida tõstmise teel kui vaiguga immutamata.

Viimasena võrreldi vaiguga immutamata mudelite laborikatsete tulemusi sarnase arvutisimulatsiooni tulemustega. Võrdluses tuli välja, et laborkatsetuste tulemusel saadud jõu keskväärtus 4613,7 N on väiksem, kui viimane arvutisimulatsioonides saadud sideraua ja B-paki haarduvust tagav jõud 5500 N. Kohati tekkis libisemine laborikatsete puhul isegi 3000 N juures, mis on oluliselt madalam tulemus. Samas kui võrrelda vaiguga immutatud katseid simulatsiooniga, siis on laborikatsete tulemused isegi paremad. Reaalselt on aga sideraua induktori maksimaalseks raskuseks kuni 100 kg, mis teeb raskusjõuks ~1000 N. Sellest võib järeldada, et haarduvus on varuga tagatud 4 Nm kinnitusemomendi juures.

Kokkuvõtteks võib magistritöö ülesannete täitmise lugeda edukaks. Peamine ülesanne, milleks oli sobivate võtmemomentide leidmine valitud sideraudadele, sai täidetud. Sobiva eelpingestusmomendi leidmine polnud lihtne, kuna sideraudade lehepaksused pole väga suured, siis võib suure kinnitusjõuga kergelt tekitada püsivad deformatsioonid, mis pole lubatud induktorite koostamisel. Valmistatud tooted peavad olema eeskujuliku välimusega ning muljutud sideraudadega induktor seda pole.

Kõige muu kõrval selgus, et laborikatsete tegemiseks mudelite koostamine võtab oluliselt aega ning nõuab erinevate ressursside kasutamist. Sinna hulka läheb detailide tellimiseks, B-paki lõikamiseks, mudeli koostamiseks ja vaiguga immutamise protsessiks kuluv aeg. Teiseks tööjõu kaasamine, kuna südamike lõikamine on operaatorite ülesanne ja detailide tellimine ostuosakonna ülesanne firmas.

Erinevalt ajamahukast laboris testimisest, on arvutisimulatsioonide ainuke raske osa lihtsustatud mudeli projekteerimine. Ülejäänud protsess jätkub lõputöös kirjeldatud katseskeeme järgides. Niiviisi leides sobivaid võtmemomente on ajavõit oluliselt suurem ja rahaline kulu põhimõtteliselt olematu võrreldes reaalelulise katsetusmeetodiga.

Antud tulemusi saaks rohkem üldistada ning paljude teiste sarnaste sideraudade puhul kasutada, kui oleks kinnituskohdade asukohad, sideraua kuju ning poldiavade asukohad standardiseeritud. Siinses lõputöös ei saa järeltõlgida teha, kuidas sideraua kuju, paksus ja mõõtmed tulemusi mõjutavad, sest siinses lõputöös kasutatud sideraudadel on igaühel omad spetsiifilised eripärad.

Saadud lõputöö tulemusi saab edaspidi kasutada induktorite projekteerimisel. Teades induktori massi saab lihtsalt mõõtmete sobivuse korral valida õige sideraua ning sellele vastava võtmemomendi. Niimoodi ei teki induktorite disainimisel olukorda, kus disainer peab tunde järgi valikut tegema. Edasiseks arenduseks oleks võimalik suurema andmebaasi korral teha arvutiprogramm. Sinna saaks kasutaja sisestada algparameetrid, nagu sideraua kujutüüp, induktori raskus ja mõõtmed. Nende järgi soovitaks programm ise sobivaid sideraua variante.



## SUMMARY

Master's thesis objective was to investigate inductors' upper brackets. Initially inductor concept was explained and its design was described, so that the main tasks for the brackets would be easily understandable. These tasks were: maintaining transportation, holding together structure of an inductor and enabling post-installation. For heavier inductors, lifting spots on the brackets are used to attach chain slings hooks. Lighter inductors are lifted by hand. Edges of the brackets are used for lifting then.

Selection of the brackets was made in the first chapter. Ten different brackets were selected. Those brackets differed from each other in shape, size and thickness. In addition, some problematic versions were added to the list. Brackets have two main shape types: L-shape and U-shape. Selection included seven L-shape and three U-shape brackets. Inductors for selected brackets weighed 100-500 kg. Moreover, the upper B-pack lengths were 250-560 mm. Later in that chapter material analysis was made and strength characteristics of the steels brought out, such as material strength limit  $R_m$  and yield strength  $R_e$ .

Solving of the first objective began after selecting brackets,. The thesis first task was to calculate maximum allowed bolt pretensions for the bolt connections. This included finding proper friction coefficients for the contacts. Furthermore friction coefficient was chosen for contact between laminated core and brackets. Calculating maximum allowed bolt pretensions for the bolts was necessary to start first computer simulation in brackets structural analysis. Biggest bolt pretension was calculated for the size M12 bolt 112,7 Nm and smallest pretension for the size M6 bolt 7,7 Nm.

In the following chapter preparation for the computer simulations started. It was necessary to design new simplified 3D-models for the brackets assemblies to create proper simulation plan. Simulation software used was ANSYS 15.0 for structural analysis of the brackets. Simplified simulation scheme was created. It based on using remote force attached to the fixing points of the chain slings hooks, imitating the pull of the chain sling. B-pack was then fixed in place from below. After confirming the testing plan, calculations for the tension forces were made according to the maximum weight of the inductors. Those were parameters for the first simulation in the first part of the testing. Second testing part included increasing tension force

value after finding reasonable bolt pretension for the bracket. Strength conditions had to be satisfied throughout simulations.

In the last main chapter laboratory tests were performed for the bracket version 7. Experiments included 3 resin-impregnated models and 3 ordinary models, which were assembled according to the simplified 3D-model assembly drawing. All bolt connections were fastened with bolt pretension value of 4 Nm.

The main objective was to find out how much load bolt pretension 4 Nm can tolerate before core starts to slide between brackets. Secondary objective was to compare resin-impregnated models with ordinary models. Results showed that resin-impregnated models can hold much bigger loads than non-impregnated models. The mean value of the biggest force values for the impregnated models was 6356,7 N and for the non-impregnated models 4613,7 N. According to the mean values loads could be increased after impregnation by 1743 N. Conclusion is that resin-impregnated inductors are much safer to transport than non-impregnated inductors.

Finally, results obtained from the laboratory tests were compared with computer simulation results. Only results of the non-impregnated models were included. Comparison brought out, that mean value of the maximum forces 4613,7 N was lower than expected, because computer simulations showed grip between core and brackets even at 5500 N. In the first quarter of the test, sliding happened around 3000 N. As test went on, force values increased to the maximum. Comparing results of the resin-impregnated models with simulation results, shows that impregnated models had even better grip than simulations revealed. Even though results of the non-impregnated models were lower than expected, values were still within safety zone. To bring out that highest force by maximum weight of the inductor is approximately 1000 N. Therefore, it is safe to conclude that 4 Nm bolt pretension is enough for bracket version 7.

In conclusion, master's thesis tasks were solved. The main objective to find appropriate bolt pretensions for the selected brackets, which had to satisfy material strength conditions, was fulfilled. Finding suitable bolt pretensions wasn't an easy task, because stresses were sometimes higher than strength conditions allowed and caused permanent deformations. In this case better solution had to be found, because permanent deformations are not allowed for any product.

The other side of the laboratory tests revealed that preparation takes lots of time and resources. Those included ordering components, cutting B-pack into proper size, assembling and impregnating. Furthermore, other workers had to be involved to build test models. Operators usually do the cutting operation and sales department orders components needed.

Unlike the time consuming laboratory testing, computer simulation's most difficult part is designing simplified 3D-models. The rest of the process continues according to the testing scheme mentioned earlier. In this way, more time can be saved and cost is practically non-existent compared to the real life testing.

Because of the selection included very different brackets, it is hard to make any conclusion how significantly bracket size, thickness etc are affecting results. In addition to that, every bracket has their own specific characteristics.

Results obtained from the master's thesis can be used in designing process of the inductors. Knowing the mass and size of the inductor it is easy to choose proper bracket version and bolt pretension. For the further development, a program could be created when having bigger database. When user enters parameters, like shape, weight and size of the inductor, program would suggest suitable brackets.

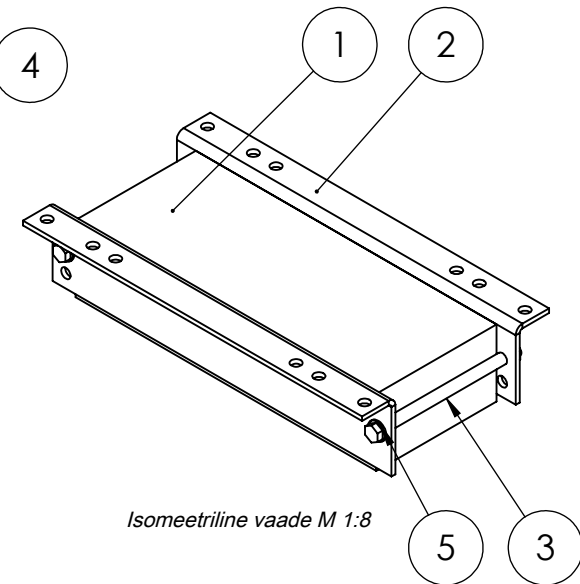
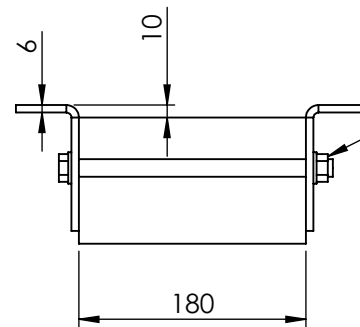
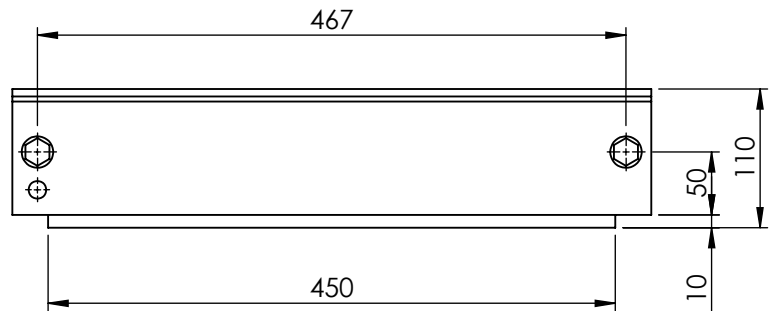
## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Tšuiikov, A. S., Anikin, I. V. (1974). Masinaelemendid. Tallinn: Valgus.
2. Lepikson, H. (1971). Masina ehitaja käsiraamat: teine köide. Tallinn: Valgus.
3. Mehaanikainseneri käsiraamat. (2013). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
4. Kirs, J., Arjassov G. (2004). Sissejuhatus lõplike elementide meetodisse I osa. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
5. Inductors 101 [WWW] <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/vishay/Inductors101.pdf> (07.03.2015)
6. Electrolytically zinc coated cold rolled steel flat products for cold forming- Technical delivery conditions. (2009). EVS-EN 10152:2009. Tallinn: Standardiamet.
7. Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. (2005). EVS-EN 10025-2:2005. Tallinn: Standardiamet.
8. Elektrotehniline teras [WWW] [http://entsyklopeedia.ee/meedia/elektrotehniline\\_teras/nene2\\_page\\_0256](http://entsyklopeedia.ee/meedia/elektrotehniline_teras/nene2_page_0256) (09.03.2015)
9. Friction and Coefficient of Friction [WWW] [http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html) (09.04.2015)
10. Materjalid. (2001). / P. Kulu, J. Kübarsepp, E. Hendre, T. Metusala, O. Tapupere. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
11. EN AW 7075 [WWW] <http://gleich.de/en/products/aluminium-rolled-plates/al-rolled-plates-en-aw/en-aw-7075?pdf> (11.04.2015)
12. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15: Theory, Applications, Case Studies. H-H. Lee. SDC Publications. (2014). [Online] (17.04.2015)
13. Von Mises Stress [WWW] <http://www.learnengineering.org/2012/12/what-is-von-mises-stress.html> (05.05.2015)
14. Basic Engineering Plasticity: An Introduction with Engineering and Manufacturing Applications. D. Rees. Oxford: Butterworth-Heinemann. (2012). [Online] (07.04.2015)
15. Dünaamika: hõõrdejõud [WWW] <http://ak.rapina.ee/valdur/dynaamika.doc> (05.05.2015)
16. Meeterkeerme profiil ja tolerantsid [WWW] <http://eprints.tktk.ee/15/2/index.html> (05.04.2015)
17. Bolt Grade Markings and Strength Chart [WWW] <https://www.boltdepot.com/fastener-information/materials-and-grades/bolt-grade-chart.aspx> (08.02.2015)

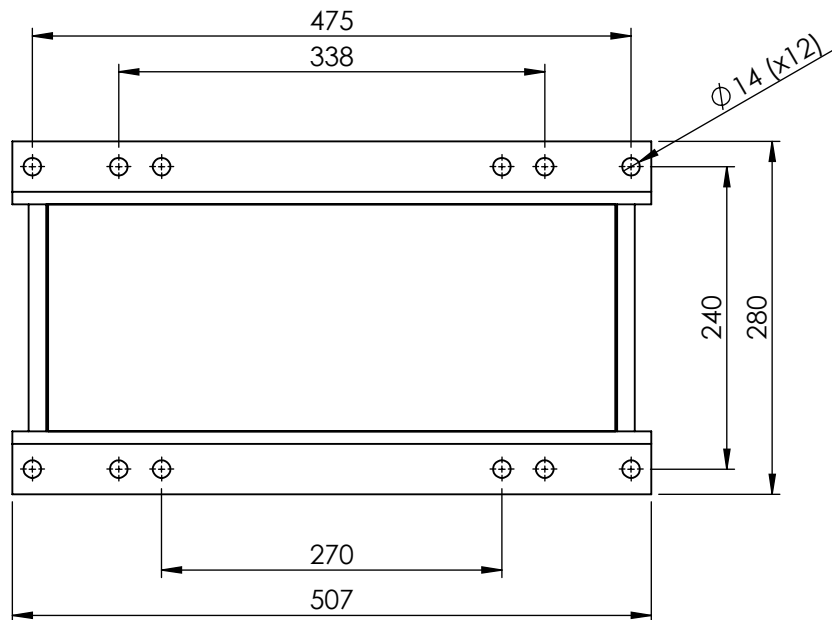
**LISAD**

**Lisa 1**

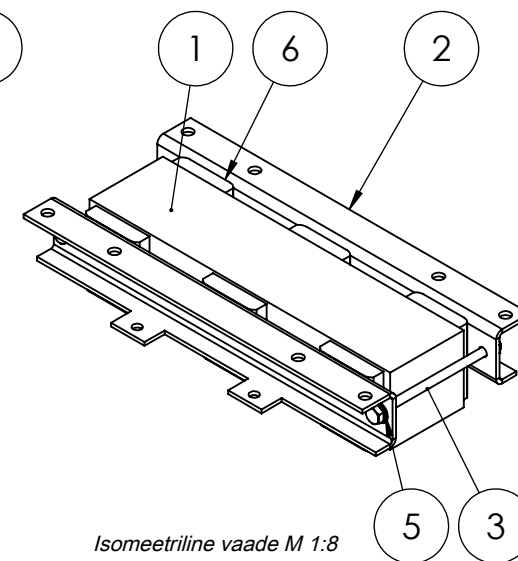
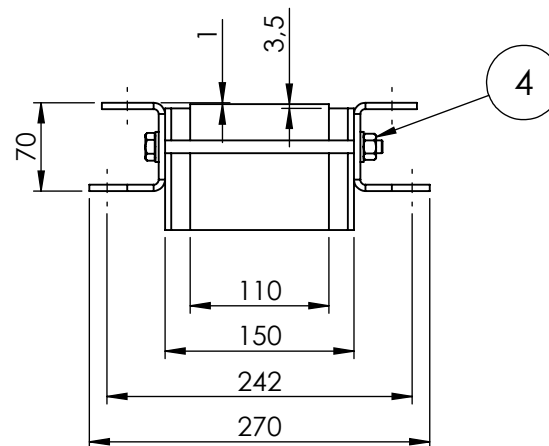
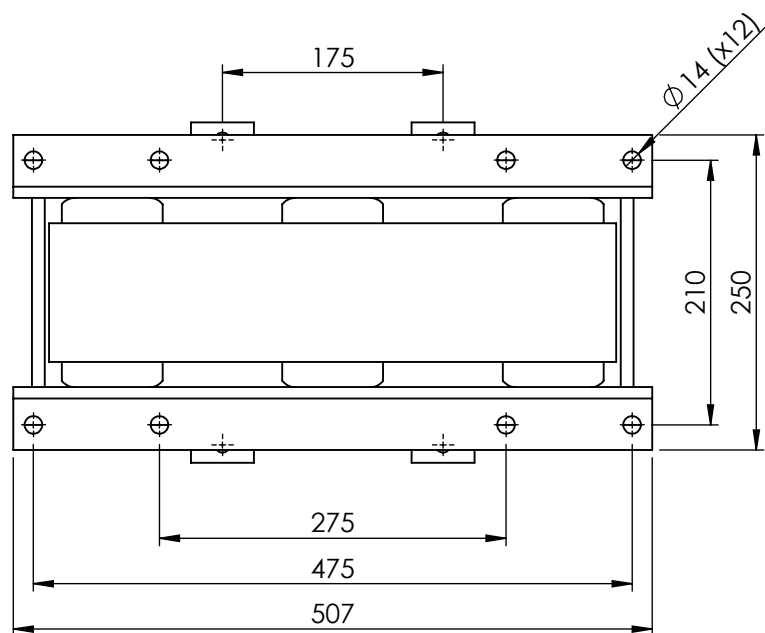
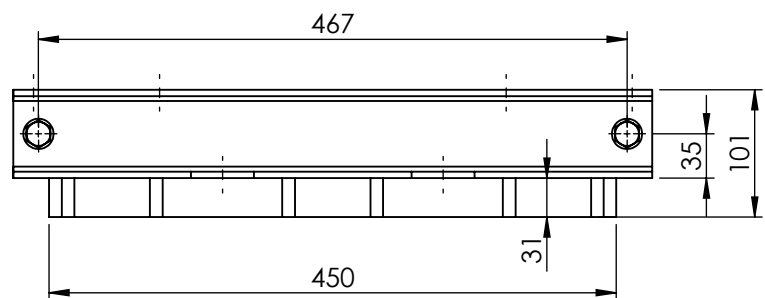
**GRAAFILINE OSA**



Isomeetriline vaade M 1:8



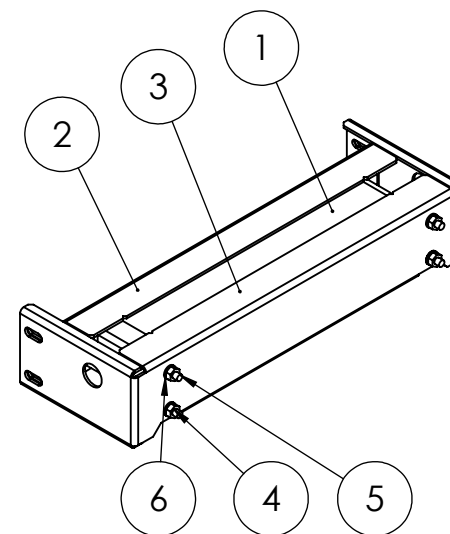
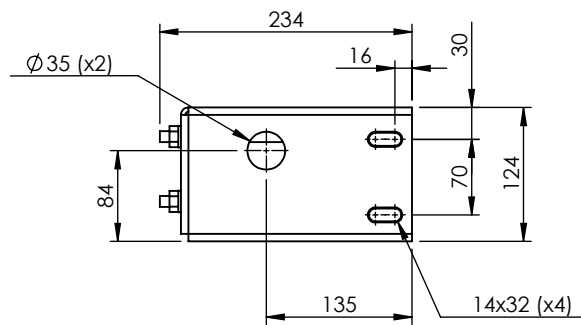
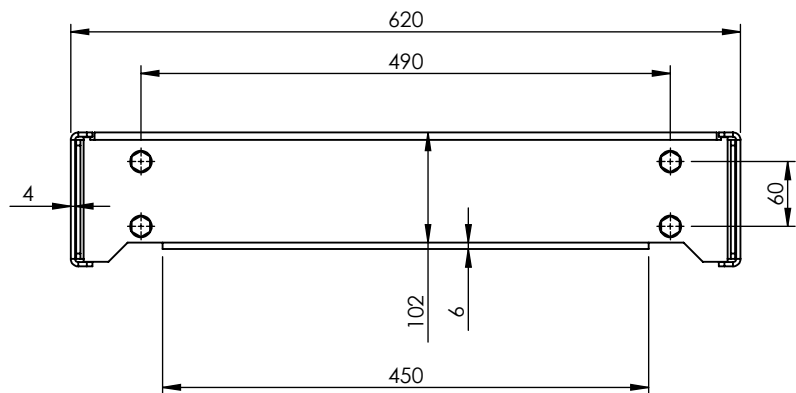
5		M12 DIN 125 ZN		4	
4		M12 DIN 934 ZN		2	
3		M12 x 210 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 1		2	
1		B-pakk 180x100x450 mm		1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 68 kg	Mõõt 1:6
Teostas		Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 1 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>		
Kontrollis					
Kinnitas					
		TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 1	Tähis: EAV.01.00.00	
		TTÜ 1918			



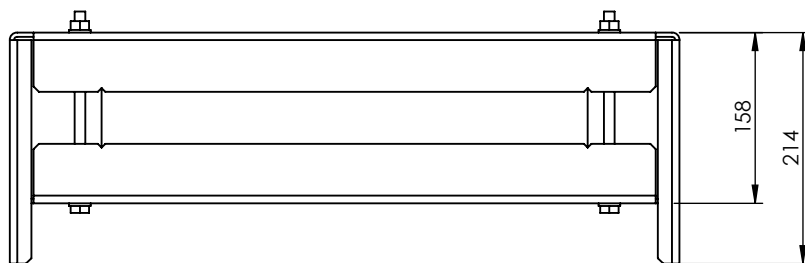
Isomeetriline vaade M 1:8

6	Jahutusprofiil Al 80x20	6
5	M12 DIN 125 ZN	4
4	M12 DIN 934 ZN	2
3	M12 x 180 mm DIN 933 ZN	2
2	Sideraud 2	2
1	B-pakk 110x100x450 mm	1

Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
	Materjal:		Märkimata piirhälbed: H12; h12; $\pm IT12/2$	Mass 46 kg	Mööd 1:6
Teostas	Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 2 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>			
Kontrollis					
Kinnitas					
	TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 2	Tähis:	EAV.02.00.00	
	TTÜ 1918				



Isomeetriline vaade M 1:10



6	M10 DIN 125 ZN	8
5	M10 DIN 934 ZN	4
4	M10 x 180 mm DIN 933 ZN	4
3	Sideraud 3 tagumine	1
2	Sideraud 3 eesmine	1
1	B-pakk 150x100x450 mm	1

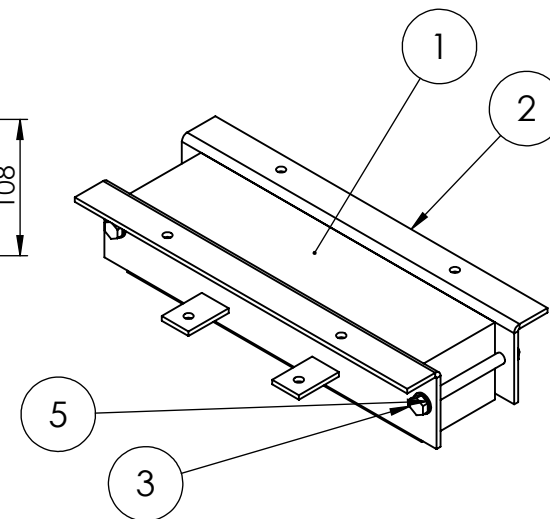
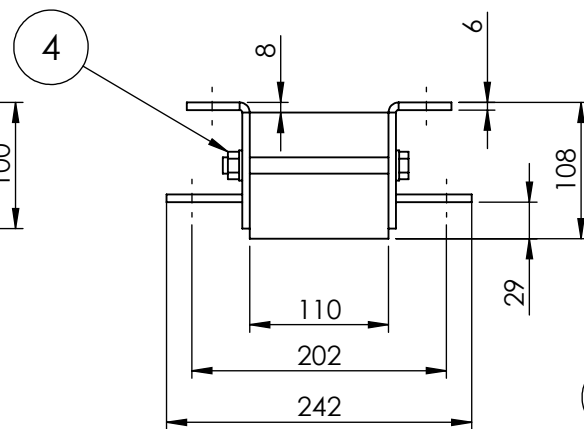
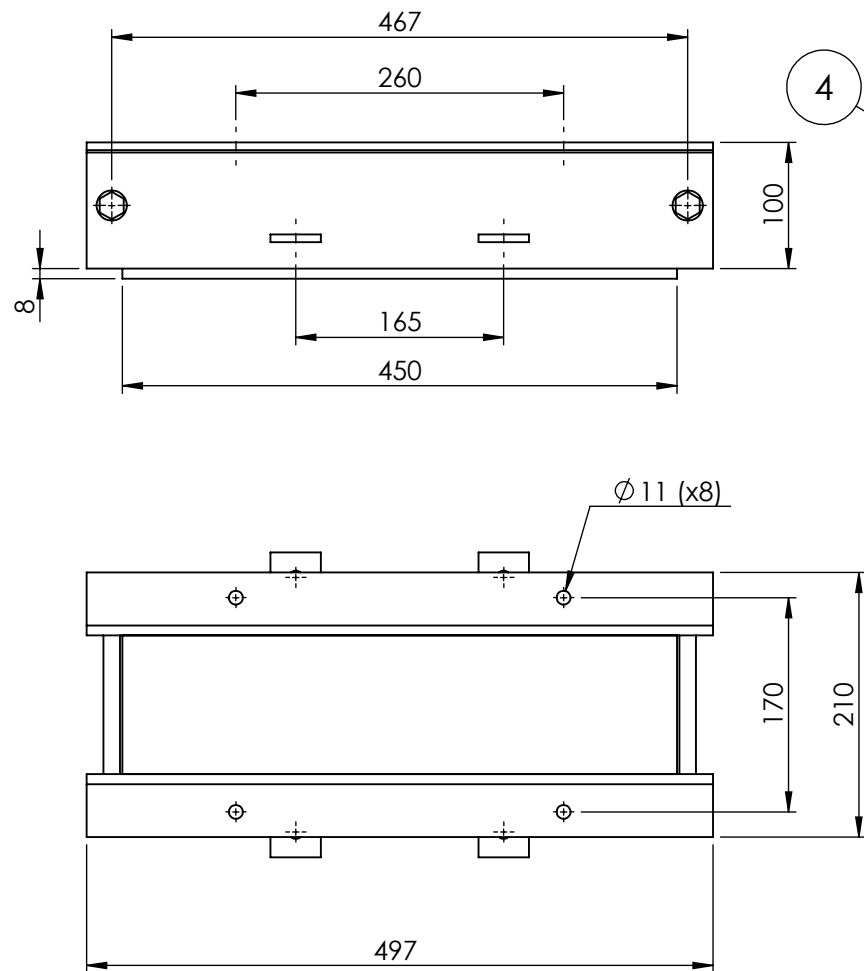
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
-----	------	---------	-------	------	--------

	Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 60 kg	Mõõt 1:7
--	-----------	--	---------------	-------------

Teostas	Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 3 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>
Kontrollis		
Kinnitas		

	TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 3	Tähis: EAV.03.00.00
--	-------------------------	--------	------------------------

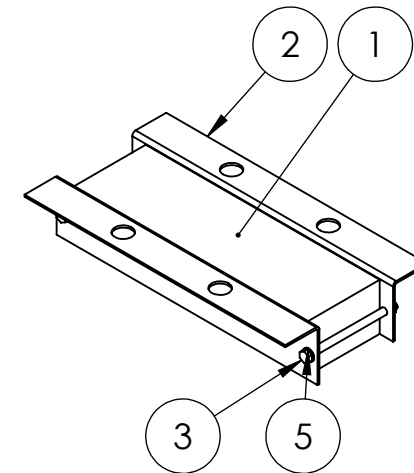
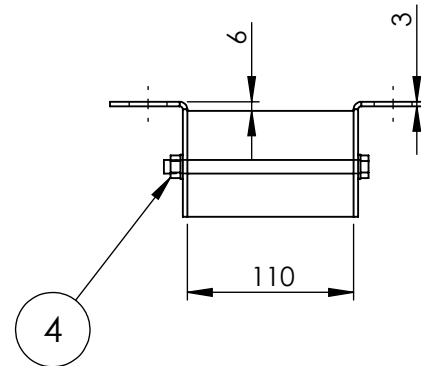
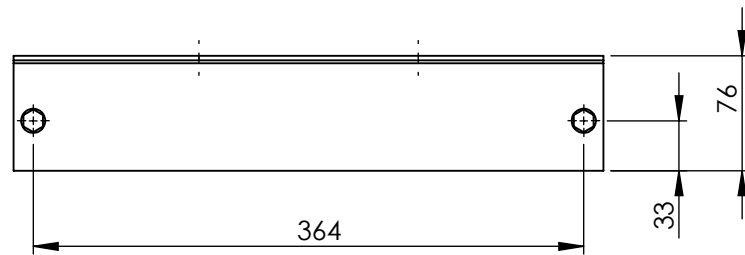




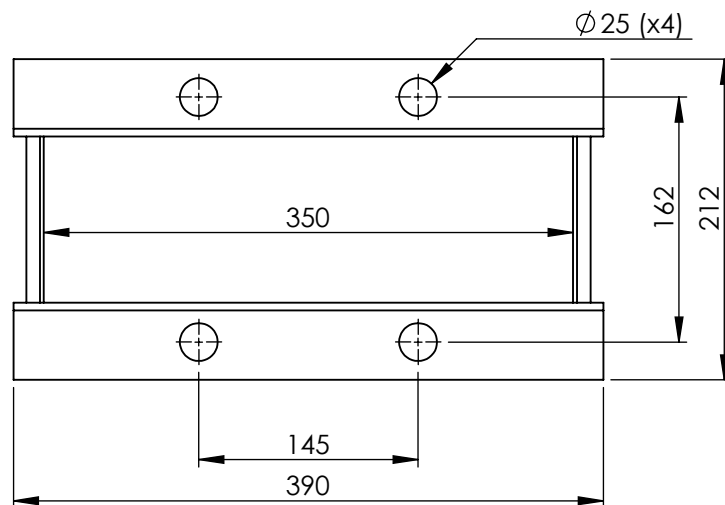
Isomeetriline vaade M 1:8

5		M12 DIN 125 ZN		4	
4		M12 DIN 934 ZN		2	
3		M12 x 140 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 4		2	
1		B-pakk 110x100x450 mm		1	

Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
	Materjal:		Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 44 kg	Mõõt 1:6
Teostas	Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 4 LIHTSUSTATUD            MUDEL</b>			
Kontrollis					
Kinnitas					
	TTÜ 1918	TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 4	Tähis: EAV.04.00.00	

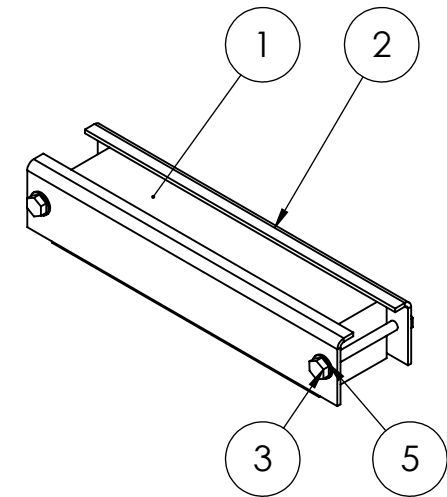
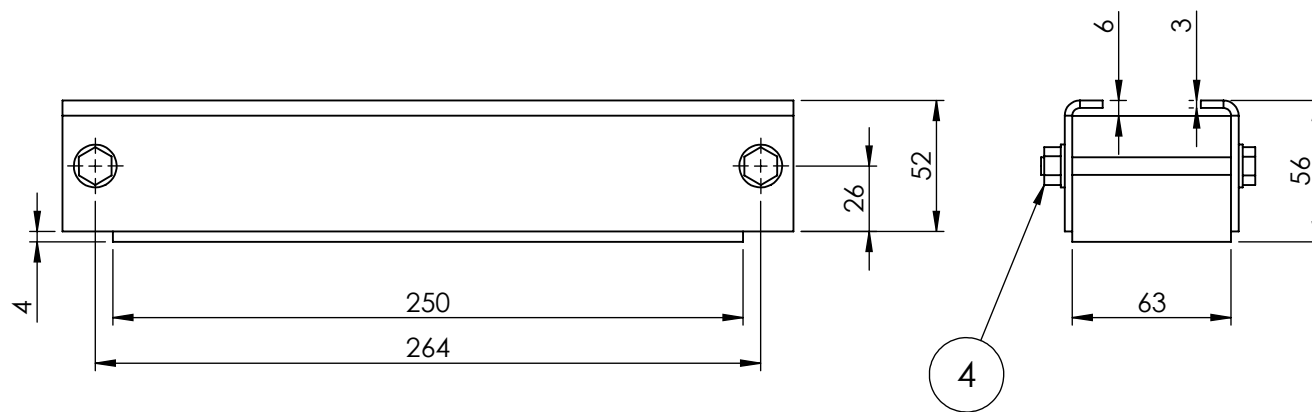


Isomeetriline vaade M 1:8

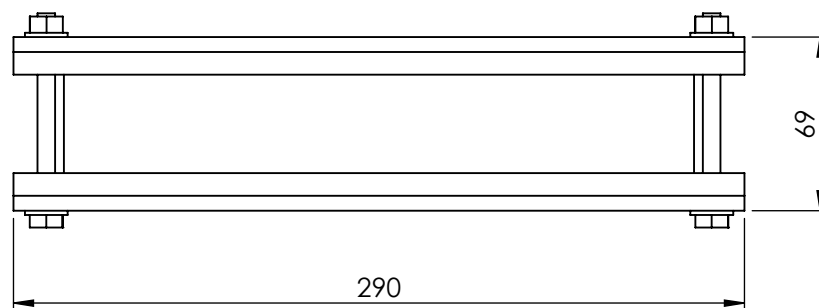


5		M8 DIN 125 ZN		4	
4		M8 DIN 934 ZN		2	
3		M8 x 130 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 5		2	
1		B-pakk 110x70x350 mm		1	

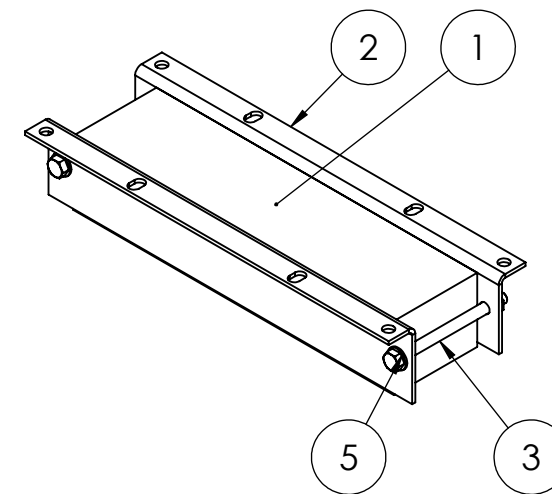
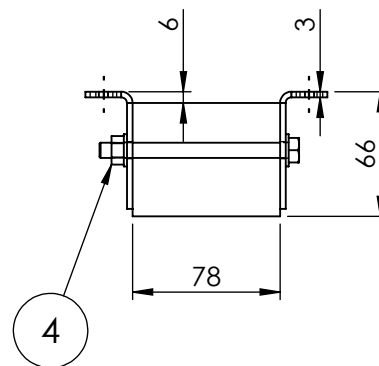
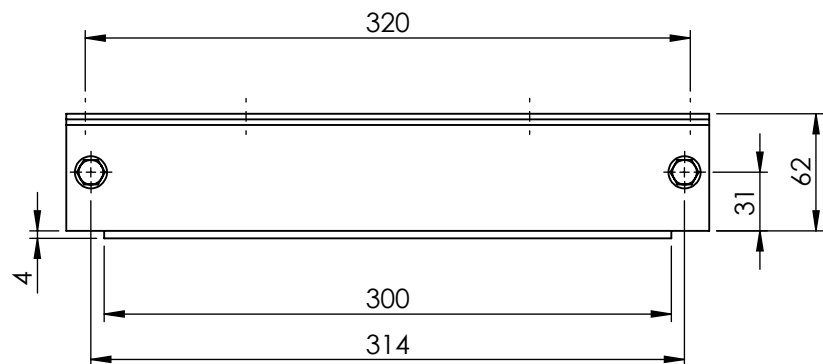
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
	Materjal:		Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 23 kg	Mõõt 1:5
Teostas	Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 5 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>			
Kontrollis					
Kinnitas					
	TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 5	Tähis: EAV.05.00.00		



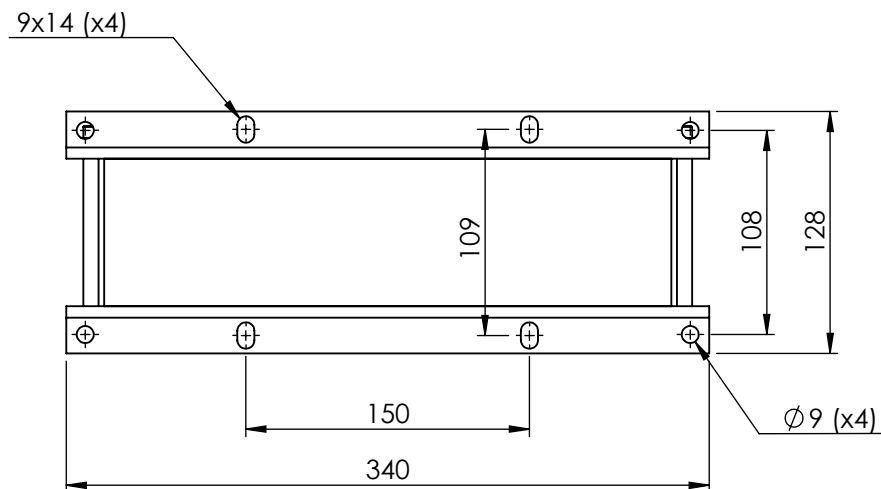
Isomeetriline vaade M 1:5



5		M6 DIN 125 ZN		4	
4		M6 DIN 934 ZN		2	
3		M6 x 80 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 6		2	
1		B-pakk 63x50x450 mm		1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 7 kg	Mõõt 1:3
Teostas		Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 6 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>		
Kontrollis					
Kinnitas					
		TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 6	Tähis: EAV.06.00.00	
		TTÜ 1918			



Isomeetriline vaade M 1:5



5		M12 DIN 125 ZN		4	
4		M12 DIN 934 ZN		2	
3		M8 x 100 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 7		2	
1		B-pakk 78x60x300 mm		1	

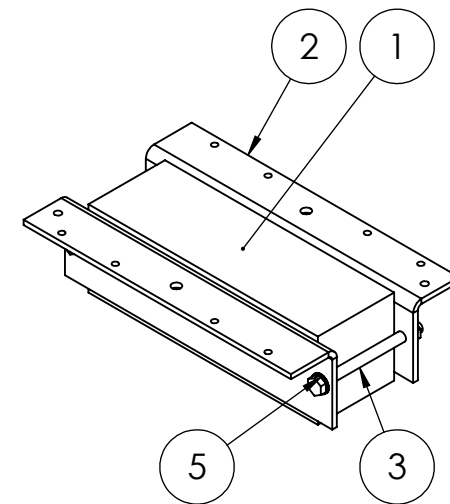
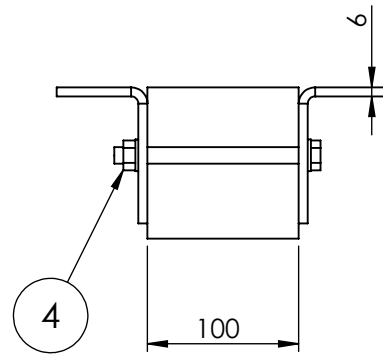
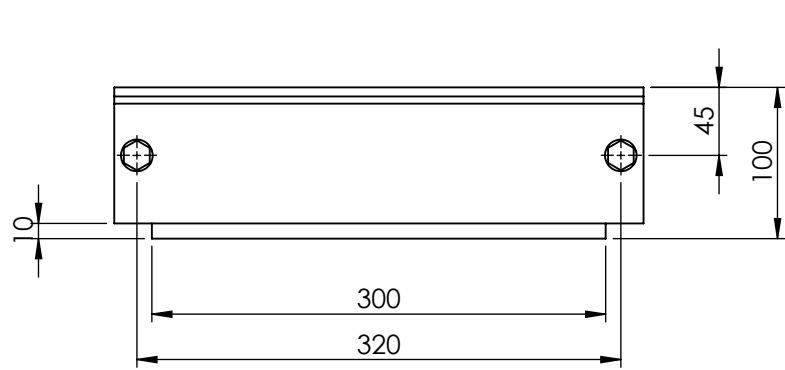
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 12 kg	Mõõt 1:4
Teostas		Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 7 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>		
Kontrollis					
Kinnitas					



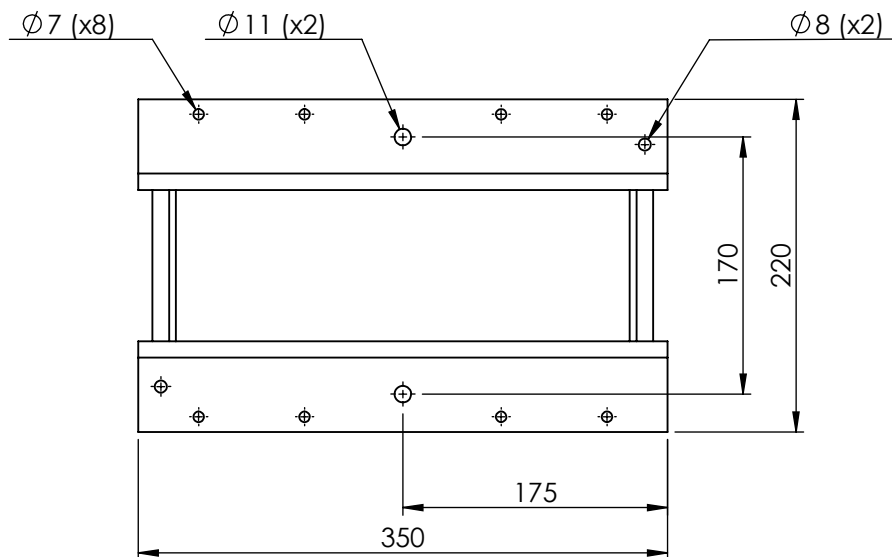
TTÜ Mehaanikateaduskond

Leht 7

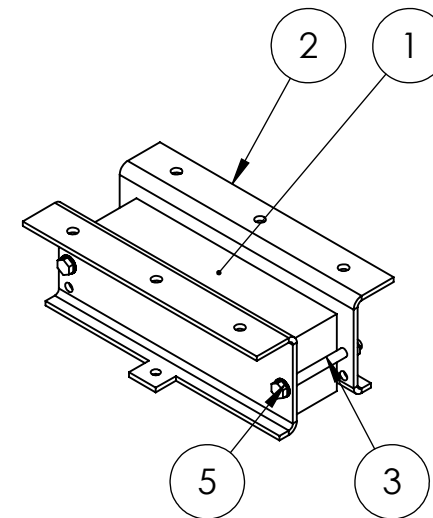
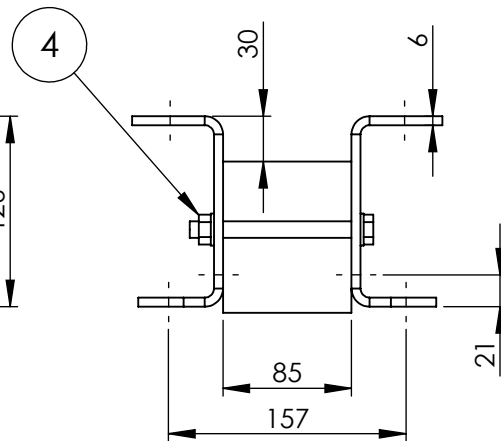
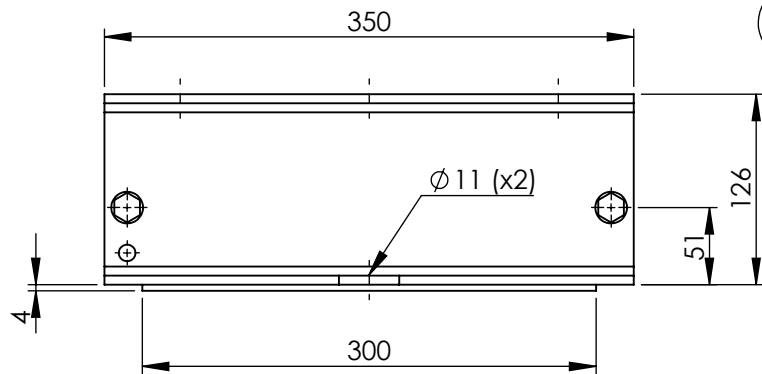
Tähis:  
EAV.07.00.00



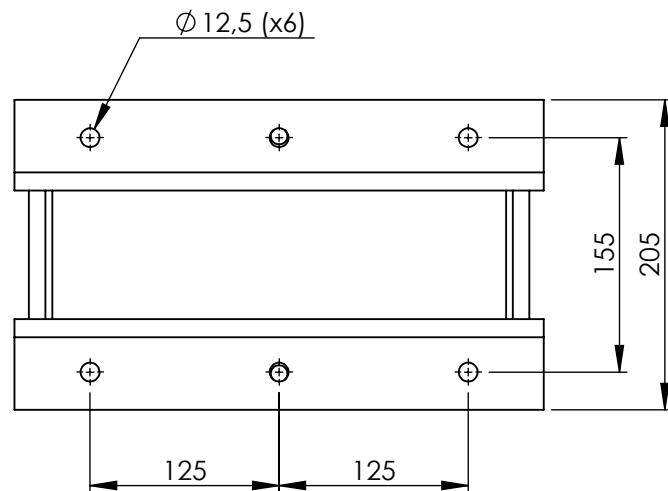
Isomeetriline vaade M 1:7



5		M10 DIN 125 ZN		4	
4		M10 DIN 934 ZN		2	
3		M10 x 130 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 8		2	
1		B-pakk 100x100x300 mm		1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 28 kg	Mõõt 1:5
Teostas		Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 8 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>		
Kontrollis					
Kinnitas					
		TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 8	Tähis: EAV.08.00.00	
		TTÜ 1918			

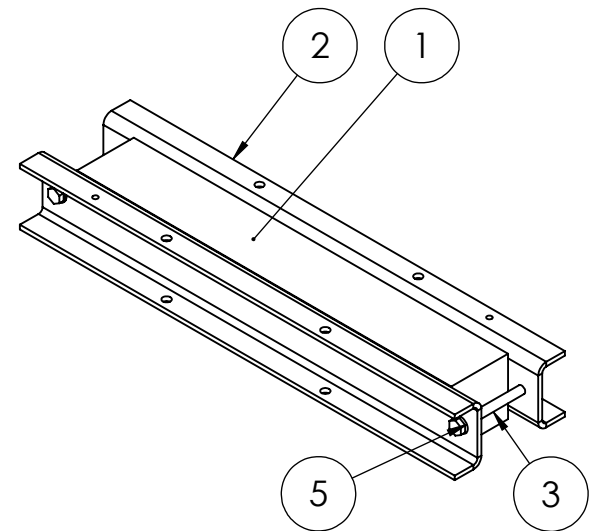
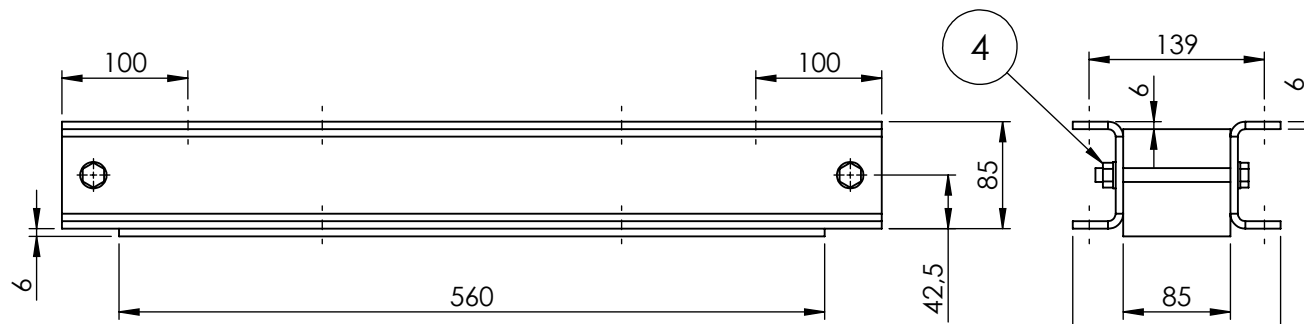


Isomeetriline vaade M 1:8

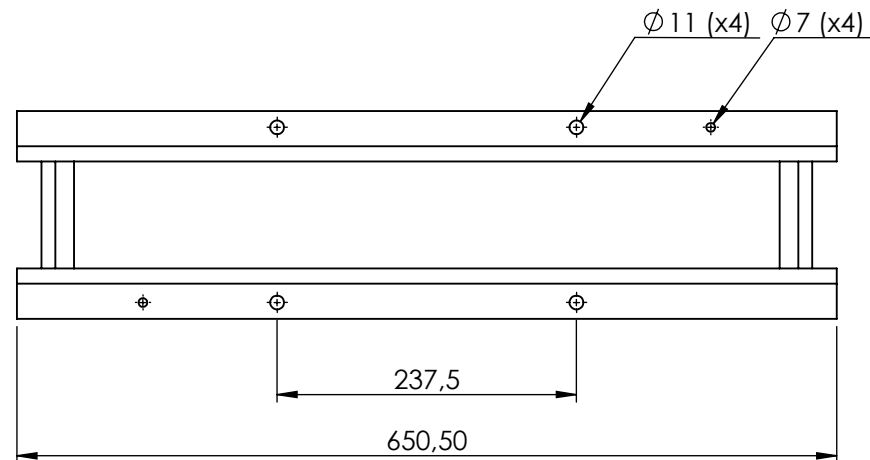


5		M10 DIN 125 ZN		4	
4		M10 DIN 934 ZN		2	
3		M10 x 110 mm DIN 933 ZN		2	
2		Sideraud 9		2	
1		B-pakk 85x100x300 mm		1	

Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
	Materjal:		Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 26 kg	Mõõt 1:5
Teostas	Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 9 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>			
Kontrollis					
Kinnitas					
	TTÜ 1918	TTÜ Mehaanikateaduskond	Leht 9	Tähis: EAV.09.00.00	



Isomeetriline vaade M 1:8



5	M10 DIN 125 ZN	4
4	M10 DIN 934 ZN	2
3	M10 x 120 mm DIN 933 ZN	2
2	Sideraud 10	2
1	B-pakk 85x85x560 mm	1

Osa	Väli	Nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed: H12; h12; ±IT12/2	Mass 40 kg	Mõõt 1:6
Teostas		Reino Seli	Nimetus: <b>SIDERAUA 10 LIHTSUSTATUD MUDEL</b>		
Kontrollis					
Kinnitas					



TTÜ Mehaanikateaduskond

Leht 10

Tähis: EAV.10.00.00