



RULLAMUOVAUSKONEEN SUUN- NITTELU

Kiri Jyrämö

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2015
Auto- ja kuljetustekniikka
Auto- ja työkonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikka
Auto- ja työkonetekniikka

KIRI JYRÄMÖ:
Rullamuovauskoneen suunnittelu

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 14 sivua
Huhtikuu 2015

Tämän opinnäytetyön aiheena oli ohutlevyjen muokkaamiseen tarkoitetun rullamuovauskoneen suunnittelu. Idea opinnäytetyön aiheesta syntyi opintoihin kuuluvan harjoittelujakson aikana. Työ on tehty Akaan Painosorvaus Oy -nimiselle metallialan yritykselle. Yrityksen pääasiallisia tuotteita ovat painosorvatut ohutlevykappaleet sekä erilaiset laserleikatut tuotteet.

Tavoitteena oli tuottaa koneesta tarvittavat koneenpiirustukset, joista selviää koneen päämitat. Tämän lisäksi tarkoituksena oli laskea tarvittavat akselihalkaisijat sekä mitoittaa niille laakerointi. Opinnäytetyössä on selvitetty koneen suunnitteluprosessia koneelta vaadittavien ominaisuuksien listaamisesta lopullisen rakenteen suunnitteluun asti. Rakenteen havainnollistamiseen on käytetty isometrisiä kuvia 3D-malleista.

Työssä tuotettuja koneenpiirustuksia tullaan käyttämään hyödyksi koneen osien valmistuksessa ja kokoonpanossa. Nämä piirustukset ovat luottamuksellista aineistoa ja ne on rajattu pois julkisesta raportista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Automotive and Transport Engineering
Option of Automobile and Industrial Vehicle Engineering

KIRI JYRÄMÖ:
Design of a Roll Forming Machine

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 14 pages
April 2015

The subject of this thesis is designing a sheet metal roll forming machine. The idea for this subject was originated during a study related practical training. This thesis is made for Akaan Painosorvaus Oy, which is a company specialized in metal forming. The main products of this company are spin formed sheet metal and laser cut objects.

The goal was to produce the blueprints which contain the main measurements of the machine. Along with that, the goal was to calculate diameters for the axles and to determine the size of bearings needed. Thesis begins with listing the features needed in the machine and goes all the way to designing the build of the machine. Thesis contains isometric images of 3D-models which demonstrate the configuration.

Blueprints developed in this thesis will be used for manufacturing the parts and to help with the assembly. Those Blueprints are confidential and they are not included in the public version of the report.

Key words: sheet metal, roll forming

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	KONEENSUUNNITTELU YLEISESTI.....	8
2.1	Tuotekehitysprosessi.....	8
2.2	Mallintaminen.....	8
2.3	Kokoonpanot 3D-ohjelmistolla.....	9
2.4	CAD-mallintaminen tässä opinnäytetyössä.....	10
3	KONEELTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET.....	12
3.1	Ohutlevyn taitto muotoon.....	12
3.2	Säädettävyys eri levyisille profiileille.....	12
3.3	Levyn katkaisu määrämittaen.....	12
3.4	Suunnittelun aloitus.....	12
4	KONEELLA VALMISTETTAVAT TUOTTEET.....	13
5	RULLAMUOVAUKSEN TEORIAA.....	14
5.1	Rullamuovaus yleisesti.....	14
5.2	Työskentelymetelmänä.....	15
5.3	Ohutlevyn taivutus teoriassa.....	15
5.3.1	Neutraaliakseli.....	15
5.3.2	Takaisinjousto.....	16
6	MUOVAAVIEN RULLIEN SUUNNITTELU.....	18
6.1	Rullien muodon suunnittelu.....	18
6.2	Rullien materiaalivalinta ja liitokset akselin kanssa.....	19
7	PROFIILILEVEYDEN SÄÄDÖN SUUNNITTELU.....	20
7.1	Keskirulla.....	20
7.1.1	Keskirullan kiinnitys akselille.....	20
7.2	Akselien suunnittelu.....	21
7.2.1	Akselien laakerointi.....	22
8	TUKEVAN AKSELIN SUUNNITTELU.....	24
8.1	Tukeva akseli.....	24
8.2	Tukevrat rullat.....	25
9	AKSELEIDEN VÄLISET LIITOKSET JA ETÄISYSSÄÄTÖ.....	26
9.1	Akselin vapaa puoli.....	26
9.2	Akselin vedon puoli.....	26
10	AKSELIEN VEDON SUUNNITTELU.....	27
10.1	Pääpiirteet.....	27
10.2	Rullien pyörimisnopeus.....	27
10.3	Rullien halkaisijat.....	27

11 KONEEN RUNKORAKENNE	28
12 ONGELMATILANTEET SUUNNITTELUN AIKANA	29
12.1 Tukevan akselin purettavuus	29
12.2 Viimeisen akseliparin toteutus	30
13 POHDINTA.....	31
LÄHTEET.....	32
LIITTEET	33
Liite 1. Akselin minimihalkaisijan määrittäminen	33
Liite 2. Laakereiden käyttöiän määrittäminen.....	35
Liite 3. Kiilaliitoksen mitoitus.....	37
Liite 4. CAD-kuvat	40

ERITYISSANASTO

iconi	yksittäinen 2D-malli, joka tallennetaan CAM-ohjelman osakirjastoon
nestaus	iconin sijoittaminen määrätylle levyille
kulminta	profiilin kylkiin tehtävä lovi, joka mahdollistaa profiilin taittamisen
isometrinen projektio	kuvan esittämistapa, jossa kolmiulotteisesta kappaleesta nähdään kerralla kolme sivua

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on suunnitella ohutlevyjen muokkaamiseen tarkoitettu rullamuovauskone. Ennen suunnittelun aloittamista on listattu koneelta vaadittavia ominaisuuksia ja pohdittu voidaanko ne toteuttaa ja miten. Suunnittelun edetessä pohditaan eri ratkaisuvaihtoehtoja suunnittelukohteille ja valitaan niistä paras vaihtoehto. Tietyt erityistä huomiota vaativat kohteet, kuten akselihalkaisijat, mitoitetaan laskemalla niille minimihalkaisijat.

2 KONEENSUUNNITTELU YLEISESTI

2.1 Tuotekehitysprosessi

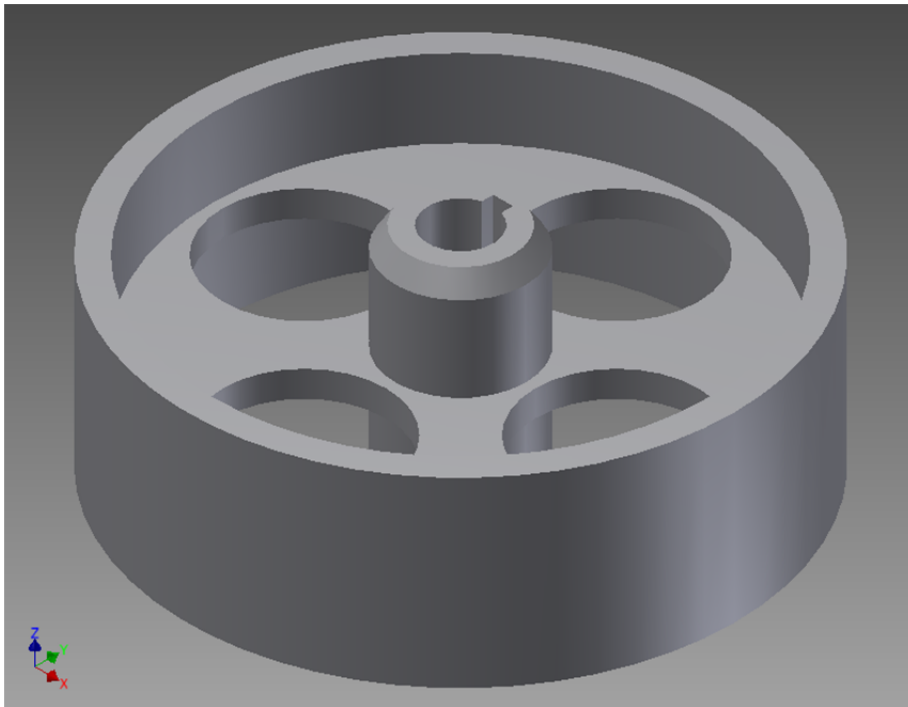
Tuotekehitysprosessin ensimmäinen vaihe on selvittää, mitkä toiminnot tuotteeseen vaaditaan, jotta se täyttää asiakkaan toiveet. Kun nämä toiminnot on määritelty, voidaan tuotteen ideointi ja luonnostelu aloittaa. Tämän jälkeen haetaan luonnoksille ratkaisuperiaatteet ja varsinainen suunnittelu voi alkaa. Suunnitteluvaiheessa suunnittelija määrittää osien geometriset mittasuhteet, liitokset, rakennemateriaalit ja valmistustavan. (Airila ym. 2010, 86.)

Koneelta vaadittavat ominaisuudet voidaan listata vaatimuslistaan. Tämä lista on luettelo, jossa on kerrottu kaikki vaatimukset ja toivomukset tuotteelle, jotka halutaan toteuttaa. Listassa on kolme luokkaa, jotka ovat kiinteät vaatimukset, vähimmäisvaatimukset ja toivomukset. (Tuomaala 1995, 80.) Tämä vaatimuslista ohjaa suunnittelua sen eri vaiheissa ja antaa vähimmäisvaatimukset sille mitä ominaisuuksia koneeseen on suunniteltava. Koneemme vaatimuslista on esitelty seuraavassa luvussa.

2.2 Mallintaminen

3D-mallintaminen on nykypäivänä olennainen osa koneensuunnittelua. Se mahdollistaa koneenosien ja kokoonpanojen suunnittelun sekä komponenttien yhteensopivuuden testaamisen jo ennen prototyyppien valmistamista. Tämä säästää aikaa ja rahaa. 3D-malleja voidaan käyttää hyväksi myös lujuuslaskennassa eri lujuuslaskentaohjelmistoilla. (Tuhola & Viitanen 2008, 13.)

3D-mallintamisella tarkoitetaan koneiden tai tuotteiden suunnittelua kolmiulotteisesti. Tällä tarkoitetaan että mallinnettavat kappaleet ja kokoonpanot näyttävät oikeilta ja saavat kaikki fysikaaliset mitat ja ominaisuudet, jotka tuotteella todellisuudessa on. Tuote suunnitellaan kolmiulotteisessa avaruudessa, joka koostuu kolmesta koordinaatiaksielista. (Tuhola & Viitanen 2008, 17.) Alla on esitetty 3D-mallinnusohjelmalla mallinnettu kuva joka sisältää koordinaatiston. (KUVA 1.)



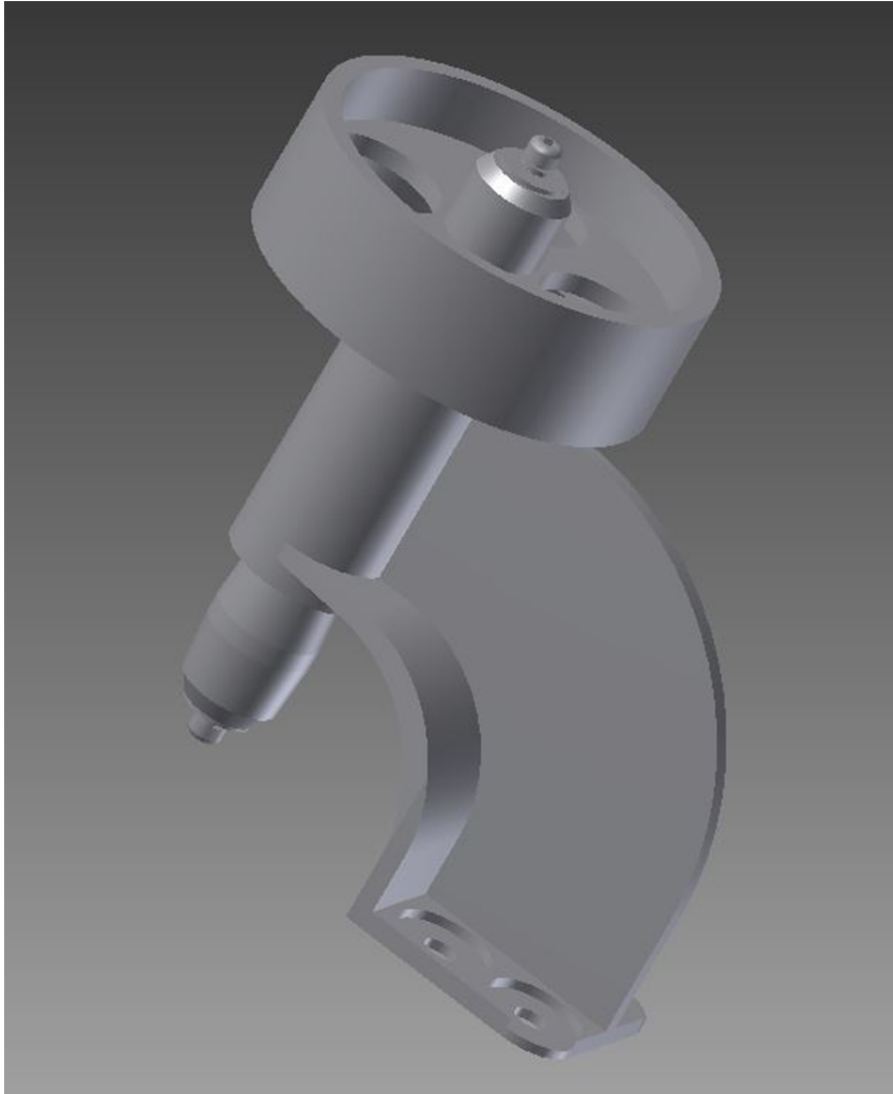
KUVA 1. 3D-malli ja koordinaatisto

2.3 Kokoonpanot 3D-ohjelmistolla

Tuholan ja Viitasen (2008, 98) mukaan mallinnettaessa kokoonpanojen luominen on se ominaisuus, jolla saadaan eniten hyötyä 3D-maailmasta. Kokoonpanot ovat hyvä tapa sovittaa osia toisiinsa jo mallinnusvaiheessa sekä testata mekanismien toimivuutta tietokoneen ruudulla prototyyppien valmistamisen sijaan. Kokoonpanoja on monia eri tyyppisiä ja ne saattavat sisältää pienempiä alikokoonpanoja. Esimerkiksi jokin yksittäinen mekanismi voi olla suuremman koneen alikokoonpano.

3D-ohjelmistoissa on mahdollista päivittää kokoonpano ilman uudelleenkaasausta, kun jonkin osan mittatietoja päivitetään. Tämä mittojen vaihtuminen saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia mekanismien toimivuudessa ja liitokset ynnä muut saatetaan joutua määrittelemään uudelleen. Kuvassa 2 on esitetty kuva kokoonpanosta 3D-ohjelmistossa.

(KUVA 2.)



KUVA 2. Kokoonpano 3D-ohjelmistolla

2.4 CAD-mallintaminen tässä opinnäytetyössä

Tässä opinnäytetyössä 3D-mallintamista on käytetty hyödyksi koneen päämittojen määrittämisessä, sekä ohjelmasta saatuja kuvia raportin esittämisen tukena. Raportissa esitellyt 3D-mallit helpottavat lukijaa ymmärtämään millaisia tuotteita koneella valmistetaan ja miten, koska valmiita tuotteita ei ole esitettäviksi valokuvina lukijalle.

Koneen koko rakenne mallinnettiin työn aikana. Mallintaminen suoritettiin tekemällä ensin alikokoonpanot jokaisesta akselistä, jonka jälkeen lopullinen kokoonpano tehtiin näitä akselien ja laakerointien alikokoonpanoja hyödyntämällä. Laakerointien kokoonpano saatiin valmiina laakerivalmistajalta.

Yrityksellä ei itsellään ole käytössä 3D-mallintamiseen soveltuvaa ohjelmaa, eikä se tämänkaltaisessa käytössä olisikaan kustannustehokas vaihtoehto. Yrityksen käytössä on SiCAM-ohjelmisto, johon sisältyy 2D-piirtotyökalut, osakirjasto ja SiCUT-ohjelmisto iconien nestäamista varten.

Varsinaisesti osien valmistamisen apuna tässä työssä käytetään 2D-malleja, jotka käännetään laserleikkurille sopiviksi käskyiksi edellä mainitulla CAM-ohjelmalla. Näitä laserleikkurilla valmistettuja levyrakenteita käytetään esimerkiksi akseleiden laakeripesien liittämiseksi koneen perusrunkoon.

3 KONEELTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET

Koneelle asetettiin ennen suunnittelun aloittamista tiettyjä vaatimuksia. Ominaisuudet pyritään toteuttamaan, mikäli se on käytettävissä olevan ajan ja rahan kannalta mahdollista. Nämä vaatimukset on listattu alla.

3.1 Ohutlevyn taitto muotoon

Lähtökohtana suunnittelulle on toteuttaa levyn taitto U-muotoon viiden rullan avulla, joista neljä ensimmäistä muovaavat levyä asteittain. Viides rulla on 90 asteen kulmassa levyn alkuasentoon nähden ja toimii vain ohjaavana rullana, eikä enää muokkaa levyä.

3.2 Säädettyvyys eri levyisille profiileille

Tarkoituksena on toteuttaa koneen rakenne niin, että profiilin leveyttä voidaan muuttaa vaivattomasti ja pienetkin sarjat on siten kannattavaa valmistaa. Koneeseen on siis suunniteltava helposti vaihdettavia osia sekä niille toimivat kiinnitykset.

3.3 Levyn katkaisu määrämittaan

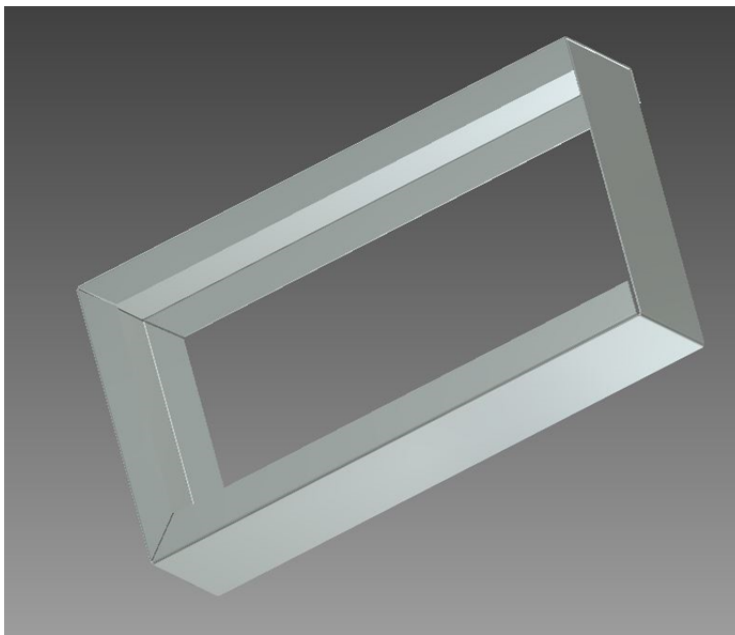
Tarkoituksena olisi toteuttaa levyn katkaisu määrämittaan etäisyysanturia käyttämällä.

3.4 Suunnittelun aloitus

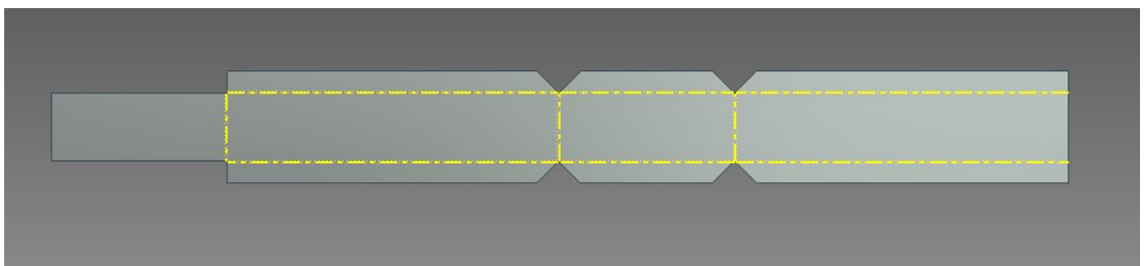
Näiden edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella koneen suunnittelu voitiin aloittaa. Ennen ensimmäisenkään luonnoksen piirtämistä tutustuimme vastaavanlaisen koneen rakenteeseen ja tutkimme tarkkaan, kuinka siinä on toteutettu vetotapa ja akselien kiinnitykset sekä laakerointi. Kone valokuvattiin perusteellisesti. Tämän jälkeen prosessia jatkettiin luonnostelemalla paperille muovaavia rullia ja niiden kiinnitystapoja.

4 KONEELLA VALMISTETTAVAT TUOTTEET

Suunnittelemlamme koneella on tarkoitus valmistaa suorakulmion muotoisia suodatinrunkoja tilaajaryitykselle, joka valmistaa aihioista ilmansuodattimia. Rullamuovauskoneella valmistettuun U-profiiliin tehdään kulminnat, jonka jälkeen profiili kantataan lopulliseen muotoonsa. Alla on esitetty suuntaa antavat 3D-mallit koneella valmistettavasta tuotteesta ja lopullisesta suodatinrungosta ilman suodatinmateriaalia. (KUVA 3; KUVA 4)



KUVA 3. Suodatinrunko

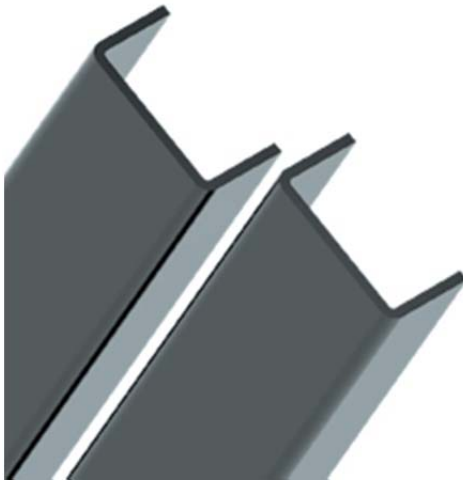


KUVA 4. Suodatinrungon levityskuva

5 RULLAMUOVAUKSEN TEORIAA

5.1 Rullamuovaus yleisesti

Rullamuovauksella tarkoitetaan metallilevyn muokkaamista profiiliksi peräkkäisten rullaparien avulla. Aihiona voidaan käyttää levynauhaa tai levyä. Muovauksessa käytetään usein montaa peräkkäistä rullaa, jotta muovaustapahtuma saadaan toteutettua vaiheittain hallitusti, eikä levyyn synny vaurioita. Mahdollisia vaurioita ovat levyn rypyttyminen ja repeäminen. Esimerkkejä rullamuovauksella valmistetuista tuotteista ovat kattopellit ja erilaiset profiilipalkit. Alla on esitetty kuva U-profiilista. (KUVA 5)



KUVA 5. U-Profiili (<http://www.ruukki.fi>)

Erilaisia palkkiprofiileita on useita ja avoimista profiileista voidaan valmistaa umpinaisia hitsaamalla. Alla on esitetty kuva hitsaamalla valmistetusta RHS-palkista. (KUVA 6)



KUVA 6. RHS-Putki (<http://www.romukauppa.fi>)

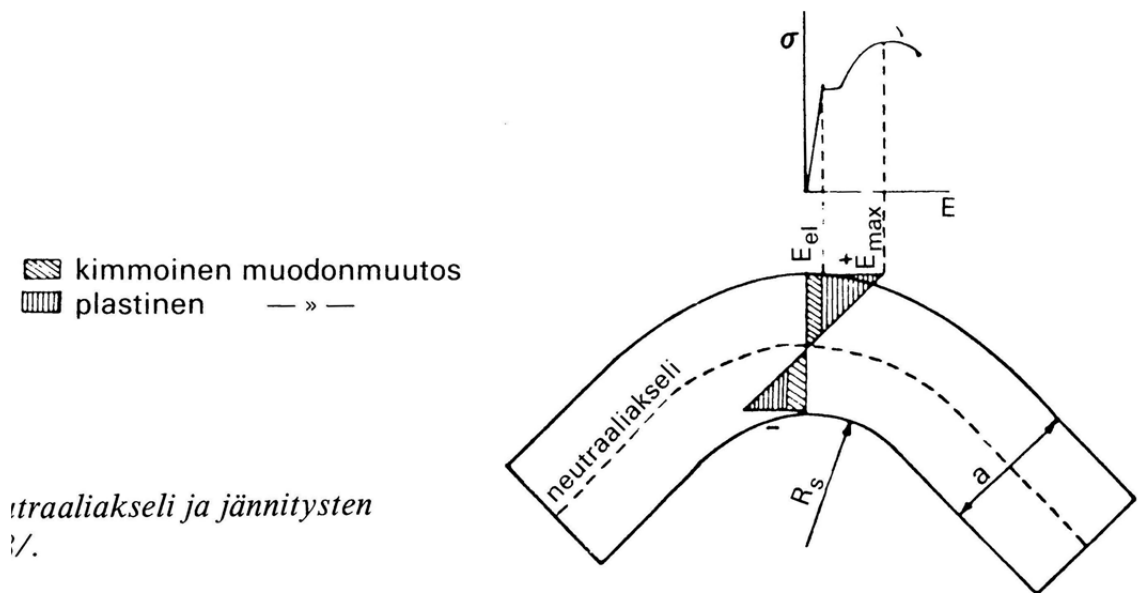
5.2 Työskentelymetelmänä

Rullamuovaus soveltuu työskentelymenetelmänä erityisesti sarjatuotantoon tarkoin toleranssein. Rullamuovauslinjaa on mahdollista täydentää esimerkiksi lävistys- ja taivutuslaittein, jolloin monimutkaisia kappaleita saadaan valmistettua huomattavan nopeasti, jopa nopeudella 100...200 m/min (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki & Sihvonen 2007, 274).

5.3 Ohutlevyn taivutus teoriassa

5.3.1 Neutraaliakseli

Rullamuovaus kuuluu taivuttaviin levynmuovaustapoihin. Taivutusta suunnitellessa on otettava huomioon kaksi olennaista perustekijää. Näitä ovat ulkopinnan murtuminen ja taivutetun osuuden takaisinjousto. Taivutuksessa ohutlevyaihion ulkoreunassa vallitsee vetojännitystila ja sisäreunassa puristusjännitystila. Siksi on selvää että aihiossa tapahtuu tietyssä kohdassa jännitysten vaihtuminen. Tätä linjaa kutsutaan neutraaliakseliksi ja sen kohdalla jännitysten arvo on nolla (Ihalainen ym. 2007, 236). Alla on esitetty kuvio jännitysten muuttumisesta ja neutraaliakselista (KUVIO 1.).

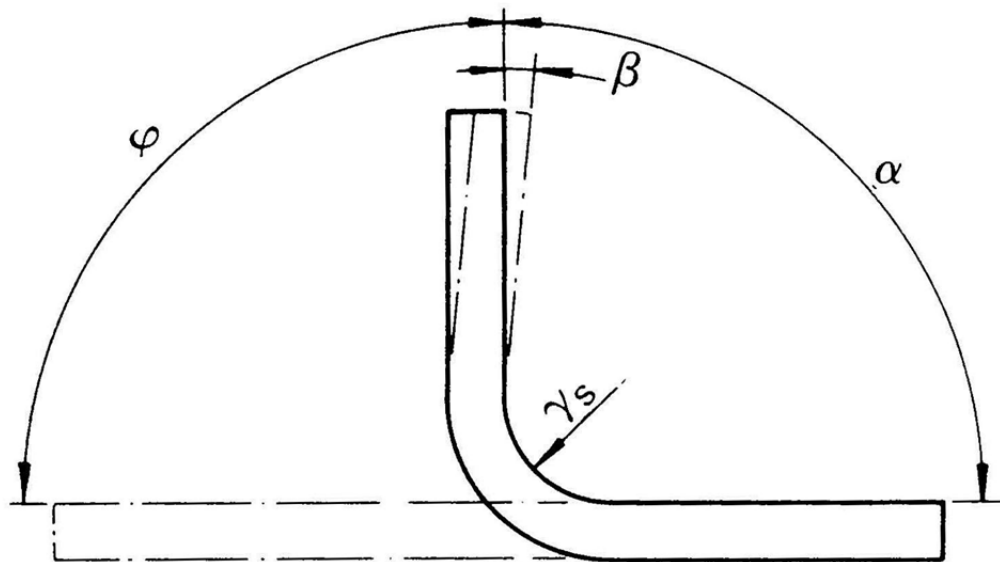


KUVIO 1. Neutraaliakseli ja jännitysten muuttuminen (Ihalainen ym. 2007)

Neutraaliakseli ei välttämättä sijaitse aihion geometrisella keskiviivalla, vaan on yleensä tietyn matkaa aihion sisäreunan puolella. Se johtuu veto- ja puristusjännitysten aiheuttamista erityyppisistä muodonmuutoksista. Tämä on merkityksellistä esimerkiksi taivutettavan aihion pituuden laskennassa (Ihalainen ym. 2007, 237).

5.3.2 Takaisinjousto

Levyä taivuttaessa neutraaliakselin kohdalle, plastisesti muodostuneiden veto- ja puristusjännitysalueiden väliin muodostuu kapea alue, jossa tapahtuu vain elastista muodonmuutosta. Tämän alueen vuoksi sisäistä voimatasapainoa ei saavutetakaan ulkoisen voiman poistuttua, jolloin levyn ulkopinnoilla on saavutettu jännityksetön tila. Elastisen alueen sisäiset jännitykset pyrkivät palauttamaan kappaleen alkuperäiseen muotoonsa. Elastisen alueen ympärille plastisesti muodostuneet alueet vastustavat tätä pyrkimystä. Lopullinen sisäinen voimatasapaino saavutetaankin vasta, kun tietyn suuruinen muodon palautuminen eli takaisinjousto, on tapahtunut (Ihalainen ym. 2007, 237). Alla on esitetty kuvio takaisinjoustokulman määrittelystä (KUVIO 2.).



γ_s sisätaivutussäde
 α taivutuskulma
 β takaisinjoustokulma
 φ kaarikulma

KUVIO 2. Takaisinjoustokulman määrittely (Ihalainen ym. 2007)

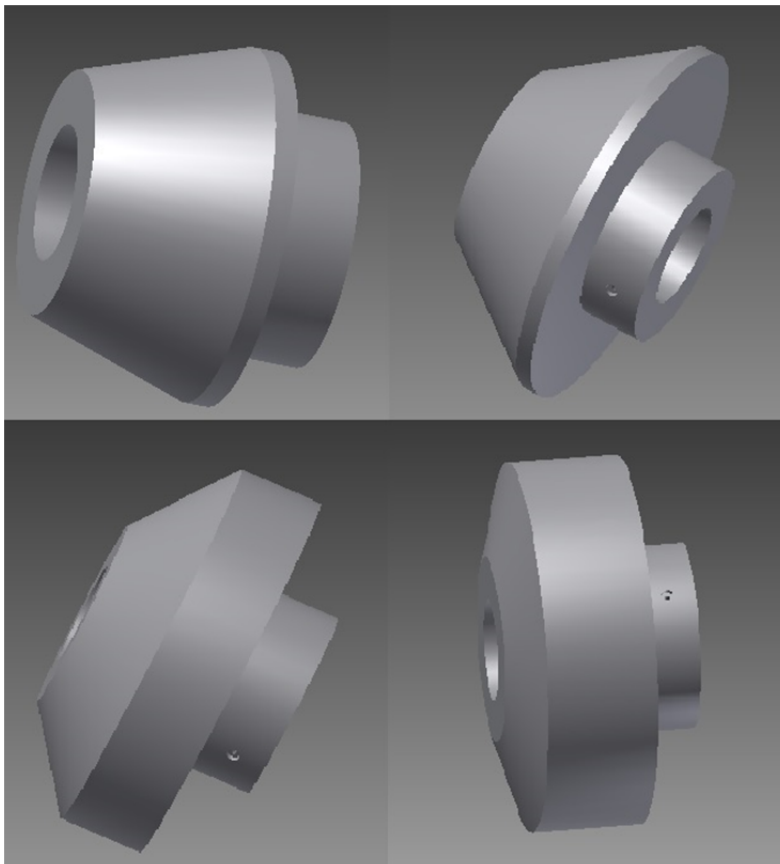
Takaisinjouston suuruus riippuu taivutettavan levyn materiaalista. Esimerkiksi ruostumattomilla teräksillä takaisinjoustot ovat rakenneteräksiä huomattavasti suuremmat. Takaisinjouston lisäksi levyssä tapahtuu ohenemista, joka on riippuvainen taivutussäteestä ja levyn suhteellisesta leveydestä. Nämä edellä mainitut taivuttamiseen vaikuttavat tekijät, mainitsemattomien ohella, aiheuttavat varsinkin vaativissa taivutuksissa monenlaisia ongelmia (Ihalainen ym. 2007, 237).

6 MUOVAAVIEN RULLIEN SUUNNITTELU

6.1 Rullien muodon suunnittelu

Suunnittelussa on lähdetty siitä oletuksesta, että koneessa on peräkkäisiä akseleita, jotka laakeroidaan molemmista päistä. Kukin akseli muodostuu perusakselista ja erillisestä levylevyyden mukaan vaihdettavasta keskiosasta, sekä muovaamisen toteuttavista päätyrullista. Päätyrullia suunnitellessa on lähdetty siitä että muovaavia rullia on neljä ja viides rulla voi olla pelkkä laakeroitu ohjaava rulla joka pitää valmiin U-profiilin oikeassa asennossa katkaisua varten.

Muovaavien rullien asteluku vaakatasoon nähden kasvaa vaiheittain nollasta yhdeksäänkymmeneen asteeseen. Suunnittelussa päätettiin tehdä rullat jakamalla suora kulma tasan neljään osaan eli 18, 36, 54 ja 72 astetta. Alla on esitetty kuvat suunnittelun alkuvaiheessa mallinnetuista rullista (KUVA 7). Suunnittelun edetessä piirustuksia muokataan tarvittaessa, joka on helppo toteuttaa työssä käytetyllä CAD-ohjelmalla.



KUVA 7. Muovaavat rullat CAD-malleina

Kullakin akselilla on kaksi muovaavaa rullaa sijoitettuna akselin päihin symmetrisesti, joka mahdollistaa tarvittavan symmetrisen muodon toteuttamisen.

Rullien muovaavan osan jatkeeksi on suunniteltu eräänlainen kaulus rullan kiinnitystä varten. Kunkin rullan kaulukseen koneistetaan reikä pidätinruuvia varten.

6.2 Rullien materiaalivalinta ja liitokset akselin kanssa

Akselin ja rullien välinen liitos toteutetaan muotosulkeisella liitoksella akseliin koneistetun uran ja kiilan avulla. Tällöin voidaan laskea, akselin, navan ja kiilan siirtämät vääntömomentit (Airila ym. 2010, 383).

Koneemme muovaaville rullille ei ole asetettu erityisvaatimuksia, joten materiaalina käytetään S355-rakenneterästä. Se on materiaalina edullinen, hitsattava ja koneistettava (Airila ym. 2010, 323).

7 PROFILILEVEYDEN SÄÄDÖN SUUNNITTELU

Yksi koneelta vaadittavista ominaisuuksista on, että sillä pystyy valmistamaan eri levyisiä profiileita ja vaihtamaan levyn leveyttä vaivattomasti. Levyn leveyden helpolla vaihtamisella haetaan joustavuutta tuotantoon ja yritetään mahdollistaa kustannustehokkaasti pienetkin sarjat.

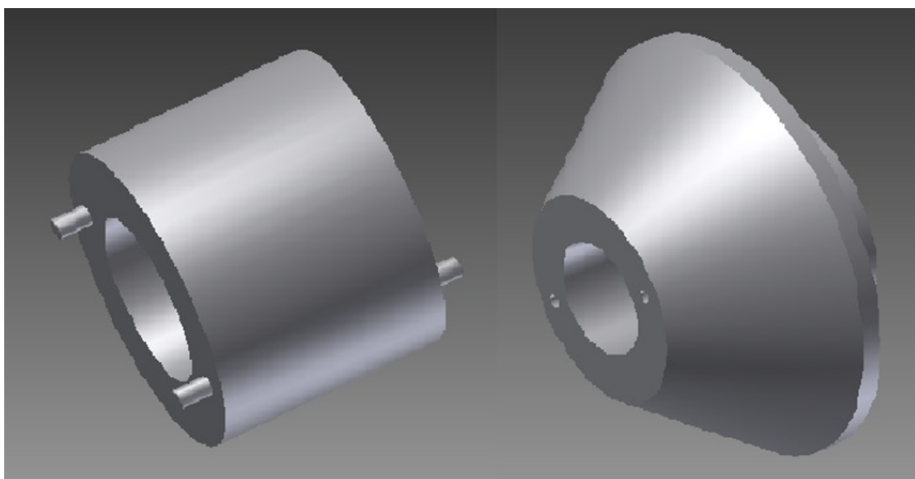
7.1 Keskirulla

Koneen muovaavien rullien väliin valmistetaan eri levyisiä rullia, kunkin koneella valmistettavan profiilileveyden mukaan. Keskirullan leveys vaikuttaa koko akselilla olevan rullayhdistelmän pituuteen, jolloin suunnittelussa on otettava huomioon, että akselin kokonaispituus ja rullien kiinnityksen mahdollistava ura on riittävän pitkä kaikille rullayhdistelmille. Mahdollista on myös että koneessa käytetään montaa erimittaista akselia, mutta lähtökohtana suunnittelussa on käytetty yhden mittaista akselia säätövaralla.

7.1.1 Keskirullan kiinnitys akselille

Keskirullan kiinnitykselle ideoitin aluksi kaksi erilaista kiinnitystapaa akselille. Vaatimuksena rullan kiinnitykselle on sileän ulkopinnan mahdollistava kiinnitys. Näin valmiiseen tuotteeseen ei synny turhia jälkiä työstövaiheessa.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa keskirulla kiinnitetään säteissuunnassa muovaaviin rulliin tapeilla, jolloin se ei tarvitse erillistä säteissuuntaista kiinnitystä akselille. Kuvassa 8 on esitetty esimerkkikuva rullien säteittäisestä kiinnityksestä toisiinsa tapeilla (KUVA 8.).



KUVA 8. Keskirullan kiinnitystapa 1

Toisessa vaihtoehdossa keskirullan kiinnitys toteutetaan rullan sisäpuolelle koneistettavan aksiaalisuuntaisen kiilauran ja kiilan avulla. Tässä vaihtoehdossa akselilla olevan kiilauran tulee olla koko akselin pituinen.

Käytettäväksi vaihtoehdoksi valikoitui lopulta jälkimmäinen kiilaliitos, koska akselille koneistetaan joka tapauksessa kiilaura muovaavien rullien kiinnitystä varten. Tämän lisäksi varsinkin vetävällä akselilla keskirullaan kohdistuu momentteja, jolloin kiilaliitos on järkevä kiinnitystapa. Kiilaliitos on mitoitettu liitteessä 3.

7.2 Akselien suunnittelu

Akselien suunnittelussa on käytetty lähtöarvoina pituutena 400 mm ja akselin halkaisijana 50 mm. Koneemme akseleille ei ole asetettu erityisvaatimuksia, joten materiaalina käytetään S355-rakenneterästä. Se on materiaalina edullinen, hitsattava ja koneistettava. (Airila ym. 2010, 323)

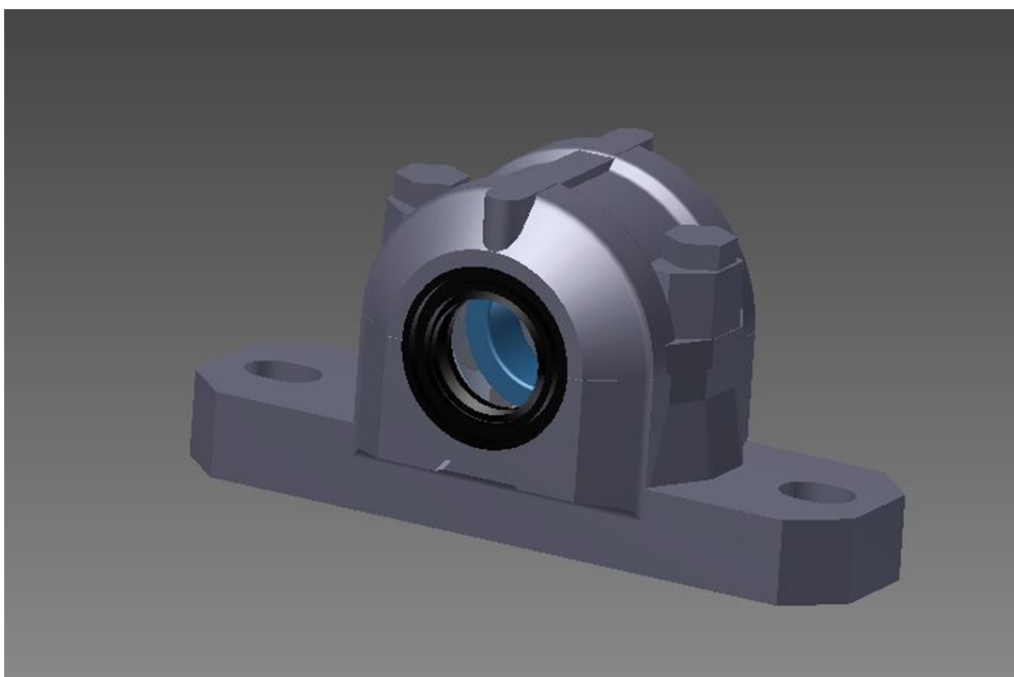
Akseliin koneistetaan pitkittäissuuntainen ura, johon muovaavat rullat kiinnitetään muotosulkeisella liitoksella. Tämä liittää rullat akseliin säteittäissuunnassa ja tappien kiristyksestä riippuen jonkin verran myös aksiaalisuunnassa. Tämän uran pituus tulee olla riittävä, jotta kaikki rullayhdistelmät mahtuvat kiinnittymään uraan. Uran pituus valitaan suurimman valmistettavan profiilin mukaan riittävän pitkäksi. Kiilauran lisäksi akseleille koneistetaan poikittaiset urat pidätinrenkaille, jotka pitävät akselin paikallaan poikittaissuunnassa. Akselin vedon puoleiseen pätyyn tulee olake, joka rajoittaa akselin liikettä poikittaissuunnassa.

Vääntöä siirtävän akselin laskennalliseksi minimihalkaisijaksi Söderbergin laskentamenetelmällä saatiin 20 millimetriä. Laskennassa on otettu huomioon akselin kiilanura sekä pidätinrenkaiden urat. Lähtöarvoina laskennassa on käytetty moottorin nimellisyörintänopeutta 650 kierrosta minuutissa ja nimellisvääntömomenttia 49 Nm. Laskenta on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

Lopulliseksi akselinhalkaisijaksi valitsimme 30 millimetriä. Materiaalikustannukset näillä akseleilla eivät ole ratkaisevan paljon suuremmat ja varmuusluku on tällöin vähintäänkin riittävä.

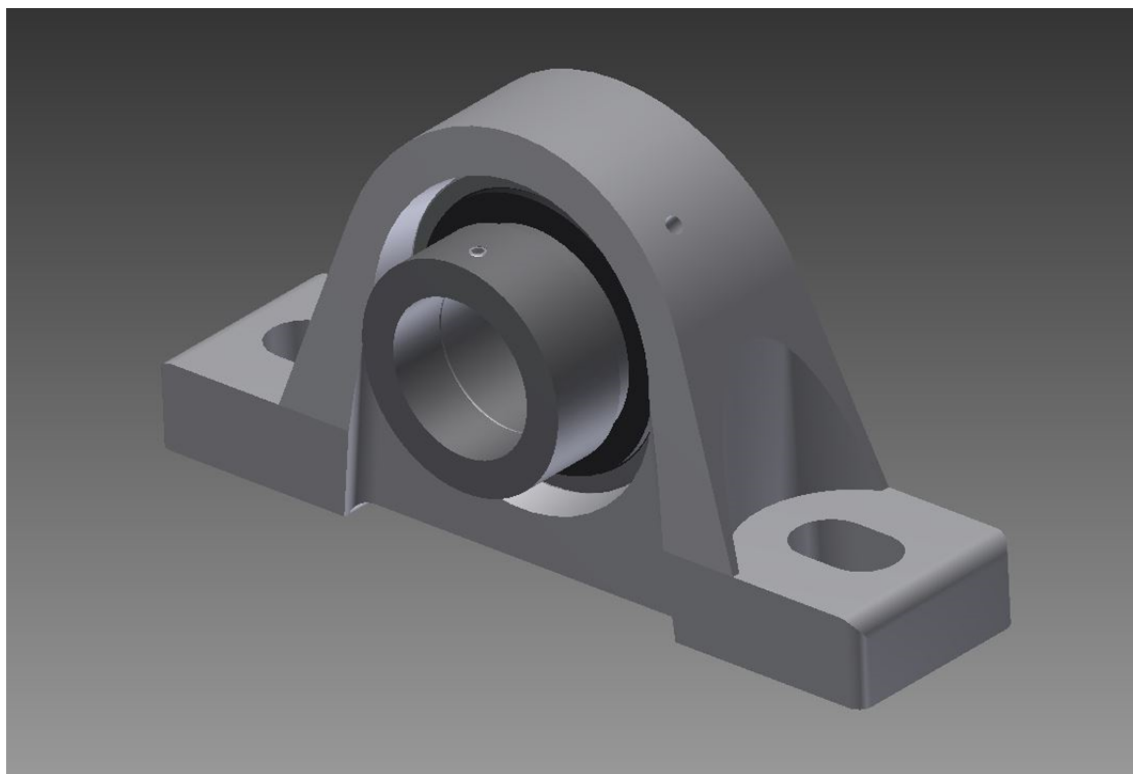
7.2.1 Akselien laakerointi

Akselien laakeroinnissa käytetään valmista laakeripesää, jolla saadaan helposti toteutettua akselien kiinnitys koneen runkoon. Laakeripesän mukana toimitetaan sille sopiva laakeri. Laakeroinnin suunnittelussa vaihtoehtona oli kaksi erilaista laakerointia. Ensimmäisessä vaihtoehdossa laakeripesä on malliltaan päältä purettava. Tällöin levylevyettä muuttaessa pelkkä laakeri tulisi vetää ulos akselilta ja itse laakeripesä saisi jäädä paikalleen. Tämä purettavuus todettiin lopulta turhaksi ominaisuudeksi koneemme rakenteen vuoksi. Alla on esitetty kuva purettavasta laakeroinnista (KUVA 9.).



KUVA 9. Purettava laakerointi (Schaeffler AG, 2014)

Lopulliseksi laakeroinniksi valikoitui lopulta kiinteä laakeripesä, lähinnä yksinkertaisuutensa vuoksi. Koneesta joudutaan joka tapauksessa irrottamaan levyleveyttä vaihtaessa useita pultteja ja pidätinrenkaita, joten kiinteä laakeri ei tuota juurikaan lisätyötä. Laakerissa on itsessään lukituskaulus, jossa on upotettu pidätinruuvi. Alla on esitetty kuva kiinteästä laakeroinnista (KUVA 10.).



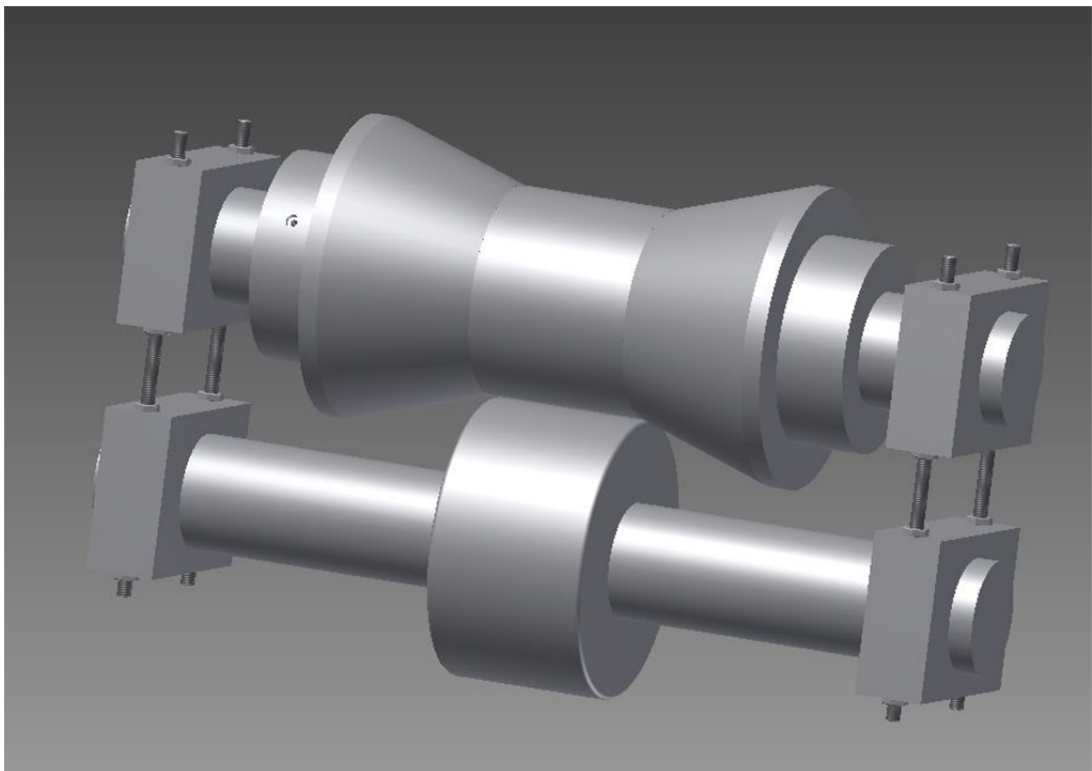
KUVA 10. Kiinteä laakerointi (Schaeffler AG, 2014)

Laakerivalmistajien luetteloista on saatavilla valmiit 3D-mallit lähes kaikista luettelon laakereista ja laakeripesistä. Tämä helpottaa suunnittelijan työtä, kun laakereita ei tarvitse erikseen mallintaa. Luettelosta on suoraan valittavissa CAD-ohjelmisto, johon malli olisi tarkoitus syöttää. Luettelosta ladattu pakattu tiedosto sisälsi valmiin kokoonpanon laakeripesästä ja itse laakerista. Tässä työssä on käytetty apuna saksalaisen Schaeffler AG:n laakeriluetteloa. Heidän tuotteidensa maahantuojana toimii Tampereen alueella Vuorenmaa Oy.

Laakereille tehdyt laskelmat ja nimellisen käyttöiän määrittäminen löytyvät liitteestä 2. Laskelmat on tehty Matchcad-laskentaohjelmistolla, kuten edellä mainittu akselin minimihalkaisijan laskenta.

8 TUKEVAN AKSELIN SUUNNITTELU

Jotta muovattava ohutlevy saadaan pysymään kiinni muovaavassa akselissa, on koneeseen toteutettava vastinpari jokaiselle muovaavalle akselille. Tämän vastinakselin tarkoitus on kiristää ohutlevy kiinni vetävään rullaan ja pitää levyä kiinni pystysuunnassa jotta muovaaminen voisi tapahtua. Alla on esitetty periaatteellinen kuva kahdesta akselista ja niiden laakerointien kiinnityksestä toisiinsa. (KUVA 11.). Kuva selventää lukijalle koneen perusrakennetta, eikä ole tarkka kuvaus lopullisesta rakenteesta.



KUVA 11. Muovaava ja tukeva akseli

8.1 Tukeva akseli

Akselina päätettiin käyttää vahvuudeltaan vastaavaa akselia kuin muovaavissa akseleissa. Tällöin pystytään käyttämään vastaavia laakereita kaikissa akseleissa, joka helpottaa kiinnityksien suunnittelua ja koneen kunnossapitoa.

8.2 Tukevat rullat

Tukevan rullan tulee olla halkaisijaltaan riittävä, jotta muovaavan rullan taittama ohutlevy mahtuu akselin ja rullan väliin jäävään tilaan. Halkaisijaksi valitaan tilaajayrityksen tuotteiden perusteella riittävän suuri halkaisija, jolloin akselien etäisyyttä pystysuunnassa toisiinsa nähden ei tarvitse muuttaa vaikka rullien leveys muuttuu. Tukevia rullia tulee olla yhtä montaa eri leveyttä kuin muovaavankin akselin keskirullia, jotta muovaaminen saadaan toteutettua. Leveys muovaavan keskirullan ja tukevan rullan välillä tulee olla lähes sama.

9 AKSELEIDEN VÄLISET LIITOKSET JA ETÄISYSSÄÄTÖ

9.1 Akselin vapaa puoli

Laakeripesät kiinnitetään kiinnitysrei'istään koneen apurunkoon kierretangon ja muttereiden liitoksella. Tämä apurunko on valmistettu rei'itetystä levystä ja siihen hitsatuista tukirakenteista. Suuntaa antava kuva apurungosta ja koneen rakenteesta on esitetty alla (KUVA 12.).

9.2 Akselin vedon puoli

Moottorin puoleiset laakeroinnit kiinnitetään myös koneen apurunkoon samaan tapaan kuin vapaa puoli. Sivuttaissuunnassa laakeripesien ovaalinmuotoiset kiinnitysreiät sallivat pienen sivuttaissuuntaisen liikkeen kiinnitystilanteessa. Kiinnitys toteutetaan kierretangon ja muttereiden avulla kuten vapaan puolen kiinnityskin. Kierretankojen avulla pystytään säätämään akseleiden etäisyys toisistaan ja kiristämään ohutlevy niiden välille. Akseleiden etäisyyden säätö mahdollistaa eri levyvahvuuksien käytön, vaikkei se tällä koneella valmistettavien tuotteiden kannalta olekaan oleellista. Keskirullien riittävän suuri halkaisija mahdollistaa rullien ja levyn välisen paineen säätämisen pisteeseen, jossa kitka on riittävä vedon toteuttamiseen.

10 AKSELIEN VEDON SUUNNITTELU

10.1 Pääpiirteet

Jo suunnittelun alkuvaiheessa päätettiin että vetävien akseleiden voimanvälitys toteutetaan sähkömoottorilla ja ketju- tai hihnavälityksellä. Veto vaaditaan vähintäänkin ensimmäiselle ja viimeiselle rullalle, jottei ohutlevyyn synny vaurioita muovausprosessin aikana.

Jos levyn veto tapahtuisi pelkästään ensimmäisellä rullalla, levyssä saattaisi tapahtua rypyttymistä, kun ilman vetoa olevat rullat aiheuttaisivat levyyn liian suuren vastustavan voiman. Koneella muovattavat levyt ovat levypaksuudeltaan noin 0,5 mm, eli verrattain ohuita, joten vaurioita voi syntyä suhteellisen pienilläkin voimilla.

Lopulliseksi vetotavaksi valittiin ketjuvälitys moottorilta akseleille, koska näin pystytään käyttämään hyväksi yrityksen tiloista löytyviä käytettyjä osia. Ketjuvälitys on hyvä valinta tämän koneen vedon toteuttamiseen, koska siinä ei esiinny luistoa ja vaatimukset asennustarkkuudelle ovat pienemmät kuin hammasvälitykselle. Tämän lisäksi uusia standardiosia ketjuvälityksiin on helposti saatavilla (Airila ym. 2010, 569-570).

10.2 Rullien pyörimisnopeus

Rullille saadaan haluttu tarpeeksi hidas pyörimisnopeus käyttämällä sähkömoottorin yhteydessä taajuusmuuttajaa, jolla voidaan säätää moottorille haluttu pyörimisnopeus. Tämän lisäksi vedolle valitaan sopiva välitys hammasrattaiden avulla.

10.3 Rullien halkaisijat

Koneen vetävät akselit valmistetaan siten, että loppupään rullat ovat halkaisijaltaan alkupään rullia hieman suuremmat. Tämä estää ohutlevyn rypyttymisen kun kaikilla rullilla on sama pyörimisnopeus, mutta loppupään rullissa kehänopeus on suurempi, johtuen suuremmasta halkaisijasta. Halkaisijoiden erot ovat suuruusluokaltaan millimetrien kymmenesosia.

11 KONEEN RUNKORAKENNE

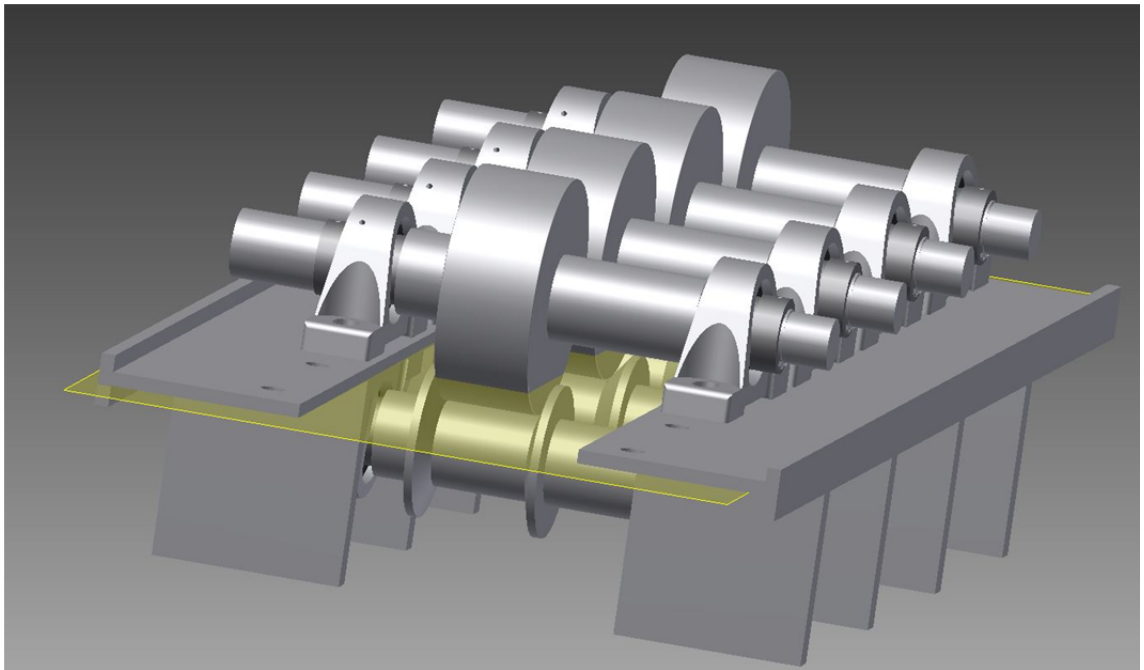
Koneen perusrunkona käytetään vanhaa yrityksen tiloista löytyvää runkoa, johon uudet koneenosat liitetään hitsaamalla ja pulttiliitoksien. Koneen akselit kiinnitetään laakeroinneistaan erikseen laserleikkaamalla valmistettuihin kiinnityslevyihin molemmista päistään. Tämä niin sanottu apurunko kiinnitetään koneen perusrunkoon pulttiliitoksilla.

Edellä mainittuja kiinnityslevyjä jäykistetään hitsaamalla pitkiin sivuihin ohuet koh-tisuorat levyt. Tällöin kunkin kiinnityslevyn rakenne muistuttaa H-profiilia, joka on huomattavasti jäykempi rakenne kuin pelkkä levy. Jäykisteiden ansiosta voidaan raken-teessa käyttää pienempää ainevahvuutta ja levyjen valmistaminen pienitehoisellakin laserleikkurilla on mahdollista.

12 ONGELMATILANTEET SUUNNITTELUN AIKANA

12.1 Tukevan akselin purettavuus

Ongelmaksi suunnittelun aikana tuli tukevan akselin rullien purkaminen, niin että koneen runkorakenne ei ole tiellä purkaessa. Muovaava akseli mahdollistaa purkamaan ilman vedottoman puolen rungon purkamista, mutta koska tukeva keskirulla on halkaisijaltaan niin suuri, ei se mahdu tulemaan pois akselilta ilman apurungon irrottamista päärungosta. Ongelmaa on havainnollistettu alla olevassa kuvassa (KUVA 12.). Siinä taso leikkaa tukevan akselin keskirullan, muttei muovaavan akselin korkeinta muovaavaa rullaa. Kuvassa näkyvät akselit olisi tarkoitus purkaa oikealta puolelta, jossa akselin päässä ei ole olaketta, vaan pelkkä pidätinrenkas.



KUVA 12. Kone ja havainnollistava taso

Ongelman ratkaisuun löytyi kaksi eri tapaa. Ensimmäisessä tavassa koko vedottoman puolen apurungon purkaminen yhtenä pakettina, jossa avataan pidätinrenkaat ja apurungon ja päärungon väliset pulttiliitokset. Toisessa tavassa muovaavat akselit puretaan vedottomasta päästä apurungon ollessa paikallaan ja tukevat akselit puretaan vedon puolelta. Tämä mahdollistaa tukevien akseleiden sijoittaminen yläpuolelle ja vedon toteuttaminen pelkästään muovaavilla akseleilla.

Koko koneen rakenne suunniteltiin alussa juuri päinvastoin eli muovaava akseli tukevan yläpuolelle, mutta itse muovaustapahtuman kannalta tällä ei ole merkitystä, joten purkamisen helpottamiseksi rakennetta käännetään 180 astetta.

12.2 Viimeisen akseliparin toteutus

Ongelmaksi viimeisen akselin kohdalla tuli muovaavien rullien toteuttaminen. Suunnittelun aikana huomattiin, ettei niitä voida toteuttaa samaan tapaan kuin edellisillä akseleilla. Aiempien rullien asteluku vaakatasoon nähden on kasvanut tasaisella jaolla. Viimeisen rullan muovaavan pinnan asteluku tulisi olla 90 astetta, tai jopa hieman enemmän, mikäli otetaan huomioon levyn takaisinjousto.

Viimeisen akselin muovausta ei voida toteuttaa samalla tavalla kuin edellisiä kahdesta syystä. Ensinnäkin rullasta ei pyöriessään muodostu kartiomaista pintaa, joka pystyy pakottamaan ohutlevyn väliinsä, vaan aiempien akselien eteenpäin työntämä puolivalmis profiili törmää viimeisen akselin rulliin. Toinen syy on rullien levyyn aiheuttamat naarmut. Mikäli levy saataisiin pakotettua viimeisen 90 asteen kulmassa olevan rullan sisäpuolelle, pyörimisliike tekisi pyörteisen naarmutusjäljen profiilin ulkopintaan.

Tämä ongelma ratkaistiin suunnittelemalla viimeisen akselin muovaavat rullat siten, että itse muovaavien rullien pyörimisakseli on 90 asteen kulmassa aiempiin akseleihin nähden. Tällöin puolivalmis profiili työntyy vasten pyörivän rullan lieriöpintaa, joka tekee viimeisen muokkauksen.

13 POHDINTA

Opinnäytetyön alussa on laadittu koneelle vaatimuslista. Tässä vaatimuslistassa mainitut asiat saatiin suunniteltua yhtä lukuun ottamatta. Levyn katkaisu määrämittaan päätettiin suosiolla jättää tässä vaiheessa suunnittelematta, koska aikaa oli rajallisesti, eikä levyn katkaisua ole mahdollista testata ennen kuin kone on kokoonpantu.

Koneen kokoonpano aloitetaan todennäköisesti kesän aikana, jolloin tässä työssä esiteltyjä laskelmia ja koneenpiirustuksia tullaan käyttämään hyväksi. Kokoonpanon edetessä suunnitelmia tullaan todennäköisesti muokkaamaan, kun huomataan että jokin ratkaisu ei toimi halutulla tavalla. Työssä esiteltyt laskelmat antavat hyvän pohjan koneen rakenteelle ja varmistavat sen että rakenne kestää, eivätkä esimerkiksi akselit ja laakeroinnit ole liian heikkoja.

Kaiken kaikkiaan työ onnistui melko hyvin, vaikkakin ongelmia ilmeni suunnittelun edetessä. Nämä ongelmat olivat opettavaisia ja pakottivat luovaan suunnitteluun, jossa tehdään asiat eri tavalla kuin oli alun perin ajateltu. Kokonaisuutena tämän koneen suunnitteluprosessi oli yksi opettavaisimmista kokonaisuuksista opiskeluaikanani.

LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola M., Martikka, H., Miettinen J., Niemi E., Ranta A., Rinkinen J., Salonen P., Verho A., Vilenius M. & Välimaa V. 2010. Koneenosien suunnittelu. 4.-5. painos. Helsinki: WSOYpro Oy.

Tuomaala, J. 1995. Luova Koneensuunnittelu. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka ky.

Tuhola, E. & Viitanen K. 2008. 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen P. 2007. Valmistustekniikka. 12. painos. Helsinki: Otatieto.

Oy Laakeri-Center AB. HFB-Laakeriluettelo. Luettu 24.2.2015.

http://www.laakeri-center.fi/assets/files/HFB_Katalog_03_2011_gesamt_engliT.pdf

Schaeffler AG. 2014. Laakeriluettelo. Luettu 24.2.2015.

http://medias.schaeffler.com/medias/en!hp.ec.br.pr/LASE*LASE30-N?clrsb=1

LIITTEET

Liite 1. Akselin minimihalkaisijan määrittäminen

1(2)

Akselin mitoitus

Lähtöarvot:

Nimellinen pyörimisnopeus:

$$n_{\text{nim}} := 650 \frac{1}{\text{min}}$$

Varmuusluku:

$$n := 1.5$$

Nimellisvääntömomentti:

$$M_{\text{nim}} := 49 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Maksimivääntömomentti:

$$M_{\text{vmax}} := 1.5 \cdot M_{\text{nim}}$$

$$M_{\text{vmax}} = 73.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Akselin mitoitus

Akselimateriaalina on s355(Fe 50), jolle:

Myötöraja:

$$R_e := 355 \text{ MPa}$$

Taivutusvaihtolujuus Smithin piirros KOS s. 773, kuva 1b:

$$\sigma_{\text{tw}} := 260 \text{ MPa}$$

Vääntömomentti jaetaan puoliksi vakio-osaan ja tykyttävään osaan:

$$M_{\text{vm}} := \frac{1}{2} \cdot M_{\text{vmax}}$$

$$M_{\text{vm}} = 36.75 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{\text{va}} := \frac{1}{2} \cdot M_{\text{vmax}}$$

$$M_{\text{va}} = 36.75 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(jatkuu)

Lovenvaikutusluku:

Ensimmäinen lovenvaikutusluku navan kiilaliitoksen mukaan,
toinen kiilanuran mukaan

$$K_{fv} := (1.55 \quad 2.3)^T$$

Ratkaistaan akselin halkaisija Söderbergin laskentamenetelmällä, kun akselissa on pelkkää vääntöä:

$$d_{\min} := \sqrt[3]{\frac{(32 \cdot n)}{\pi} \cdot \left(K_{fv} \cdot \frac{M_{va}}{\sigma_{tw}} + \frac{M_{vm}}{R_e} \right)}$$

$$d_{\min}^T = (17.019 \quad 18.709) \cdot \text{mm}$$

Valitaan standardin mukaiset halkaisijat:

$$d := (18 \quad 20)$$

Minimihalkaisija akselille on 20 mm

Liite 2. Laakereiden käyttöiän määrittäminen

1(2)

Laakerin käyttöiän määrittäminen:

Kaavat ja taulukot, joihin laskennassa viitataan, löytyvät kirjasta **Koneosien suunnittelu (2010)**

Lähtöarvot:

Aksiaalikuorma (akselin suuntainen kuorma):	$F_a := 150\text{ N}$
Radiaalikuorma (säteen suunnassa):	$F_r := 1.5\text{ kN}$
Akselin pyörimisnopeus, kierroksia minuutissa:	$n := 60$
Käyttötuntivaatimus laakerin kestoajalle:	$L_{10h.min} := 25000$
EkspONENTTI kuulalaakerille:	$p := 3$

a) Ratkaistaan mitoitussyhtälö, kaava (5.2-2) ja mitoitetaan ohjaava laakeri

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{Josta voidaan ratkaista:}$$

$$C \geq \left(\frac{60 \cdot n \cdot L_{10h.min}}{10^6} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot P \quad , \text{ jossa kerroin: } \left(\frac{60 \cdot n \cdot L_{10h.min}}{10^6} \right)^{\frac{1}{p}} = 4.481$$

Mitoitussyhtälö on siis:

$$C_{min} \geq 4.481 \cdot P$$

Valitaan luettelosta laakerointi Lase 30-N, jolle on annettu seuraavat arvot:

Staatinen kantavuusluku: $C_{01} := 11300\text{ N}$

Dynaaminen kantavuusluku: $C_1 := 20700\text{ N}$

Haetaan kertoimet X ja Y taulukon (5.2-2) avulla:

$$\frac{F_a}{C_{01}} = 0.013$$

Taulukko (5.5-2) => rajasuhdeluku $e=0.1$

(jatkuu)

$$\frac{F_a}{F_r} = 0.1$$

Taulukko (5.5-2) => $X_1 := 1$ $Y_1 := 0$

Tällöin ekvivalenttikuorma on:

$$P_1 := X_1 \cdot F_r + Y_1 \cdot F_a$$

$$P_1 = 1.5 \cdot \text{kN}$$

Kantavuusluvun on oltava vähintään, jotta laakeri kestää annetun tuntimäärän:

$$C_{\min 1} := 4.481 \cdot P_1 = 6.721 \cdot \text{kN}$$

Vaatus dynaamiselle kantavuusluvulle on siis 6,721kN ja valittu laakeri kestää 20,7kN eli reilusti sen mitä vaaditaan.

B) Valitun laakerin nimelliskestoikä käyttötunteina:

$$L_{10h} := \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C_1}{P_1} \right)^p$$

$$L_{10h} = 7 \times 10^5$$

Liite 3. Kiilaliitoksen mitoitus

1(3)

Kiilaliitoksen mitoitus:**Lähtöarvot:**

Varmuusluku:

$$n := 1.5$$

Vääntömomentti:

$$M_{v\text{nim}} := 49 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{v\text{max}} := 1.5 \cdot M_{v\text{nim}} = 73.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Akselille valittu halkaisija Söderbergin laskentamenetelmällä:

$$d := 30 \cdot \text{mm}$$

Valitaan akselin halkaisijaa vastaavasti kiila standardista SFS 2636, KOS s.384 Taulukko (4.3-8):

Leveys:

$$b := 10 \cdot \text{mm}$$

Korkeus:

$$h := 8 \cdot \text{mm}$$

Akselin ura:

$$t_1 := 5 \cdot \text{mm}$$

Navan ura:

$$t_2 := 3.3 \cdot \text{mm}$$

Navan ja akselin sallittu pintapaine, taulukko (4.3-6):

Peruspaine akselille ja navalle, molemmat samaa materiaalia S355 ja pinnat karkaistu:

$$p_o := 200 \cdot \text{MPa}$$

Sallittu pintapaine navalle ja akselille, yksisuuntainen kuormitus kevyin iskuin:

$$p_{\text{nsall}} := 0.7 \cdot p_o$$

$$p_{\text{nsall}} = 140 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{\text{asall}} := 0.7 \cdot p_o$$

$$p_{\text{asall}} = 140 \cdot \text{MPa}$$

(jatkuu)

a) Vääntömomentin siirtokyky navalle, KOS kaava (4.3-18)

$$M_{v.n} = \frac{1}{2} \cdot p_n \cdot l \cdot t_2 \cdot (d + t_2)$$

Asetetaan momentti ulkoisen momentin suuruiseksi ja pintapaine sallitun suuruiseksi, jolloin minimipituus kiilalle, jotta napa ei myöda on:

$$l_{\min.n} := \frac{2 \cdot M_{vmax}}{p_{nsall} \cdot t_2 \cdot (d + t_2)}$$

$$l_{\min.n} = 9.555 \cdot \text{mm}$$

b) Vääntömomentin siirtokyky akselille, KOS kaava (4.3-18)

$$M_{v.a} = \frac{1}{2} \cdot p_a \cdot l \cdot t_1 \cdot (d - t_1)$$

Asetetaan momentti ulkoisen momentin suuruiseksi ja pintapaine sallitun suuruiseksi, jolloin minimipituus kiilalle, jotta napa ei myöda on:

$$l_{\min.a} := \frac{2 \cdot M_{vmax}}{p_{asall} \cdot t_1 \cdot (d - t_1)}$$

$$l_{\min.a} = 8.4 \cdot \text{mm}$$

c) Vääntömomentin siirtokyky kiilalle, KOS kaava (4.3-19)

$$M_{v.k} = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot b \cdot l \cdot d$$

Myötöraja kiilamateriaalille:

$$R_{e.k} := 500 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{sall} := 0.6 \cdot \frac{R_{e.k}}{n}$$

$$\tau_{sall} = 200 \cdot \text{MPa}$$

(jatkuu)

Asetetaan vääntömomentti ulkoisen vääntömomentin suuruiseksi ja leikkausjännitys sallitun suuruiseksi, jolloin minimipituus kiilalle, jotta kiila ei leikkaudu on:

$$l_{\min.k} := \frac{2 \cdot M_{v\max}}{\tau_{\text{sall}} \cdot b \cdot d} \quad \boxed{l_{\min.k} = 2.45 \cdot \text{mm}}$$

Kiilapituus minimi: $\text{ceil}\left(\max\left(\frac{l_{\min.n}}{\text{mm}}, \frac{l_{\min.a}}{\text{mm}}, \frac{l_{\min.k}}{\text{mm}}\right)\right) = 10$

$$\frac{10 \cdot \text{mm}}{d} = 0.333$$

Ohjearvo kiilan pituudelle on $1,5 \cdot d$, ja tavallisesti $0,7 \cdot d < \text{kiilan pituus} < 2,5 \cdot d$, joten valitaan suosituksen mukainen kiila vaikka 10mm olisi mitoituksen mukaan riittävä. Minimipituus kiilalle on ohjearvoa pienempi, koska akseliksi on valittu tarvittavaa halkaisijaa paksumpi akseli.

$$l_w := 0.8 \cdot d = 0.024 \text{ m}$$

Siis napa on kriittisin ja mitoittaa kiilan pituuden tässä tapauksessa!

Valitaan kiilan lopulliseksi pituudeksi tasaluku ja kiilatyyppi B, jolloin kiilan standardimerkintä on: B-10x8x24 SFS 2636