



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Samu Tuomi

Putkisahatestipenkin suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

8.2.2021

Tekijä Otsikko	Samu Tuomi Putkisahatestipenkin suunnittelu
Sivumäärä Aika	52 sivua 8.2.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Tuotekehityspäällikkö Marko Törrönen, Exact Tools Oy Projektipäällikkö Sampo Kuikka
<p>Insinööriyössä suunniteltiin putkisahatestipenkki, jolla Exact Tools Oy -yhtiö voi testata ko-vapalateriensä kestävyyttä ja saada samalla lisää tietoa putken leikkuutapahtumaan vaikuttavista muuttujista. Testipenkkiin voi liittää yhtiön erikokoisia putkisahoja.</p> <p>Testipenkki koostuu putkisahatelineestä, putkisahan kahvan momenttivarresta, putken pyöritysmekanismista sekä sähkömoottoritelineestä, johon liitettävä sähkömoottori pyörittää leikattavan putken ja putken pyöritysmekanismin muodostamaa kokonaisuutta. Testipenkkiin valitun sähkömoottorin pyörimisnopeutta voi säätää arvosta 6 rpm alaspäin, ja se tuottaa 100 Nm:n vääntömomentin, joka riittää pyörittämään teräs- muovi- tai valurautaputkea ulkohalkaisijaltaan 100–360 mm.</p> <p>Putkisahatelineen jalat suunniteltiin L-raudasta, ja ne pitävät putkisahan sekä sen tarttujan paikoillaan, kun putkisahan terä leikkaa putkea. Kolmihaarainen putken pyöritysmekanismi suunniteltiin kiilautumaan putken sisäpinnalle sen lävitse kulkevaa trapetsikierretankoa kiertämällä. Sähkömoottorin korkeudensäätö erikokoisille putkille toteutettiin mitoittamalla sähkömoottoritelineen pystypalkkeihin urat, joihin sähkömoottori voidaan lukita.</p> <p>Pienikokoinen mikrokytkin valittiin tunnistamaan putkisahan terän ala-asento, jossa putkea pyörittävän sähkömoottorin on käynnistyttävä. Mikrokytkin sijoitetaan putkisahan moottoriosan ja tarttujan väliin, ja kun putkisahan kahvalle suunnitellun momenttivarren päähän lisätään painoa, moottoriosan laskeutuu aktivoiden mikrokytkimen.</p> <p>Putkisahatestipenkin osat suunniteltiin mahdollisimman yksinkertaisiksi valmistaa ja kasata. Suunnittelun pohjana käytettiin mahdollisimman paljon jo valmiiksi saatavilla olevia materiaaleja ja siinä hyödynnettiin myös putkisahan osia, joita jatkokehitettiin.</p> <p>Työn tuloksena suunnitellut testipenkin osat ovat valmiina valmistusvaihetta varten. Näiden osien toiminta selviää vasta, kun testipenkki kootaan ja sitä käytetään. Tämän pohjalta osia voidaan muokata testipenkin oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi.</p>	
Avainsanat	kestomagneettimoottori, mikrokytkin, putkisaha, testipenkki, trapetsikierre, vääntömomentti

Author Title	Samu Tuomi Design of a Pipe Saw Test Bench
Number of Pages Date	52 pages 8 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Marko Törrönen, R&D Manager Sampo Kuikka, Project Engineer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design a test bench for a pipe saw so that the commissioner of the thesis, Exact Tools Oy, can use the test bench to test the strength of their circular saw blades, and, at the same time, receive more information about the variables affecting the pipe cutting process.</p> <p>The test bench includes a stand for the pipe saw, a torque arm for handling the pipe saw handle, the rotation mechanism of the pipe and a stand for the electric motor. The electric motor with 100 Nm output torque and rotational speed adjustment from 0 to 6 rpm was chosen to rotate the pipe via the rotation mechanism of the pipe. The rotated pipe is made of steel, plastic or cast iron with an outer diameter from 100 to 360 mm. A small micro switch was chosen to recognize the lower position of the circular saw blade. When weight is added to the end of the torque arm of the handle of the pipe saw, its motor part moves towards the gripper. The micro switch is installed between the motor part and the gripper so that the motor part will press it and the electric motor will be started.</p> <p>The stand for the pipe saw and its legs were designed from L-bar and they are to hold the pipe saw and its gripper still, when the circular saw blade cuts the pipe. A trapeze rod is fitted into the rotation mechanism of the pipe, and when rotated it will wedge the rotation mechanism of the pipe against the inner surface of the pipe. The height of the electric motor can be adjusted by grooves measured in the vertical bars of the electric motor's stand.</p> <p>The components of the pipe saw test bench were designed to be simple to manufacture and assemble. Materials already available were used to design the components, and also some parts in the pipe saw were used and developed further.</p> <p>As a result of this thesis the designed components of the pipe saw test bench are ready to be manufactured. After the test bench is assembled and it is in use, the function of its components can be observed, and the components of the test bench will be modified, if needed, to ensure the proper function of the test bench.</p>	
Keywords	micro switch, permanent magnet motor, pipe saw, test bench, torque, trapeze rod

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoitteet	1
1.2	Exact Tools Oy	1
2	Testipenkin tärkeimmät vaatimukset	4
3	Putkea pyörittävä sähkömoottori	7
3.1	Pyörimisnopeusväli	7
3.2	Vaadittava momentti	9
3.3	Alennusvaihde	21
3.4	Sähkömoottorin valinta	24
3.5	Sähkömoottoriteline	26
4	Putken pyöritysmekanismi	33
5	Putkisahateline	37
6	Putkisahan kahvan momenttivarsi	41
7	Mikrokytkin	43
8	Yhteenveto	48
	Lähteet	49

1 Johdanto

1.1 Työn tavoitteet

Insinööriyön aiheena on suunnitella suomalaiselle Exact Tools Oy -yhtiölle ja sen kehittämille kannettaville putkisahoille testipenkki, jonka avulla putken leikkuutapahtumaan vaikuttavia muuttujia, kuten putken pyörimisnopeutta ja leikkuuterälle lisättävän painon määrää, pystyy hallitusti säätämään. Tämä mahdollistaisi kovapalaterien kestävyys- ja laadunvalvonnan terätoimittajien suuntaan, sillä teränkestosta halutaan saada mahdollisimman hyvä. Tavoitteena on suunnitella ja mallintaa testipenkin osat sekä valita testipenkeissä tarvittavat oikein mitoitetut komponentit.

1.2 Exact Tools Oy

Exact Tools Oy on vuonna 2001 rekisteröity suomalainen yhtiö, joka kehittää kannettavia putkisahoja ja innovatiivisia ratkaisuja putkialan tarpeisiin.

Yhtiön tarjoamia tuotteita ovat

- putkisahat metallille ja muoville
- putkisahat ilmastointiputkille
- pneumaattiset putkisahat märkiin olosuhteisiin
- laitteet putkien viistämiseen
- terät yhtiön omiin tuotteisiin
- putkituet.

Näitä tuotteita on koottu alla olevaan kuvaan 1.



Kuva 1. Exact PipeCut 460 Pro Series -putkisaha, laukku, putkituet ja TCT 165 -terä [1].

Yhtiön kehittämällä putkisahoilla voi leikata kaikenlaisista materiaaleista valmistettuja putkia, ja riippuen putkisahan mallista, leikattavan putken ulkohalkaisija voi vaihdella välillä 15–460 mm. Jokaisessa putkisahassa on patentoitu tarttuja, joka kiinnittyy rullilla leikattavaan putkeen (kuva 2). Tämä tekee putkenkatkaisusta nopeaa ja turvallista, sillä katkaisutapahtuma ei rasita putkisahan käyttäjää, kun putkisahaa ei tarvitse kannatella voimalla. Lisäksi putkisahan katkaisujälki on tarkka ja suora.



Kuva 2. Exact PipeCut 170 System -putkisaha käytössä [2].

Yllä olevassa kuvassa putkisaha on kiinnittynyt leikattavaan putkeen tarttujalla, joka mahdollistaa putkisahan liikuttamisen putken ympärillä ainoastaan sahaus suuntaan, eli putkisahan käyttäjästä katsottuna eteenpäin. Putkisahan terä liikkuu alas kahvasta painamalla. Kun putkisaha on leikannut putkea ala-asentoonsa asti, voi putken ympärisahaamisen aloittaa syöttämällä putkisahaa eteenpäin. Putkisahan käyttäjä estää putken pyörimisen sahan mukana pitämällä putkea paikallaan vasemmalla jalallaan. Tämän jälkeen putkisahan käyttäjä vapauttaa putken ja pyöräyttää putkisahaa taaksepäin, jolloin myös putki kiertyy taaksepäin. Putkisahan käyttäjä astuu jälleen putken päälle vasemmalla jalallaan ja syöttää putkisahaa eteenpäin. Tätä toistetaan, kunnes putki katkeaa. [3, s. 12.]

Yhtiön kehittämien putkisahojen ja laitteiden virrankulutus on alhainen perinteiseen kulmahiomakoneeseen verrattuna, mikä kertoo yhtiön halusta edistää kestävä kehitystä ja

panostaa jatkuvaan tuotekehitykseen. Yhtiö onkin saanut tunnustusta muun muassa parhaan teollisen suunnittelun palkinnon muodossa. [4.]

2 Testipenkin tärkeimmät vaatimukset

Testipenkiltä vaaditaan seuraavia ominaisuuksia:

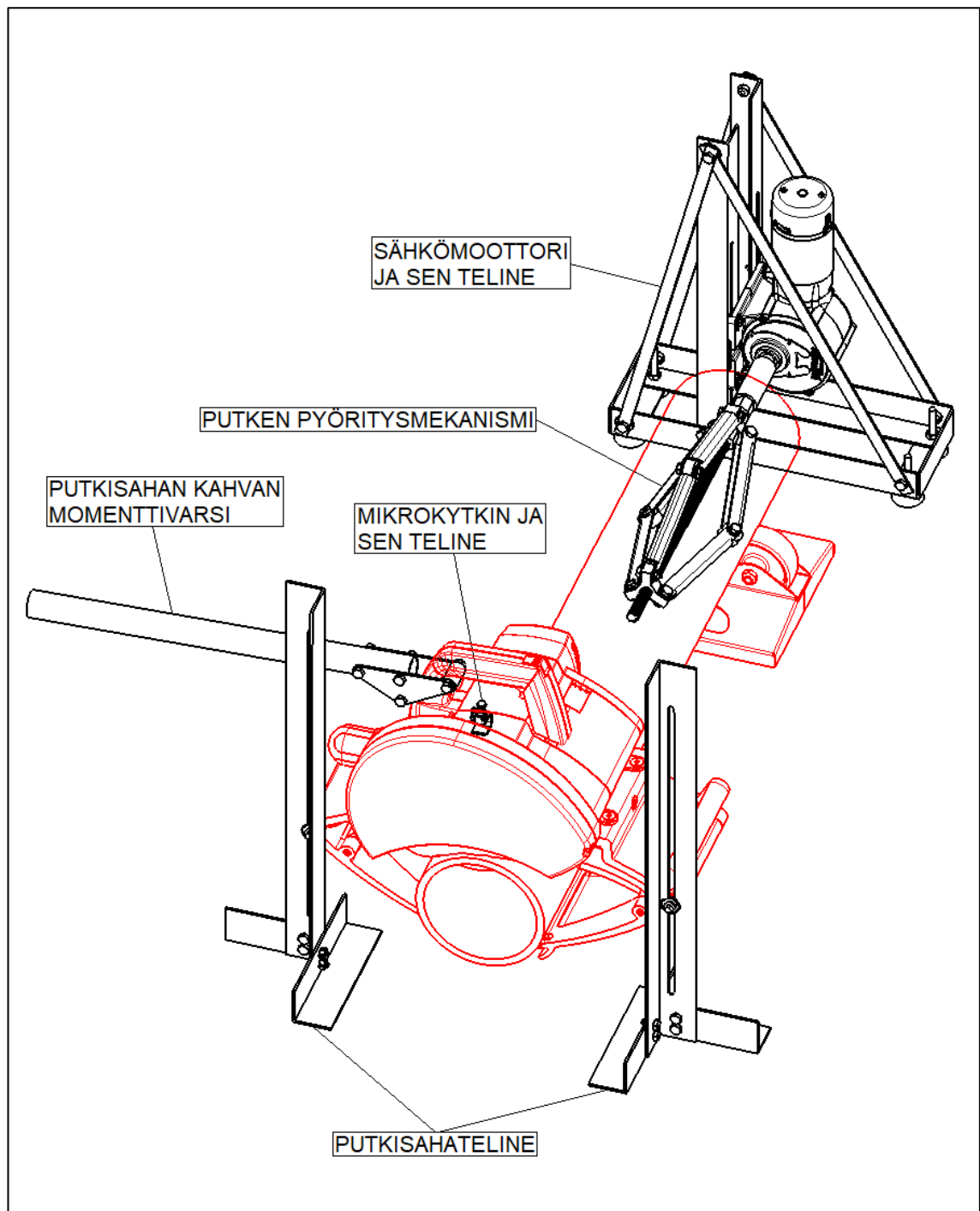
- testipenkillä on pystyttävä leikkaamaan putkia, joiden ulkohalkaisija vaihtelee välillä 100–360 mm
- putken on pyörittävä leikkuutapahtuman aikana putkisahan ja sen terän pyöryssä paikoillaan
- testipenkissä on oltava terän ala-asennon tunnistin, joka sallii putkea pyörittävän sähkömoottorin käynnistymisen vasta, kun terä on leikannut putkea ala-asentoonsa asti
- leikattavan putken pyörimisnopeuden on oltava säädettävissä
- terän on liikuttava ala-asentoonsa putkisahan kahvan momenttivarren päähän lisättävällä painolla.

Jotta edellä luetellut vaatimukset testipenkin rakenteesta toteutuisivat, putkelle on suunniteltava pyöritysmekanismi, joka kiinnittyy sähkömoottoriin ja sen alennusvaihteeseen. Leikattavan putken pyörimisnopeuden säätäminen onnistuu halutulle pyörimisnopeusvälille mitoitettun sähkömoottorin ja sen alennusvaihteen valinnalla. Valintakriteerinä on myös sähkömoottorilta vaadittava maksimivääntömomentti, joka tarvitaan raskaimman testipenkillä leikattavan putken pyörittämiseksi. Lisäksi putkisahalle on suunniteltava teline, joka mahdollistaa sahan korkeudensäädön halkaisijaltaan erikokoisten putkien kohdalla. Telineeseen on pystyttävä liittämään neljä erikokoista putkisahamallia, jotka leikkaavat putkia maksimiulkohalkaisijoilla 220 mm, 280 mm, 360 mm ja 460 mm. Näistä putkisahamalleista kolme on esitetty alla olevassa kuvassa 3.



Kuva 3. Suunniteltavaan putkisahatelineeseen liitettävät putkisahamallit maksimiulkohalkaisijoiltaan 360 mm, 280 mm ja 220 mm olevien putkien leikkaamiseen [5]. Tarttujan koko vaihtelee jokaisessa mallissa, mikä on otettava huomioon putkisahatelineen suunnittelussa.

Vaihtelevien putkikokojen takia putken pyöritysmekanismin sekä sähkömoottorin ja sen alennusvaihteen muodostamalle kokonaisuudelle on myös suunniteltava korkeussuunnassa säädettävä teline. Putkisahan kahvaan liitettävä momenttivarsi on suunniteltava terän liikuttamiseksi leikkaussyvyyteensä, kun momenttivarren päähän lisätään painoa. Terän ala-asennon tunnistaminen onnistuu mikrokytkimen avulla. Alla olevassa kuvassa 4 on putkisahatestipenkki kokonaisuutena.

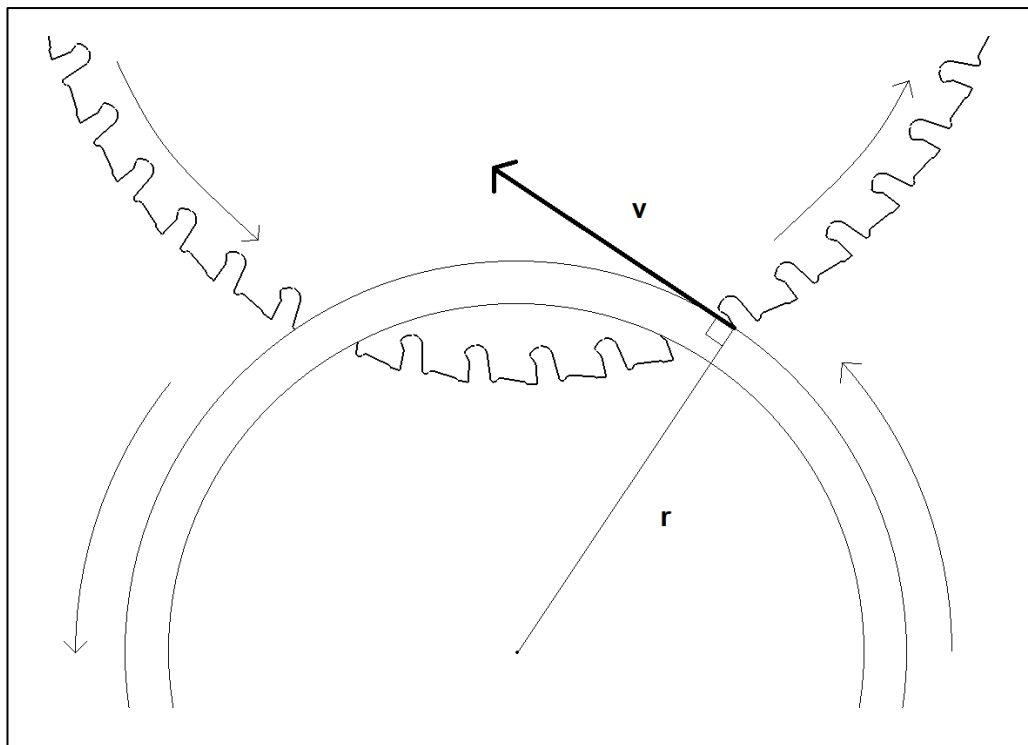


Kuva 4. Putkisahatestipenkin osat. Putkisaaha, putki ja putkituet on merkitty punaisella.

3 Putkea pyörittävä sähkömoottori

3.1 Pyörimisnopeusväli

Metallista tai muovista valmistettu leikattava putki pyörähtää testipenkissä pituusakselinsa suhteen täyden kierroksen tasaisella nopeudella. Putken syöttönopeus, eli putken kehäpisteen nopeus putken ja putkisahan terän kohtauspaikassa (kuva 5) [6, s. 13], halutaan rajata välille 0,5–3 m/min, sillä 0,5 m/min pienemmät syöttönopeuden arvot antavat epäoleellisen pieniä putken pyörimisnopeuden arvoja putkikoon kasvaessa. Jatkossa syöttönopeudesta puhutaan ratanopeutena, jonka tieteellinen määritelmä yhtyy edellä mainittuun syöttönopeuden määritelmään. Tasaisessa ympyräliikkeessä ympyrän kehäpisteen ratanopeuden arvo pysyy koko ajan samansuuruisena. Ratanopeuden suunta kuitenkin muuttuu pisteen edetessä ympyrän kehällä. Ratanopeuden suunta on aina ympyrän tangentin suuntaan. [7.]



Kuva 5. Ratanopeus v , eli putken kehäpisteen nopeus putken ja putkisahan terän kohtauspaikassa. Ratanopeuden suunta on kohtisuorassa putken sädettä r vastaan putken ja terän pyöriessä vastapäivään.

Testipenkillä leikattavien putkien pyörimisnopeuksien laskeminen on tärkeää oikealaisen putkea pyörittävän sähkömoottorin sekä sen pyörimisnopeutta rajoittavan alennusvaihteen valinnan kannalta. Halkaisijaltaan erikokoisten putkien pyörimisnopeuksien laskeminen tapahtuu edellä annetun ratanopeusvälin 0,5–3 m/min avulla putken halkaisijan vaihdellessa välillä 100–360 mm. Putken halkaisijan avulla on ensiksi laskettava putken ulkokehän pituus alla olevan yhtälön

$$p = \pi d, \quad (1)$$

jossa p on putken ulkokehän pituus ja d on putken halkaisija, mukaisesti [8, s. 31]. Pienimmän testipenkillä leikattavan putken ulkokehän pituudeksi saadaan 100 mm:n halkaisijalla

$$p = \pi \times 0,1 \text{ m} \approx 0,314 \text{ m},$$

kun taas vastaavasti isoimman putkikoon ulkokehän pituudeksi saadaan samalla periaatteella, mutta 360 mm halkaisijalla, 1,13 m. Leikattavan putken ulkokehän pituuden vaihteluväli on täten 0,314–1,13 m. Tälle välille osuvan putken ulkokehän pituusarvon ja välille 0,5–3 m/min osuvan putken kehäpisteen ratanopeusarvon avulla voidaan laskea kyseisiä arvoja vastaava putken pyörimisnopeuden arvo yhtälöllä

$$n = \frac{1}{\frac{p}{v}} = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

jossa n on putken pyörimisnopeus, p on putken ulkokehän pituus, v on putken kehäpisteen ratanopeus ja T on aika, jona putken kehäpiste kiertää yhden kierroksen p :n pituista putken ulkokehää pitkin ratanopeudella v [8, s. 116]. Alla olevaan taulukkoon 1 on koottu yhtälöllä 2 lasketut putken pyörimisnopeuden arvot pienimmälle ja suurimmalle putkikoolle (kehän pituus) pienimmällä ja suurimmalla ratanopeusarvolla.

Taulukko 1. Pienimmälle ja suurimmalle putkikoolle lasketut putken pyörimisnopeuden arvot pienimmällä ja suurimmalla ratanopeusarvolla.

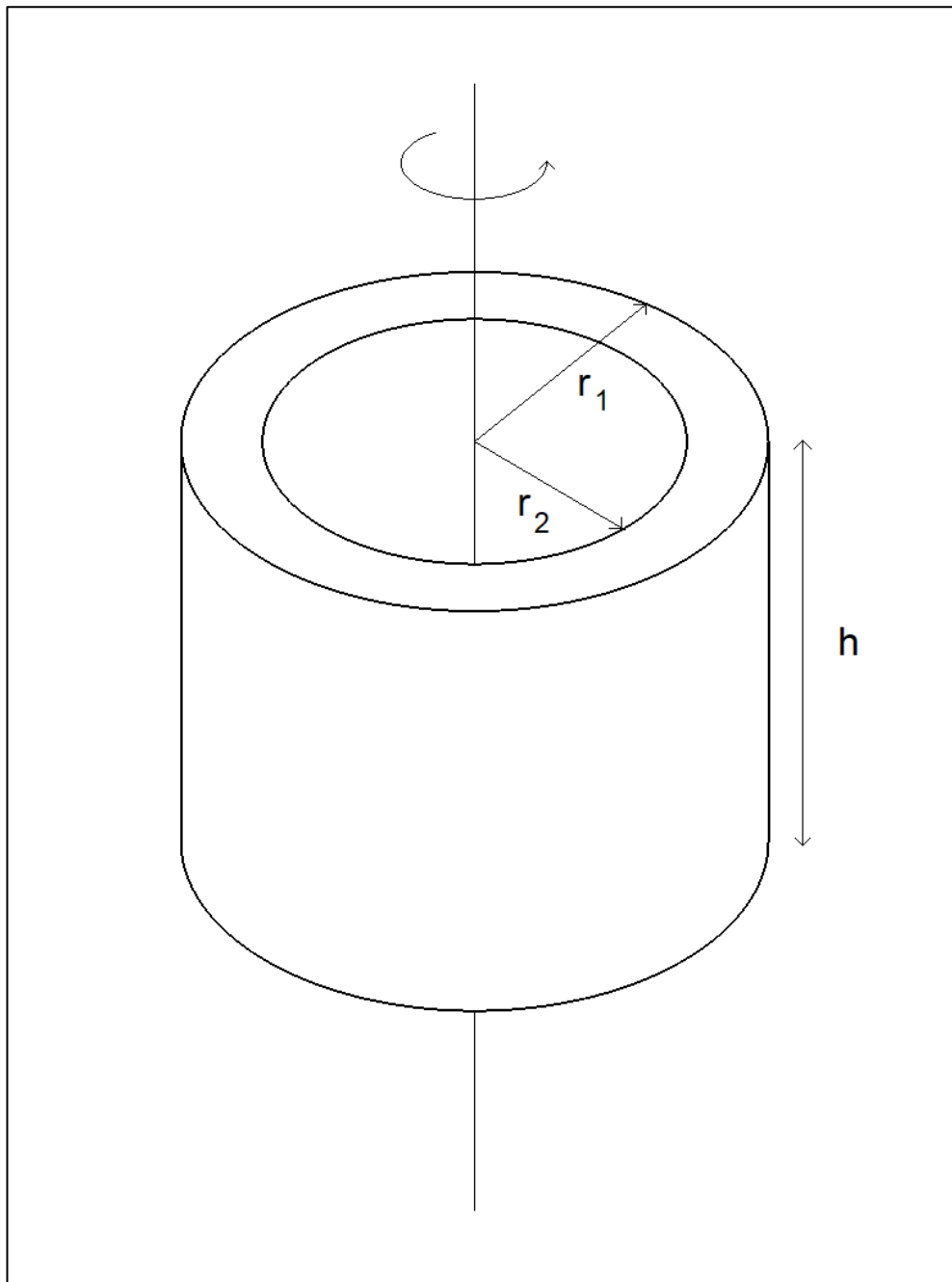
Kehän pituus [m]	Ratanopeus [m/min]	Pyörimisnopeus [1/min]
0,314	0,5	1,592
0,314	3	9,554
1,13	0,5	0,442
1,13	3	2,655

Pienimmän putkikoon kohdalla, ratanopeuden kasvaessa pienimmästä arvosta suurimpaan arvoonsa, putken pyörimisnopeuden arvoväli on 1,592–9,554 rpm. Suurimman putkikoon kohdalla putken pyörimisnopeuden arvoväli on huomattavasti kapeampi: 0,442–2,655 rpm. Putken ulkokehän pituusarvon ollessa suurimmillaan, eli 1,13 m, ja putken kehäpisteen ratanopeusarvon ollessa pienimmillään, eli 0,5 m/min, saavutetaan kyseisiä arvoja vastaava putken pyörimisnopeuden pienin arvo 0,442 rpm. Vastaavasti putken ulkokehän pienimmällä pituusarvolla 0,314 m ja putken kehäpisteen suurimmalla ratanopeusarvolla 3 m/min saavutetaan putken pyörimisnopeuden suurin arvo 9,554 rpm. Täten putkea pyörittävän sähkömoottorin valinta alennusvaihteineen voidaan tehdä sen mukaan, että alennusvaihte rajoittaa sähkömoottorin pyörimisnopeuden arvovälille 0,442–9,554 rpm.

3.2 Vaadittava momentti

Hitausmomentti

Leikattavan putken pyörittämiseksi sähkömoottorin on tuotettava tietty vääntömomentti, jonka laskemiseksi tarvitaan hitausmomentin määritelmää. Hitausmomentti kuvastaa kappaleen kykyä vastustaa pyörimisliikkeen muutosta tietyn akselin suhteen, ja sen suuruus on riippuvainen kappaleen mitoista ja massasta [9]. Alla oleva kuva 6 havainnollistaa putken hitausmomenttia.



Kuva 6. Hitausmomentti vaikuttaa pituusakselinsa suhteen vastapäivään pyörivään putkeen. Kirjain h kuvastaa putken pituutta, r_1 putken ulkokehän sädettä ja r_2 putken sisäkehän sädettä. Säteiden erotus antaa putken seinämänpaksuuden.

Putkelle tyypillisen muodon takia sen hitausmomentti J voidaan laskea yhtälöllä

$$J = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2), \quad (3)$$

jossa m on putken massa ja r_1 ja r_2 ovat kuvan 6 mukaiset putken ulko- ja sisäkehän säteiden pituudet [8, s. 118]. Putken massa on pienimmillään, kun putken tilavuuden V ja sen materiaalin tiheyden ρ tulo on pienimmillään. Putken tilavuus on sitä pienempi mitä lyhyempiä ovat sen pituus, ulkohalkaisija ja seinämänpaksuus. Vastaavasti putken massa on suurimmillaan, kun putken tilavuuden ja sen materiaalin tiheyden tulo on suurimmillaan. Putken massa kasvaa sen pituuden, ulkohalkaisijan ja seinämänpaksuuden kasvaessa. Alla olevaan taulukkoon 2 on laskettu teräksestä, muovista ja valuraudasta valmistettujen testipenkillä leikattavien putkien pienimmät ja suurimmat massat.

Taulukko 2. Teräksestä, muovista ja valuraudasta valmistettujen putkien pienimmät ja suurimmat massat.

Teräsputki				
r_1 [m]	r_2 [m]	h [m]	ρ [kg/m ³]	m [kg]
0,05	0,047	0,3	7850	2,15
0,18	0,16	4	7850	671
Muoviputki				
r_1 [m]	r_2 [m]	h [m]	ρ [kg/m ³]	m [kg]
0,05	0,047	0,3	900	0,247
0,18	0,13	4	900	175
Valurautaputki				
r_1 [m]	r_2 [m]	h [m]	ρ [kg/m ³]	m [kg]
0,05	0,047	0,3	7400	2,03
0,18	0,16	4	7400	632

Putkien pituuksien vaihteluväli on 300–4000 mm ja ulkohalkaisijoiden 100–360 mm. Muoviputken kohdalla sen seinämänpaksuus vaihtelee välillä 3–50 mm, kun taas teräksestä ja valuraudasta valmistettujen putkien seinämänpaksuus vaihtelee välillä 3–20 mm. Teräksen tiheys on 7850 kg/m³ [10], PEL-muovin 900 kg/m³ [11] ja adusoidun va-

luraudan 7400 kg/m^3 [12, s. 4]. Edellä olevasta taulukosta huomataan, että putken materiaali-kohtainen pienin massa saadaan aina lyhyimmällä putkenpituudella 0,3 m ja ohuimmalla putken seinämänpaksuudella 0,003 m, kun taas putken materiaali-kohtainen suurin massa saadaan pisimmällä putkenpituudella 4 m ja putkenseinämän ollessa paksuimmillaan, eli 0,05 m muovilla ja 0,02 m sekä teräksellä että valuraudalla.

Pienintä taulukon 2 massaa 0,247 kg vastaava putken hitausmomentti on

$$J = \frac{1}{2} \times 0,247 \text{ kg} \times ((0,05 \text{ m})^2 + (0,047 \text{ m})^2) \approx 0,000581 \text{ kgm}^2,$$

jonka mukaan putken massa ei riitä ollenkaan vastustamaan putken pyöryttämistä levosta liikkeelle. Vastaavasti suurinta putken massaa 671 kg vastaava hitausmomentti on

$$J = \frac{1}{2} \times 671 \text{ kg} \times ((0,18 \text{ m})^2 + (0,16 \text{ m})^2) \approx 19,5 \text{ kgm}^2,$$

jota tarvitaan putkea pyörittävältä sähkömoottorilta vaadittavan maksimivääntömomentin laskemiseksi.

Maksimimomentti

Leikattavan putken pyörittämiseksi sähkömoottorilta vaadittava maksimivääntömomentti T voidaan jakaa sekä dynaamisen momentin komponenttiin T_{dyn} että kuormamomentin komponenttiin T_{kuorma} yhtälön

$$T = T_{dyn} + T_{kuorma} \quad (4)$$

mukaisesti. Yhtälön dynaamisen momentin komponentti T_{dyn} kuvastaa sähkömoottorilta vaadittavaa vääntömomenttia aluksi paikallaan olevan putken pyöryttämiseksi vakio-pyörimisnopeuteen tietyssä ajassa. Tämä dynaamisen momentin komponentti saadaan laskettua yhtälöllä

$$T_{dyn} = J \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{\Delta n}{\Delta t}, \quad (5)$$

jossa J on leikattavan putken hitausmomentti ja Δt on aika, jona putken pyörimisen halutaan kiihtyvän pyörimisnopeuteen Δn . [13, s. 15.] Lasketaan tämän dynaamisen momentin suurin arvo käyttäen yhtälöllä 3 laskettua massiivisimman putken hitausmomentin arvoa $19,5 \text{ kgm}^2$, kun putken pyörimisliikkeen halutaan kiihtyvän levosta suurimman pyörimisnopeuden arvoon $9,554 \text{ rpm}$ (taulukko 1) kahdessa sekunnissa. Täten dynaamisen momentin suurimmaksi arvoksi saadaan

$$T_{dyn} = 19,5 \text{ kgm}^2 \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{9,554 \frac{1}{\text{min}}}{2 \text{ s}} \approx 9,73 \text{ Nm}.$$

Dynaamisen momentin komponentin lisäksi sähkömoottorin tuottaman maksimivääntömomentin on voitettava putkea leikkaavan terän aiheuttama kuormamomentin komponentti T_{kuorma} , joka pyrkii vastustamaan putken pyörittämistä halutulla pyörimisnopeudella [14, s. 16]. Tämän kuormamomentin selvittämiseksi on ensin laskettava terän pyörimistehtö yhtälöllä

$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6}, \quad (6)$$

jossa P_c on terän nettotehtö, a_p on terän lastuamissyvyys eli terän putkeen leikkaaman uran halkaisija, a_e on terän lastuamisleveys eli putken seinämänpaksuus, v_f on pöytä-

syöttö eli putken kehäpisteen ratanopeus putken ja terän kohtaamispaikassa ja k_c on putken materiaalista riippuvainen ominaislastuamisvoima [15]. Ominaislastuamisvoiman k_c arvo saadaan edelleen laskettua yhtälöllä

$$k_c = k_{c1} \times h_m^{-m_c} \times \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right), \quad (7)$$

jossa k_{c1} on ominaislastuamisvoiman materiaaliikohtainen vakiotaulukkoarvo, h_m on keskilastunpaksuus, m_c on ominaislastuamisvoiman materiaaliikohtaista vakiotaulukkoarvoa vastaava potenssiluku ja γ_0 on terän rintakulma [16, s. 14]. Ominaislastuamisvoiman yhtälössä 7 oleva keskilastunpaksuuden h_m arvo saadaan puolestaan laskettua yhtälöllä

$$h_m = \frac{180 \times \sin K_r \times a_e \times f_z}{\pi \times D_{cap} \times \sin^{-1}\left(\frac{a_e}{D_{cap}}\right)}, \quad (8)$$

jossa K_r on terän asetuskulma, a_e on putken seinämänpaksuus, f_z on terän hammassyöttö ja D_{cap} on terän halkaisija tehollisessa lastuamissyvytydessä a_p [17]. Hammassyötön f_z yhtälö on muotoa

$$f_z = \frac{v_f}{n \times z_c}, \quad (9)$$

jossa v_f on putken kehäpisteen ratanopeus, n on terän pyörimisnopeus ja z_c on tehollisten terien lukumäärä (kuinka monta terää putkea lastuaa kullakin kerralla) [15]. D_{cap} -parametrin yhtälö on puolestaan muotoa

$$D_{cap} = D_c + \frac{2 \times a_p}{\tan K_r}, \quad (10)$$

jossa D_c on lastuamishalkaisija eli terän halkaisija, a_p on terän putkeen leikkaaman uran halkaisija ja K_r on terän asetuskulma [15]. Edellä olevat yhtälöt 6–10 ovat jyrkinnässä käytettäviä yhtälöitä, mutta niiden soveltaminen putkea leikkaavan terän pyörimistehon laskemiseen antaa riittävän suuntaa antavan tuloksen, jota voidaan käyttää putken pyörittämistä vastustavan voiman selvittämiseksi. Alla olevaan taulukkoon 3 on koottu edellä olevilla yhtälöillä lasketut arvot seinämänpaksuudeltaan vahvimman teräsputken tapauksessa putken ratanopeusarvon ollessa suurimmillaan.

Taulukko 3. Yhtälöiden 6–10 arvot lueteltuina siinä järjestyksessä, jossa niitä tarvitaan aina seuraavassa yhtälössä terän pyörimistehon laskemiseksi.

Terän halkaisija		D_c	165 [mm]	
Terän putkeen leikkaaman uran halkaisija		a_p	1,8 [mm]	
Terän asetuskulma		K_r	93 [°]	
Terän halkaisija tehollisessa lastuamissyvyydessä a_p		D_{cap}	164,81 [mm]	(yhtälö 10)
Putken ratanopeus		v_f	3000 [mm/min]	
Terän pyörimisnopeus		n	1900 [1/min]	
Tehollisten terien lukumäärä		z_c	26 [kpl]	
Teräsyöttö		f_z	0,06 [mm]	(yhtälö 9)
Putken seinämänpaksuus		a_e	20 [mm]	
Keskilastunpaksuus		h_m	3,47 [mm]	(yhtälö 8)
Ominaislastuamisvoiman taulukkoarvo		k_{c1}	3200 [N/mm ²]	
Ominaislastuamisvoiman taulukkoarvoa vastaava potenssiluku		m_c	0,25	
Terän rintakulma		ν_0	3 [°]	
Putken materiaalin ominaislastuamisvoima		k_c	2344,01 [N/mm ²]	(yhtälö 7)
Terän pyörimisteho		P_c	4,22 [kW]	(yhtälö 6)

Terän pyörimisteho on 4,22 kW, joka on saatu käyttämällä TCT 165 -kovametallipalaterän mittoja laskennan lähtökohtana. Terän kuormittamaton pyörimisnopeus ruostumaton ja haponkestävää terästä leikattaessa on 1900 rpm [18], ja leikkaustapahtuman tehollisten terien lukumäärä on puolet terien kokonaislukumäärästä 52. Laskennassa käytettävän teräsputken ominaislastuamisvoiman taulukkoarvoksi on valittu sen suurin arvo 3200 N/mm² [19], sillä mitä suurempi kyseinen arvo on, sitä suurempia ovat myös yhtälöllä 7 laskettu teräsputken ominaislastuamisvoima ja edelleen yhtälöllä 6 laskettu

terän pyörimisteho. Tämä lisää varmuutta sille, että sähkömoottorin tuottama maksimivääntömomentsi T riittää pyörittämään raskainta teräsputkea, kun maksimivääntömomentin T_{kuorma} -komponentti lasketaan putken pyörittämistä vastustavan voiman avulla.

Voima, jolla terä vastustaa putken pyörittämistä, saadaan ratkaistua terän vääntömomentin yhtälöllä

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}, \quad (11)$$

jossa P_c on yhtälöllä 6 laskettu terän pyörimisteho ja n on terän pyörimisnopeus [15]. Sijoittamalla parametrien arvot edellä olevaan yhtälöön 11 saadaan terän vääntömomentiksi

$$M_c = \frac{4,22 \text{ kW} \times 30 \times 10^3}{\pi \times 1900 \frac{1}{\text{min}}} \approx 21,21 \text{ Nm}.$$

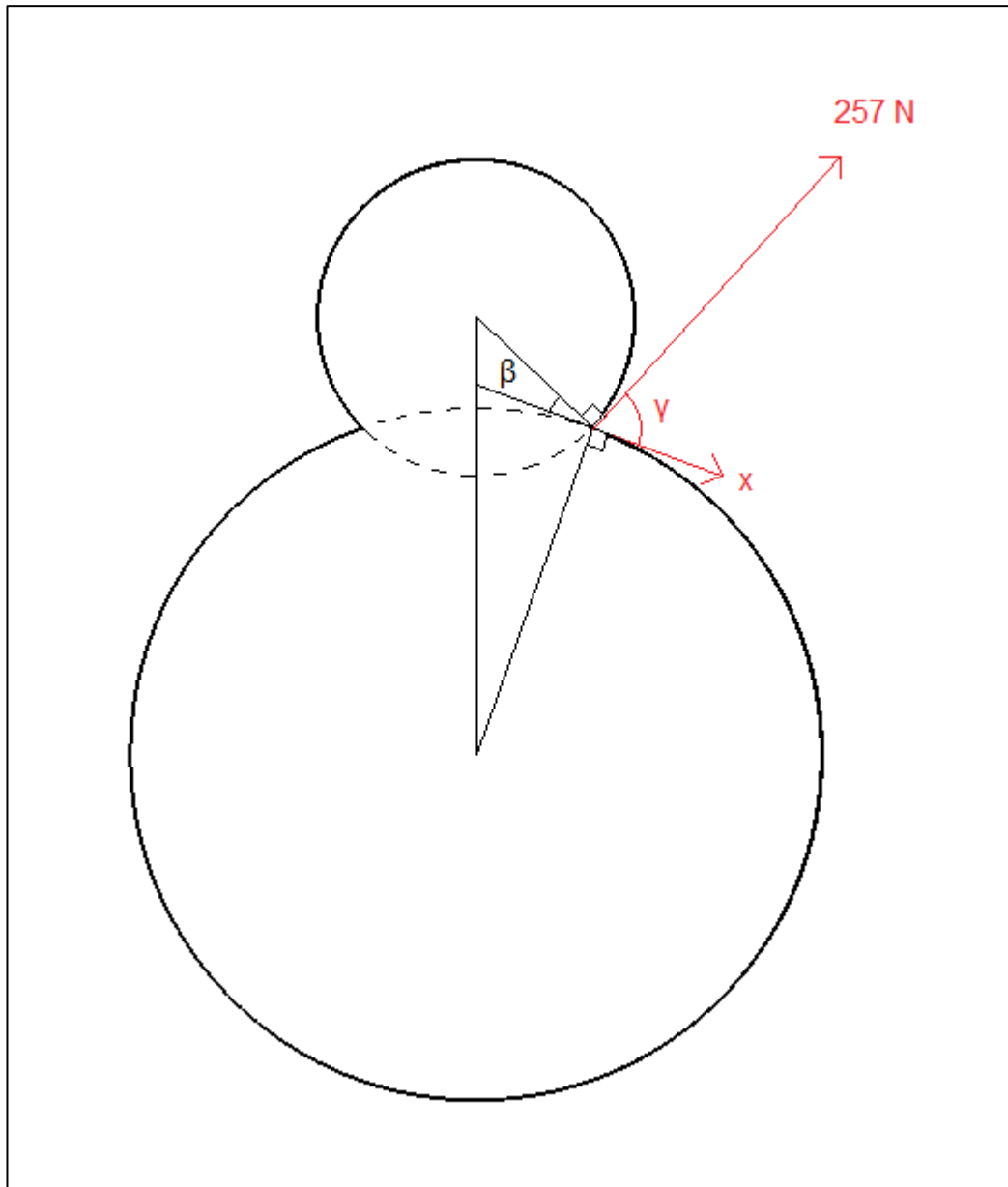
Terän vääntömomentin voimakomponentti F saadaan yhtälöstä

$$M_c = F \times r, \quad (12)$$

jossa r on TCT 165 -terän säde pituudella 0,0825 m [8, s. 118]. Ratkaisemalla edellä oleva yhtälö F -parametrin suhteen, sen arvoksi saadaan

$$F = \frac{21,21 \text{ Nm}}{0,0825 \text{ m}} \approx 257 \text{ N}.$$

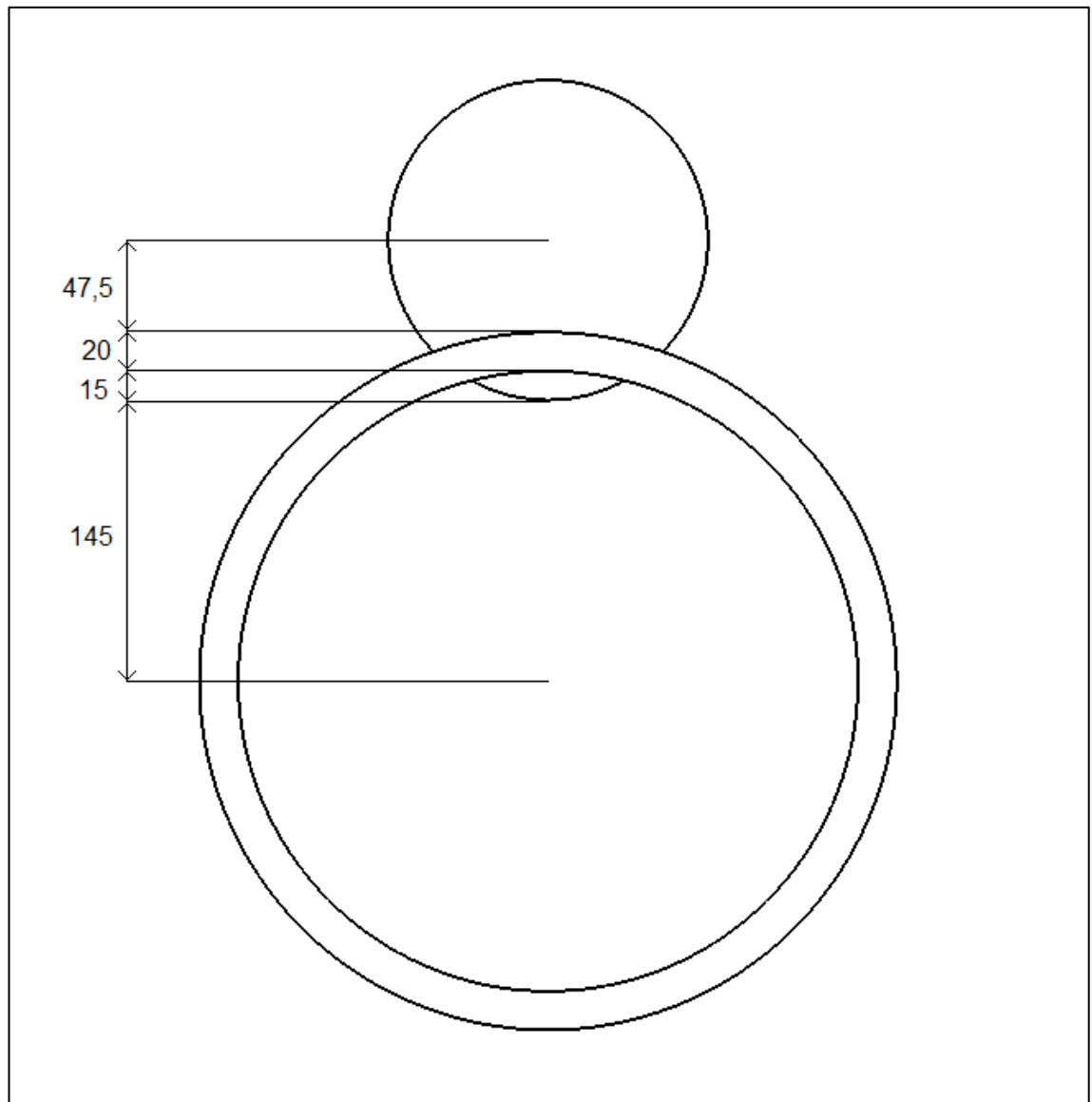
Tämä voima on kohtisuorassa putkea leikkaavan terän sädettä vastaan ja sen alkupiste on terän ja putken ulkokehien leikkauskohdassa alla olevan kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. Terän vääntömomentin avulla laskettu 257 N:n voima on kohtisuorassa terän sädettä vastaan. Kuvan pienempi ympyrä edustaa terää ja isompi ympyrä suurimman putkikoon ulkohalkaisijaa. Kirjain x kuvastaa putken pyörittämistä vastustavaa voimaa, joka on kohtisuorassa suurimman putkikoon sädettä vastaan.

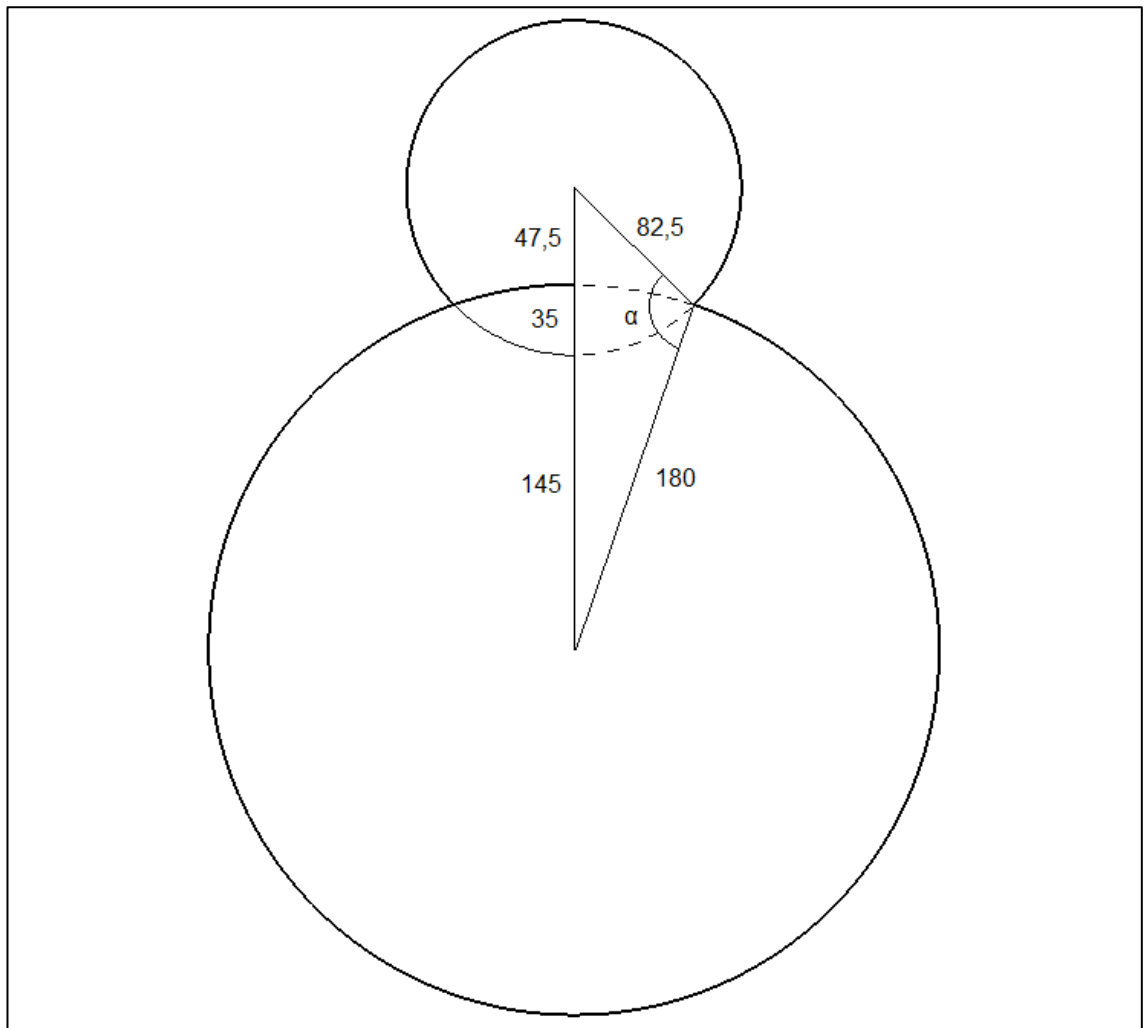
Putken pyörittämistä vastustavan voiman suuruus x saadaan laskettua 257 N:n voiman ja edellä olevan kuvan γ -kulman avulla hyödyntäen suorakulmaisen kolmion trigonomet-

riaa. Kuva 7 sisältää myös tuntemattoman kulman β , jonka suuruuden selvittäminen alkaa terän ja putken pyörimisakseleiden välisen etäisyyden määrittämisestä alla olevan kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Exact PipeCut 460 Pro Series -putkisahan terä leikkaa ulkohalkaisijaltaan 360 mm:n putkea ala-asennossaan. Terän pyörimisakselin etäisyys putken pyörimisakselista on kuvan mittojen summa eli 227,5 mm. Kyseisellä putkisahalla leikattaessa putken seinämänpaksuus voi olla maksimissaan 35 mm, jolloin TCT 165 -terän pyörimisakselin kohtisuora etäisyys putken ulkokehästä on 47,5 mm.

Terän ja suurimman putkikoon säteiden välinen kulma α säteiden kohtauspisteessä saadaan laskettua kosinilauseella alla olevassa kuvassa 9 esiintyvillä mitoilla.



Kuva 9. Terän ja suurimman putkikoon säteiden välinen kulma α säteiden kohtauspisteessä. Kulman α viereisinä sivuina ovat terän ja putken säteet, ja sen vastaisena sivuna on terän ja putken pyörimisakseleiden välinen etäisyys. Terän säteen pituus on 82,5 mm ja suurimman putkikoon säteen pituus on 180 mm. Terän ja putken pyörimisakseleiden välinen etäisyys on 227,5 mm.

Kolmioon sovellettavan kosinilauseen yhtälö on muotoa

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha, \quad (13)$$

jossa a on kulmaa α vastapäätä olevan sivun pituus, ja b ja c ovat kulman α viereisten sivujen pituudet [8, s. 29]. Kun kuvassa 9 esitetyt mitat sijoitetaan kosinilauseen yhtälöön, kulman α arvoksi saadaan

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{(180 \text{ mm})^2 + (82,5 \text{ mm})^2 - (227,5 \text{ mm})^2}{2 \times 180 \text{ mm} \times 82,5 \text{ mm}} \right) \approx 115^\circ.$$

Kuvassa 7 esiintyväksi β -kulmaksi saadaan tällöin

$$\beta = \alpha - 90^\circ = 115^\circ - 90^\circ = 25^\circ,$$

jonka avulla edelleen γ -kulmaksi

$$\gamma = 180^\circ - \beta - 90^\circ = 180^\circ - 25^\circ - 90^\circ = 65^\circ.$$

Voima x , jolla putkea leikkaava terä vastustaa putken pyörittämistä, on kohtisuorassa suurimman putkikoon sädettä vastaan ja sen arvo saadaan laskettua kertomalla kulman γ kosini terän 257 N voimakomponentin kanssa [8, s. 36]. Tällöin voiman x arvoksi saadaan

$$x = 257 \text{ N} \times \cos 65^\circ \approx 109 \text{ N}.$$

Saadun putken pyörittämistä vastustavan voiman varmuuskertoimeksi valitaan luku viisi, jotta valittava sähkömoottori jaksaisi varmasti pyörittää raskainta teräsputkea suurimmalla pyörimisnopeudella. Putken pyörittämistä vastustavan voiman suuruudeksi määritetään täten 545 N, ja kun se kerrotaan suurimman putkikoon säteellä 0,18 m, saadaan putkea pyörittävältä sähkömoottorilta vaadittavaksi maksimivääntömomentin T_{kuorma} komponentin arvoksi

$$T_{kuorma} = 545 \text{ N} \times 0,18 \text{ m} = 98,1 \text{ Nm}.$$

Sähkömoottorilta vaadittavan maksimivääntömomentin T arvo on täten yhtälön 4 mukaan

$$T = T_{dyn} + T_{kuorma} = 9,73 \text{ Nm} + 98,1 \text{ Nm} \approx 108 \text{ Nm}.$$

Tämä on suurin momentin arvo, joka sähkömoottorilta vaaditaan, jotta se jaksaisi kiihdyttää raskaimman teräspuutken (ulkohalkaisija 360 mm ja seinämänpaksuus 20 mm) pyörimään suurimmalla pyörimisnopeudella 9,554 rpm kahden sekunnin aikana terän vastustaessa puutken pyörittämistä.

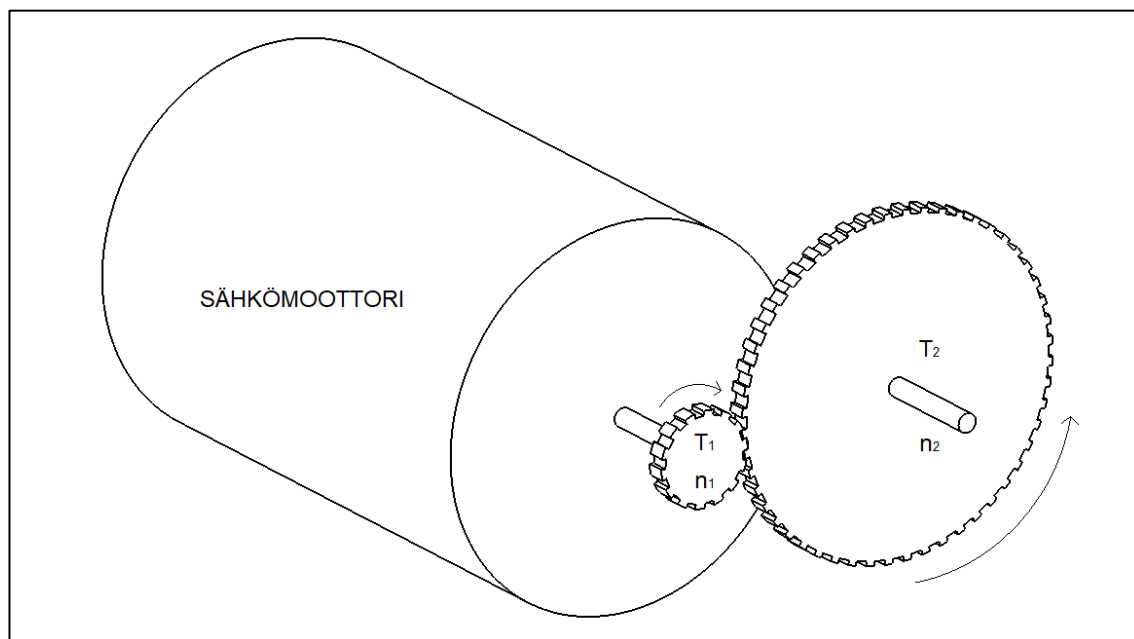
3.3 Alennusvaihte

Putkea pyörittävän sähkömoottorin ja sen alennusvaihteen muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan alennusvaihemoottoriksi, jossa alennusvaihte pienentää sähkömoottorin pyörimisnopeutta ja samalla kasvattaa sen tuottamaa momenttia. Alennusvaihteen toiminta perustuu siihen, että sen ulostuloakselin hammaspyörän hampaiden lukumäärä on suurempi kuin sen sisääntuloakselin hammaspyörän hampaiden lukumäärä. Nämä erikokoisten hammaspyörien hampaiden lukumäärät muodostavat yhdessä alennusvaihteen välityssuhteen R , jota kuvastaa yhtälö

$$R = \frac{T_2}{T_1}, \tag{14}$$

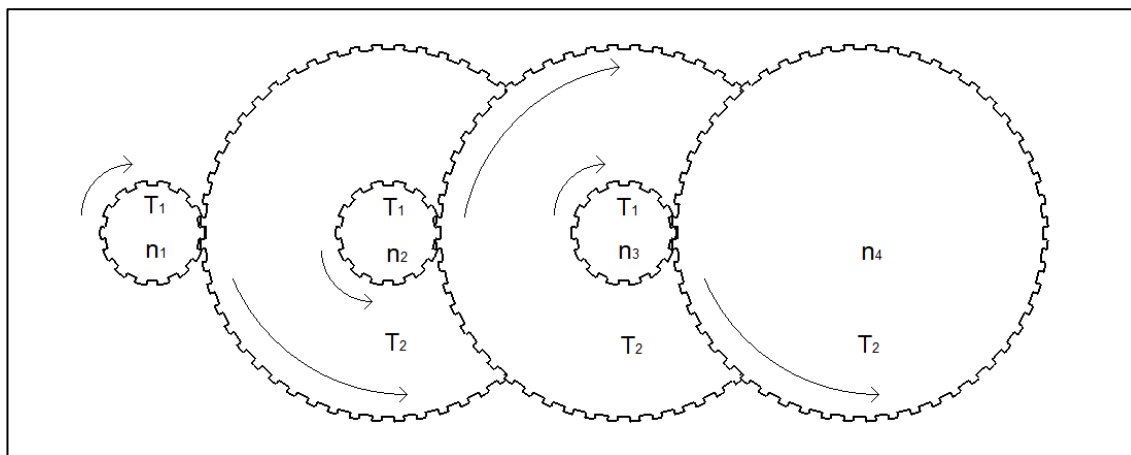
jossa T_2 on ulostuloakselin hammaspyörän hampaiden lukumäärä ja T_1 on sisääntuloakselin hammaspyörän hampaiden lukumäärä. Jotta kyseessä olisi alennusvaihte, vä-

lityssuhteen arvon on oltava suurempi kuin luku yksi. Väilyssuhde voidaan laskea samaan tapaan myös jakamalla alennusvaihteen sisääntuloakselin pyörimisnopeus ulostuloakselin pyörimisnopeudella. Väilyssuhde kertoo siis, kuinka monta kertaa nopeammin alennusvaihteen sisääntuloakseli pyörii verrattuna ulostuloakseliin. [20; 21.] Alla oleva kuva 10 havainnollistaa kahden erikokoisen hammaspyörän muodostamaa alennusvaihdetta.



Kuva 10. Sähkömoottori pyörittää alennusvaihteen sisääntuloakselia ja sen hammaspyörää pyörimisnopeudella n_1 . Pyöriä liike välittyy isommalle hammaspyörälle ja siihen liitettyyn alennusvaihteen ulostuloakseliin, jotka pyöriävät nopeudella n_2 . T_1 on pienemmän hammaspyörän hampaiden lukumäärä ja T_2 on isomman hammaspyörän hampaiden lukumäärä.

Sähkömoottorin pyörimisnopeus saadaan sitä pienemmäksi, mitä suurempi on yhtälöllä 14 laskettava alennusvaihteen väilyssuhde. Väilyssuhdetta saadaan kasvatettua käyttämällä isompaa hammaspyörää alennusvaihteen ulostuloakselilla verrattuna sisääntuloakselin hammaspyörän kokoon. Väilyssuhteen kasvattaminen onnistuu myös liittämällä useita edellä olevia pienemmän ja isomman hammaspyörän pareja rinnakkain, jolloin saadaan alla olevan kuvan 11 mukainen yhdistelmävaihte.



Kuva 11. Kolmen hammaspyöräparin muodostama yhdistelmävaihte, jossa yhden parin muodostavat pieni ja iso hammaspyörä. Pienen hammaspyörän hampaiden lukumäärä on T_1 ja ison hammaspyörän hampaiden lukumäärä on T_2 . Hammaspyöräparin isompi hammaspyörä pyörii samalla pyörimisnopeudella seuraavan hammaspyöräparin pienemmän hammaspyörän kanssa, koska ne sijaitsevat samalla pyörimisakselilla.

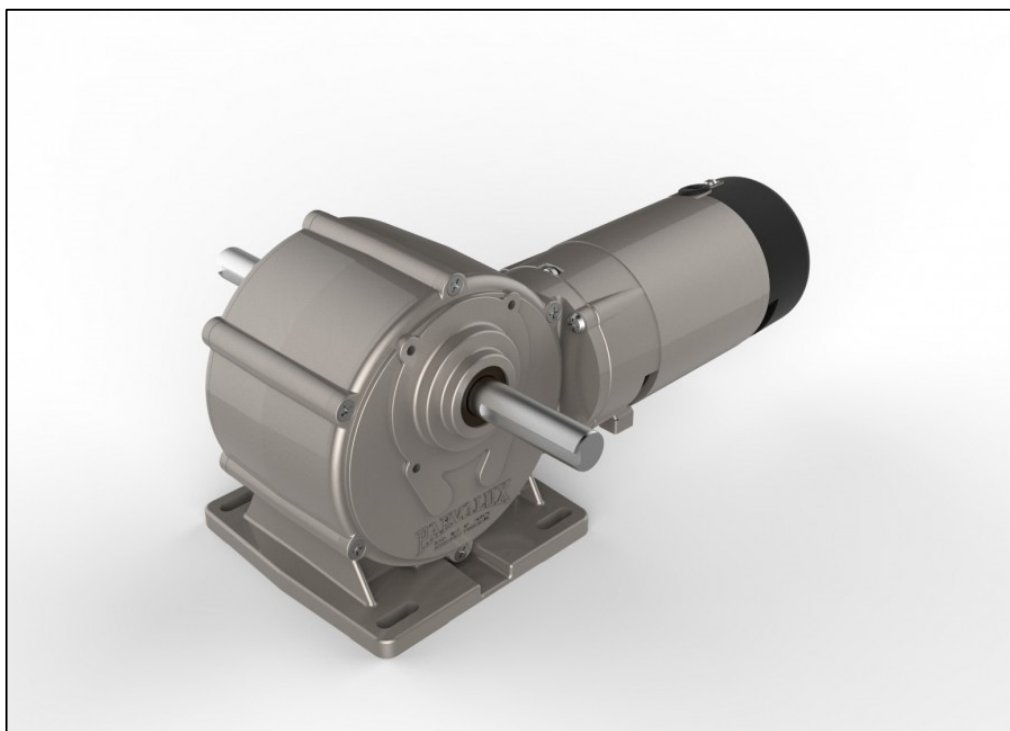
Yhdistelmävaihteen välityssuhde lasketaan kuvan 11 esimerkissä yksittäisten hammaspyöräparien välityssuhteiden tulona yhtälöllä

$$R = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{T_2}{T_1} \times \frac{T_2}{T_1}. \quad (15)$$

Sähkömoottori pyörittää kuvan 11 alennusvaihteen sisääntuloakselia ja siihen liitettyä kuvan vasemmanpuolimmaista pientä hammaspyörää pyörimisnopeudella n_1 , jolloin kuvan oikeanpuolimmainen iso hammaspyörä pyörii yhtälöllä 15 lasketun välityssuhteen arvon verran hitaammin kuin sisääntuloakselin pieni hammaspyörä, eli pyörimisnopeudella n_4 . Kuvan oikeanpuolimmainen iso hammaspyörä on liitetty alennusvaihteen ulostuloakseliin, jolloin ne pyörivät samalla nopeudella. [22.] Liittämällä yhä useampia vastaavanlaisia hammaspyöräpareja rinnakkain, saadaan yhdistelmäalennusvaihteen välityssuhdetta kasvatettua ja siihen liitettävän sähkömoottorin pyörimisnopeutta pienennettyä huomattavasti. Tämä sopii hyvin tilanteisiin, joissa haluttu pyörimisnopeus on erityisen pieni, mutta sähkömoottorin pyörimisnopeus suuri.

3.4 Sähkömoottorin valinta

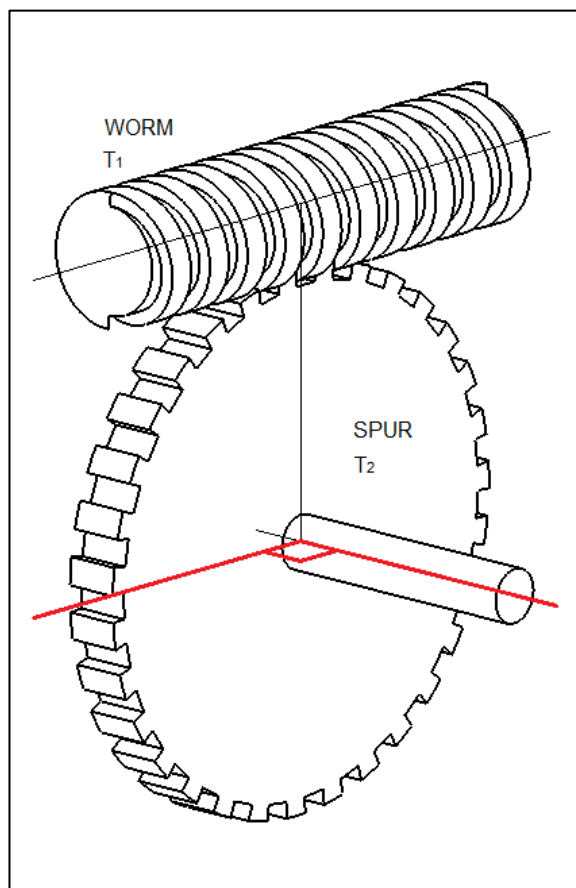
Putkea pyörittäväksi sähkömoottoriksi on valittu alla olevan kuvan 12 mukainen 12V tasavirralla toimiva harjallinen kestmagneettimoottori kierukkavaihteella, joka alentaa moottorin pyörimisnopeuden arvoon 6 rpm ja kasvattaa sen tuottaman momentin arvoon 100 Nm [23]. Valitun alennusvaihdemoottorin pyörimisnopeuden suurin arvo on siis suunniteltua (9,554 rpm) pienempi, jotta päästään lähelle haluttua 108 Nm vääntömomenttia.



Kuva 12. PM1-LWS (Permanent Magnet Large Worm Spur) eli alhaisen pyörimisnopeuden ja suuren vääntömomentin kestmagneettimoottori [24].

Tasavirralla toimivan moottorin pyörimisnopeutta voidaan muuttaa sen käyttöjännitteen rajoissa. Tämä on iso etu, sillä yhdistettynä IC 556 (Integrated Circuit) -mikropiiriin, valitun sähkömoottorin 12V jännitteen laskeminen lähelle 0V jännitettä pienentää moottorin pyörimisnopeuden sen pienimpään haluttuun arvoon 0,442 rpm. Lisäksi mikropiiri pitää sähkömoottorin tuottaman 100 Nm vääntömomentin vakiona, kun moottorin pyörimisnopeutta säädetään uudelleen määritellyllä pyörimisnopeusvälillä 0,442–6 rpm. Sähkömoottorin pyörimisnopeus on muutettavissa kyseisellä välillä riippumatta moottorin pyörimissuunnasta. [25.] IC 556 -mikropiiriin valinta ei ole osa tätä insinööriötä.

Valitun sähkömoottorin kierukkavaihte muistuttaa toiminnaltaan hyvin paljon hammasvaihdetta, jonka avulla alennusvaihteen toiminta on selitetty yllä olevissa esimerkeissä. Myös kierukkavaihteen välityssuhde voidaan laskea yhtälöllä 14, mutta sen rakenteessa on pieniä eroja: kierukkavaihteessa sisääntuloakselin hammaspyörän tilalla on kiereruuvi, joka pyörittää ulostuloakselin hammaspyörää 90° kulmassa alla olevan kuvan 13 mukaisesti [26].

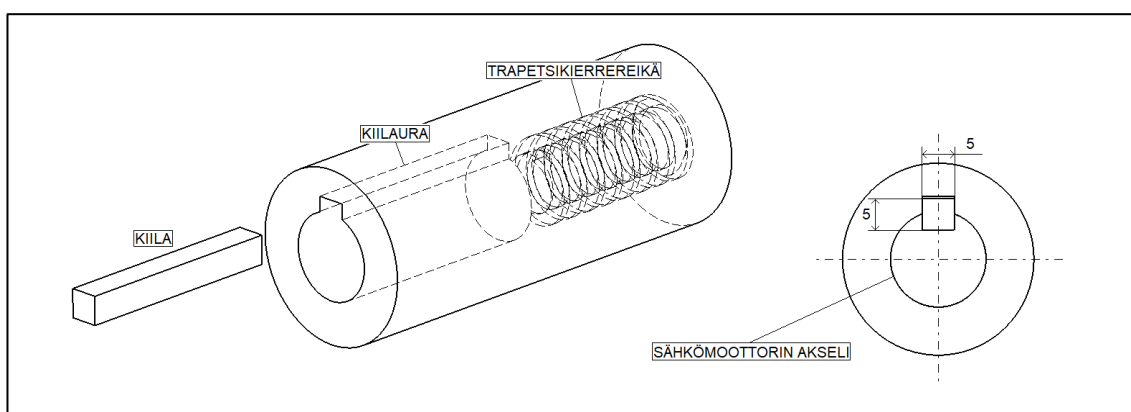


Kuva 13. Kierukkavaihteen kiereruuvin (Worm) ja hammaspyörän (Spur) pyörimisakselit ovat toisiinsa nähden 90° kulmassa. T_1 on kiereruuvin hampaiden lukumäärä ja T_2 on hammaspyörän hampaiden lukumäärä.

Kierukkavaihteen kiereruuvin ollessa yksihampainen, sen pyörittämän hammaspyörän hampaiden lukumäärä antaa suoraan vaihteen välityssuhteen (yhtälö 14), joka voi olla todella suuri suhteessa kierukkavaihteen pieneen kokoon.

Akselisovite

Valitun sähkömoottorin akseli on halkaisijaltaan 15 mm ja siinä on 38 mm pituinen kiilaura, jonka leveys on 5 mm [23]. Jotta sähkömoottorin akseli voitaisiin liittää putkea pyörittävään mekanismiin, myös sen akselisovitteessa on oltava kiilaura 5x5mm-kiilalle, jonka koko määräytyy sähkömoottorin akselin halkaisijan mukaan [27]. Kiila välittää sähkömoottorin tuottaman vääntömomentin putken pyöritysmekanismin ja estää sähkömoottorin akselin pyörimisen putken pyöritysmekanismin akselisovitteen sisällä [28]. Alla olevassa kuvassa 14 on putken pyöritysmekanismin akselisovite ja kiila, joka asennetaan akselisovitteen ja sähkömoottorin akselin väliin.



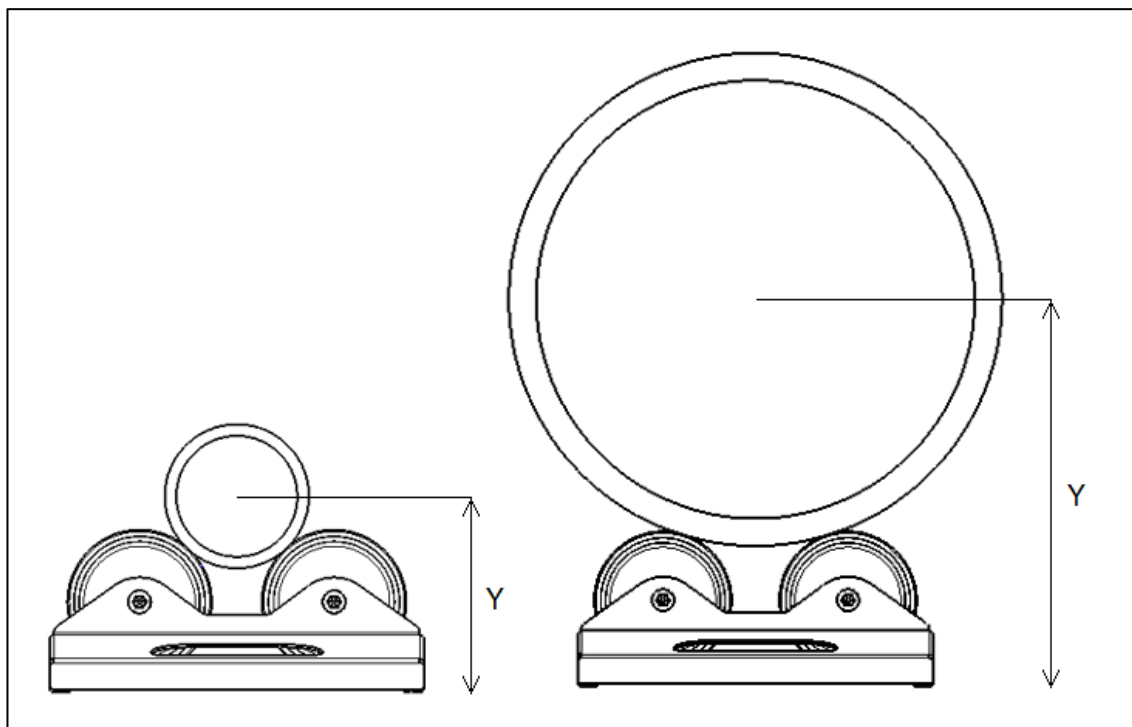
Kuva 14. Putken pyöritysmekanismin akselisovite, jonka sisään sähkömoottorin akseli työntyy kiilan kanssa. Akselisovitteen kiilaura on mitoitettava oikein suhteessa sähkömoottorin akselin kiilauraan, jotta niiden ja kiilan välinen liitos ei pettäisi. Akselisovitteen trapetsikierreikä on putken pyöritysmekanismin lävitse kulkevaa trapetsikierretankoa varten. Putken pyöritysmekanismin käsitellään kokonaisuutena myöhemmin.

3.5 Sähkömoottoriteline

Korkeudensäätö

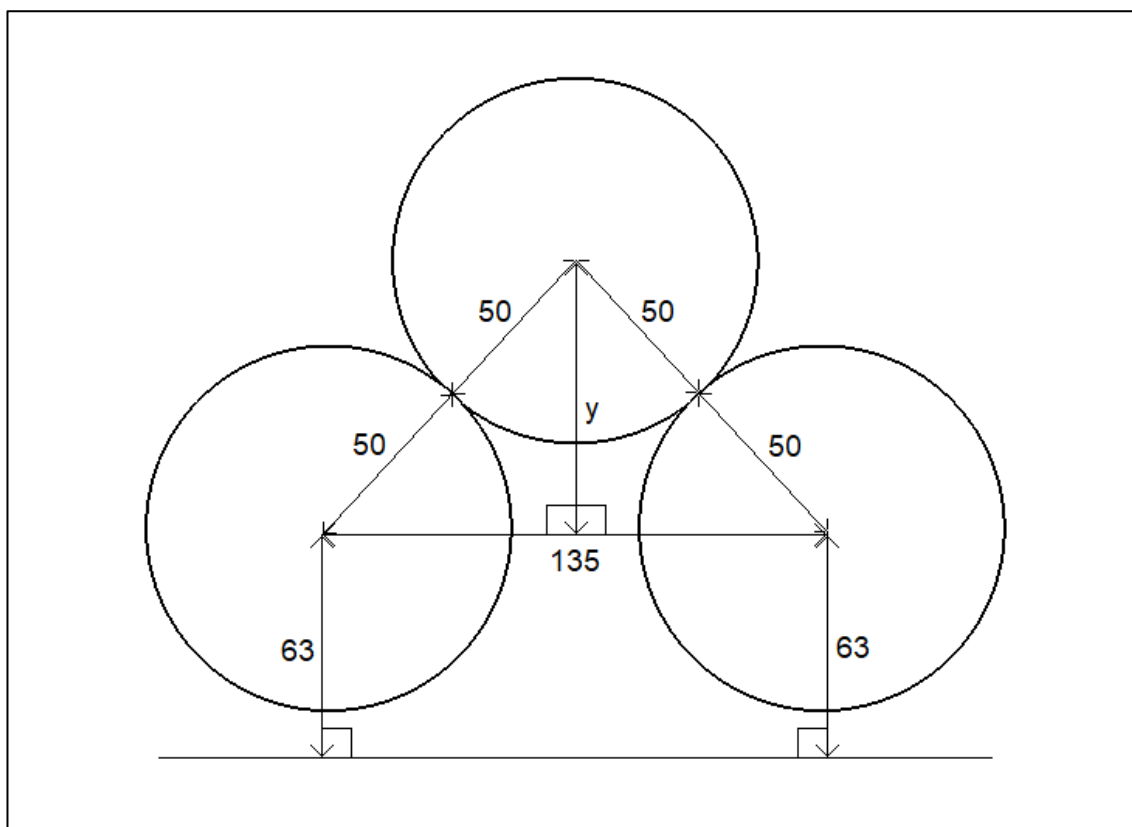
Leikkauksen aikana putki lepää erillisten putkitukien päällä. Nämä putkituet on sijoitettu aivan maanpinnan tasolle, eivätkä ne liiku missään vaiheessa leikkaustapahtumaa. Täten putkitukien rullien, joiden päällä putki lepää, pyörimisakseleiden kohtisuora etäisyys maanpinnan tasoon ja toisiinsa nähden pysyy koko ajan samana. Vastaavasti putken ulkohalkaisijan kasvaessa putkitukien päällä lepävän putken pyörimisakselin sijainnin

pysty- eli Y-koordinaatti kuitenkin kasvaa. Tämä tilanne on esitetty alla olevassa kuvassa 15 putken ulkohalkaisijan kasvaessa arvosta 100 mm arvoon 360 mm.



Kuva 15. Putken pyörimisakselin sijainnin Y-koordinaatti kasvaa putken ulkohalkaisijan kasvaessa. Y-koordinaatti kuvastaa kohtisuoraa etäisyyttä putken pyörimisakselin ja maanpinnan tason välillä.

Sähkömoottorin korkeudensäädön toteutuksen kannalta Y-koordinaatin arvo on laskettava sekä pienimmälle että suurimmalle putkikoolle. Saatavien arvojen erotus antaa putkea pyörittävän sähkömoottorin pystysuuntaisen siirtymän suuruuden, jolloin sähkömoottorin korkeussuunnassa säädettävän telineen liikerata voidaan sovittaa oikeisiin ala- ja ylämittoihin. Alla olevan kuvan 16 mukaisesti pienimmän putkikoon pyörimisakselin Y-koordinaatti voidaan laskea hyödyntäen Pythagoraan lausetta.



Kuva 16. Pienin putkikoko lepää kahden samankokoisen rullan päällä. Sekä putken että rullien säteiden pituus on 50 mm, ja rullien pyörimisakseleiden kohtisuora etäisyys maanpinnan tasoon on 63 mm. Muuttuja y kuvastaa putken pyörimisakselin kohtisuoraa etäisyyttä rullien pyörimisakseleiden yhdysjanaan.

Pythagoraan lause on muotoa

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad (16)$$

jossa a ja b ovat suorakulmaisen kolmion kateetit ja c on hypotenuusa [8, s. 36]. Kuvassa 16 esiintyvä y -muuttuja on suorakulmaisten kolmioiden kateetti, jonka pituus on Pythagoraan lauseen mukaan

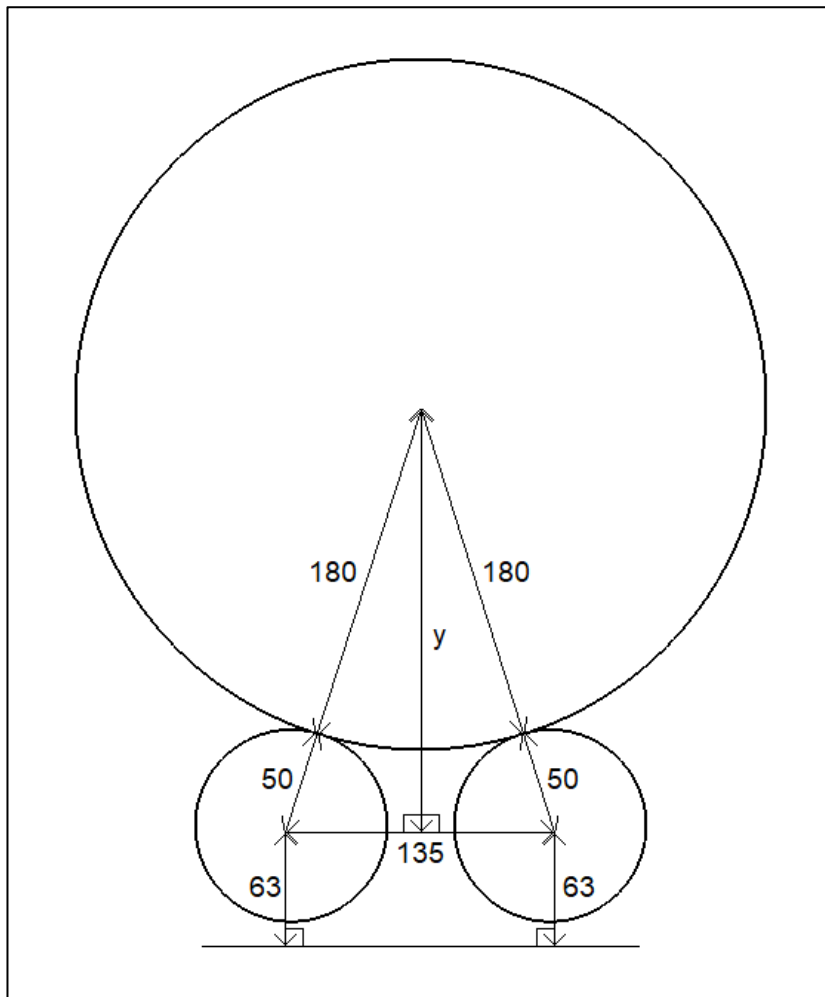
$$y = \sqrt{(50 \text{ mm} + 50 \text{ mm})^2 - \left(\frac{135 \text{ mm}}{2}\right)^2} \approx 73,8 \text{ mm}.$$

Näin ollen pienimmän putkikoon pyörimisakselin kohtisuoraksi etäisyydeksi maanpinnan tasoon saadaan

$$Y = y + 63 \text{ mm} = 73,8 \text{ mm} + 63 \text{ mm} = 136,8 \text{ mm} \approx 137 \text{ mm},$$

joka on matalin kohta, jossa sähkömoottori kiinnittyy putkeen.

Pienimmän putkikoon tapaan myös suurimman putkikoon pyörimisakselin Y-koordinaatti saadaan laskettua hyödyntämällä edellä mainittua Pythagoraan lausetta alla olevan kuvan 17 mitoilla.



Kuva 17. Suurin putkikoko lepää kahden yli kolme kertaa pienemmän rullan päällä. Putken säteen pituus on 180 mm, jolloin muuttujan y arvo on suurempi kuin pienimmän putkikoon tapauksessa.

Pythagoraan lauseella laskettu muuttujan y arvo on täten

$$y = \sqrt{(180 \text{ mm} + 50 \text{ mm})^2 - \left(\frac{135 \text{ mm}}{2}\right)^2} \approx 220 \text{ mm},$$

jolloin suurimman putkikoon pyörimisakselin kohtisuoraksi etäisyydeksi maanpinnan tasoon saadaan

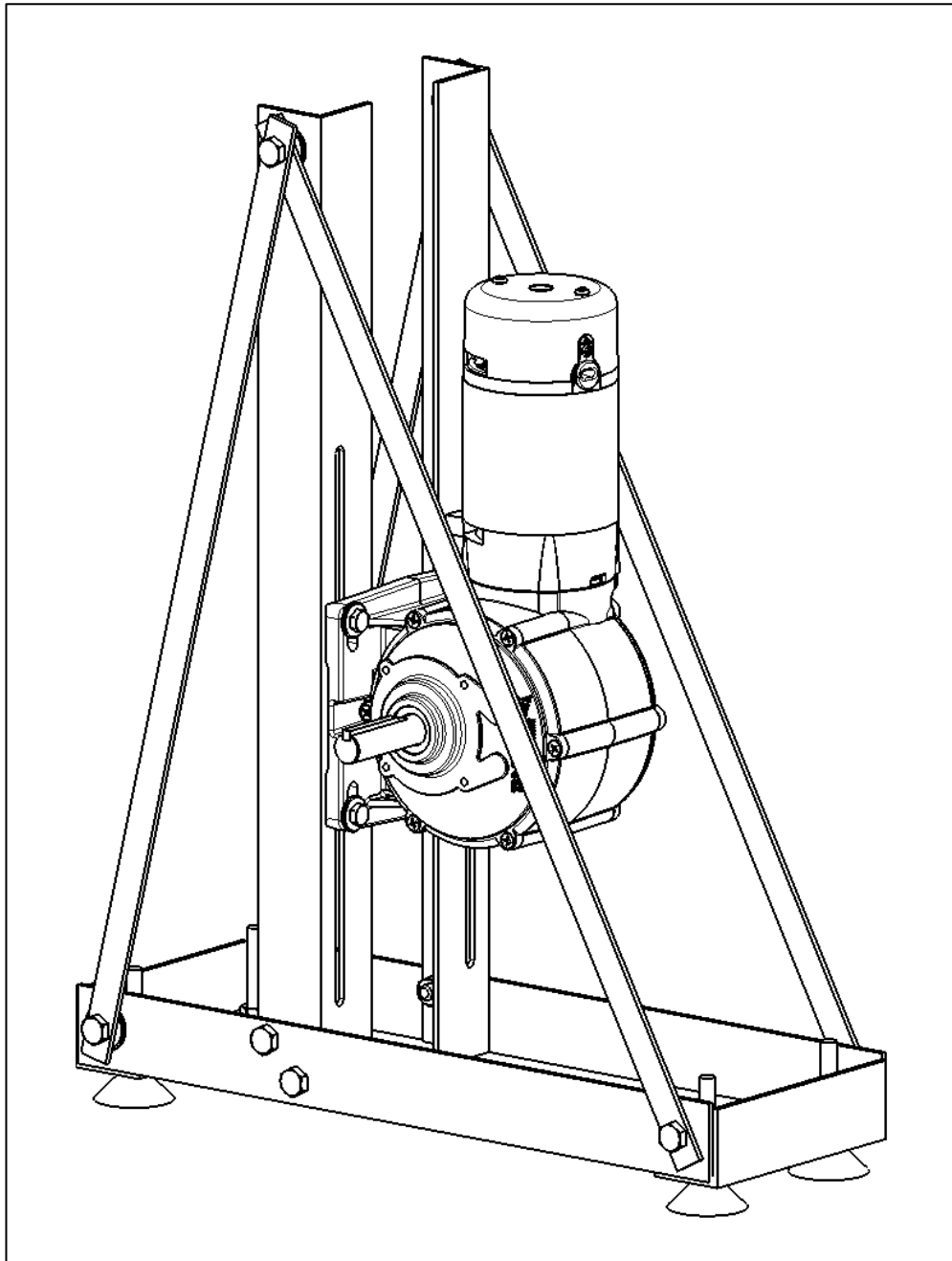
$$Y = y + 63 \text{ mm} = 220 \text{ mm} + 63 \text{ mm} = 283 \text{ mm},$$

joka on korkein kohta, jossa sähkömoottori kiinnittyy putkeen.

Sähkömoottorin ja putken liitoskohdan korkeuden vaihteluväli on täten 137–283 mm, jonka avulla sähkömoottoria nostava ja laskeva teline voidaan mitoittaa ja suunnitella oikein.

Telineen rakenne

Alla olevan kuvan 18 mukainen sähkömoottoriteline on suunniteltu L-kirjaimen muotoisesta 40x40x3mm-teräspalkista, joka on tukevaa ja mahdollistaa yksittäisten palkkien välisten M8-pulttiliitosten helpon kiristämisen, kun esimerkiksi U-palkissa kaksi seinämää rajoittaa asennustilaa huomattavasti.



Kuva 18. PM1-LWS-sähkömoottori ja sen teline.

Sähkömoottorin jalustan kulmissa on kapeat urat M6-pulteille, jotka muttereilla ja aluslevyillä kiristettyinä sähkömoottoritelineen pystypalkkien uriin, mahdollistavat sähkömoottorin korkeudensäädön. Rakenteen tukevoittamiseksi pystypalkkien urat on sijoitettu mahdollisimman lähelle palkkien taitosta, ottaen kuitenkin huomioon taitoskohdassa mahdollisesti olevan pyöristyksen, johon sähkömoottorin jalusta ei saa osua. Pystypalkkien urien pituus on mitoitettu niin, että ala-asennossaan sähkömoottorin akseli on 120

mm:n korkeudessa, kun taas yläasennossaan se on 300 mm:n korkeudessa. Edellä laskettu sähkömoottorin ja putken liitoskohdan korkeuden vaihteluväli (137–283 mm) osuu kyseiselle välille 120–300 mm, jonka ala- ja ylämitoissa on varmuusluku.

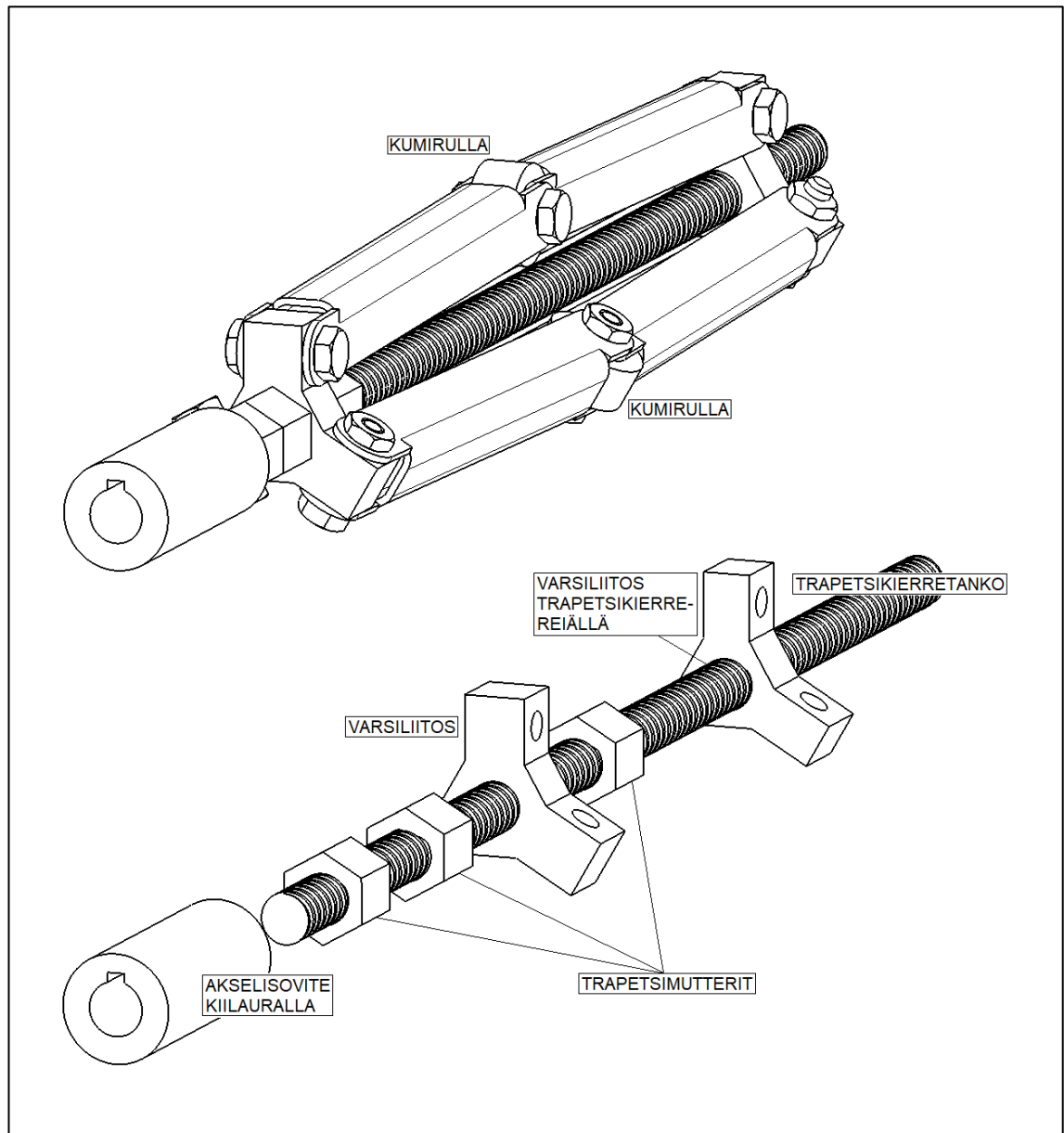
Lattaraudat ovat kiinni sähkömoottoritelineen pystypalkissa ja sen pohjan poikittaisessa palkissa telineen molemmin puolin. Lattarautojen tehtävänä on tukea pystypalkkeja sähkömoottorin pyörimissuuntaa päinvastaiselta momentilta, joka syntyy, kun sähkömoottori pysäytetään [29]. Näin lattaraudat estävät pystypalkkien kiertymisen, oli sähkömoottorin pyörimissuunta sitten kumpi tahansa.

Sähkömoottoritelineen pohja on muodoltaan suorakulmio, jonka kulmissa on kiinteät säätöjalat. Nämä säätöjalat liittävät sähkömoottoritelineen pohjan L-palkit kiinni toisiinsa ja kumoavat maanpinnan epätasaisuuksia testipenkillä leikattaessa. Säätöjalkojen korkeus on otettu huomioon sähkömoottorin akselin korkeudensäätöväliä mitoitettaessa.

4 Putken pyöritysmekanismi

Putken pyöritysmekanismeissa on kolme haaraa, jotka koostuvat leveästä ja kapeasta U-palkin muotoisesta varresta. M8-pultit ja -mutterit liittävät nämä 2 mm paksusta teräslevystä suunnitellut varret kiinni toisiinsa ja putken pyöritysmekanismin päätyjen liitospaloihin. Putken pyöritysmekanismin lävitse kulkee Tr14x4-trapetsikierretanko, jota kiertämällä myötä- ja vastapäivään saadaan pyöritysmekanismeja levennettyä ja kavennettua. Näin trapetsikierretanko muuttaa pyörivän liikkeen suoraviivaiseksi liikkeeksi ja tukee samalla putken pyöritysmekanismin rakennetta [30]. Putken pyöritysmekanismin toisen pään liitospalassa on Tr14x4-trapetsikierteinen reikä, jonka lävitse kiertyessään trapetsikierretanko mahdollistaa pyöritysmekanismin leveydensäädön.

Putken pyöritysmekanismin varsien liitoskohdissa on kumirullat, joiden avulla pyöritysmekanismi kiilautuu leikattavan putken sisäpinnalle. Trapetsikierretankoa kiertämällä kumirullien välinen etäisyys kasvaa tai pienenee riippuen putken koosta. Alla olevassa kuvassa 19 on putken pyöritysmekanismi kasattuna ja purettuna.



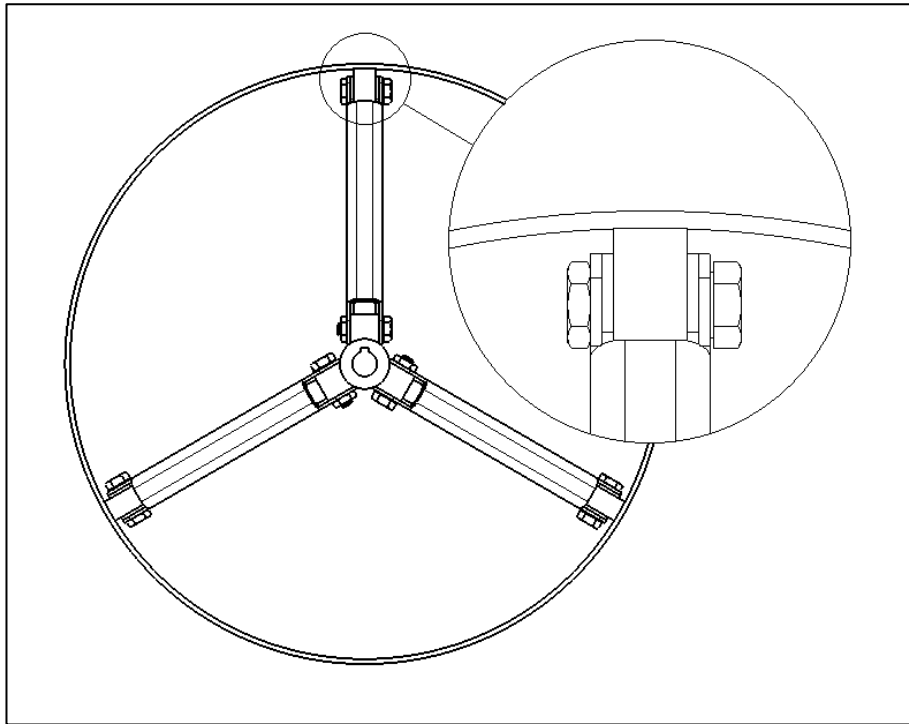
Kuva 19. Putken pyöritysmekanismi kapeimmillaan ja purettu näkymä sen säätöperiaatteesta.

Yllä olevan kuvan sähkömoottorin akselin jatkeeksi liitettävässä akselisovitteessa on kierre-reikä trapetsikierretangolle. Trapetsikierretanko kiertyy jälkimmäisen varsiliitoksen lävitse, kun sähkömoottori pyörittää akselisovitettä ja trapetsikierretankoa. Kahden trapetsikierremutterin välissä oleva ensimmäinen varsiliitos pysyy koko ajan paikoillaan, koska sen reiässä ei ole kierrettä. Kun trapetsikierretanko kiertyy myötäpäivään, jälkimmäinen varsiliitos lähestyy ensimmäistä varsiliitosta, koska varsiliitokset liittyvät toisiinsa putken pyöritysmekanismin haaroilla. Putken pyöritysmekanismi levenee, kunnes sen

kumirullat osuvat putken sisäpintaan. Oikeakätisten kierteiden takia putken pyöritysmekanismi kiristää samalla itseään, ja sen kaventaminen tapahtuu kiertämällä trapetsikierretankoa vastapäivään.

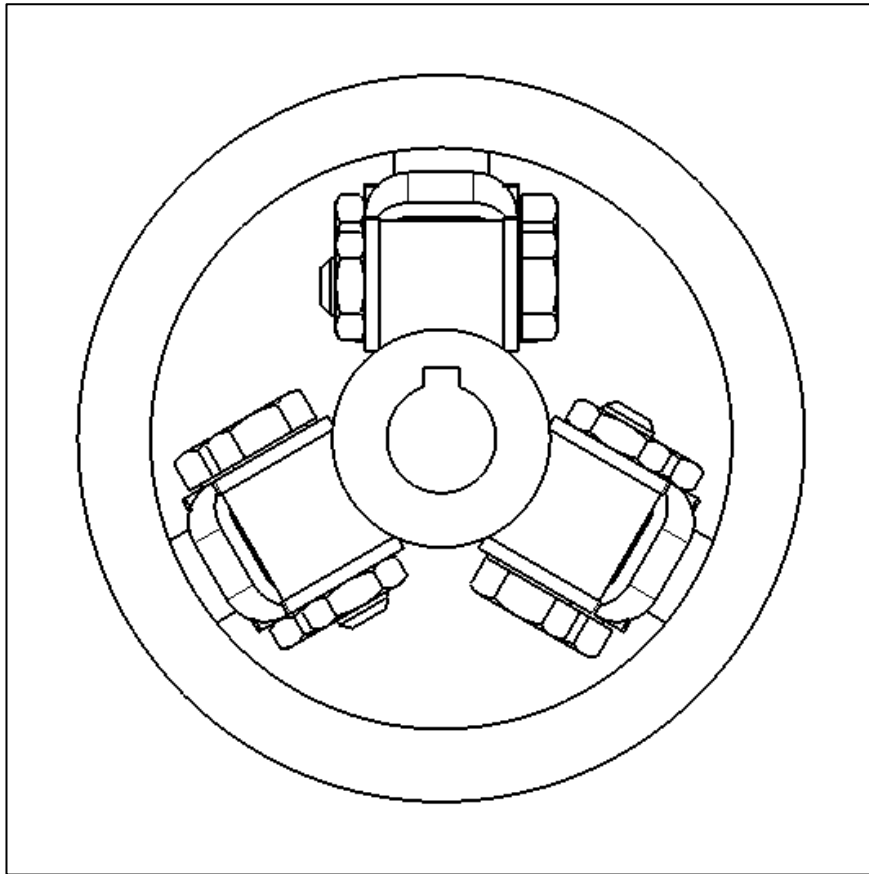
Kumi on valittu rullien materiaaliksi hyvien kitkaominaisuuksiensa takia, oli se sitten kosketuksissa lähes minkä tahansa muun materiaalin kanssa. Kumirullien ja putken sisäpinnan välinen lepokitkavoima pyrkii vastustamaan kumirullien ja täten koko putken pyöritysmekanismin luistamista putken sisällä. Putkenleikkaustapahtuman onnistumiseksi putken on pyörittävä pyöritysmekanismin mukana ilman niiden kosketuspintojen välistä luistoa. Edellä mainittu lepokitkavoima on sitä suurempi, mitä suurempi on kumirullien ja putken sisäpinnan välinen lepokitkakerroin. [31, s. 5, 8.] Suurimmalla osalla kosketuksissa olevista materiaaleista lepokitkakerroin saa arvon välillä 0–1, ja mitä lähempänä ollaan arvoa 1, sitä vähemmän keskenään luistavista kosketuspinoista on kyse [32]. Esimerkiksi kuivan kumin ja teräksen välinen lepokitkakerroin on 0,8 [33, s. 2], mikä kertoo kumin hyvistä pito-ominaisuuksista, oli leikattava putki valmistettu sitten teräksestä, muovista tai valuraudasta.

Putken pyöritysmekanismin ollessa leveimmillään ulkohalkaisijaltaan 360 mm:n ja seinämäpaksuudeltaan 3 mm:n putken sisällä, pyöritysmekanismin varret muodostavat trapetsikierretangon kanssa 58°:n kulman. Tällöin putken pyöritysmekanismin kumirullien ja putken sisäpinnan välinen kosketuspinta-ala on suurimmillaan. Alla oleva kuva 20 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 20. Putken pyöritysmekanismin kumirullien ja putken sisäpinnan välinen kosketuspinta-ala on suurimmillaan ulkohalkaisijaltaan leveimmän (360 mm) ja seinämänpaksuudeltaan ohuimman (3 mm) putken kohdalla. Kolmen haaran ansiosta putken pyöritysmekanismi keskittää itse itsensä putken pyörimisakselin mukaisesti.

Kapeimmillaan putken pyöritysmekanismin on mahdolltava ulkohalkaisijaltaan 100 mm ja seinämänpaksuudeltaan 10 mm olevan putken sisälle. Alla oleva kuva 21 havainnollistaa edellä mainittua tilannetta.

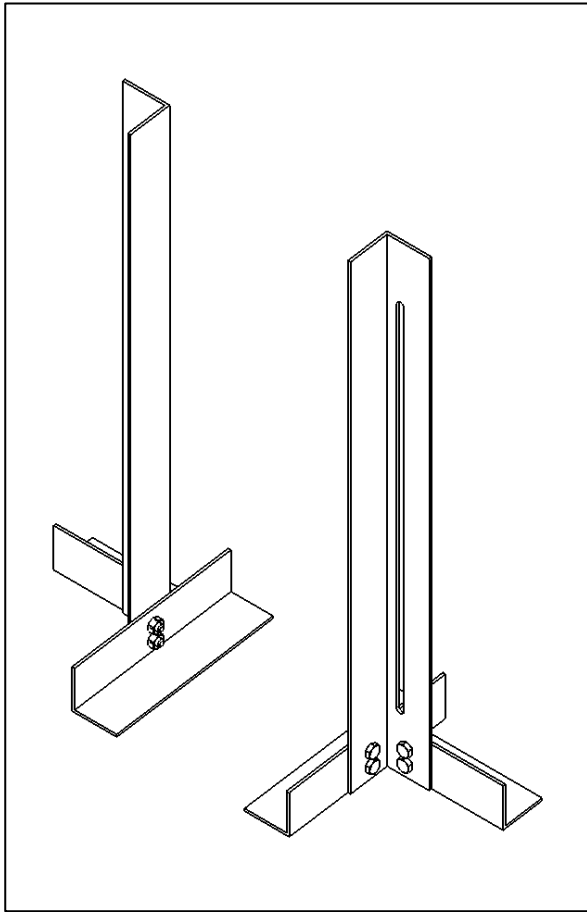


Kuva 21. Putken pyöritysmekanismi kapeimmillaan ulkohalkaisijaltaan 100 mm ja seinämänpaksuudeltaan 10 mm olevan putken sisällä. Varsien ja kumirullien kiinnityspisteissä on käytettävä pienikantaisia ja oikeanpituisia pultteja sekä matalia muttereita, jotta ne eivät osuisi putken sisäpintaan, kun putken pyöritysmekanismi säädetään haluttuun leveyteen.

Putken pyöritysmekanismi mahtuu kuitenkin vielä tätä pienempään tilaan, mikä helpottaa sen asettamista edellä mainitun putkikoon sisälle. Putken pyöritysmekanismi onkin ala-asennossaan, kun sen kumirullat osuvat trapetsikierrretankoon. Niiden välille on siis jätävä riittävästi tilaa säätöä varten.

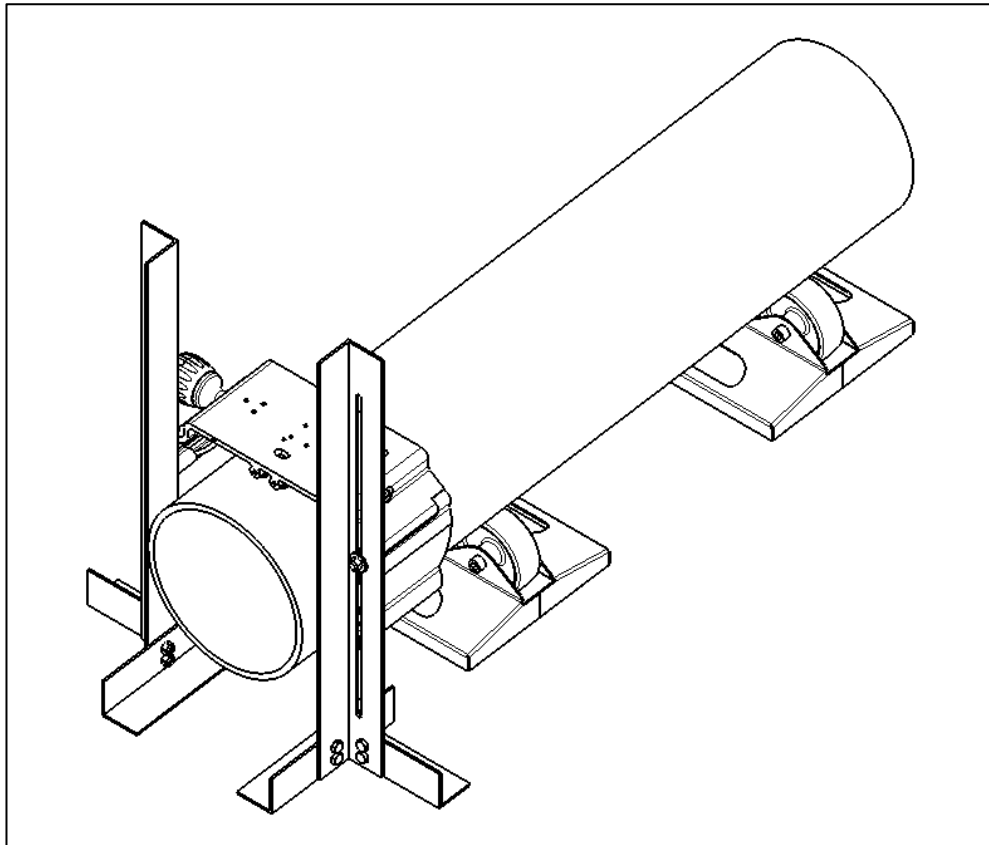
5 Putkisahateline

Putkisahateline koostuu kahdesta jalasta, joiden profiili on tukevaa L-kirjaimen muotoista 50x50x3mm-teräspalkkia. Palkkien välillä on pulttiliitokset, joiden sijainti saa jalkojen maanpinnan kanssa kosketuksissa olevat palkit risteämään, mikä auttaa jalkoja pysymään paremmin pystyssä. Putkisahatelineen jalat on esitetty alla olevassa kuvassa 22.



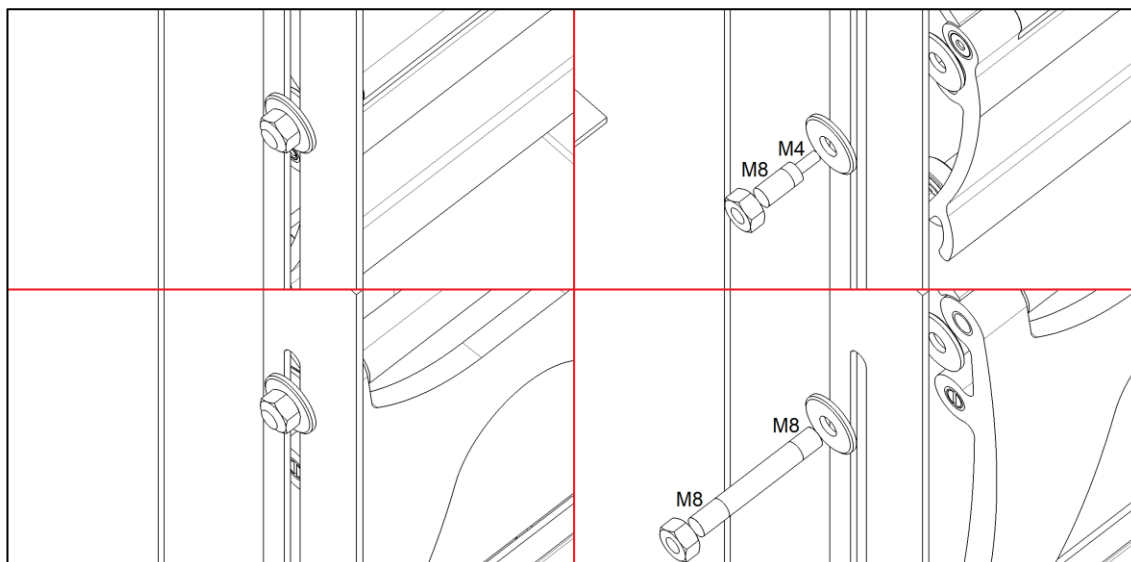
Kuva 22. Kolmesta L-palkista koostuvat putkisahatelineen jalat.

Jalkojen pystypalkissa on halkaisijaltaan 8 mm oleva ura putkisahan korkeudensäätöä varten, kun jalat kiinnittyvät putkisahan tarttujan niveltappien jatkeisiin alla olevan kuvan 23 mukaisesti.



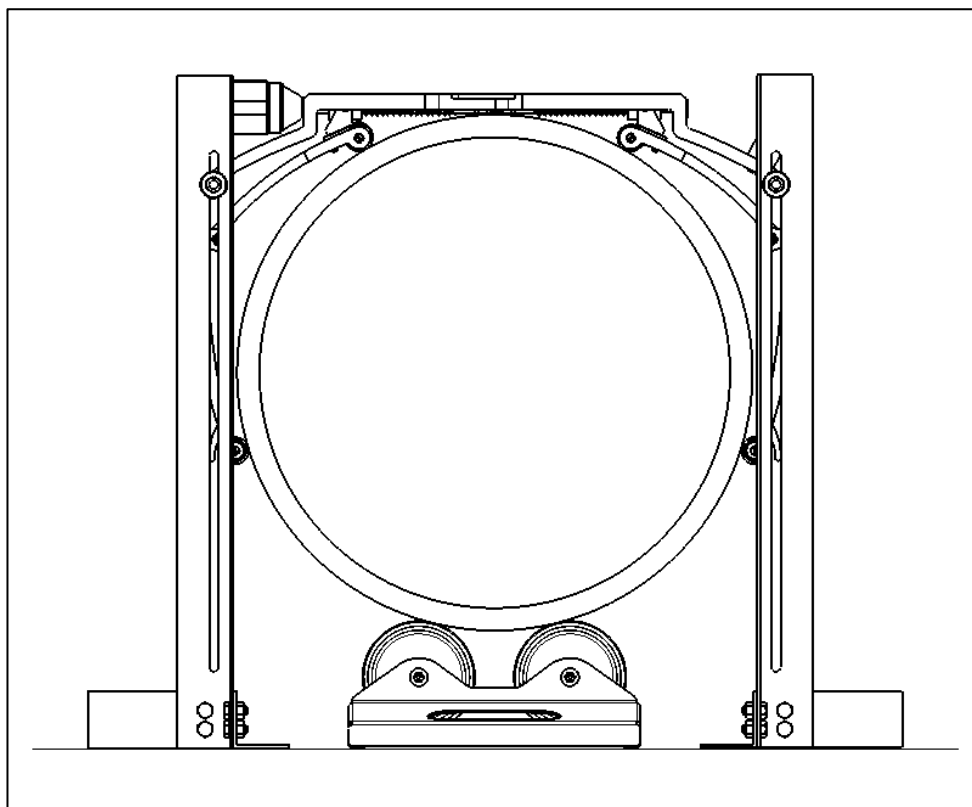
Kuva 23. Putkisahan jalat kiinni tarttujan etupuolelta. Putki lepää kahden putkituen päällä.

Putkisahan ja sen tarttujan on pysyttävä paikoillaan leikkuutapahtuman aikana, joten putkisahan jalkojen ja tarttujan välisten liitosten on oltava riittävän vahvoja putken pyörittämisestä aiheutuvan momentin kumoamiseksi. Kun putkisahan tarttuja kiinnitetään leikattavaan putkeen, sen niveltapit pysyvät koko ajan samassa paikassa. Täten putkisahan tarttujan niveltappeja voidaan pidentää putkisahan lukitsemisen toteuttamiseksi sekä korkeus- että sivuttaissuunnassa. Alla olevassa kuvassa 24 on esitetty Exact Pipe-Cut 220E System ja Exact PipeCut 460 Pro Series -putkisahojen tarttujen niveltappien ja jalkojen välisten liitosten rakenteelliset eroavaisuudet.



Kuva 24. Exact PipeCut 220E System ja Exact PipeCut 460 Pro Series -putkisahojen telineliitokset koottuina ja purettuina. Ensin mainitun putkisahamallin (ylempi kuvapari) tarttujan niveltapeissa on jo reikä M4-kierteelle, joten niveltapeille tulee vain mitoittaa jatkotapit M4- ja M8-kierteillä. Jälkimmäisen putkisahamallin (alempi kuvapari) tarttujan niveltapeissa ei ole valmiita kierrereikiä, joten niveltappien tilalle on suunniteltava uudet pidemmät tapit, joissa on M8-kierteet. Tappien pidentäminen johtuu siitä, että liitoksen kiristävän M8-mutterin ja putkisahan tarttujan väliin on jätävä tilaa putkisahatelineen jalalle ja kahdelle aluslevylle.

Aluslevyt tukevat pidennettyjen niveltappien ja putkisahatelineen jalkojen välistä liitosta, kun niveltapit työntyvät halkaisijaltaan samankokoisten putkisahatelineen jalkojen urien ja aluslevyjen reikien läpi. Liitoksen kiristävät mutterit on helppo pyörittää sivuilta paikoilleen putkisahatelineen jalkojen palkkien L-muodon takia. Putkisahatelineen jalkojen urien pituus on varmuuden vuoksi mitoitettu ulkohalkaisijaltaan 460 mm olevan putken mukaan, vaikka testipenkillä leikataan maksimiulkohalkaisijoiltaan 360 mm olevia putkia. Edellä mainittu tilanne on esitetty alla olevassa kuvassa 25.



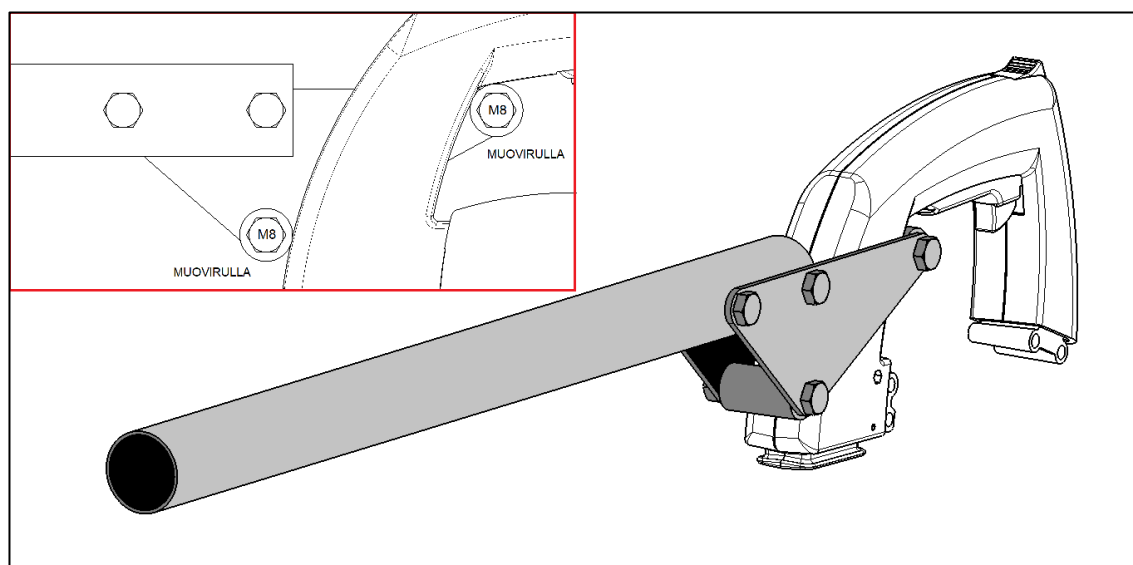
Kuva 25. Putkisahatelineen jalat ja ulkohalkaisijaltaan 460 mm oleva putki. Putkisahatelineen jalkojen urat ovat riittävän pitkät tarttujan ja jalkojen liitoskohdille, kun tarttuja on kiinnittynyt ulkohalkaisijaltaan 460 mm olevaan putkeen, joka lepää putkitukien päällä. Putken on mahdollista kulkemaan putkisahatelineen jalkojen välistä, joten niiden urat on sijoitettu mahdollisimman lähelle pystypalkkien taitosta.

6 Putkisan kahvan momenttivarsi

Putkisan kahvaa voidaan painaa monella eri tavalla, ja etenkin kahvan painamiseen käytettävä voima riippuu hyvin paljon putkisan käyttäjästä. Lisäksi jotkut painavat putkisan kahvaa suoraan alaspäin, kun taas toisilla kahvan painaminen tapahtuu hiukan viistosti. Nämä edellä mainitut muuttujat vaikuttavat suoraan siihen, miten putkisan terä lävistää ja leikkaa putkea. Käyttäjäsidonnaisten muuttujien tasoittamiseksi putkisan kahvaan on liitettävä momenttivarsi, jonka päähän lisättävä paino painaa putkisan kahvan alas aina samalla tavalla.

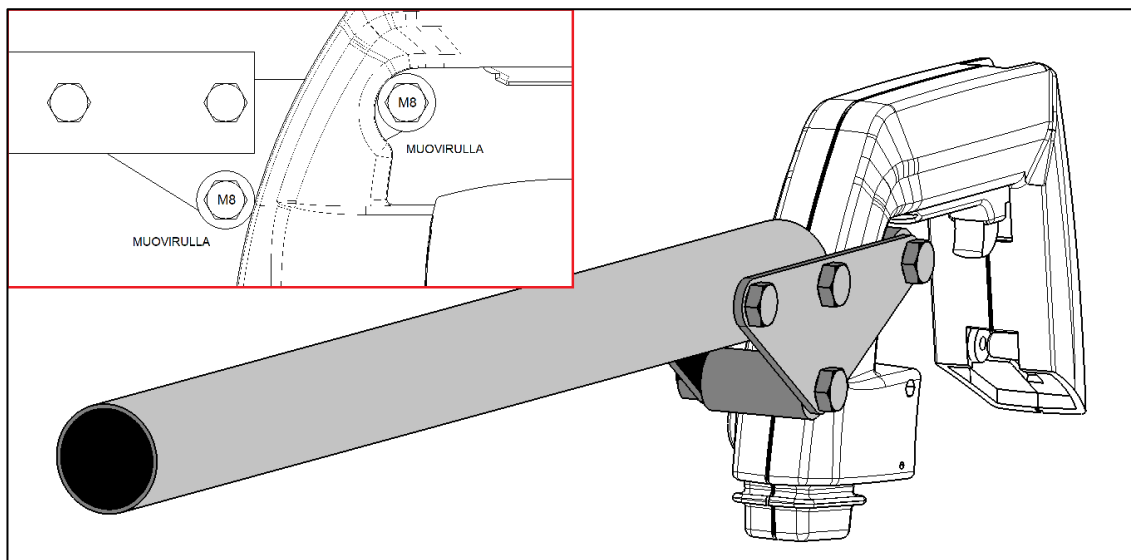
Putkisan uudelle ja vanhalle kahvamallille on omat momenttivartensa, jotka voi helposti vaihtaa käytettävän putkisan mukaan. Molemmat kahvamallit on valmistettu muovista, joten momenttivarret kiilautuvat kahvojen ulko- ja sisäpinnalle kahden POM-

muovista (polyasetaali) valmistetun rullan avulla, jotta kahvojen pinta ei naarmuuntuisi. Polyasetaalilla on hyvät kitkaominaisuudet ja mittapysyvyys [34, s. 1]. Muovirullat ovat pituudeltaan kahvojen levyisiä, ja niiden molemmilla puolilla on 3 mm paksuiset teräslevyt M8-pulteille tarkoitettuilla rei'illä. Pultit kulkevat muovirullien läpi ja ne myös kiinnittävät ohutseinäisen (1,5 mm) teräsputken levyjen väliin. Putkisahan kahva painuu alas, kun tämän putken päähän lisätään painoa. Liian painava teräsputki painaisi kahvan itse alas, mikä ei ole kuitenkaan toivottua, sillä kahvalle lisättävän painon määrän on oltava itse säädettävissä. Alla olevassa kuvassa 26 on esitetty putkisahan uuteen kahvamalliin liitetty momenttivarasi ja sen kiilautuminen kahvan pinnoille.



Kuva 26. Momenttivarasi liitettynä putkisahan kahvan uuteen malliin. Momenttivarasi kannattaa asentaa hiukan vinossa toisen puolen teräslevy irrotettuna, sillä kun momenttivarren suoristaa, sen muovirullat kiilautuvat tiiviisti kahvan pintoja vasten.

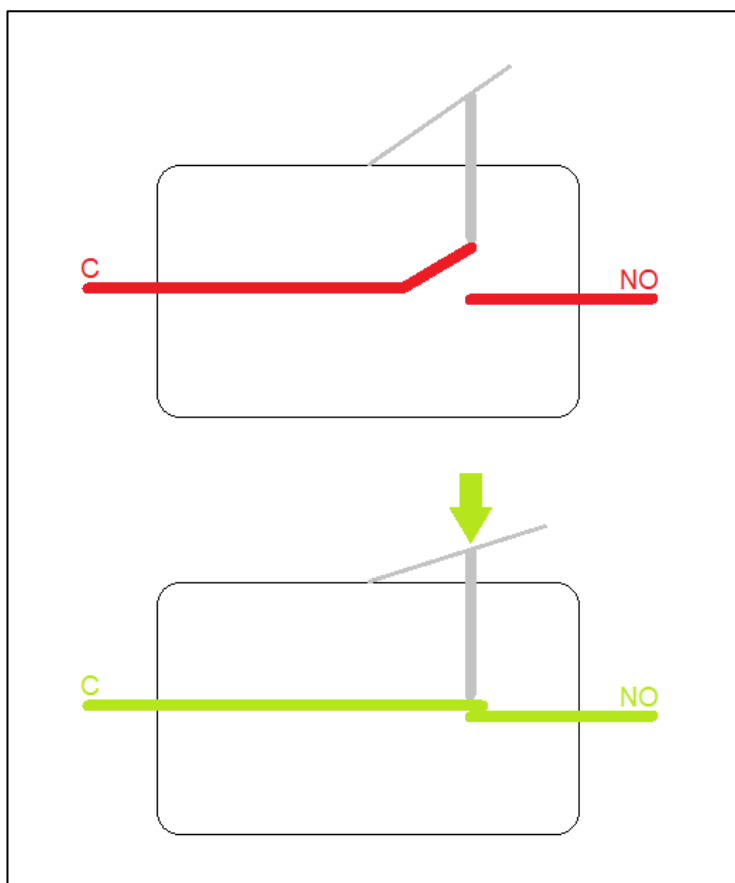
Vanha kahvamalli on muodoltaan hiukan erilainen, kuin uusi kahvamalli. Tämä on otettava huomioon momenttivarren teräslevyjen reikien sijainnissa, jotta muovirullien ja kahvan pintojen väliin ei jäisi tyhjää tilaa. Tällöin uutta kahvamallia pienemmän vanhan kahvamallin ja sen momenttivarren välinen liitos jäisi löysäksi, jolloin momenttivarasi ei olisi asennuksen jälkeen suorassa. Alla olevassa kuvassa 27 on vanha kahvamalli ja siihen liitetty momenttivarasi.



Kuva 27. Uutta kahvamallia pienempi vanha kahvamalli ja sen momenttivarsi.

7 Mikrokytkin

Leikattavaa putkea pyörittävän sähkömoottorin on alettava pyörittämään putkea vasta, kun putkisahan terä on leikannut putkea ala-asentoonsa asti. Tämä terän ala-asennon tunnistaminen onnistuu parhaiten pienikokoisen ja toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertaisen mikrokytkimen avulla. Mikrokytkimen lävitse kulkevan sähkövirran kulkusuuntaa pystytään mekaanisesti muuttamaan ulkoisen voiman avulla. Mikrokytkimen ulkopinnalla onkin tavallisesti vipu, nappi, rulla tai mäntä, jota painettaessa mikrokytkimen sisäinen kytkentä muuttuu vaikuttaen samalla virran kulkusuuntaan halutulla tavalla. Näin virta pääsee kulkemaan esimerkiksi käytettävään sähkölaitteeseen. Alla oleva kuva 28 havainnollistaa mikrokytkimen toimintaperiaatetta.



Kuva 28. Yksinkertaistetut läpileikkauskuvat mikrokytkimen kahdesta kytkennästä. Ylemmässä läpileikkauskuvassa mikrokytkin muodostaa avoimen virtapiirin, jossa virta ei pääse kulkemaan käytettävään sähkölaitteeseen, koska mikrokytkimen vipua ei paineta. Vastavasti alemmassa läpileikkauskuvassa mikrokytkimen vipua painetaan, jolloin syntyvä suljettu virtapiiri mahdollistaa virran kulkemisen laitteeseen, joka on tässä tapauksessa putkea pyörittävä sähkömoottori. [35.]

Virta kulkee mikrokytkimen sisälle C-navan (Common terminal) kautta, ja riippuen mikrokytkinmallista, virta poistuu joko NO- (Normally Open) tai NC-navan (Normally Closed) kautta. Avoimen virtapiirin mallissa C- ja NO-napa yhdistyvät mikrokytkimen vipua painettaessa (kuva 28), jolloin virralle muodostuu kulkureitti mikrokytkimen lävitse. Vastavasti suljetun virtapiirin mallissa C- ja NC-napa ovat kosketuksissa siihen asti, kun mikrokytkimen vipua painetaan, jolloin virran kulku estyy. On myös olemassa malli, joka sisältää kaikki kolme napaa. [36.]

Mikrokytkimet ovat halpoja, kestäviä ja luotettavia estäen esimerkiksi sähkölaitteen enenaikaisen käynnistymisen. Jokainen mikrokytkin on toimintaperiaatteeltaan samanlainen huolimatta siitä, muuttaako mikrokytkimen sisäistä kytkentää vipu, nappi, rulla vai mäntä. [37.]

Mikrokytkimen valinta

Putkisahan terän ala-asennon tunnistamiseen on valittu alla olevan kuvan 29 mukainen SPST-NO-mikrokytkin, joka estää putkea pyörittävän sähkömoottorin käynnistymisen, kunnes kytkimen vipua painetaan (NO-merkintä).

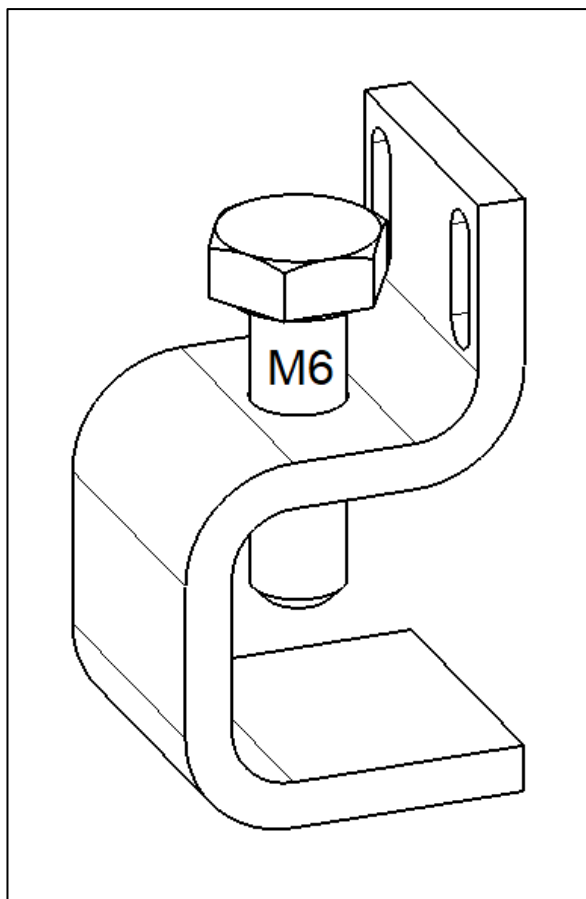


Kuva 29. Pienikokoinen SPST-NO-mikrokytkin vivulla [38].

Mikrokytkimen SPST-merkintä tulee siitä, että kytkintä voidaan käyttää ohjaamaan ainoastaan yhtä virtapiiriä (Single Pole), jonka kytkin sulkee yhdessä asennossa (Single Throw) [39]. Mikrokytkimen C- ja NO-navat sijaitsevat kytkimen oikealla sivulla, kun tavallisesti ne on sijoitettu kytkimen pohjaan. Tämä säästää asennustilaa mikrokytkimen korkeussuunnassa. Virta kulkee mikrokytkimen C-navalle mustaa johdinta pitkin ja poistuu kytkimen NO-navalta sinistä johdinta pitkin.

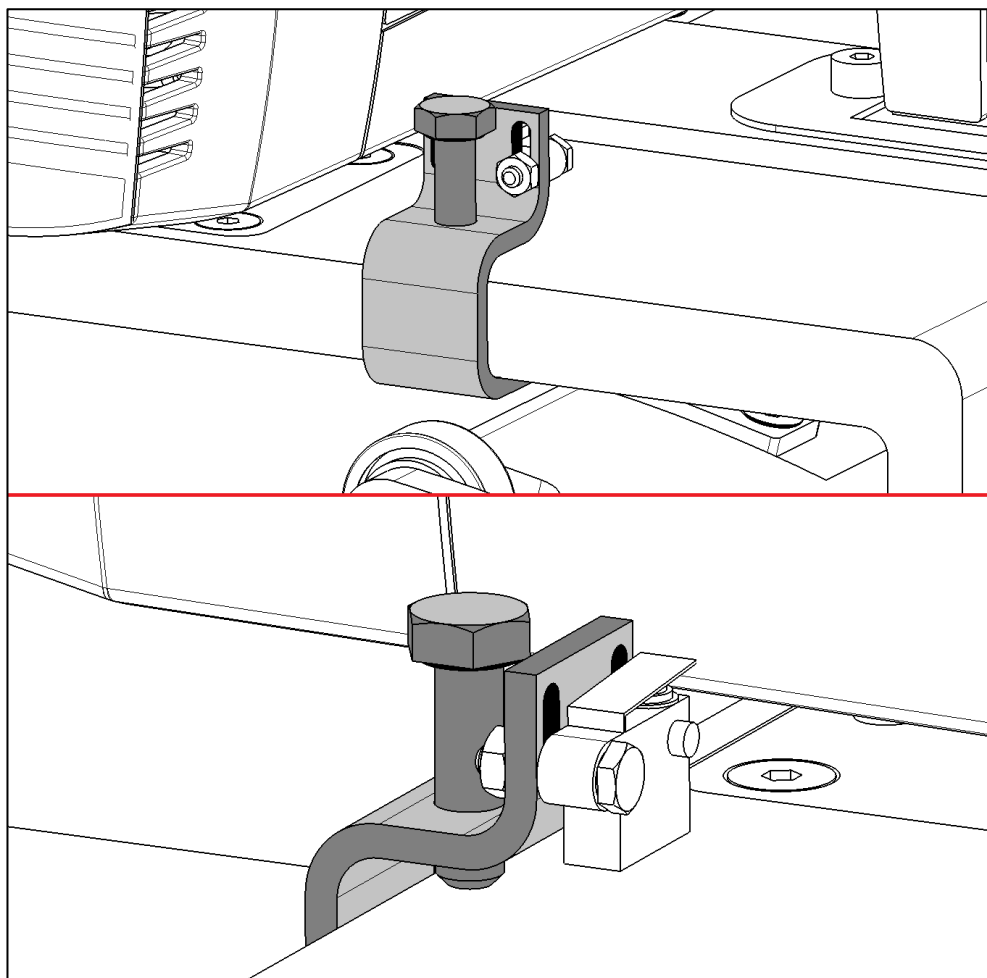
Mikrokytkinteline

Alla olevan kuvan 30 mukainen pienikokoinen mikrokytkimen teline on taiteltua alumiini-levyä, jonka paksuus on 3 mm. Telineen keskellä on kierrereikä M6-pultille, jolla teline voidaan kiristää kiinni erikokoisten putkisahojen tarttujien reunaan.



Kuva 30. Mikrokytkimen teline M6-pultilla.

Telineessä on urat sekä mikrokytkimen kiinnittämistä että sen korkeudensäätöä varten. Kun putkisahan terä leikkaa putkea ala-asentoonsa, putkisahan moottoriosaa taittuu lähelle putkisahan tarttujaa. Täten mikrokytkin ja sen teline on sijoitettava mahdollisimman lähelle putkisahan moottoriosan reunaa, jotta se painaisi mikrokytkimen vipua, kun putkisahan terä on leikannut putkea ala-asentoonsa asti. Mikrokytkimen korkeus ja sen telineen etäisyys putkisahan moottoriosasta on säädettävä jokaisen putkisahamallin kohdalla erikseen. Alla olevassa kuvassa 31 putkisahan moottoriosaa painaa mikrokytkimen vipua.



Kuva 31. Mikrokytkin ja sen teline lähellä putkisahan moottoriosan reunaa. Putkea pyörittävä sähkömoottori käynnistyy, koska putkisahan moottoriosaa painaa mikrokytkimen vipua. Mikrokytkimen telineen kiristyspultti on sijoitettu telineen yläosaan, koska alaosassa putkisahan tarttujan liikkuvat yläpyörät osuisivat siihen, kun tarttuja kiinnittyy putkeen. Terästä pehmeämpänä metallina alumiininen mikrokytkimen teline tekee sen ja putkisahan tarttujan välisestä liitoksesta joustavan.

Putkisahan terän leikattua putkea täyden kierroksen, putkea pyörittävän sähkömoottorin pysäyttäminen jää testipenkin käyttäjän vastuulle. Lisäksi käyttäjän on pysäytettävä putkisahan moottori ja nostettava sen terä takaisin yläasentoon.

8 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella putkisahatestipenkki, jonka avulla putken leikkuutapahtumaan vaikuttavista muuttujista saadaan enemmän tietoa, kun näitä muuttujia pääsee hallitusti säätämään. Testipenkki mahdollistaa erityisesti leikkuuterien kestävyys-
den testaamisen, kun se minimoi putkisahan käyttäjäkohtaisten muuttujien vaihtelut, kuten esimerkiksi tavan ja voiman, joilla putkisahan kahvaa painetaan tai millä nopeudella putkea leikataan.

Myöhemmin valmistettavan putkisahatestipenkin osat suunniteltiin ja mitoitettiin ottaen huomioon vaihtelevat putkisahakoot, niin että samat osat voidaan liittää erikokoisiin putkisahoihin. Tämä säästää materiaalikustannuksissa ja lisäksi osien kokoonpanoon kuluu vähemmän aikaa. Putkea pyörittävä sähkömoottori ja putkisahan terän ala-asennon tunnistava mikrokytkin valittiin laskettujen vaatimustensa mukaan. Myös komponenttien koolla oli merkitystä valinnalle, jotta ne muodostaisivat suunniteltujen telineidensä kanssa mahdollisimman vähän tilaa vievän kokonaisuuden. Putkisahatestipenkin valmistamisen helpottamiseksi, sen suunnitteluvaiheessa löydettiin sopiva mikropiiri putkea pyörittävän sähkömoottorin pyörimisnopeuden säätämiseksi.

Putkisahatestipenkin osien suunnittelussa pyrittiin helppoon valmistettavuuteen, kun suunnitelmiin sisällytettiin mahdollisimman paljon markkinoilta jo valmiiksi saatavia materiaaleja, joita muokattiin käyttötarkoitukseensa sopiviksi. Tästä esimerkkeinä ovat putkisahatelineen jalkojen ja sähkömoottoritelineen L-palkit, joihin mitoitettiin reiät ja urat kiinnitystä ja korkeudensäätöä varten. Uusien osien suunnittelussa opittiin yksinkertaistamaan osien rakennetta, tinkimättä kuitenkaan osien kestävydestä.

Putkisahatestipenkin suunnitelmat ovat valmiit valmistusvaihetta varten, ja sen osien toiminta saadaan selville vasta, kun testipenkin ensimmäinen versio on rakennettu ja se on käytössä. Tämän pohjalta testipenkkiin voidaan tehdä tarpeelliset parannukset sen oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi niin, ettei esimerkiksi putken pyöritysmekanismi pääse vääntymään isoimpien putkikokojen sisällä niitä leikattaessa.

Lähteet

- 1 MAG Tool. Exact PipeCut 460 Pro Series -putkisaha, laukku, putkituet ja TCT 165- terä. Viitattu 2.2.2021. <<https://magtool.com/new-products/exact-460>>.
- 2 Exact Tools Oy. Pipe cutting machine in use. Viitattu 2.12.2020. <http://cdn.primeweb.fi/www.exacttools.com/images/170_in_use_Hi_res.jpg>.
- 3 Käyttöohje. Verkkoaineisto. Exact Tools Oy. <http://cdn.primeweb.fi/www.exacttools.com/manuals2020/170170E220E/Exact_PipeCut_170-170E-220E_FI.pdf>. Päivitetty 31.8.2012. Luettu 2.12.2020.
- 4 Mullistavia ratkaisuja putkien sahaukseen ja viimeistelyyn. Verkkoaineisto. Exact Tools Oy. <<https://exacttools.com/fi/exact-tools/>>. Luettu 2.2.2020.
- 5 Red Dot. Pipe Cutting System Exact 220E, 280E, 360E. Viitattu 3.12.2020. <<https://www.red-dot.org/project/exact-220e-280e-360e-30776>>.
- 6 Haapala, Kalle. 2008. Koneajan laskeminen lastuvirran avulla. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 7 Tasainen ympyräliike. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/pihtipudas/luokio/oppiaineet/fysiikka/ujlja/muistiinpanot/k2ty:file/download/21436f047c7859470d0a5395711dcb5fd9cca0fd/kpl%20%20tasainen%20ympyr%C3%A4liike.pdf>>. Luettu 22.9.2020.
- 8 Seppänen, Raimo; Kervinen, Martti; Parkkila, Irma; Karkela, Lea & Meriläinen, Pekka. 2005. MAOL-taulukot. 2.–10. painos. Helsinki: Otava.
- 9 Peura, Pekka & Hellsten, Lauri. FY5: Pyörimisen liikeyhtälö ja energia. Verkkoaineisto. Opetus.tv. <<https://polku.opetus.tv/node/504>>. Luettu 1.10.2020.
- 10 Teräs. Verkkoaineisto. Teräsrakenneyhdistys. <<http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneollisuus/teras-materiaalina/terasta-ja-rautaa/>>. Luettu 3.10.2020.
- 11 Muovien tiheyksiä. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/jamsa/perusopetus/paunu2/luokat-oppiaineet/kemia/arl/9-luokan-ryhm%C3%A4t/arkisto/9a-kev%C3%A4t-2018/mj/mt/tta>>. Luettu 1.10.2020.
- 12 Meskanen, Seija & Höök, Tuula. 2015. Materiaalien ominaisuuksia. Verkkoaineisto. ValuAtlas. <https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/perusopas_22.pdf>. Päivitetty 10.11.2015. Luettu 1.10.2020.

- 13 Sähkökäytön mitoitus. Verkkoaineisto. ABB. <https://library.e.abb.com/public/b11dafe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf>. Luettu 6.10.2020.
- 14 Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Verkkoaineisto. ABB. <https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf>. Luettu 13.10.2020.
- 15 Jyrsinnän laskukaavoja ja määritelmiä. Verkkoaineisto. Sandvik Coromant. <<https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>>. Luettu 13.10.2020.
- 16 Sairanen, Teemu. 2011. Valukappaleen koneistuksen optimointi. Tutkintotyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. DocPlayer-tietokanta.
- 17 Average chip thickness – Full-Radius face milling. Verkkoaineisto. Meusburger. <<https://schnittdaten.meusburger.com/average-chip-thickness/>>. Luettu 25.1.2021.
- 18 Exact PipeCut 460 Pro Series. Verkkoaineisto. Exact Tools Oy. <<https://exacttools.com/product/exact-pipecut-460-pro-series/>>. Luettu 6.12.2020.
- 19 Lastuttavat materiaalit. Verkkoaineisto. Sandvik Coromant. <<https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>>. Luettu 14.10.2020.
- 20 What is Gear Reduction : Reduction Drive. Verkkoaineisto. SMLease Design. <<https://www.smlease.com/entries/mechanism/what-is-gear-reduction-reduction-drive/>>. Luettu 1.11.2020.
- 21 Gear Train : Gear Ratio, Torque and Speed Calculations. Verkkoaineisto. SMLease Design. <<https://www.smlease.com/entries/mechanism/gear-train-gear-ratio-torque-and-speed-calculation/>>. Luettu 8.12.2020.
- 22 Gear and Wheels Part 1. Verkkoaineisto. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=D_i3PJYtuY&t=213s>. Katsottu 6.11.2020.
- 23 PM1LWS. Verkkoaineisto. Parvalux. <<https://www.parvalux.com/media/wysiwyg/parvalux/datasheets/pm1-lws-data-sheet-10-10-2016.pdf>>. Päivitetty 10.10.2016. Luettu 15.1.2021.
- 24 Parvalux. PM1-LWS-kestomagneettimoottori. Viitattu 15.1.2021. <<https://www.parvalux.com/pm1-lws-pmdc-motor-family.html>>.

- 25 Simple DC Motor Speed Controller Circuits Explained. Verkkoaineisto. Home-made circuits. <<https://www.homemade-circuits.com/dc-motor-speed-controller-circuits/>>. Päivitetty 23.2.2020. Luettu 15.1.2021.
- 26 Ryan, V. WORM GEARS. Verkkoaineisto. Technology Student. <<https://technologystudent.com/gears1/worm1.htm>>. Luettu 15.1.2021.
- 27 Keyway Standards. Verkkoaineisto. Bearings & Industrial Supplies. <<http://www.bearing.net.au/wp-content/uploads/2014/11/BIS-Keyway-Standards.pdf>>. Päivitetty 11/2014. Luettu 22.1.2021.
- 28 Why Power Transmission Shafts Have Both Keys and Keyways. Verkkoaineisto. Lovejoy. <<https://www.lovejoy-inc.com/resources/technical-articles/why-power-transmission-shafts-have-both-keys-keyways/>>. Luettu 22.1.2021.
- 29 Motor fwd/rev and braking methods. Verkkoaineisto. Industrial Electronics. <http://www.industrial-electronics.com/ptee_4c.html>. Luettu 25.1.2021.
- 30 Trapetsiruuvit. Verkkoaineisto. Mekanex Oy AB. <<https://www.mekanex.se/wp-content/uploads/trapetsskruvar-fi.pdf>>. Luettu 3.11.2020.
- 31 Kitka syntyy pintojen vuorovaikutuksesta. Verkkoaineisto. Weebly. <<http://ohtonen.weebly.com/uploads/2/5/4/2/25424534/kitka.pdf>>. Luettu 26.11.2020.
- 32 Friction review. Verkkoaineisto. Khan Academy. <<https://www.khan-academy.org/science/high-school-physics/two-dimensional-motion-2/friction/a/friction-ap-physics-1>>. Luettu 26.11.2020.
- 33 Material Contact Properties Table. Verkkoaineisto. <http://atc.sjf.stuba.sk/files/mechanika_vms_ADAMS/Contact_Table.pdf>. Päivitetty 8.8.2008. Luettu 26.11.2020.
- 34 Nykänen, Sanna. Polyasettaali (POM). Verkkoaineisto. ValuAtlas. <https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/plastics_POM_FI.pdf>. Luettu 29.1.2021.
- 35 Avoin ja suljettu virtapiiri. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/siikalatva/peruskoulut/pp/luokat-1-6/luokka-3-4/3-luokka/e33/fysiikka4/vl/ajsv>>. Luettu 17.11.2020.
- 36 Micro Switch or Snap-action Switch. Verkkoaineisto. Components101. <<https://components101.com/switches/micro-switch-or-snap-action-switch>>. Päivitetty 20.8.2018. Luettu 10.12.2020.

- 37 Microswitches. Verkkoaineisto. RS Components. <<https://uk.rs-online.com/web/c/switches/microswitches-accessories/microswitches/>>. Luettu 17.11.2020.
- 38 SPST-NO-mikrokytkin vivulla. Verkkoaineisto. Radioduo Oy. <<https://www.radioduo.fi/mikrokytkin-snap-action--vivun-kanssa--spst-no--0-1a-125vac/p/D2HW-C213MR/>>.31.12.2020.
- 39 What do SPST, SPDT, DPST, and DPDT mean? Verkkoaineisto. Littelfuse. <<https://www.littelfuse.com/technical-resources/technical-centers/commercial-vehicle-technical-center/poles-and-throws.aspx>>. Luettu 31.12.2020.