



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PAAVO HONKANEN
PAALUNKATKAISULAITTEEN TUOTEKEHITYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
3. kesäkuuta 2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

HONKANEN, PAAVO: Paalunkatkaisulaitteen tuotekehitys

Diplomityö, 105 sivua, 39 liitesivua

Huhtikuu 2016

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: tuotekehitys, paalujen katkaisu, teräsputkipaalu

Tämä diplomityö on tehty osana Enmac Oy:n uusien tuotteiden kehittelyä. Työ esittelee paalunkatkaisulaitteeseen tehtyä tuotekehitysprojektia ensimmäisen prototyypin testeihin asti. Itse projekti jatkuu vielä tämän jälkeen, mutta ensimmäisen prototyypin jälkeiset projektin vaiheet eivät ehtineet tämän työn piiriin. Idea tuotteen kehitykseen on saatu paalujen kanssa työskentelevän kohderyhmän kontaktin kautta.

Projektin tavoitteena oli suunnitella kevyt, yksinkertainen ja käsikäyttöinen paalunkatkaisulaite. Laitteella on tarkoitus katkaista ainoastaan teräsputkipaaluja. Laitteen tulisi kyetä katkaisemaan mahdollisimman montaa paalukokoa, joiden halkaisija on lähellä 320 mm:ä. Tämän kokoisia paaluja käytetään yleisesti esimerkiksi työsilloissa. Katkaisun tulisi olla mahdollista maalla ja vedessä.

Tämä diplomityö jakautuu kahteen pääosuuteen. Ensimmäisessä osuudessa on esitelty projektille oleellista taustatietoa sekä teräksen katkaisua teoreettisesti. Teoriaosuudessa on esitelty yksi mekaaninen katkaisumenetelmä laajasti ja yksi terminen menetelmä lyhyesti. Suunnitteluprosessiin liittyen on esitetty yksi kehys kirjallisuudesta ja toteutetun projektin rakenne.

Toinen pääosuus keskittyy käytännön toteutukseen. Tässä yhteydessä tuotteen toteuttamiseksi ideoitiin erilaisia periaatteellisia ratkaisuja. Tämän jälkeen näistä kehitettiin konsepteja, joita parantelemalla päädyttiin valmistettavan prototyypin konseptiin. Prototyypin aikaansaamiseksi sen rakennetta ja komponentteja mitoitettiin laskelmiin pohjautuen. Prototyypille suoritettiin myös testejä, joilla kokeiltiin laitteen toimintaa käytännössä. Laitteen eri toiminnallisuuksia testattiin testivälineiden puitteissa erikseen.

Prototyypin testien perusteella laite vaatii vielä lisää testejä ja jatkokehittelyä. Prototyyppi toimii hetimitäin halutulla tavalla, mutta näin toimiakseen se vaatii laitteen säätöjen muuttamista ajon aikana. Tuotteen kehitystä voisi jatkaa valitsemalla joillekin pääkomponenteille erilaiset suoritusarvot. Myös itse katkaisumenetelmälle voisi pohtia muita vaihtoehtoja. Testiolosuhteista johtuen prototyypin testit tehtiin maalla yhdelle vaakasuuntaiselle paalulle. Testejä tulisi tehdä vielä erikokoisille pystysuuntaisille paaluille niin vedessä kuin maalla.

ABSTRACT

HONKANEN, PAAVO: Product development of a pile cutter
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 105 pages, 39 Appendix pages
April 2016
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
Major: Design of machines and systems
Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: product development, pile cutting, steel pipe piles

This thesis has been done as part of Enmac Oy's product development. This work presents the product development project of a pile cutting machine up to the first tests of the prototype. The project continues after this but these subsequent steps aren't included in this work. The idea for the implementation of this product has come from a contact that works with piles.

The aim of the project was to design a pile cutter that is lightweight, simple and hand held. The product is to be used only for cutting steel pipe piles. The machine is supposed to be able to cut as many pile sizes that are close to 320 *mm* in diameter as possible. Piles of this size are commonly used in temporary bridges. Cutting should be possible both on land and in water.

This thesis is divided into two main parts. In the first part essential background information of the project and a part of steel cutting theory are presented. In the theory section one mechanical cutting method is presented in detail and one thermal method briefly. With respect to the design process one model from literature and the structure of the implemented project is shown.

The other part focuses on the practical execution of this project. Here various schematic solutions were composed in order to realize the product. Using the schematic solutions concepts were made and further developed until a satisfactory concept was found for the prototype that is to be manufactured. In order to complete the prototype its structure and components were designed based on calculations. Tests were also performed on the prototype in order to test it in practice. Functionalities of the machine were tested separately as much as the testing equipment allowed.

Based on the test of the prototype more test and refinement need to be done. The prototype functions correctly intermittently but it needs adjustment of its controls during operation. One way to further develop this product could be a different choice of specifications for some of the key components. Also an alternative cutting method could be considered. Because of test circumstances prototype tests were performed only on a single horizontal pile on land. Additional test ought to be done on vertical piles of different diameter both in water and on land.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Enmac Oy:n uusien tuotteiden kehitystä. Työ käsittelee paalunkatkaisulaitteen tuotekehitysprojektia. Idea tuotteen suunnitteluun on saatu paalujen kanssa työskentelevän kohderyhmän kontaktin kautta. Haluan kiittää Enmac:n henkilöstöstä erityisesti Sampo Siukoa ja Erkki Suontakaa diplomityön aiheesta ja projektin aikaisesta ohjauksesta. Tämän lisäksi osoitan kiitokseni Jaakko Mähöselle avusta projektin pneumatiikkaosiossa. Myös Jani Sahramäki ansaitsee kiitoksen virtausteknisistä neuvoista. Osoitan arvostukseni niin ikään koko Enmac:n henkilöstölle hyvästä työilmapiiristä vuosien varrelta.

Paaluihin liittyvän työmaalla tehtävän työn selostamisesta kiitän Juuso Siukoa. Myös Aki Kopraa kiitän samasta asiasta. Diplomityön tarkastamisesta kiitän professori Asko Ellmania. Kiitän häntä myös opastuksesta.

Esitän korvaamattoman kiitokseni ennen kaikkea vanhemmilleni. He ovat aina jaksaneet tukea ja motivoida minua opinnoissani.

Tampereella, 22.03.2016

Paavo Honkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TAUSTOJEN ESITTELY	3
2.1	Paalujen esittely.....	3
2.1.1	Yleistä tietoa paaluista	3
2.1.2	Puupaalut.....	6
2.1.3	Teräsbetonipaalut	7
2.1.4	Teräsputkipaalut.....	8
2.1.5	Muut paalutyypit	11
2.1.6	Yhteenveto paaluista	11
2.2	Nykyiset katkaisumenetelmät	13
2.2.1	Katkaisusta yleisesti	13
2.2.2	Katkaisuun kehiteltyjä tuotteita	14
2.3	Tuotteeseen vaikuttavat tekijät.....	20
2.4	Tuotteen rajaus ja suunnitteluvaatimukset	21
3.	KATKAISUN TEORIA.....	25
3.1	Lastuavan työstön perusteet	25
3.1.1	Katkaisulaikalla katkaisemisen ja lastuava työstö	25
3.1.2	Ortogonaalinen lastuamismalli	26
3.1.3	Lastun leikkaantuminen	27
3.1.4	Lastuamisvoimat ja jännitykset.....	29
3.1.5	Teho ja ominaisenergia	32
3.2	Hiomisen perusteet.....	35
3.2.1	Katkaisu geometrisesti määräämättömällä terällä.....	35
3.2.2	Hioma-aineet: abrasiiviset partikkelit	36
3.2.3	Hiomarakeen koko	38
3.2.4	Hiomarae laikassa	39
3.2.5	Hiomarakeen rakenne ja kovuus	40
3.2.6	Laikan sidemateriaalit	41
3.2.7	Laikkojen merkintäjärjestelmä.....	42
3.2.8	Hiomarakeen ja työkappaleen erilaiset kosketukset	43
3.2.9	Teho ja ominaisenergia hiomisessa.....	44
3.2.10	Mahdollinen katkaisupaksuus	46
3.3	Teräksen katkaisu polttoleikkaamalla	46
4.	SUUNNITTELU METODIIKKA	49
4.1	Kirjallisuudessa esitetty tuotekehitysprojektin rakenne.....	49
4.1.1	Perusidea	49
4.1.2	Vaihe 1: Tehtävän selvittely	51
4.1.3	Vaihe 2: Luonnostelu	51
4.1.4	Vaihe 3: Kehittely	52

4.1.5	Vaihe 4: Viimeistely	52
4.1.6	Mallin soveltuvuus käytäntöön	53
4.2	Toteutetun projektin rakenne	54
5.	ERILAISET KONSEPTIVAIHTOEHDOT	57
5.1	Erilaisia periaatteellisia ratkaisuja	57
5.2	Valittu periaatteellinen ratkaisu	59
5.3	Valitun periaatteellisen ratkaisun erilaisia toteutuksia	59
5.3.1	Konsepti 1: Remmiveto	59
5.3.2	Konsepti 2: Ketjuveto yhdellä sylinterillä	61
5.3.3	Konsepti 3: Ketjuveto kahdella sylinterillä kiinteässä rungossa....	62
5.4	Prototyypin konsepti	63
5.4.1	Idean lähtökohta	63
5.4.2	Oleellisimpien osien esittely	65
5.4.3	Pneumatiikkakaavio	66
5.4.4	Laitteen toimintasykli	67
5.4.5	Suunnitteluvaatimusten toteutuminen	69
6.	TOIMILAITTEIDEN JA KOMPONENTTIEN VALINTA	71
6.1	Terää työntävä sylinteri	71
6.2	Laitteen paalun ympärille kiristävä sylinteri	73
6.3	Terää pyörittävä moottori	74
6.4	Laitetta paalun ympäri pyörittävä moottori	77
6.5	Erikseen valmistettavat osat	79
6.6	Laakerit	79
6.7	Laikat	80
6.8	Ketju	81
6.9	Ketjupyörä	82
6.10	Vastusvastaventtiilit	82
6.11	Suuntaventtiilit	83
6.12	Muut osat	85
7.	PROTOTYYPIN TESTIT	87
7.1	Testivalmistelut	87
7.2	Testipaikka ja -laitteisto	88
7.3	Ensimmäinen testi: ilman painetta	89
7.4	Toinen testi: kiristyminen	90
7.5	Kolmas testi: toiminta ilman laikkaa	90
7.6	Neljäs testi: toiminta laikan kanssa	91
7.7	Lopputulokset ensimmäisistä testeistä	94
8.	YHTEENVETO	97
	LÄHDELUETTELO	100

LIITE B: TOIMILAITTEIDEN MITOITUS

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Rintakulma
β	Kitkakulma
γ	Leikkausmyötymä
$\dot{\gamma}$	Leikkaantumisen muutosnopeus
ε	Päästökulma
μ	Kitkakerroin
τ_s	Leikkausjännitys liukutasolla
ϕ	Liukukulma
AB	Liukutason terän särmää kohtisuorassa olevan sivun pituus
A_s	Liukutason pinta-ala
d	Lastun lamellin paksuus
d_g	Hioma-aine rakeen halkaisijan arvio
F	Kitkavoima rintapinnalla
F_{a_g}	Aksiaalinen hiomisvoima
F_c	Lastuamisvoima, Päälastuamisvoima
F_f	Syöttövoima
F_n	Normaalivoima liukupinnalla
F_{n_g}	Tangentiaalinen hiomisvoima
F_r	Varsivoima
F_s	Liukuvoima liukupinnalla
F_t	Tangentiaalinen voima
F_{t_g}	Tangentiaalinen hiomisvoima
G	G-suhde, hiomissuhde
i	Terän särmän kulma liikesuuntaan nähden lastuamisessa
M	Mesh-numero
N	Normaalivoima rintapinnalla
P	Lastuamiseen tarvittava kokonaisteho
P_{grind}	Hiomisteho
p	Ketjun jako (pitch)
R	Resultanttivoima lastun ja rintapinnan välillä
R'	Resultanttivoiman lastun ja liukupinnan välillä
R''	Resultanttivoima terällä ja työkappaleella
r_c	Lastun paksuussuhde
t_0	Lastuamissyvyys
t_c	Lastunpaksuus
u	Hiomisen kokonaisenergia
u_f	Kitkallinen ominaisenergia
$u_{hankaus}$	Hankauskokonaisenergia hionnassa
$u_{kyntö}$	Kyntämiskokonaisenergia hionnassa

u_{lastu}	Lastuamiskokonaisenergia hionnassa
u_s	Leikkaantumisominaisenergia
u_t	Kokonaisominaisenergia
V	Lastuamisnopeus
V_c	Lastun nopeus
V_{disc}	Laikasta kulunut tilavuus hionnassa
V_{fa}	Aksiaalinopeus
V_{fn}	Normaalinopeus
V_s	Liukunopeus
V_w	Työkappaleen nopeus laikkaan nähden
V_{work}	Poistetun materiaalin tilavuus työkappaleesta hiomisessa
w	Lastun leveys

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty osana Enmac Oy:n uusien tuotteiden kehitystä. Työ käsittelee paalunkatkaisulaitteen tuotekehitysprojektia. Diplomityö esittelee tätä projektia ensimmäisen prototyypin testeihin asti.

Kasvavissa määrin monien rakennustyömaiden pohjissa käytetään paaluja. Jotta paaluista saadaan halutun mittaisia, tulee ne katkaista. Tavanomaisesti tämä tehdään polttoleikkaamalla tai kulmahiomakoneella. Katkaisutavan valintaan vaikuttaa olennaisesti katkaistavan paalun koko.

Paalujen katkaisuun voidaan käyttää kaivureihin kiinnitettäviä katkaisulaitteita, mutta kaikissa tilanteissa tämänlaisen laitteen käyttö ei aina ole mahdollista. Jos katkaisu joudutaan tekemään esimerkiksi veden alla, tarvitaan tähän työhön lähes poikkeuksetta sukeltaja. Kaivinkoneisiin kiinnitettävät katkaisulaitteet ovat myös kooltaan suuria. Tässä työssä esiteltävän tuotekehitysprojektin tarkoituksena onkin luoda kannettava pienikokoinen paalunkatkaisulaite, jolla on mahdollista suorittaa paalun katkaisuja niin vedellä kuin maalla. Paalunkatkaisulaitetta on tarkoitus käyttää ainoastaan teräsputkipaaluille joidenka halkaisija on noin 320 mm.

Toisessa kappaleessa esitellään projektin taustoja. Tässä kappaleessa kerrotaan oleellisia asioita paaluista sekä kuvataan nykyisiä katkaisumenetelmiä ja katkaisuun jo kehiteltyjä tuotteita. Myös tuotteelle asetettavia vaatimuksia ja toisaalta rajauksia sekä itse tuotteen tarkoitusta avataan kyseisessä kappaleessa.

Projektissa suunniteltavaan tuotteeseen liittyvä oleellinen teoria on käsitelty kolmannessa kappaleessa. Teoriaosuudessa käsitellään tarkemmin yksi mekaaninen katkaisumenetelmä ja päällisin puolin yksi terminen katkaisumenetelmä. Käsiteltävä mekaaninen menetelmä on teräksen katkaiseminen katkaisulaikalla ja termisistä menetelmistä käsitellään polttoleikkaus.

Neljäs kappale käsittelee suunnittelumetodiikkaa. Siinä on ensin tuotu esille yksi teoria tuotekehitysprojektin rakenteesta. Tämän jälkeen paalunkatkaisulaiteprojektin rakenne on esitelty. Tässä yhteydessä kerrotaan mistä vaiheista projekti koostuu ja minkälaisia asioita kussakin vaiheessa tulee huomioida ja saavuttaa. Toteutettua projektia myös verrataan kirjallisuudessa esiteltyyn tuotekehitysprojektin rakenteeseen.

Viides kappale sisältää keskustelun projektin konseptisuunnitteluvaiheesta. Tässä pohditaan erialaisia vaihtoehtoja millä tavoin alussa tuotteelle määritetyt vaatimukset voi-

daan toteuttaa. Erilaisten vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia käydään läpi ja lopulta esitetään prototyypin konsepti.

Kuudennessa kappaleessa valittua konseptia esitellään tarkemmin. Tähän liittyen käsitellään tuotteen tarkempi mitoitus sisältäen komponenttien valinnan. Tässä kappaleessa käydään läpi komponenttien valintaperusteita ja valittujen komponenttien suoritusarvoja.

Seitsemäs kappale on omistettu prototyypin testeille. Siinä kuvaillaan testivalmisteluja, testipaikkaa sekä suoritettuja testejä vaiheittain. Lopuksi käydään läpi testeistä opitut asiat ja pohditaan kehitysmahdollisuuksia.

Viimeisenä kappaleena on yhteenveto. Siinä esitetään tiivistetysti tämän diplomityön tärkeimmät asiat.

2. TAUSTOJEN ESITTELY

Suunnittelun kohteena on paalunkatkaisulaite. Vaikka paalujen katkaisu kuulostaa melko selkeältä määräykseltä, on kuitenkin heti alkuvaiheessa huomioitava muutama asia. Ensinnäkin paaluja on monia erilaisia. Sekä paalujen materiaalit että koot vaihtelevat suuresti. Tämän lisäksi paaluja kiinnitetään maahan eri tavoin ja erilaisissa ympäristöissä. Kaikki nämä asiat vaikuttavat siihen mitä tuotteelta vaaditaan. On väistämätöntä että yhdellä laitteella ei voida suorittaa kaikkien mahdollisten paalujen katkaisua.

Aloittaessa uuden tuotteen suunnittelu tulee monia asioita ottaa huomioon. Ensinnäkin tuotteen käyttötarkoitus tulee pystyä rajaamaan riittävän tarkasti, jotta siihen liittyvä suunnittelu olisi mahdollisimman tehokasta ja päämäärähakuista. Tuotekehitysprojektin alkuvaiheessa määritetään toiminnallisuudet, jotka valmiin tuotteen tulee pystyä toteuttamaan. Luonnollisesti ratkaisuvaihtoehtoja on monia. Paalunkatkaisemiseen onkin jo kehitelty monia toisistaan hyvin poikkeavia tuotteita. Kuitenkin kehitteillä olevan tuotteen tulee pystyä saavuttamaan halutut toiminnallisuudet tietyissä puitteissa. Näitä ovat esimerkiksi käytettävyyys ja tuotteen käyttöympäristö, jotka tarkemmin rajaavat tuotteen toteutusmahdollisuuksia. Jotkin tuotteen vaatimuksista voidaan antaa selkeästi numeroin kuten massa, toiset taas ovat monitulkintaisempia kuten ulkonäkö tai käytön helpous.

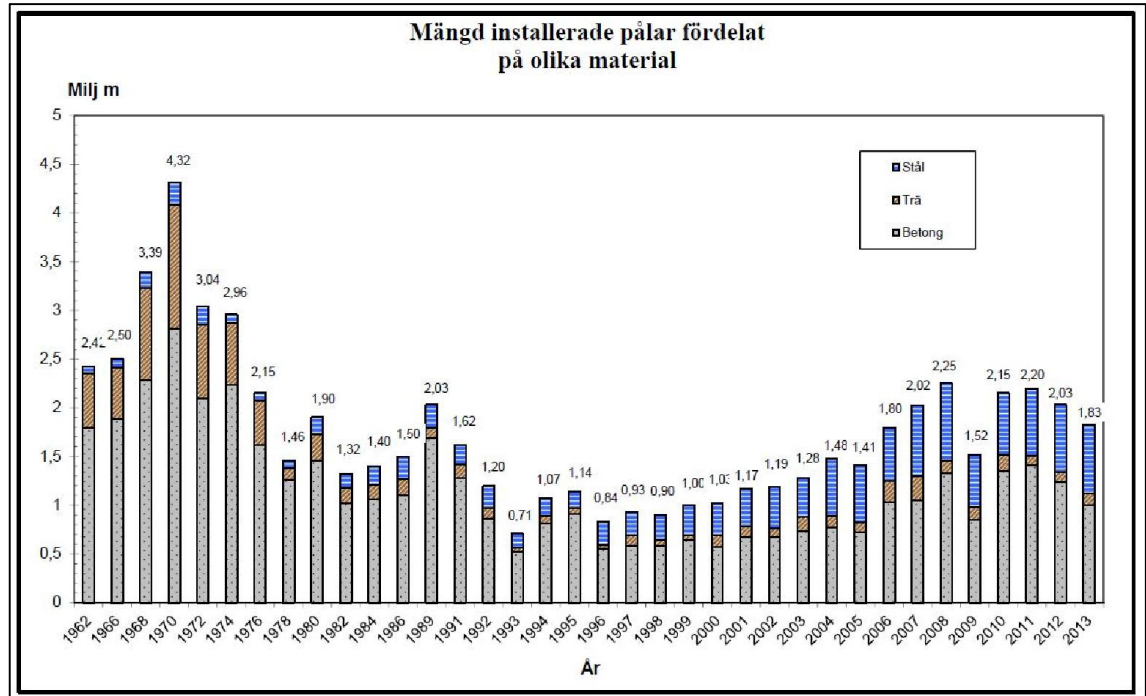
2.1 Paalujen esittely

2.1.1 Yleistä tietoa paaluista

Paalutus on eräs pohjarakennustekniikka. Sitä käytetään kun kantava pohja on liian syvällä, perusmaa liian heikko tai maahan aiheutuvat painaumat liian suuria. Näissä tapauksissa vaihtoehtoinen tekniikka, massanvaihto, ei ole taloudellisesti kannattavaa. Paalutuksessa yläpuolisten rakenteiden kuorma siirretään paalujen avulla kantavaan tai tiiviiseen maaperään tai kallioon. Paalutuksen tarve on lisääntynyt, koska rakentaminen on laajentunut huonopohjaisimmille alueille. (Rantamäki & Tammirinne 2000; Jääskeläinen 2009)

Paaluja voidaan jaotella monella tapaa. Näitä ovat ainakin paalujen materiaali, koko, muoto, asennustapa ja toimintatapa. Yleisesti käytössä olevat paalut ovat valmistettu puusta, teräsbetonista tai teräksestä. (Hartikainen 2000; Paalutusohje PO-2011 2011; Aalto-yliopisto 2014) Kuvassa 1 näkyy Ruotsin paalutusmäärät materiaaleittain jaettuna vuodesta 1962 vuoteen 2013 asti. Kuvassa sinen kuvaa terästä, ruskea puuta ja harmaa

teräsbetonia. Pystyakselilla on asennetut paalutusmäärät miljoonina metreinä. Teräsbetoni on ollut aina käytetyin paalumateriaali, mutta teräs on kasvattanut suosiotaan viimeisen parinkymmenen vuoden aikana. Paalumateriaalien käyttösuhteet ovat samantapaiset myös Suomessa. (Pålkommissionen 2014)



Kuva 1. Ruotsin paalutusmäärät paalumateriaalin mukaan jaoteltuna (Pålkommissionen 2014).

Kokonsa puolesta paalut jaetaan pien- ja suurpaaluihin. Ympyräpoikkileikkauksisilla paaluilla alle 300 mm halkaisijan omaavat paalut ovat pienpaaluja. Tätä suuremmat vastaavasti ovat suurpaaluja. Pienpaalujen kantavuus on yleensä suurempi kuin 50 kN kun taas suurpaaluilla noin 1,5 MN tai enemmän. Yleisimmät paalujen poikkileikkauksien muodot ovat ympyrä ja neliö. Ympyrä voi olla suljettu tai avoin. Muita mahdollisia poikkileikkauksia ovat harvemmin käytetyt x-paalut, ratakiskot ja hitsaamalla jatkettut I-palkit ja H-palkit. Paaluja asennetaan joko lyömällä, puristamalla, täräyttämällä tai poraamalla. Lyöminen on näistä suosituin asennusmenetelmä. Paalujen toimintatapa ker- too millä tavalla paalut ovat tukeutuneet maahan tai peruskallioon. Toimintatapansa mukaan paalut jaetaan tuki- kitka- ja koheesiopaaluihin. Tukipaalun tapauksessa paalu tukeutuu alapäästään tiiviiseen maakerrokseen tai kallioon. Suurin osa Suomessa asennettavista paaluista tukeutuvat näin. Paalut voidaan jakaa myös maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Ensiksi mainituissa maata ei kaiveta pois paaluja asennettaessa kun taas jälkimmäisten kohdalla näin tehdään. Yksittäisen paalun pituus vaihtelee muutamasta metristä useaan kymmeneen metriin. Tarpeen tullen paaluja jatke- taan joko hitsaamalla tai mekaanisen- tai kierreltioksen avulla. (Hartikainen 2000; Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Paalutusohje PO-2011 2011; Pålkommissionen 2014; Aalto-yliopisto 2014)

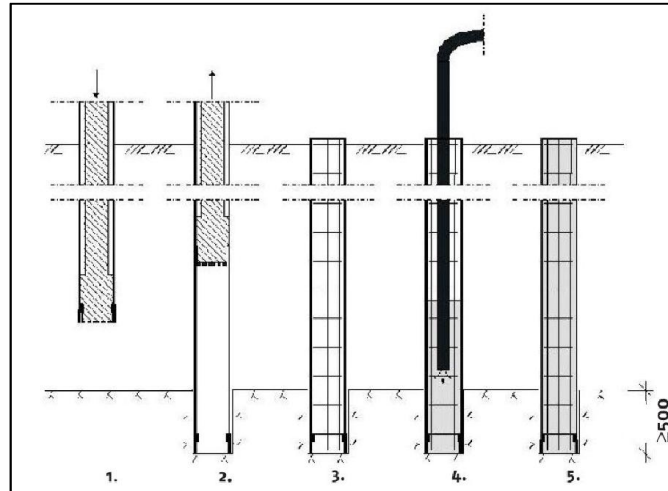
Paalujen asennuksessa tarvitaan peruskone ja lyöntilaite. Peruskoneen koko määräytyy asennettavien paalujen koon mukaan. (Pienapaalutusohje PPO-2007 2007; Paalutusohje PO-2011 2011; Aalto-yliopisto 2014) Pienten paalujen tapauksessa tämä voi olla esimerkiksi trukki, nosturi, pienoiskaivinkone, kevyt tela-alusta, kuorma-auto tai traktori. Siirryttäessä massiivisempiin paaluihin käytetään peruskoneena kaivinkonetta, jossa on paalutuspuomi. Suurimmat paalut vaativat peruskoneeksi perinteisen tb-paalujen paalutuskaluston, jotka painavat useita kymmeniä tonneja. Peruskoneen tarkoituksena on tukea paalu ja lyöntilaitteisto sekä liikuttaa paalu oikeaan asennuspaikkaan. Paalut tulee kyetä asentamaan myös vinoon. Enimmillään paalut asennetaan 4:1 kaltevuuteen. Kuvassa 2 näkyy lyöntilaite ja peruskone joilla asennetaan vinopaalu.



Kuva 2. Paalun asentaminen lyömällä (perustuu lähteeseen Ruukki RR-pienpaalutusohje 2010).

Myös lyöntilaite tulee valita asennettavan paalun koon mukaan, jotta se pystyy mobilisoimaan riittävän geoteknisen staattisen vastuksen. Lyöntilaitteina käytetään pudotus- ja hydraulijärkäleitä, hydraul- ja paineilmasarasaita sekä täryttimiä. Näistä kaikki paitsi viimeinen liittyvät asentamiseen lyömällä. Ne kaikki perustuvat iskevän kappaleen nostamiseen ja pudottamiseen vapaasti tai kiihdytetysti. Isku tapahtuu paalun yläpäähän iskutyynyn välityksellä. Täryttämällä asentaessa taas pareittain vastakkaisiin suuntiin pyörivät epäkeskeiset massat aiheuttavat nopeataajuisia iskuja. Tärytin voi sijaita putken päällä tai sen vaipalla. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005 2005; Pienapaalutusohje PPO-2007 2007; Ruukki RR-pienpaalutusohje 2010; Paalutusohje PO-2011 2011; Aal-

to-yliopisto 2014; HTM Yhtiöt Oy 2014; SSAB:n teräspaalu Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)



Kuva 3. Esitys porapaalun asentamisesta (Ruukki RD-paalutusohje 2010).

Asentaessa paaluja poraamalla liitetään peruskoneeseen joko päältätyövään tai uppo-vasaraan perustuva laite. Tällöin asennuksessa käytetään yhtä aikaa lyömistä ja poraamista. Yksinkertaistettuna nämä ovat suuria poravasaroita, joissa on myös pyöritysyksikkö. Molemmat voivat toimia sekä keskeisellä että epäkeskeisellä porausmenetelmällä. Poratessa paaluja teräsputki toimii porausputkena porauksen aikana ja kantavana rakenteena valmiissa paalussa. Kuvassa 3 on esitetty vaiheittain paalujen asennus poraamalla. Tässä tapauksessa paalu on raudoitettu ja betonoitu (vaiheet 3-5) poran poistamisen (vaihe 2) jälkeen. Itse paalu ei poratessa pyöri vaan sen sisällä oleva pora. (Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Ruukki RD-paalutusohje 2010; Paalutusohje PO-2011 2011; Aalto-yliopisto 2014; SSAB:n teräspaalu Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)

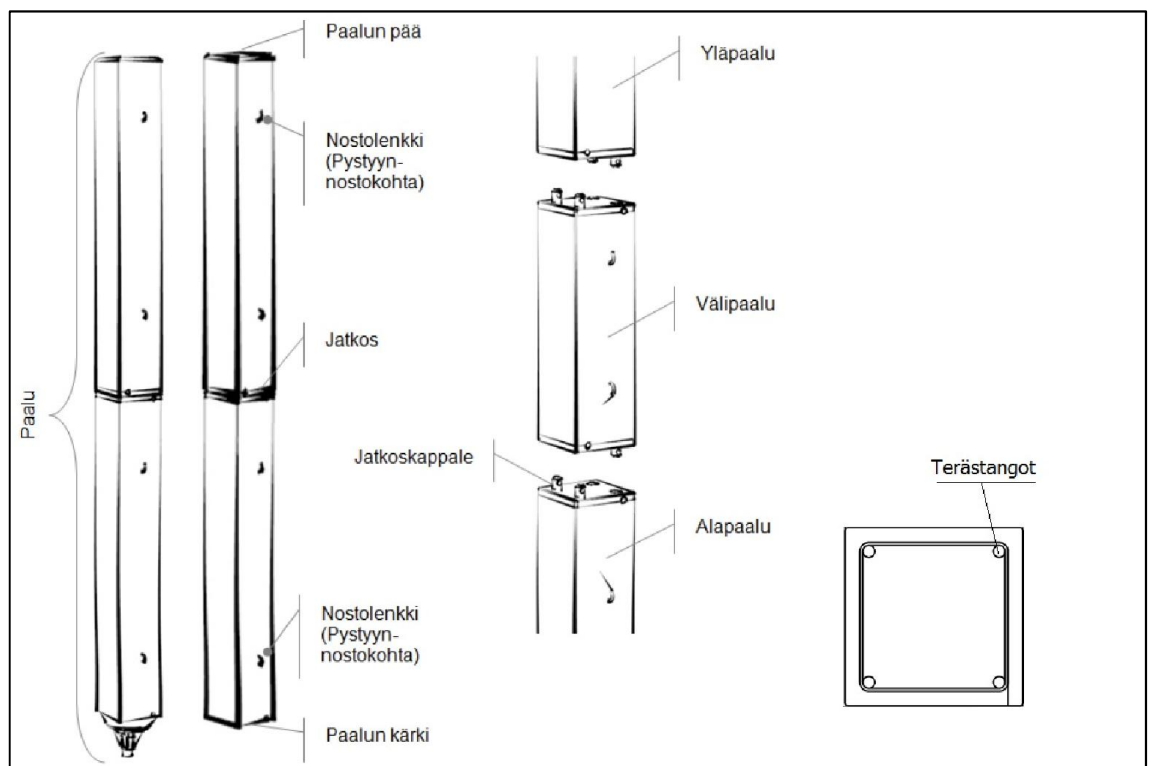
2.1.2 Puupaalut

Puu on kaikkein vanhin ja aikoinaan ainoa käytetty paalutusmateriaali. Puupaaluina käytetään kuusta, mäntyä tai muuta yhtä hyviä lujuusominaisuuksia omaavaa puuta. Vaikka muiden materiaalien käyttö paaluissa on nykyään huomattavasti suositumpaa, on puupaalujen käyttö edelleen perusteltua joissakin tilanteissa. Puupaaluja voidaan käyttää kun siirrettävät kuormat eivät ole kovin suuria. Tällöin niiden käyttö on hyvinkin taloudellista. Esimerkiksi laitureissa niitä käytetään yhä paljon (Rantakankaan Saha). Tässä tapauksessa materiaalivalintaan vaikuttaa kuitenkin paljon esteettiset syyt. Toinen sovellus puupaaluille on työsilat, jotka puretaan käytön jälkeen. Tällöin paalutuksen ei tule olla pitkäikäinen. Sopivissa olosuhteissa myös puupaalu voi olla hyvinkin pitkäikäinen, mutta pohjaveden korkeuden vaihdellessa ne muuttuvat alttiiksi lahoamiselle. Uudempiin paalumateriaaleihin verrattuna puupaaluilla on huomattavasti pienempi kantavuus ja taivutusjäykkyys. Puupaalut ovat poikkileikkaukseltaan umpinaisia ja

pyöreitä. Puupaalut asennetaan yleensä lyömällä, mutta toisinaan myös täräyttämällä. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005 2005; Rakennustietosäätiö 2010; Paalutusohje PO-2011; Aalto-yliopisto 2014)

2.1.3 Teräsbetonipaalut

Kaikista paalutyypeistä eniten käytetään teräsbetonipaaluja tukipaaluina (Aalto-yliopisto 2014; Pålkommissionen 2014). Teräsbetonipaalun poikkileikkaus on neliö. Paalu on muuten täysin betonoitu, mutta sen poikkileikkauksen reunoilla kulkee harjateräksestä valmistetut terästangot kuten kuvasta 4 voi nähdä. Siitä näkyvät myös asentamista auttavat nostolenkit sekä paalun jatkotapa. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005 2005; Rakennusteollisuus 2011; Aalto-yliopisto 2014)



Kuva 4. Teräsbetonipaalun rakenne (perustuu lähteeseen Rakennusteollisuus 2011).

Paalun alaosassa oleva kärki on joko kallio- tai maakärki riippuen siitä, kiinnitetäänkö paalu kallioon asti vai ei. Käytettävien teräsbetonipaalujen poikkileikkaukset ovat $250 \times 250 \text{ mm}^2$, $300 \times 300 \text{ mm}^2$, $350 \times 350 \text{ mm}^2$ ja $400 \times 400 \text{ mm}^2$. Betonin kovuus on C35/45 tai C40/50. Tämänlainen paalu on melko yksinkertainen ja helppo valmistaa. Puupaaluun verrattuna teräsbetoni kestää aikaa paremmin ja sillä on huomattavasti suurempi nurjahduskestävyys ja kuormankantokyky. Pisimmät yksittäiset teräsbetonipaalut ovat 12–15 m pitkiä, mutta niistä saadaan jatkamalla huomattavasti pidempiä. Tapaaluja voidaan asentaa raskaalla ja keskiraskaalla kalustolla. Asennus suoritetaan lähes

poikkeuksetta lyömällä. Tb-paalut eivät sovellu erityisen hyvin kivisiin täyttömaihin. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005 2005; Rakennusteollisuus 2011; Aalto-yliopisto 2014)

2.1.4 Teräspuutkipaalut

Teräksestä valmistettavat paalut jaetaan karkeasti lyötäviin ja porattaviin teräspuutkipaaluihin. Molemmat jaetaan tavanomaisesti vielä pien- ja suurpaaluihin. Molemmat teräspuutkipaalutyypit voidaan halutessa betonoida ja tämän lisäksi vielä raudoittaa sisältä paalun maahan lyömisen jälkeen. Teräspuutkipaaluista on tarjolla laaja koko ja materiaa- livalikoima. Halkaisijat vaihtelevat 76,1 mm – 1220 mm välillä ja seinämävahvuuksia on saatavilla 6,3 mm aina 23 mm asti ja ne ovat valmistettu joko perusteräksestä S355J2H, hyvästä teräksestä S440J2H tai erityisen lujasta S550J2H teräksestä. Myös muut teräsvaihtoehdot ovat mahdollisia. Kuvassa 5 näkyy porattavien teräspuutkipaalu- jen mitat ja materiaalit taulukoituna. Saatavat materiaalit ja seinämävahvuudet vaihte- levat halkaisijan mukaan. Lyötävien teräspuutkipaalujen mittavalikoima on lähes identti- nen. Teräspuutkipaaluilla on suurempi kantavuus verrattuna vastaavankokoiseen tb- paaluun. Kuten tb-paaluissa alaosaan kiinnitetään lyötäviin teräspuutkipaaluihin tarpeen tullen maa- tai kalliokärki. Porattavien paalujen tapauksessa paalun alaosaan kiinnite- tään maakenkä tai avarrinkruunu. (Paalutusohje PO-2011 2011; Aalto-yliopisto 2014; SSAB:n teräspaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)

Paalu	Halkaisija [mm]	Seinämöpaksuus [mm]									
		6.3	8	10	12.5	14.2	16	18	20	23	
RD90	88,9										
RDs100	101,6										
RD115	114,3										
RDs125	127,0										
RD140	139,7										
RD170	168,3										
RD220	219,1										
RD270	273,0										
RD320	323,9										
RD400	406,4										
RD450	457,0										
RD500	508,0										
RD550	559,0										
RD600	610,0										
RD650	660,0										
RD700	711,0										
RD750	762,0										
RD800	813,0										
RD900	914,0										
RD1000	1016,0										
RD1200	1220,0										

Teräslajit S440J2H ja S550J2H

Teräslajit S440J2H, S550J2H ja S355J2H

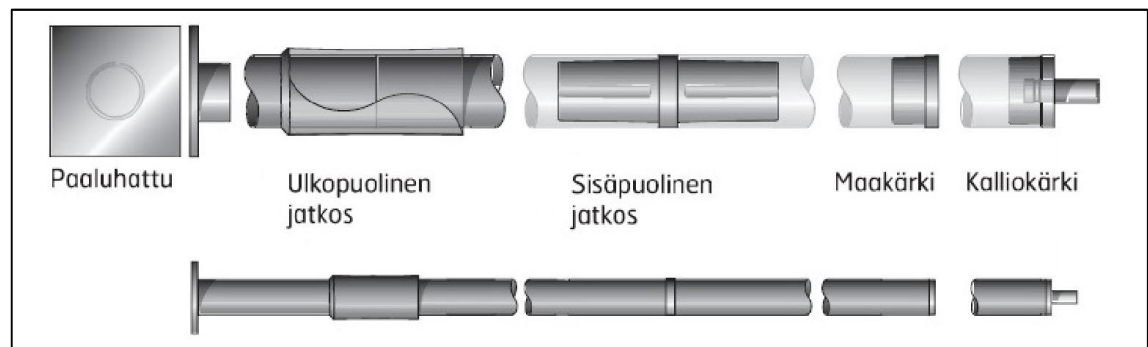
Teräslaji S550J2H

Teräslajit S440J2H ja S355J2H

Kuva 5. Ruuikin porattavien RD-paalujen koko ja materiaalivalikoima (SSAB:n teräspaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015).

Lyötävät pienteräspuutkipaalut ovat pituussaumahitsattuja. Valmistettavat halkaisijat ovat 76,1 – 323,9 mm seinämävahvuuksien vaihdella 16,3 – 12,5 mm välillä. Paalu- ja on mahdollista tilata sekä putkena että suurimmalle osalle halkaisijoista myös elementteinä. Vakiopituudet ovat 6 ja 12 m paalun halkaisijasta riippuen. Käyttäessä jatkettavia elementtejä ei hitsausta tarvita. Jatkopala kiinnittää paaluputket joko sisä- tai ul-

kopuolisella mekaanisella liitoksella. Kuvassa 6 on esitetty lyötävän pienteräsputkipaalun rakenne. Jatkoksien lisäksi siitä voidaan nähdä paalun yläosassa sijaitseva paaluhattu, joka estää putken sisälle sinne kuulumattomien esineiden joutumisen ja siirtää paalun yläpuolisen kuorman tasaisesti paalulle. Tämä liitos on jatkopalan tavoin kitkaan perustuva. Vaikka nämä paalut ovat maata syrjäyttäviä, tapahtuu maan siirtymistä vähän pienen halkaisijan takia. Samasta syystä ja jatkostekniikasta johtuen asennus voidaan tehdä kevyellä kalustolla ja ahtaassa tilassa. Lyötävillä pienteräsputkipaaluilla on tilavuuteensa nähden suuri kantavuus ja ne soveltuvat erityisen hyvin työmaille, joissa maa ei sisällä suuria vaikeasti läpäistäviä kiviä ja joidenka lähirakenteet ovat tärinälle herkkiä. Kyseistä paalutyyppeä käytetään paalukuormien ollessa pieniä esimerkiksi pientalorakentamisessa ja perustustenvahvistamisessa. Lyötävät pienteräsputkipaalut voidaan asentaa lyömisen lisäksi myös täräyttämällä ja puristamalla. (Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Ruukki RR-pienpaalutusohje 2010; Hannu Vesämäki 2013; Aalto-yliopisto 2014; SSAB:n teräsmaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)



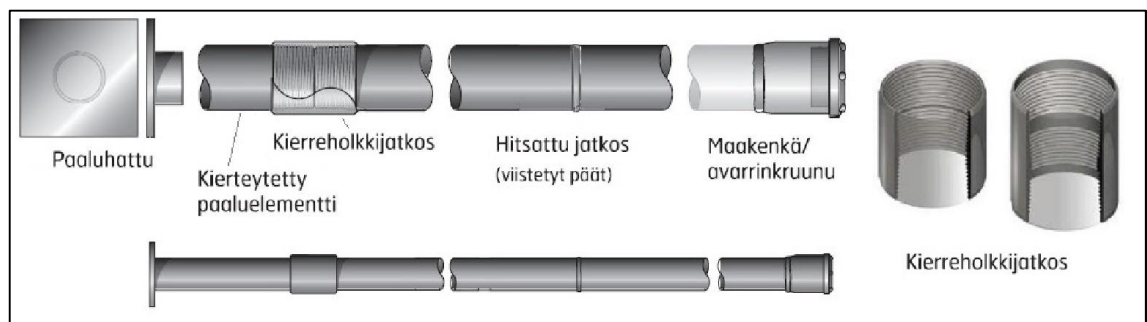
Kuva 6. Lyötävän pienteräsputkipaalun rakenne (perustuu lähteeseen SSAB:n teräsmaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015).

Lyötävät suurteräsputkipaalut ovat kierresaumahitsattuja. Pienpaaluista poiketen suurpaaluja ei valmisteta elementeistä kuten kuvasta 7 voi nähdä. Suurpaalut valmistetaan yleensä valmiiksi asiakkaan toivomaan mittaan. Ilman jatkohitsausta ne voidaan valmistaa jopa 34 m pitkiksi ja tehtaalla tehtävän jatkosauman kanssa 45 m pitkiksi. Paaluja jatketaan tarpeen tullen työmaalla. Lyötävien suurteräsputkipaalujen halkaisijoiden ja seinämävahvuuksien vaihteluvälit ovat 406–1220 mm ja 8–23 mm tässä järjestyksessä. Pienpaaluihin ja samankokoiseen teräsbetonipaaluun verrattuna lyötävä suurteräsputkipaalu omaa suuremman kuormankantokyvyn, taivutuskestävyyden ja jäykkyyden. Koska nämä paalut ovat suuriläpimittaisia ja maata syrjäyttäviä, eivät ne sovellu hyvin jos maan syrjäytyminen, tiivistyminen ja tärinä ovat merkittäviä tekijöitä. Hyvä valinta tämä taas on silloin kun rakennettavassa kohteessa on suuria keskittyneitä pysty- tai vaakakuormia ja maa sisältää jonkin verran kiviä ja lohkareita. Lyötävät teräsputkipaalut voidaan asentaa lyömällä ja täräyttämällä. Perinteisiä käyttökohteita ovat sillat, satamat ja monikerroksiset rakennukset. (Suurpaalutusohje SPO-95 1995; Paalutusohje PO-2011 2011; Hannu Vesämäki 2013; Aalto-yliopisto 2014; Lyötävät RR-suurpaalut 2015; SSAB:n teräsmaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)



Kuva 7. Lyötävä suurteräsputkipaalu (Lyötävät RR-suurpaalut 2013).

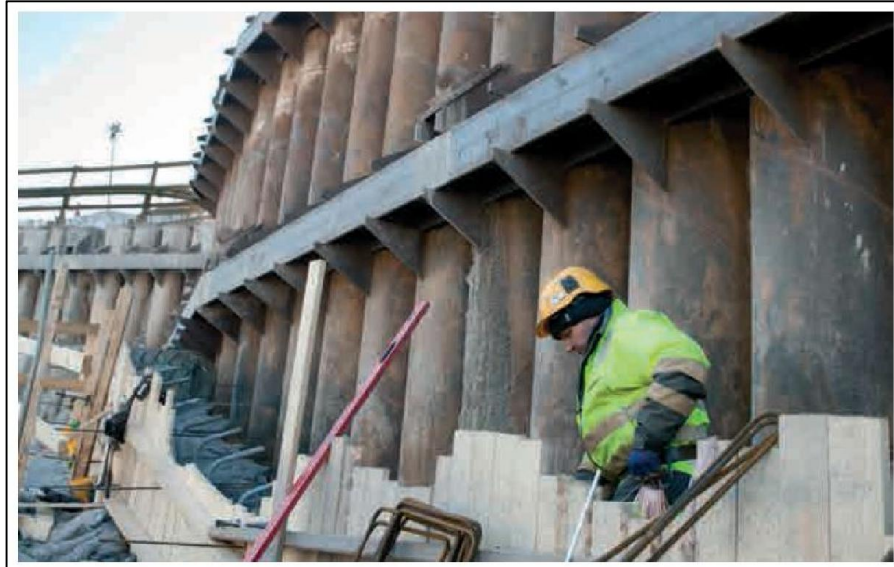
Porattavat pienteräsputkipaalut ovat lyötävien pienteräsputkipaalujen tapaan pituus-saumahitsattuja. Tarjolla olevat halkaisijat 88,9–323,9 mm ja seinämävahvuudet 6,3–12,5 mm ovat lähes samat kuin aikaisemmin esitellyllä lyötävällä pienteräsputkipaalulla. Yhdistävänä tekijänä on myös paalutuksen tekeminen paaluelementeistä suurimmalle osalle tarjotusta kokoskaalasta. Liitosmekanismi on kuitenkin kierreholkki-jatkos kuten kuvasta 8, jossa on esitetty porattavan pienteräsputkipaalun rakenne, näkyy. Kaikki koot voidaan aina jatkaa myös hitsaamalla. Nämä paalut voidaan asentaa kaikkiin maaperäolosuhteisiin suhteellisen pienellä kalustolla aiheuttamatta tärinää ympäröiviin rakenteisiin. Erityisen käyttökelpoisia porapaalut ovat silloin, kun paalut kiinnitetään vinoon kallion pintaan tai kun kallion päältä puuttuu tukea antavat kitkamaakerrokset tai se on kovin lähellä maan pintaa. Nimensä mukaisesti nämä paalut asennetaan vain poraamalla. (Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Ruukki RD-paalutusohje 2010; Hannu Vesamäki 2013; Aalto-yliopisto 2014; Porattavat RD-pienpaalut 2015; SSAB:n teräs-paalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)



Kuva 8. Porattavan pienteräsputkipaalun rakenne (perustuu lähteeseen SSAB:n teräs-paalut 2015).

Porattavat suurteräsputkipaalut ovat lyötävien suurteräsputkipaalujen tapaan kierresaumahitsattuja ja niillä on sama mittavalikoima. Ne voidaan myös valmistaa samoihin pituuksiin ilman jatkohitsiä tai sen kanssa mitä on mainittu lyötävien suurteräsputkipaalujen kohdalla. Porattavien pienteräsputkipaalujen tapaan ne soveltuvat hyvin vaikeaan ja lohkareiseen maastoon, mutta myös suuremmille kuormille. Porattavat suurteräsputkipaalut ovat paras valinta kun paalujen asennukselle vaaditaan tiukat kaarevuus- ja sijaintitoleranssit. Porapaalujen asennus on kalliimpaa kuin lyötävien paalujen asen-

nus. Kuvassa 9 rakenteilla oleva porapaaluseinä on eräs suurporapaalusovellus. Tässä porapaalut liitetään toisiinsa ponttiliitoksien, jotka voidaan valmistaa myös vesitiiviiksi. Porapaaluja asennetaan ainoastaan poraamalla. (Ruukki RD-paalutusohje 2010; Hannu Vesämäki 2013; Aalto-yliopisto 2014; Porattavat RD-suurpaalut 2015; SSAB:n teräs-paalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)



Kuva 9. Rakenteilla oleva suurporapaaluseinä (Ruukki RD-paaluseinä 2012).

2.1.5 Muut paalutyypit

On olemassa myös muita paalutyyppejä. Näitä ovat esimerkiksi kaivin-, Franki-, puristus ja injektoidut paalut. Näistä kaksi ensimmäistä eroavat aikaisemmin esitellyistä paaluista siinä että niissä teräsputki toimii usein vain työputkena, joka nostetaan ylös betonoinnin yhteydessä. Franki-paalu on myös siinä mielessä erilainen, että lyömisessä käytettävää järkälettä pudotetaan putken sisällä olevan tulpan päälle. Injektoidut paalut voivat olla joko poraamalla, lyömällä tai puristamalla asennettuja. Injektoitujen paalujen asennuksen aikana paalun yläpäästä syötetään sementtipohjaista injektointiainetta, joka purkautuu paalua ympäröivään maaperään paalun ala-osassa olevien injektointireikien kautta. Yleensä paalun ala-osan halkaisija on suurempi kuin paaluputken halkaisija. (Suurpaalutusohje SPO-95 1995; Hannu Vesämäki 2013; Aalto-yliopisto 2014)

2.1.6 Yhteenveto paaluista

Yläpuoliset kuormat voidaan siirtää maahan hyvin erilaisten paalujen avulla. Nämä ovatkin yleensä vaihtokelpoisia keskenään. Kuitenkin jokaisella paalutyypillä on omat erikoispiirteensä. Taulukossa 1 on vertailtu eri paalutyyppejä keskenään.

Taulukko 1. Paalutyyppeiden vertailua (Paalutusohje P0-2011; Rakennusteollisuus 2011; Aalto-yliopisto 2014; SSAB:n teräspaalu Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015).

Paalutyyppi	Poikkileikkauksen mitat (mm)	Yhden paalun max. pituus (m)	Poikkileikkauksen tyyppi	Materiaali	Kantavuus (kN)
Lyötävä pienteräsputkipaalu	Ø76,1x6,3- Ø323,9x12,5	16	Avoin	S355J2H, S440J2H tai S550J2H	>50
Lyötävä suurteräsputkipaalu	Ø406x8- Ø1220x23	45	Avoin	S355J2H, S440J2H tai S550J2H	>1500
Porattava pienteräsputkipaalu	Ø88,9x6,3- Ø323,9x12,5	16	Avoin	S355J2H, S440J2H tai S550J2H	>50
Porattava suurteräsputkipaalu	Ø406x8- Ø1220x23	45	Avoin	S355J2H, S440J2H tai S550J2H	>1500
Teräsbetonipaalu	250x250, 300x300, 350x350, 400x400	15	Umpinainen	Betoni (C35/45 tai C40/50) ja harjateräs	>300
Puupaalu	min. Ø150	14*	Umpinainen	Kuusi tai mänty	160–670**
*Tätä lyhyempiä puupaaluja ei yleensä tehdä jatkamalla. Yksittäinen puupaalu voi kuitenkin olla tätä pidempi. **Tyypillinen aksiaalinen suunnittelukuorma					

Puupaaluja käytetään kannettavien kuormien ollessa pieniä ja paalujen upotussyvyyden ollessa pohjaveden yläpuolella. Ne soveltuvat myös väliaikaisiin rakenteisiin. Taulukossa 1 puupaalun kantavuus vaikuttaisi olevan pienpaaluja ja jopa tb-paaluja suurempi. Tässä täytyy kuitenkin huomioida, että kantavuus ja aksiaalinen suunnittelukuorma eivät ole sama asia. Toinen huomioitava asia on se, että puupaalujen kantavuus on esitetty vaihteluvälinä ja muiden minimiarvoina. Tavallisesti teräsputkipaalujen ja tb-paalujen kantavuus on paljon taulukon arvoja suurempi. Erot, johtuvat siitä että taulukko on koottu useasta eri lähteestä. Tb-paalujen käyttö on melko yksinkertaista ja halpaa. Myös niiden saatavuus on erittäin hyvä. Sekä lyötävät että porattavat pienpaalut voidaan asentaa kevyellä koneistolla aiheuttamatta ympäröivään maahan suurta siirtymistä tai tiivistymistä verrattuna suurpaaluihin ja tb-paaluihin. Nämä molemmat sopivat myös käytettäviksi ahtaissa tiloissa. Porattava pienpaalu aiheuttaa kaikkein pienimmät vaikutukset

ympäristöön ja se voidaan asentaa vaikeampiin maastoihin ja tarkemmilla sijaintipointeilla. Suurteräspaaluja yhdistää niiden sopivuus suuremmille kuormille ja lohkareisemmille maastoille kuin tb-paalut ja pienpaalut. Nämä molemmat vaativat raskaan tai keskiraskaan asennuskaluston. Suuret porapaalut voidaan asentaa kaikkein vaativimpiin kohteisiin ja niillä pystytään toteuttamaan tarkimmat toleranssit ja kantamaan suurimmat kuormat. Niiden käyttö on myös kallista, mutta hankalissa kohteissa perusteltua. (Paalutusohje PO-2011; Hannu Vesamäki 2013; Aalto-yliopisto 2014)

2.2 Nykyiset katkaisumenetelmät

2.2.1 Katkaisusta yleisesti

Paaluja voidaan katkaista monilla tavoilla. Yleisimmin teräspaalun katkaisu suoritetaan kulmahiomakoneella tai polttoleikkaamalla (Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Ruukki RD-paalutusohje 2010; SSAB:n teräspaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015). Kulmahiomakoneen käyttö on suositumpaa pienten paalujen yhteydessä kun taas suuria paaluja katkaistaessa käytetään mieluummin polttoleikkausta. Piikkaus tulee kyseeseen teräsbetonisten paalujen kohdalla. Tällöin paalun teräkset paljastetaan piikkaamalla ja katkaistaan sahaamalla. Tämän jälkeen paalu katkaistaan työntämällä. (Lyöntipaalutusohje LPO-2005 2005) Vaikka teräspuutkipaalut voidaankin betonoida sisältä, tehdään niiden katkaisu tavallisesti ennen tätä vaihetta minkä takia piikkausta ei käytetä teräspuutkipaalujen katkaisussa. Puupaalujen yhteydessä sopiva laite katkaisuun on yleensä moottorisaha (Collin 2015). Pienet paalut voidaan katkaista helposti käsikäyttöisillä laitteilla, kuten kuvassa 10 näkyy. Siinä pienihalkaisijaista teräspuutkipaalua katkaistaan käsikäyttöisellä kulmahiomakoneella. Näin toimitaan yleisesti esimerkiksi omakotitalojen paalutuksia rakennettaessa. Suurempia paaluja varten on kehitetty tehokkaita ja raskaita laitteistoja, jotka voidaan kiinnittää johonkin työmaalla sijaitsevaan laitteeseen.



Kuva 10. Pienen teräspuutkipaalun katkaisu kulmahiomakoneella (SEOKANG Piling Ltd. 2015).

Paaluja katkaistaan sekä maalla että veden alla. Suurin osa katkaisuista tehdään maalla. Vedessä paalun katkaisu joudutaan tekemään esimerkiksi puupaalujen yhteydessä mai-

nitun työsillan purkamisessa. Lähtökohtaisesti väliaikaisten työsiltojen paalut pyritään nostamaan ehjinä ylös, jotta ne voitaisiin käyttää uudestaan, mutta tämä ei ole aina mahdollista. Paalut saattavat olla liian tiukasti maassa kiinni tai niiden pois nostamiseen ei ole tilaa, koska ne sijaitsevat varsinaisen sillan alla. Tällöin paalun katkaisemiseen tarvitaan sukeltaja. Kuvassa 11 sukeltaja polttoleikkaa teräsputkea veden alla. Myös veden alla toimivia sukeltavia katkaisukoneita voidaan käyttää. (Onninen 2005)



Kuva 11. Sukeltaja katkaisee polttoleikkaamalla teräsputkea (JRS Adriatic Commercial Diving 2013).

Käytännössä katsoen kaikki asennetut paalut tarvitsee katkaista. Tämä johtuu siitä, että paaluja asentaessa ei kovin tarkasti voida tietää millä syvyydellä kallio tai kantava maakerros on. Paalut asennetaan siis jonkin verran tavoitetasoa korkeammalle, jonka jälkeen ne katkaistaan tarkkaan määritetylle korolle kohtisuoraan paalun pituusakselia vastaan. Katkaistun paalun pään kohtisuoruusvaatimus on alle 2,0 % paalun halkaisijasta ja pään tasomaisuusvaatimus on alle 2 mm paalun akselin kohtisuoruuteen nähden. (Pienpaalutusohje PPO-2007 2007; Paalutusohje PO-2011 2011; SSAB:n teräsmaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet 2015)

2.2.2 Katkaisuun kehiteltyjä tuotteita

Perinteisten käsikäyttöisten katkaisulaitteiden rinnalle on jo kehitelty useita katkaisukoneita. Ne eroavat toisistaan niin kokonsa, ulkonäkönsä, toimintaperiaatteensa kuin mahdollisen käyttöympäristönsä osalta. Osa näistä toimii maalla ja osa veden alla. Joitakin on mahdollisia käyttää käsin ilman apuvälinettä kun taas toiset ovat niin raskaita, että ne tarvitsevat avukseen toisen työvälineen. Tämä voi olla esimerkiksi kaivinkone, jolla katkaisulaitetta myös liikutetaan, tai nostoapuväline tai nosturi riippuen katkaisulaitteen massasta. Vaihtelua on myös siinä minkä kokoisia ja mistä materiaalista tehtyjä putkia ja paaluja näillä voidaan katkaista.

Suomalaisten kehittämä Motocut on kaivinkoneeseen kiinnitettävä teräsbetonipaalujen katkaisuun suunniteltu paalunkatkaisulaite. Kuvassa 12 on näytetty Motocut-katkaisukoura toiminnassa.



Kuva 12. Motocut-katkaisukoura työssä (MotoCut Oy 2014).

Se kiinnittyy tartuntakourilla paaluun ja samanaikaisesti leikkaa kahdelta puolelta timanttilaikoilla tb-paalun reunoilla olevat harjateräkset. Harjaterästen katkaisun jälkeen laitetta kierretään paalun pituus akselia vastaan sen verran että paalun keskiosan betoni murtuu. Tartuntakourat pitävät edelleen katkaistun paalun yläosasta kiinni jolloin se voidaan siirtää sivuun. Laite saa voimansa kaivinkoneen hydraulikasta. (MotoCut Oy 2014)

Toinen suomalainen katkaisulaitteita valmistava yritys on T-Drill. Heidän käsikäyttöisten katkaisijoiden tuoteperheen nimi on Pipe Cutting System (PCS), joka koostuu kolmesta erikokoisesta laitteesta. Nämä kattavat putkien ulkohalkaisijat 15–360 mm, ja ne sopivat niin mustalle teräkselle, ruostumattomalle teräkselle, valuraudalle, alumiinille, kuparille kuin muovillekin. Laitteen terä vaihdetaan katkaistavan materiaalin mukaan. Katkaistavan teräksen suurin seinämävahvuus on 8 mm kaikille tuoteperheen laitteille ja muovin tapauksessa 27 mm tuoteperheen suurimmalla katkaisijalla. Periaatteessa T-Drill PCS on kulmahiomakone, johon on rakennettu kiinnitysmekanismi, joka sallii laitteen pyörimisen putken ympäri. Kuvassa 13 näkyy selkeästi laitteen koostuminen putkeen kiinnittyvästä ja leikkauksen tekevästä osuudesta. Jos katkaistaan irtoputkia, on helpoin työtapa pyörittää putkea leikkaajaa vasten. Maassa kiinni olevan paalun tapauksessa tämä ei ole mahdollista, jolloin työkonetta tulee pyörittää putkea ympäri. Sekä terän putkea vasten työntäminen että putken tai koneen pyörittämien tapahtuvat käsin. Laitteiden massat vaihtelevat 5,7–14,3 kg välillä. Tehonsa tuote saa piuhalla sähköverkosta. (T-Drill Oy)



Kuva 13. T-Drill putkenkatkaisijatuoteperheen keskikokoinen malli PCS 8+ (T-Drill Oy).

Amerikkalainen yritys, Aggregate Technologies, on kehittänyt oman laitteensa paalujen katkaisuun. Tämä on patentoitu ja sen nimi on Pile Cutting Machine (PCM). PCM on rakennettu teleskooppipuomilla varustetun Gradall-merkkisen kaivurin pohjalle. Puomin päässä sijaitsevassa katkaisuyksikössä on Motocut-katkaisukouran tapaan paalua kiinnipitävät tartuntakourat ja katkaiseva terä. Tämä näkyy kuvan 14 suurennetussa osassa. Tuote on kuitenkin siinä mielessä erilainen että laikkoja on käytössä vain yksi, se on isompi ja se leikkaa koko paalun läpi reilusti tartuntakohtaa alemmaa. Vaihtamalla laitteeseen erilainen terä soveltuu se erikokoisille tb-paaluille ja myös teräsputkipaaluille. Tämän lisäksi sillä pystytään katkaisemaan jopa betonoituja teräsputkipaaluja. (Pile Buck Magazine 2014)



Kuva 14. Aggregate Technologies:n valmistama PCM katkaisemassa tb-paalia (vasemmalla) ja teräsputkipaalia (oikealla) (perustuu lähteeseen Aggregate Technologies; Pile Buck Magazine 2014).

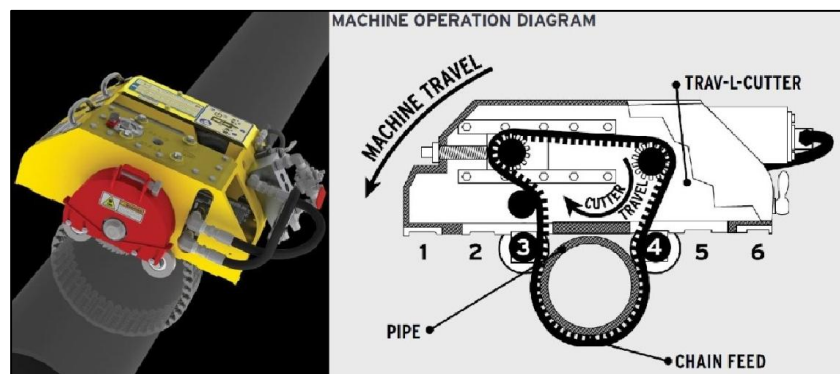
Toinen amerikkalainen yritys Prime Marine Services INC valmistaa kylmäleikkaukseen perustuvia paalunkatkaisijoita nimeltään Prime Pile Cutter. Näissä ei siis ole pyörivää terää vaan kaksi terää, joista toinen pysyy paikallaan ja toinen puristuu hydraulisesti ensimmäistä vasten. Tuoteperheeseen kuuluu viisi eri kokoa, joilla voi katkaista halkaisijaltaan jopa puolitoistametrisiä paaluja. Tämä tuote on suunniteltu suurille paaluille ja se tarvitsee siirtelyyn avuksi nosturin tai vastaavan. Laite painaa 1136–39008 kg mal-

lista riippuen. Kuvasta 15 näkyy tuotteen massiivisuus. Katkaisu voidaan suorittaa vaak- tai pystyasennossa veden alla tai maalla niin betonille, teräkselle kuin puulle. (Prime Marine Services INC.)



Kuva 15. Prime Pile Cutter model 24:llä suorittu suuren paalun katkaisu (Prime Marine Services INC).

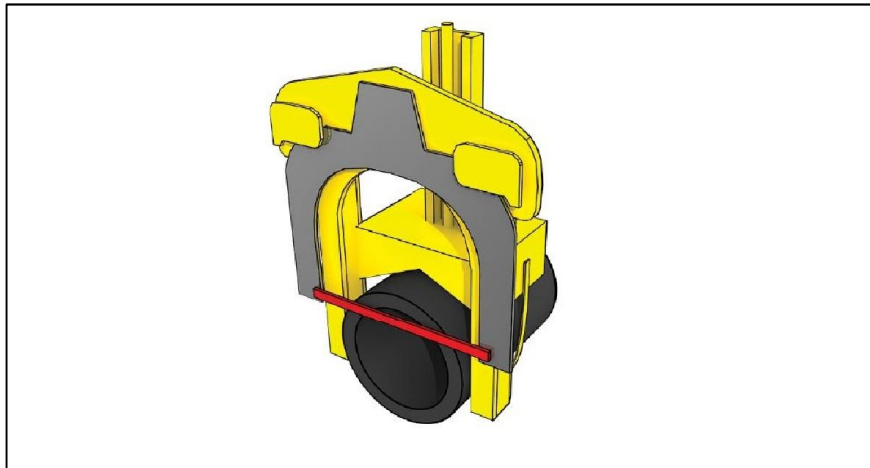
Yritys nimeltä E.H. Wachs valmistaa kylmäleikkaukseen perustuvia putkien työstämiin, hitsaamiseen ja katkaisuun tarkoitettuja tuotteita. Heillä on laaja valikoima eri tavoilla toimivia laitteita, joilla voi tehdä putkiin viisteitä ja upotuksia sekä katkaista niitä. Osa näistä on suunniteltu pienille putkille, mutta jopa 3000 mm halkaisijan omaavia putkia voidaan myös työstää ja katkaista. Mallista riippuen laitteen voimanlähde on joko paineilma, hydraulikka tai sähkö. Eräs heidän tuotteistaan on Trav-L-Cutter, joka kiristää itsensä putken ympärille kiristysketjun avulla. Ketjun pituutta voidaan säätää ketjunpätkiä lisäämällä, jolloin 152,4–1829 mm halkaisijaisia putkia voidaan viistää ja katkaista. Kuvassa 16 on näytetty kyseinen laite ja siitä näkyy myös katkaisuterää pyörittävä moottoriosio, joka on laitteen punainen osa. Laite toimii missä tahansa kulmassa oleville putkille ja hydraulista versiota voidaan käyttää myös vedessä. Toinen versio on pneumaattinen. Sen massa on 97,5 kg toimintatilassa. (E.H. Wachs 2015)



Kuva 16. Trav-L-Cutter kokonaisuudessaan (vasemmalla) ja poikkileikkattuna (oikealla) (perustuu lähteeseen E.H. Wachs 2015).

Eräs edellä mainitun yrityksen toinen tuote on Guillotine Pipe Saw. Nimensä mukaan se on giljotiinia muistuttava saha. Tämä on aikaisemmin esiteltyyn tuotteeseen verrattuna

yksinkertaisempi eikä sillä voida tehdä viisteitä. Putkisahojen tuoteperhe kattaa 60,3–813 mm halkaisijan putket ja sillä voidaan katkaista vaaka- ja pystyasennossa. Voimallähde on joko paineilma tai hydraulikka. Kuvassa 17 on esitetty yksinkertaistettu piirustus tästä tuotteesta. Punainen osa on vaihdettava terä, joka on kiinni edestakaisin ja ylösalaisin sahaavaa liikettä tekevässä kuvassa harmaana osoitetussa kehikossa. Tuoteperheen suurimmat sahat ovat jo erittäin massiivisia kaikkien kokojen massojen välillä 52–816,5 kg välillä. (E.H. Wachs 2015)



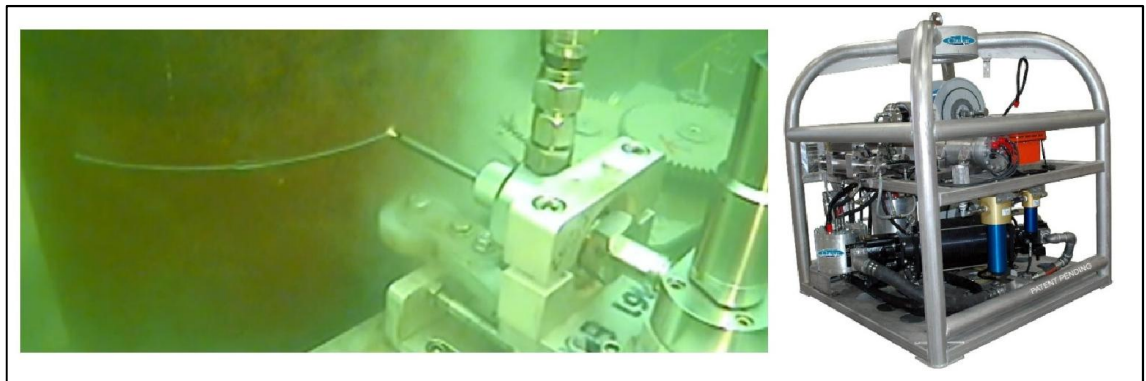
Kuva 17. E.H. Wachs:n valmistama Guillotine Saw:n yksinkertaistettu piirros (E.H. Wachs 2015).

Samalla yrityksellä on myös yksinomaan vedenalaiseen käyttöön suunniteltuja katkaisijoita. Eräs näistä on timanttivaijerilla leikkaava Diamond Wire Saw tuoteperhe, joka koostuu viidestä erikokoisesta katkaisijasta. Nämä toimivat hydraulikan voimin ja niillä pystytään katkaisemaan putkia, joidenka ulkohalkaisijat vaihtelevat 122–2134 mm välillä. Putket voivat olla minkä suuntaisia tahansa. Laitteella voi katkaista teräsputkia, jotka sisältävät myös betonia ja merenalaista kertymää. Laitteet ovat melko raskaita niiden panojen vaihdellessa muutamasta sadasta lähes tuhanteen kiloon. Kuvan 18 vasemmalla puolella on näytetty tuoteperheen keskikokoinen katkaisija. Kuvan oikealla puolella näkyy laitteessa oleva järjestelmä, joka säätää automaattisesti vaijerin kiristyksen ja sen työntämisen leikattavaa kohdetta kohti optimaaliseksi. Katkaisijaa ohjataan joko sukeltajan avustuksella, sukeltavalla työrobotilla tai veden pinnalta kauko-ohjauksen avulla. Laite ei kierrä paalua ympäri leikatessa vaan työntää timanttivaijerin paalun läpi kerrasta koko sen leveydeltä. (E.H. Wachs 2014)



Kuva 18. Wachs yrityksen vedenalainen timanttivaijerikatkaisija mallin DWS 3616 yläprojektio (vasemmalla) ja vaijerin säätösystemi (oikealla) (perustuu lähteeseen E.H. Wachs 2014).

Teräsputkia voidaan katkaista myös erittäin korkean vedenpaineen avulla. Amerikkalainen yritys Chukar valmistaa 3000 m syvyydessä toimivaa tuotetta, jossa hydraulinen paineenvahvistin nostaa veden paineen 3800 bar asti ja suihkuttaa sitä keskitetysti työstettävään kohteeseen. Kun suihkutettavan veden sekaan lisätään abrasiivista liettä, voidaan laitteella katkaista jopa 250 mm paksua terästä. Kuvan 19 vasemmalla puolella näkyy tilanne, jossa kyseisellä laitteella katkaistaan putkea sen ulkopuolelta veden alla.

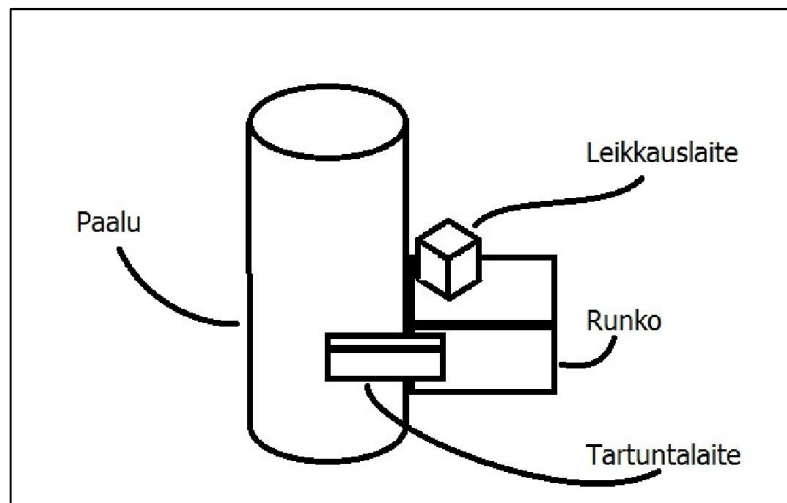


Kuva 19. Chukar yrityksen valmistama veden alla toimiva teräksen katkaisija toiminnassa (vasemmalla) ja sen voimayksikkö (oikealla) (perustuu lähteeseen Warren & Lauseng 2013).

Paineistettava vesi otetaan suoraan ympäröivästä merestä. Katkaisuyksikön mukana on voimaa tuova laitteisto, kuvan 19 oikea puoli, jota ohjataan sukeltajan avulla tai se on toteutettu kauko-ohjattavana vedenalaisena työrobotina. Laite painaa 2858 kg ja sen äärimitat ovat 1,8x1,8x2,4 m. (Warren & Lauseng 2013)

2.3 Tuotteeseen vaikuttavat tekijät

Paalujen esittelyn yhteydessä ilmi tulleet asiat määrittävät suunnitteilla olevaa tuotetta. Osalla niistä on välitön vaikutus tuotteeseen ja jotkin ovat hyvin toissijaisia. Tuotteeseen vaikuttavia tekijöitä voidaan arvioida helpommin, kun kuvitellaan paalunkatkaisulaitteen koostuvan rungossa olevasta paalun kiinnittävstä ja sitä leikkaavasta osiosta. Kuvassa 20 on esitetty kyseinen yksinkertaistettu idea laitteesta. Kummatkin mainituista toiminnoista voidaan siis toteuttaa monella eri tavalla, mutta niihin vaikuttavat tekijät ovat samoja.



Kuva 20. Yksinkertaistettu idea paalunkatkaisulaitteesta (oma piirros).

Merkittävimmät paalunkatkaisulaitteeseen vaikuttavat paalun ominaisuudet ovat sen poikkileikkauksen muoto ja koko sekä paalun materiaali. Paalun poikkileikkauksen muoto vaikuttaa suoraan siihen miten paaluun voidaan kiinnittyä. Tämä vaikuttaa myös siihen millä tavalla leikkaavan elimen on mahdollista seurata leikattavaa pintaa. Poikkileikkauksen koko vaikuttaa samoihin asioihin; kiinnitysmekanismiin pitää sopeutua kasvavaan paalun ulkomittaan. Suurempi seinämävahvuus taas vaatii varsinaiselta leikkaavalta koneistolta enemmän. Paalun materiaali vaikuttaa suuresti siihen millä tavalla sitä voidaan leikata. Tällä on vaikutusta kuitenkin myös kiinnittymiseen esimerkiksi eri materiaaliparien kitkojen muodossa.

Paalutuskoneistolla, ja työmaalla olevalla muulla koneistolla, on myös vaikutusta paalunkatkaisulaitteeseen. Näiden avulla voidaan suorittaa katkaisua auttavia toimintoja. Näitä ovat esimerkiksi katkaistavan paalun tukeminen katkaisun aikana ja katkaistun paalun siirtäminen katkaisun jälkeen. Näitä samoja aputoimintoja tarvitaan myös nykyisten käsikäyttöisten katkaisulaitteiden käytön yhteydessä. Paalun pituus ei suoraan vaikuta itse katkaisuun. Jos kuitenkin paalua jää merkittävästi katkaisukohtaan yläpuolelle sen saavutettua tavoitesyvyytensä, täytyy silloin huomioida että tuotetta ei voida kätevästi asettaa paalulle sen ylitse. Tällöin kiinnitysmekanismiin tulee tukeutua paaluun vain sen sivuilta tai ympäri mennessään olla jostakin kohtaa avautuva. Asennusympäris-

tökin pitää huomioida, koska se saattaa olla esimerkiksi ahdas. Tämä asettaa vaatimuksia laitteen ulkomitoille. Itse asennustapa ei vaikuta paalun katkaisuun, koska käytettiinpä mitä asennustapaa hyvänsä ovat katkaisuvaatimukset samat. Ainoastaan kappaleen alussa mainittu paalutuslaitteisto tulee huomioida aputoiminnoissa. Paalun kantavuus ei aiheuta vaatimuksia katkaisulle.

2.4 Tuotteen rajaus ja suunnitteluvaatimukset

Edellisessä kappaleessa pohdittiin paalujen ominaisuuksien aiheuttamia huomioon otettavia tekijöitä. Tämän lisäksi sille asetetaan muita rajoituksia ja vaatimuksia. Heti projektin aluksi suunnitteilla olevaa tuotetta on rajattu karkealla tasolla. Nämä rajoitukset liittyvät ensinnäkin katkaistavan paalun poikkileikkauksen muotoon, kokoon ja materiaaliin. Tuote on päätetty suunnitella katkaisemaan vain ympyräpoikkileikkauksellisia teräsputkipaaluja. Laitteella on tarkoitus katkaista pienpaaluja ja pieniä suurpaaluja. Tarkemmin sanottuna tarkoituksena on, että samalla koneella voidaan katkaista mahdollisimman montaa RD320 paalun lähikokoa. Katkaisun tulisi olla mahdollista maalla ja vedessä. Taulukossa 2 on esitetty tuotteen karkean tason rajoitukset.

Taulukko 2. Paalunkatkaisulaitteella katkaistavien paalujen karkean tason rajoitukset.

Materiaali	Muoto	Koko
Teräspaalut	Ympyräpoikkileikkaus	RD320 ja sen lähikoot

Suunnittelun alla olevalle tuotteelle asetetaan aluksi joitakin vaatimuksia. Näiden avulla suunnittelijan on helpompi hahmottaa, mitä kaikkia asioita hänen tulee ottaa huomioon ja mihin hänen kannattaa keskittyä. Nämä eivät vielä määritä yhtä tiettyä selkeää ratkaisuvaihtoehtoa vaan auttavat rajaamaan mahdottomia vaihtoehtoja pois ja parantamaan mielikuvaa siitä minkälainen valmis tuote voisi mahdollisesti olla. Tuotekehitysprojektissa asetetut vaatimukset ovat esitetty kuvassa 21.

Suunnitteluvaatimukset

- Yksinkertainen
- Helppokäyttöinen
- Helposti huollettava
- Kevyt
- Soveltuva useille paalun halkaisijoille
- Kilpailukykyinen katkaisuaika
- Kilpailukykyinen hinta
- Katkaisu maalla ja vedessä
- Koneistusten sijaitseminen samassa kappaleessa
- Valmistus yksinkertaisista osista
- Silmää miellyttävä ulkonäkö
- Käyttöturvallisuus

Kuva 21. Paalunkatkaisulaitteen suunnitteluvaatimukset.

Ensinnäkin tuotteen tulisi olla yksinkertainen. Tarkoituksena ei siis ole suunnitella esimerkiksi hienoja automatisoituja toimintoja. Oikeanlaisen mielikuvan luomiseksi tuotetta voitaisiin monimutkaisuudessaan verrata esimerkiksi moottorisahaan. Seuraavat kaksi vaatimusta, helppokäyttöisyys ja helppo huoltaminen, liittyvät myös yksinkertaisuuteen. Suunnittelun alkuvaiheessa ei vielä tiedetä mitä toimilaitteita ja osia valmis tuote tulee sisältämään, mutta siitä huolimatta käyttäjän näkökulmasta sen käsittelyn tulisi olla vaivatonta. Lopulta tuote vaatii siis vähintäänkin selkeän käynnistä ja sammuta katkaisijan. Myös muita tuotteen ohjaamiseen mahdollisesti tarvittavia toimintoja tulee pystyä säätämään helposti. Myös yksinkertainen ohjauspaneeli saattaa tulla kyseeseen. Helppokäyttöisyyteen voidaan lisätä myös käytönmukavuus. Tämä aspekti huomioida vähintäänkin siinä, miten laitteesta voidaan ottaa kiinni sitä kannettaessa ja siirtäessä. Mahdollisia ratkaisuja ovat ainakin sopivaan paikkaan sijoitettu kahva ja kenties laitteelle erikseen suunniteltu apulaite sen liikuttelemista varten. Helppo huollettavuus tulee huomioida ainakin siten, että laitteen mahdollisia kuluvia osia tulee pystyä vaihtamaan vaivattomasti. Mahdollisien irrotettavien osien käyttö tulee myös olla nopeaa ja selkeää.

Suunnittelun alla olevan tuotteen tulee olla mahdollisimman kevyt. Kevyt tuote on lähtökohtaisesti myös helpommin käsiteltävä kuin raskas. Tämäkin vaatimus siis tukee edellä mainittuja asioita. Tarkoituksena on saada aikaiseksi käsin kannettava laite. Alustavasti siis noin 10 kg paino on mielikuvana sopiva. Tämän perusteella muiden yritysten valmistamien tuotteiden esittelyn yhteydessä (kappale 2.2.2) ilmi tulleet jopa satoja kiloja painavat suuren nostolaitteen tai kaivurin tarvitsevat tuotteet ovat poissuljettuja. Keveys vaatimus luonnollisesti rajoittaa tehtävän laitteen ulkomittoja mutta myös materiaalivalintoja ja käytettäviä komponentteja.

Puhuttaessa katkaisulaitteista on katkaisuun kuluva aika oleellinen tekijä. Lyhyt katkaisuaika mahdollistaa mahdollisimman monen paalun katkaisun työpäivän aikana, mikä tuo käyttäjälle säästöjä. Katkaisuaikaa ei voi kuitenkaan käsitellä täysin riippumattomana tekijänä. Jotta laitteella voi edes aloittaa katkaiseminen, tulee se asettaa paalun ympärille tukevasti. Tämän lisäksi laite pitää irrottaa paalusta katkaisun jälkeen ja valmistella uutta katkaisua varten. Kaikki nämä tekijät vaikuttavat todelliseen katkaisuun tarvittavaan aikaan. Tätä kautta aikaisemmin mainittu käytön helppous myös vaikuttaa katkaisuun aikaansaamiseen tarvittavaan aikaan.

Suorituskyvyn lisäksi hinta on merkittävä tekijä. Projektissa sovittiin alustavasti että tuotteen hinta käyttäjälle olisi noin 5000 €. Mainittu hinta on ammattityökaluhinta paalunkatkaisuja ammatikseen tekevällä henkilölle. Kyseessä ei siis ole normaali kulutus tuote vaan ammattikäyttöön suunniteltu työkalu. Kustannusten arviointia varten suunniteltavasta laitteesta pidetään yllä arvioitua kustannuskalkyyliä. Sen avulla suunnittelija pystyy edelleen rajaamaan mahdollisia toteutusvaihtoehtoja. Kustannuseuranta helpottaa havaitsemaan ainakin mitkä komponentit ovat kaikkein arvokkaimpia ja mitkä taas edullisia. Halvan komponentin yhteydessä on siis perusteltua hieman ylimitoittaa esimerkiksi kestävyteen nähden, jos se ei vaikuta suuresti muihin merkityksellisiin ominaisuuksiin kuten vaikkapa massaan. Suunnittelu-aikaa ei siis kannata uhrata liikaa yksinkertaisten osien turhan optimaaliseen mitoittamiseen, koska niiden ylimitoittaminen ei tule kalliiksi.

Laitteen tulisi toimia niin maalla kuin vedessäkin. Tämä tulee huomioida vähintäänkin laitteessa käytettävissä materiaaleissa. Käytettävät teräsosat tulevat olla lähtökohtaisesti ruostumatonta terästä tai muuten suojattu kosketukselta veden kanssa. Vesi on muutenkin kuin ruostumisen suhteen erilainen ympäristö. Vesi esimerkiksi vastustaa liikkeitä enemmän kuin ilma. Tämän lisäksi näkyvyys veden alla voi olla erittäin huono.

Osa suunnitteluvaatimuksista painottaa enemmän valmistusteknisiä asioita. Pyrkimyksenä on, että laite voitaisiin valmistaa tekemällä koneistuksia mahdollisimman paljon samaan kappaleeseen. Tästä johtuen komponenttien kiinnittämistä ja laitteen muiden toimintojen suoritusta varten tehtäviä porauksia, jysintöjä, viisteitä, pyöristyksiä ja muita töstöjä pyritään tekemään niin pieneen määrään osia kuin vain mahdollista. Tällöin koko laitteen osien lukumäärä pysyy pienempänä ja sen rakenne myös yksinkertaisena. Yksinkertaisuus vaatimus ulottuu siis laitteen kaikkiin osiin. Suunnittelija pystyy suuresti vaikuttamaan tarvittavien koneistusten määrään toteuttamalla rakenne järkevänä kokonaisuutena, joka koostuu sopivasta määrästä osia ja alikokoonpanoja. On myös päätettävissä toteutetaanko laitteen runko osista, jotka kiinnitetään toisiinsa hitsaamalla tai ruuveilla, vai onko järkevämpää käyttää valua. Valmiissa tuotteessa voi olla myös näitä yhdisteltyinä. Runkoon kiinnittyvien osien tulisi myös itsessään olla yksinkertaisia.

Tuotteen tulisi myös näyttää hyvältä ja olla turvallinen käyttää. Tähän voidaan vaikuttaa ainakin osien muotoilulla ja väreillä. Valmis tuote voidaan halutessa maalata mutta myös varsinaista konetta suojaava runko on mahdollinen toteutusratkaisu. Tämän lisäksi viisteiden ja pyöristysten tekeminen tulee tässä tapauksessa kysymykseen. Näillä on myös merkitystä turvallisuuden kanssa siinä mielessä, että laitteeseen ei saa jäädä sopimattomiin paikkoihin teräviä työstämättömiä reunoja. Myös katkaisuväline, joka voi olla, terä kuuma liekki tai jokin muu, tulee olla laitteessa käytettävissä turvallisella tavalla.

3. KATKAISUN TEORIA

Terästä voidaan katkaista hyvin monilla eri tavoilla. Eräs tapa on jakaa teräksenkatkaisumenetelmät mekaanisiin - ja termisiin menetelmiin. Mekaanisia menetelmiä ovat ainakin katkaisu pyörivällä terällä, joka voi olla esimerkiksi katkaisulaikka. Myös sahaus ja saksimainen levyleikkaus ovat eräitä yleisiä mekaanisia teräksen katkaisumenetelmiä. Termisistä teräksenkatkaisumenetelmistä yleisimpiä ovat polttoleikkaus, laserleikkaus ja plasmaleikkaus.

Tämän työn teoriaosiossa käsitellään tarkemmin yksi mekaaninen menetelmä ja päällisin puolin yksi terminen menetelmä. Mekaanisista menetelmistä esitellään katkaisu katkaisulaikalla. Katkaisulaikalla katkaisemisen ilmiöt ovat samat kuin hiomisessa. Se voidaan nähdä eräänä hiomisen erikoisosa-alueena. Yleensä hiomista sovellettaessa materiaalia poistetaan vain pieni määrä, jolloin saadaan aikaan todella hyvä pinnanlaatu työstetylle materiaalille. Hiomalla aikaansaatua pinnankarheus on pienempi kuin mihin voidaan päästä sorvaamalla tai jyrsimällä. Tämän takia hiominen on yleensä viimeisiä valmistettavan tuotteen arvoa lisääviä vaiheita. Kuitenkin hiomista voidaan myös hyödyntää siten, että materiaalia poistetaan nopeasti paljon pinnanlaadun ollessa toisarvoisen tekijä. Tässä tapauksessa hiomalaikan tilalla käytetään huomattavasti ohuempaa katkaisulaikkaa ja suurempia kehänopeuksia. Termisistä menetelmistä käsitellään katkaisu polttoleikkaamalla.

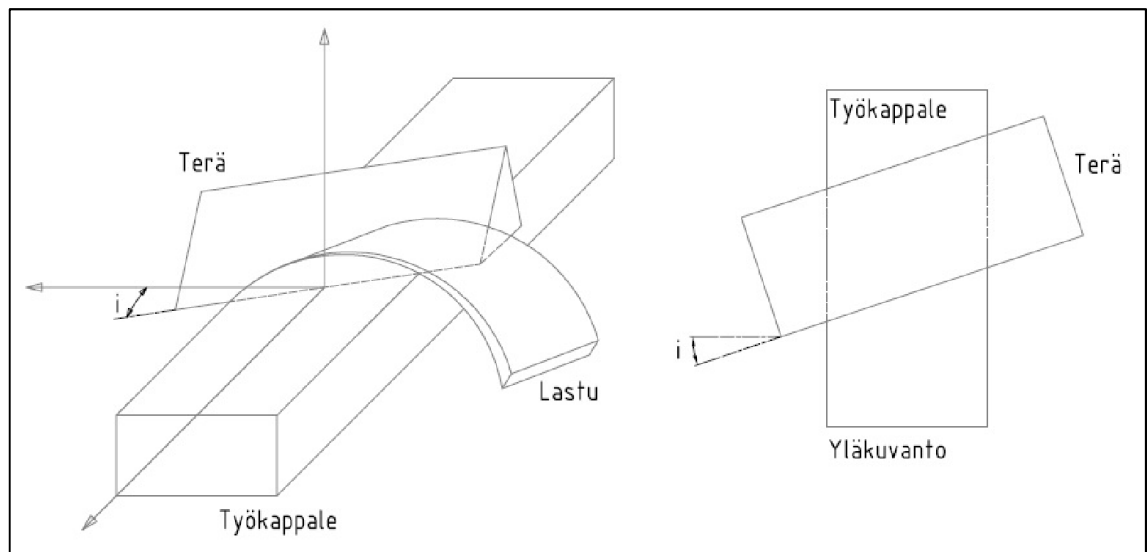
3.1 Lastuavan työstön perusteet

3.1.1 Katkaisulaikalla katkaiseminen ja lastuava työstö

Katkaisulaikalla katkaisemisen ymmärtämistä helpottaa lastuavan työstön perusteiden ymmärtäminen. Tämän takia tässä vaiheessa esitellään muutama asia lastuvasta työstöstä. Katkaisulaikka on itse asiassa eräs erikoismalli hiomalaikasta. Hiominen taas on eräs lastuavan työstön menetelmä. Muita tunnettuja lastuavia menetelmiä ovat sorvaaminen, jyrsiminen, poraaminen ja sahaaminen. Lastuaminen perustuu siihen, että työstettävää materiaali huomattavasti kovempi terä tunkeutuu työkappaleeseen ja plastisen muodonmuutoksen seurauksena irrottaa kappaleesta ainetta lastuina. Lastuava työstö voidaan terän muodon perusteella jakaa kahteen osa-alueeseen. Nämä ovat lastuaminen geometrisesti määrätynmuotoisella terällä ja lastuaminen geometrisesti epämääräisellä terällä. Ensimmäiseen kuuluu esimerkiksi sorvaaminen ja jyrsintä ja jälkimmäiseen hionta ja hienotyöstömenetelmät. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)

3.1.2 Ortogonaalinen lastuamismalli

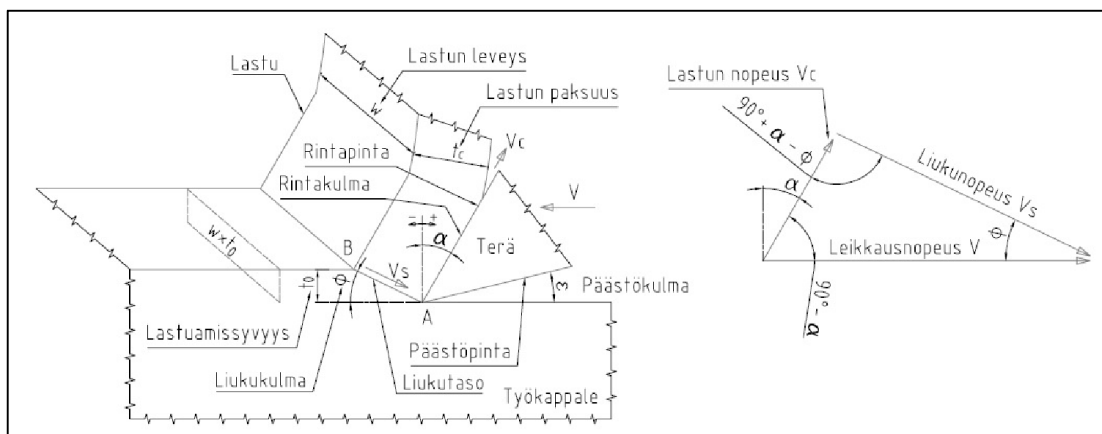
Lastuamisen teorian ymmärtämisen helpottamiseksi käsitellään tarkemmin vain kaksiulotteinen lastuamismalli. Tätä kutsutaan myös ortogonaaliseksi malliksi. Se on riittävä lastunmuodostumisen selostamiseen. Tässä mallissa terän särmä on kohtisuorassa terän liikesuuntaan nähden. Todellisuudessa suurimmassa osassa lastuavia menetelmiä terän särmä on kulmassa liikesuuntaansa nähden kuvan 22 mukaisesti. Tällöin on kyse vinosta koneistamisesta. Ortogonaalinen malli on vinon mallin erikoistapaus. Mikäli kuvan 22 kulma i on 0° , on kyseessä ortogonaalinen malli. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)



Kuva 22. Vinoa koneistaminen isometrisenä kuvantona (vasen) ja päältä (oikea) (Kalpakjian 1997)

Kuvassa 23 on esitetty ortogonaaliseen lastuamiseen liittyvää tärkeää termistöä. Kuvan vasemmalla puolella on esitelty terän, lastun ja työkappaleen välisiä kulmia ja pintoja. Alhaalla on työkappale, josta irrotetaan lastuja. Terä uppoaa työkappaleeseen lastuamissyvyydellä t_0 ja vaakasuuntaisella nopeudella V , jota kutsutaan lastuamisnopeudeksi. Kuvassa terä liikkuu oikealta vasemmalle. Terä leikkaa työkappaleesta lastunpaksuuden t_c omaavan lastun. Terä muodostaa kulman sekä työkappaleen, että työkappaleen normaalin kanssa. Työkappaleen ja terän välistä kulmaa kutsutaan päästökulmaksi ja se on merkitty kirjaimella ε . Tämän kulman tarkoituksena on estää terän hankautuminen uutta työstettyä pintaa vasten. Jos hankausta syntyy, kitka lisääntyy ja pinnanlaatu huononee. Terän alapuolista pintaa kutsutaan päästöpinnaiksi. Terän yläpuolisen pinnan ja työkappaleen normaalin välistä kulmaa kutsutaan rintakulmaksi ja sen symbolina käytetään kirjainta α . Rintakulma voi olla positiivinen tai negatiivinen. Terän yläpuolista pintaa kutsutaan rintapinnaksi. Tällä pinnalla tapahtuu lastun ja terän kosketus. Työkappaleen kohtaa, jossa lastunmuodostus tapahtuu, kutsutaan liukutasoksi. Liukutaso kulma työkappaleen pintaan nähden on nimeltään liukukulma ja sitä kuvataan symbolilla ϕ . Pinta-

alan w^*t_0 merkitys selitetään myöhemmin ominaisenergioiden yhteydessä. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997)

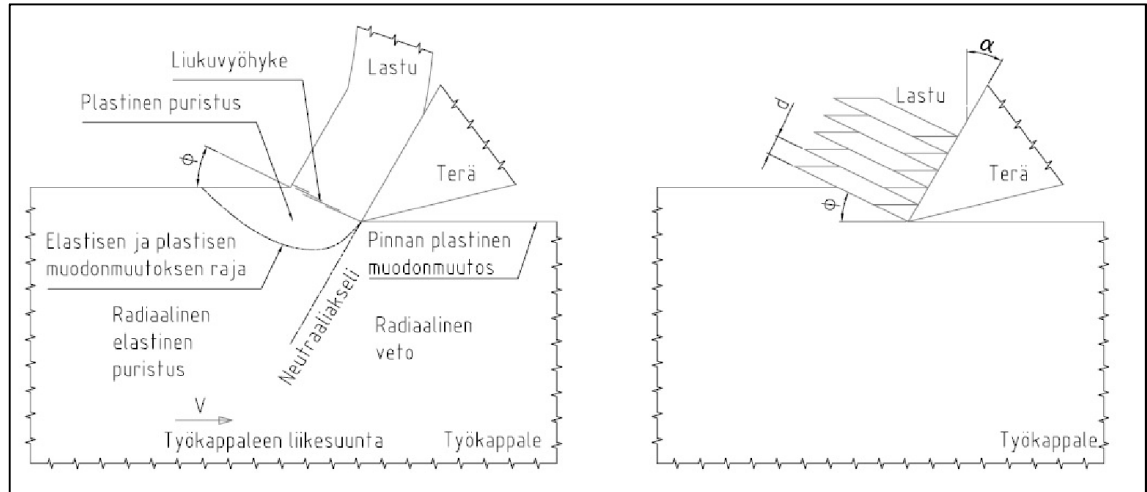


Kuva 23. Lastuavan työstön oleellista geometriaa (perustuu lähteeseen Kalpakjian 1997)

Kuvassa 23 on myös kaksi muuta nopeutta. Lastun nopeus on V_c ja se suunta on terän rintapintaa pitkin. Liukunopeus taas on V_s ja se kulkee liukutasolla. Se kuvaa lastun leikkaantumisen nopeutta työkappaleeseen nähden liukutasolla. Ortogonaalisessa mallissa esitetyistä kolmesta nopeudesta voidaan muodostaa kuvan 23 oikealla puolella esitetty vektorikolmio. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997)

3.1.3 Lastun leikkaantuminen

Lastun muodostus johtuu kapealla alueella tapahtuvasta leikkaantumisesta. Siinä suurilla leikkausmyötymillä ja leikkausmyötymänopeuksilla tapahtuva plastinen muodonmuutos kehittyy säteittäisesti laajenevasta puristumakentästä, joka kulkee terän edellä sen liikkuessa työkappaletta pitkin. Tätä tapahtumaa on kuvattu kuvan 24 vasemmalla puolella. Siinä näkyy kauempana terän edellä säteittäisesti laajeneva elastisen puristuman alue. Lähempänä terää tämä alue muuttuu plastiseksi puristukseksi. Plastinen puristus aiheuttaa työkappaleessa tiiviitä dislokaatiovyöhyttejä ja -verkostoja, mikä johtaa materiaalin myötölujuuttamiseen. Kun täysi myötölujuuttaminen on tapahtunut, ei materiaali voi muuta kuin leikkaantua. Tämä leikkaantuminen on epähomogeenistä ja se tapahtuu useasta leikkausrintamasta koostuvasta liukuvyöhykkeestä (shear fronts). Kuvassa näkyy myös jännityksen muuttuminen radiaaliseksi vedoksi neutraaliakselin oikealla puolella terän alla. (DeGarmo 1988)



Kuva 24. Erilaiset jännityskentät työkappaleessa (vasen) ja lastun muodostuminen korttipakan lailla (oikea) (perustuu lähteeseen DeGarmo 1988 ja Kalpakjian 1997)

Lastun mallintamisen helpottamiseksi leikkaantumisen oletetaan kuitenkin tapahtuvan yksittäisellä kapealla tasolla usean leikkausrintaman muodostaman leikkausalueen sijaan. Tämä taso on kuvassa 23 näytetty liukutaso. Lastuamisen mallinnuksessa terä oletetaan myös täydellisen teräväksi. (DeGarmo 1988) Terän edetessä ohuita leikkaantuneita kerroksia kasaantuu toistensa päällä. Tällä tavalla lastu saa lamellirakenteen. Lastun voidaan kuvitella muodostuvan kuten korttipakka, jossa kortit ovat lamelleja ja korttien pinnat toisiaan vasten liukuvia liukupintoja. Lastujen muodostumista useasta peräkkäin leikkaantuvasta lamellista on selvennetty kuvan 24 oikealla puolella. (Kalpakjian 1997)

Liukukulman laskemiseksi määritetään yhtälön 1 (DeGarmo 1988) mukaisesti lastun paksuussuhde

$$r_c = \frac{t_0}{t_c} = \frac{AB \cdot \sin(\varphi)}{AB \cdot \cos(\varphi - \alpha)} \quad (1)$$

missä osoittajassa on leikkaussyvyys ja nimittäjässä lastun paksuus kuten kuvassa 23. Koska lastun paksuus on aina enemmän kuin leikkaussyvyys, on lastun paksuussuhteen arvo aina vähemmän kuin yksi. Tämä yhtälö voidaan ratkaista rintakulman suhteen jolloin saadaan yhtälö 2 (DeGarmo 1988)

$$\tan(\varphi) = \frac{r_c \cdot \cos(\alpha)}{1 - r_c \cdot \sin(\alpha)} \quad (2)$$

Lastun paksuussuhde voidaan määrittää esimerkiksi lastun pituuden ja leikkauksen pituuden suhteen avulla. Toinen vaihtoehto on pysäyttää leikkaus nopeasti ja kuvata lastun irtoamiskohta pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Tilavuuden säilymisen johdosta lastun paksuussuhde voidaan ratkaista myös lastun nopeuden ja lastuamisnopeuden suhteen kaavan 3 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$r_c = \frac{V_c}{V} \quad (3)$$

Mikäli lastun nopeus voidaan määrittää luotettavasti, voidaan yhtälön 3 paksuussuhteen avulla ratkaista leikkauskulma yhtälöstä 2. Liukunopeuden ja lastuamisnopeuden suhde on kaavan 4 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$\frac{V_s}{V} = \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\varphi - \alpha)} \quad (4)$$

Leikkaantumisen lastuun kohdistuu leikkausmyötymä kaavan 5 (DeGarmo 1988 ja Kalpakjian 1984) mukaisesti

$$\gamma = \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi - \alpha)} = \cot(\varphi) + \tan(\varphi - \alpha) \quad (5)$$

mistä huomataan että leikkausmyötymä riippuu sekä rintakulmasta että liukukulmasta. Lastuavassa työstössä leikkausmyötymän arvot ovat suuria verrattuna muihin plastisiin prosesseihin. Jopa arvo 5 tai suurempi on mahdollinen (Kalpakjian 1984). Arvot ovat suuria pienillä ja negatiivisilla rintakulmilla ja pienillä liukukulmilla. Sen lisäksi että leikkausmyötymä on suuri, tapahtuu se hyvin kapealla muodonmuutosalueella. Leikkaantumisen muodonmuutosnopeus voidaan laskea kaavan 6 (Kalpakjian 1984) mukaisesti

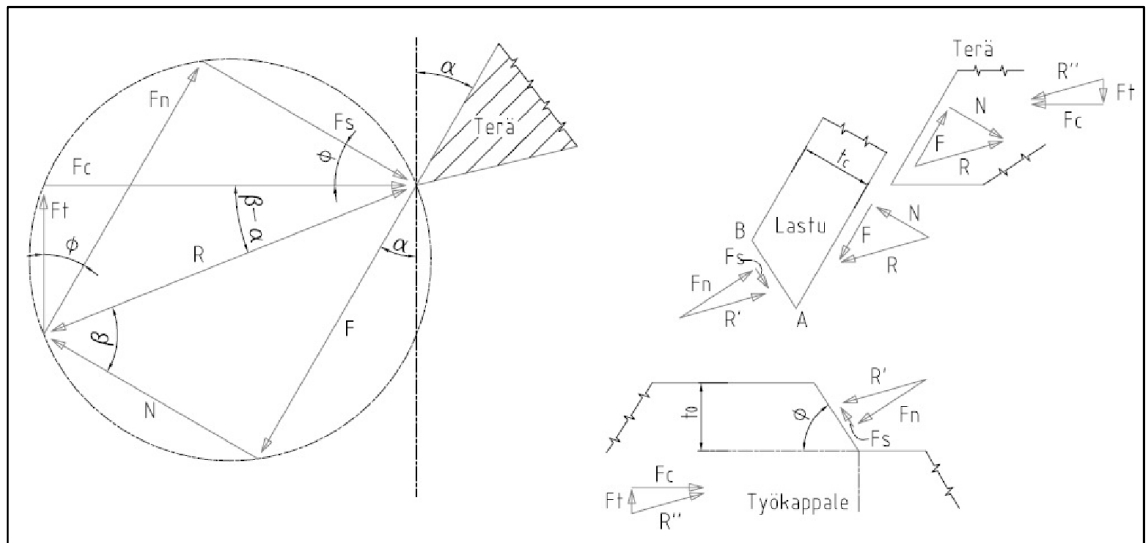
$$\dot{\gamma} = \frac{V_s}{d} \quad (6)$$

missä d on kuvan 24 oikealla puolella esitetyn leikkaantuneen elementin paksuus. Tyyppillinen leikkaantuneen alueen paksuus on 1-10 μm . Koska leikkaantuvat alueet ovat matalia, on leikkaantumisen muodonmuutosnopeus suuri jopa pienillä lastuamisnopeuksilla. Suuruusluokaltaan nämä nopeudet ovat 10^3 - 10^6 1/s. (Kalpakjian 1984)

3.1.4 Lastuamisvoimat ja jännitykset

Ortogonaalisen lastuamisen mallin voimat ovat määritelty terän pääsärmää vastaan kohtisuoralla tasolla olevilla voimapareilla. Näitä voimapareja on kolme kappaletta. Voimaparit voidaan kätevästi hahmottaa kuvan 25 oikealta puolelta, missä esitetään vapaakappalekuvina työkappaleesta liukutasolta irrotettu lastu. Tässä lastu on myös irrotettu terästä. Täten siinä näkyy työkappaleeseen, lastuun ja terään kohdistuvat voimat. Lastun terää vasten olevalle pinnalle kohdistuva resultanttivoima R on yhtä suuri, mutta vastakkaisuuntainen kuin lastun liukupinnalle kohdistuva resultanttivoima R' . Ensin mainittu resultanttivoima koostuu kitkavoimasta F ja normaalivoimasta N jotka vaikuttavat lastun ja terän välisen pinnan kosketuksessa. Nämä voimat vaikuttavat vastakkaisuuntaisina terän vapaakappalekuvassa. Jälkimmäinen resultanttivoima taas koostuu liukuvoimasta F_s ja sen normaalista voimasta F_n jotka vaikuttavat liukutason alueella A_s . Tämä voimapari vaikuttaa vastakkaisuuntaisena työkappaleen vapaakappalekuvassa. Mi-

tään näistä kahden voimaparin neljästä voimasta ei kuitenkaan voida mitata helposti. Tästä johtuen määritellään kolmas voimapari. Tämän resultanttivoima on R'' ja se on esitetty kuvan 25 oikealla puolella työkappaleen ja terän vapaakappalekuvissa. Kyseinen voima on yhtä suuri kuin molemmat aikaisemmin määritellyt resultanttivoimat ja sen suunnat ovat esitetty kuvan 25 oikealla puolella. Kyseinen voima kohdistuu terään ja työkappaleeseen. Terän tapauksessa se edustaa terän ja työkappaleen tapauksessa työkappaleen pidikkeen aiheuttamia tukivoimia. Terällä resultanttivoima R'' koostuu terän liikkeen suuntaisesta lastuamisvoimasta F_c ja sitä vasten kohtisuorasta tangentiaalisesta (normaalista) voimasta F_t , joka kuvaa terän työkappaleeseen painavaa voimaa. Työkappaleella nämä vaikuttavat vastakkaissuuntaisina. (DeGarmo 1988)



Kuva 25. Ortogonaalisen mallin voimaympyrä (vasen) ja työkappaleen lastun ja terän vapaakappalekuvat (oikea) (perustuu lähteeseen DeGarmo 1988)

Ortogonaalisen mallin voimat F , N , F_s ja F_n voidaan esittää voimien F_c ja F_t avulla. Tätä varten on määritelty kuvan 25 vasemmalla puolella näkyvä voimaympyrä. Tätä kutsutaan myös Merchantin voimaympyräksi. Siinä kaikki kuuden voiman aiheuttamaa kolme voimaparia ovat näytetty samassa ympyrässä. Tästä voi huomata helposti kaikkien resultanttivoimien olevan samoja. Kaikki voimat siis edustavat saman resultanttivoiman erilaisia komponentteihin jakoja. Voimaympyrässä on esitetty myös useita kulmia, joista ainoa määrittelemätön on kitkakulma β . Tämä on normaalivoiman N ja resultanttivoiman R välinen kulma. Sen avulla määritellään kitkakerroin μ kaavan 7 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$\beta = \tan^{-1}(\mu) = \tan^{-1}\left(\frac{F}{N}\right) \quad (7)$$

Kitkavoiman F ja sen normaalivoiman N voidaan osoittaa oleva kaavojen 8 ja 9 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$F = F_c * \sin(\alpha) + F_t * \cos(\alpha) \quad (8)$$

$$N = F_c * \cos(\alpha) - F_t * \sin(\alpha) \quad (9)$$

joissa F_c ja F_t ovat määritelty kaavan 10 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_t^2} \quad (10)$$

Liikutason suuntainen ja sitä vastaan kohtisuora voima voidaan osoittaa olevan kaavojen 11 ja 12 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$F_s = F_c * \cos(\varphi) - F_t * \sin(\varphi) \quad (11)$$

$$F_n = F_c * \sin(\varphi) + F_t * \cos(\varphi) \quad (12)$$

Eryteisesti liukuvoima F_s kiinnostaa, koska sitä käytetään liukutasolla tapahtuvan leikkausjännityksen laskemiseen kaavan 13 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (13)$$

missä leikkauspinta-ala on kaavan 14 (DeGarmo 1988) mukaisesti

$$A_s = \frac{t_0 * w}{\sin(\varphi)} \quad (14)$$

missä t_0 ja w ovat kuvan 23 mukaisesti leikkaussyvyys ja leikkauksen leveys. Leikkausjännityksen oletetaan olevan tasaisesti jakautunut. Se voidaan myös esittää kaavan 15 (DeGarmo 1988) mukaisesti yhdistämällä kaavat 11, 13 ja 14

$$\tau_s = \frac{F_c * \cos(\varphi) * \sin(\varphi) - F_t * \sin^2(\varphi)}{t * w} \quad (15)$$

Monikiteisille metalleille tämä leikkausjännityksen arvo on materiaalivakio. Se ei siis riipu leikkauksen parametreista tai terän materiaalista.

Liukukulmalla on suuri merkitys lastuamisen toimintaperiaatteeseen. Tämän takia sille on kehitelty ratkaisuja materiaaliominaisuuksien ja prosessimuuttujien suhteen. Eräs näistä perustuu siihen, että liukukulma säätää itsensä sellaiseksi, että lastuamisvoima on minimi. Toisin sanoen suurin leikkausjännitys ilmenee liukutasolla. Kun kulman β oletetaan olevan riippumaton kulmasta ϕ , saadaan suurinta leikkausjännitystä vastaava liukukulma derivoimalla yhtälö 15 liukukulman suhteen ja laskemalla tämän derivaatan nollakohta kaavan 16 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

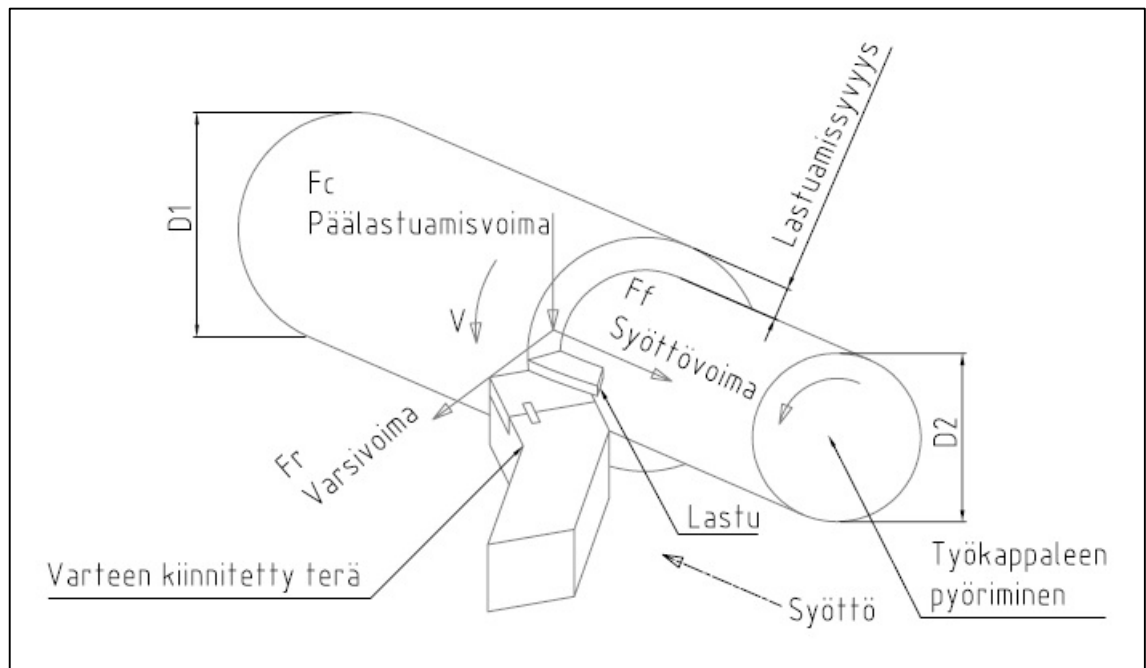
$$\frac{d\tau_s}{d\varphi} = \cos(\varphi + \beta - \alpha) * \cos(\varphi) - \sin(\varphi + \beta - \alpha) * \sin(\varphi) = 0 \quad (16)$$

Kyseiseen muotoon on päästy hyödyntämällä voimaympyrässä esitettyjä voimien geometrisia yhteyksiä ja trigonometrinen funktioiden laskusääntöjä. Sieventämällä yhtälöä 16 edelleen päästään kaavan 17 (Kalpakjian 1997) mukaiseen muotoon

$$\varphi = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (17)$$

Yhtälö osoittaa liukukulman pienenevän rintakulman pienentyessä ja kitkakulman kasvaessa. Tällöin myös lastu on paksumpi. Näin on huomattu tapahtuvan myös käytännössä. (Kalpakjian 1997)

Ortogonaalisen mallin vahvuus on sille määriteltävissä olevat yksinkertaiset kaavat. Kannattaa kuitenkin pitää mielessä, että todellisuudessa voimia on kolmessa ulottuvuudessa. Kuvassa 26 on näytetty esimerkkinä yksinkertainen esitys sorvaamisessa ilmenevistä voimista. Siinä F_c on vastaava voima kuin edellä esitelty lastuamisvoima, mutta tässä tapauksessa sitä kutsutaan päälastuamisvoimaksi. Ortogonaalisen mallin tangentialista voimaa F_t vastaa syöttövoima F_f . Kuvassa 26 näkyvää varsivoimaa F_r ei huomioida ortogonaalisessa mallissa. Lastuamissyvyys ei ole määritelty sorvauksessa samalla tavalla kuin ortogonaalisessa mallissa. Kuvan voimat ovat terään kohdistuvia voimia. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)



Kuva 26. Kolme suorakulmaista voimaa sorvauksessa (DeGarmo 1988)

3.1.5 Teho ja ominaisenergia

Lastuamiseen tarvittava kokonaisteho saadaan lastuamisvoiman ja –nopeuden tulosta kaavan 18 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$P = F_c * V \quad (18)$$

Tangentialinen voima ei vaikuta tehon tarpeeseen, koska sen suuntainen nopeus on merkityksetön. Lastuavassa työstössä käytetään yleensä kuitenkin ominaisenergioita.

Kokonaisominaisenergia lasketaan kaavan 19 (Kalpakjian 1997) mukaisesti jakamalla kokonaisteho lastuvirralla

$$u_t = \frac{P}{w*t_0*V} = \frac{F_c*V}{w*t_0*V} = \frac{F_c}{w*t_0} \quad (19)$$

Kaavan 19 ensimmäisen ja toisen version nimittäjässä oleva lastuvirta on yksikertaisesti terän leveyden, lastuamissyvyyden ja lastuamisnopeuden tulo. Tulon kahden ensimmäisen termin voidaan kuvitella muodostavan poistettavan materiaalin poikkipinta-alan. Tämä pinta-ala on otettu työkappaleesta terän edeltä kohdasta, jossa lastunmuodostumista ei ole vielä tapahtunut kuten kuvasta 23 voi nähdä. Viimeinen termi on tätä pinta-alaa vastaan kohtisuora nopeus, joten lastuvirran yksiköksi tulee mm^3/s . Ominaisenergian yksikkö on siis $W/mm^3/s$ tai sievennettyinä J/mm^3 . Se kuvaa energiaa jouleina, joka tarvitaan yhden kuutiomillimetrin irrottamiseen työkappaleesta. Koska kaavasta 19 sievenee lastuamisnopeus pois, on kokonaisominaisenergia yksikertaisesti lastuamisvoiman ja leikkauspinta-alan suhde. (Kalpakjian 1997)

Kokonaisominaisenergia voidaan jakaa kahteen osaan. Näistä ensimmäinen on kitkallinen ominaisenergia ja se kuvaa terän ja lastun kosketusta. Tähän tarvittava teho on kitkavoiman F ja sen suuntaisen nopeuden V_c tulo. Kitkallinen ominaisenergia saadaan kokonaisominaisenergian tapaan jakamalla teho lastuvirralla kaavan 20 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$u_f = \frac{F*V_c}{w*t_0*V} = \frac{F*r_c}{w*t_0} = \frac{(F_c*\sin(\alpha)+F_t*\cos(\alpha))*r_c}{w*t_0} \quad (20)$$

missä kitkavoima on sievennetty kaavan 8 ja nopeudet kaavan 3 avulla. Toinen kokonaisominaisenergian osa on liukutasolla tapahtuva leikkaantumiso-minaisenergia, joka määritellään vastaavasti kuin u_t ja u_f . Leikkaantumiseen tarvittava teho on liukuvoiman F_s ja leikkaantumisnopeuden V_s tulo. Leikkaantumiso-minaisenergia saadaan täten kaavan 21 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$u_s = \frac{F*V_s}{w*t_0*V} \quad (21)$$

Kokonaisominaisenergia on kahden edellisen summa kaavan 22 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$u_t = u_f + u_s \quad (22)$$

Lastuamiseen liittyy itse asiassa vielä kaksi muuta kohdetta johon kuluu energiaa. Ensimmäinen näistä on pintaenergia, joka johtuu uuden pinnan muodostumisesta terän alle lastun irrotessa työkappaleesta. Kuitenkin tämä energia on hyvin pieni verrattuna leikkaantumiseen ja kitkaan liittyviin energioihin. Toinen kohde, mihin kuluu energiaa, liittyy liikemäärän muutokseen metallin ylittäessä leikkaustaso. Tällä on merkitystä vain leikkausnopeuden ollessa $125 m/s$ tai enemmän. (Kalpakjian 1997)

Taulukko 3. Mittaustuloksia ortogonaalisesta leikkauksesta 4130 teräkselle* (perustuu lähteeseen Kalpakjian 1997)

α	ϕ	γ	μ	β	F_c (N)	F_t (N)	u_t (J/mm^3)	u_s	u_f	u_f/u_t (%)
25°	20,9°	2,55	1,46	56°	1690	996	2.2	1,4	0,8	35
35°	31,6°	1,56	1,53	57°	1130	453	1.5	0,8	0,7	48
40°	35,7°	1,32	1,54	57°	1032	316	1.3	0,6	0,7	52
45°	41,9°	1,06	1,83	62°	1032	302	1.3	0,5	0,8	62

* $t_0=0,0635$ mm; $w=12,065$ mm; $V=0,46$ m/s; terämateriaali: pikateräs

Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty kokeellisia mittaustuloksia lastuamisesta. Ensimmäinen tärkeä havainto näistä on liukukulman pieneminen rintakulman pienentyessä. Toinen tärkeä huomio liittyy ominaisenergioihin. Rintakulman pienentyessä u_f pysyy enemmän tai vähemmän vakiona kun taas u_s kasvaa nopeasti. Tästä johtuen suhde u_f/u_t pienenee merkittävästi rintakulman pienentyessä. Tämä käyttäytyminen voidaan ennustaa myös avaamalla ominaisenergioiden suhde kaavan 23 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$\frac{u_f}{u_t} = \frac{F \cdot V_c}{F_c \cdot V} = \frac{R \cdot \sin(\beta)}{R \cdot \cos(\beta - \alpha)} * \frac{V_r}{V} = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta - \alpha)} * \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi - \alpha)} \quad (23)$$

Kokeelliset havainnot ovat osoittaneet, että kun α pienenee, pienenevät myös β ja ϕ . Täten kaavan 23 tutkiminen osoittaa, että u_f/u_t suhteen tulisi myös pienentyä, kun α pienenee. Näin nähdään tapahtuvan taulukoissa 3 ja 4. Kuitenkaan u_f ja u_s eivät ole toisistaan riippumattomia. Vaikka u_f ei edistä leikkausta, vaikuttaa se u_s :n suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että kitkan kasvaessa leikkauskulma pienenee. Pienenevä liukukulma vuorostaan kasvattaa u_s :n arvoa. (Kalpakjian 1997)

Taulukko 4. Mittaustuloksia ortogonaalisesta leikkauksesta 9945 teräkselle* (perustuu lähteeseen Kalpakjian 1997)

α	V (m/s)	ϕ	γ	μ	β	F_c (N)	F_t (N)	u_t (J/mm^3)	u_s	u_f	u_f/u_t (%)
+10°	1,00	17°	3,4	1,05	46°	1646	1214	2,8	2,0	0,8	27
	2,03	19°	3,1	1,11	48°	1601	1259	2,7	1,8	0,9	32
	3,26	21,5°	2,7	0,95	44°	1463	965	2,5	1,7	0,8	30
	6,02	25°	2,4	0,81	39°	1348	747	2,3	1,6	0,7	31
-10°	2,03	16,5°	3,9	0,64	33°	1850	1713	3,1	2,4	0,7	24
	3,24	19°	3,5	0,58	30°	1708	1450	2,9	2,2	0,7	25
	5,89	22°	3,1	0,51	27°	1584	1170	2,7	2	0,7	25

* $t_0=0,940$ mm; $w=6,35$ mm; terämateriaali: kovametalli

Jokainen ominaisenergian laskemiseen tarvittava muuttuja on todellisuudessa hankala laskea. Hyviä teoreettisia laskelmia on olemassa, mutta niitä on monimutkaista käyttää. Tästä johtuen luotettavat leikkausvoimien ja energioiden arviot perustuvat edelleen taulukon 5 tapaisiin kokeellisiin tuloksiin. Ominaisenergioiden suuri vaihtelu johtuu jokai-

sen materiaaliryhmän lujuuden vaihtelusta sekä muista muuttujista kuten kitkasta ja käyttöolosuhteista. (Kalpakjian 1997)

Taulukko 5. Arvioituja kokonaisominaisenergioita lastuamisessa* (perustuu lähteeseen Kalpakjian 1997)

Materiaali	Kokonaisominaisenergia (J/mm^3)
Alumiiniseokset	0,4–1,1
Valuraudat	1,6–5,5
Kupariseokset	1,4–3,3
Korkean lämpötilan seokset	3,3–8,5
Magnesiumseokset	0,4–0,6
Nikkeliseokset	4,9–6,8
Tulenkestävät seokset	3,8–9,6
Ruostumaton teräs	3,0–5,2
Teräkset	2,7–9,3
Titaaniseokset	3,0–4,1
<i>*korjattu huomioiden käyttömoottorin 80 % hyötysuhde ja 1,25 kerroin tylsän terän huomioimiseksi</i>	

3.2 Hiomisen perusteet

3.2.1 Katkaisu geometrisesti määräämättömällä terällä

Hiomisessa tapahtuvat samat ilmiöt mitä edellä esiteltiin geometrisesti määrätylle terälle. Myös hionnassa terän ja työkappaleen välillä ilmenee kuvassa 23 (lastuamisgeometria) esitetyt asiat ja kuvan 24 osoittama elastinen ja plastinen käyttäytyminen. Hionnassa terä on kuitenkin geometrisesti määräämätön. Tarkkaa rintakulmaa ei voida siis määrittää. Ne ovat kuitenkin keskimäärin hyvin negatiivisia. Kuten aikaisemmin todettiin, pieni rintakulma johtaa pieneen liukukulmaan. Hionnassa siis liukukulmat ovat pieniä ja tästä johtuen ominaistehot suuria. Hiomalastut ovat muihin lastuavien menetelmien lastuihin verrattuna pieniä. Myös leikkaussyvytydet vaihtelevat terien välillä. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)

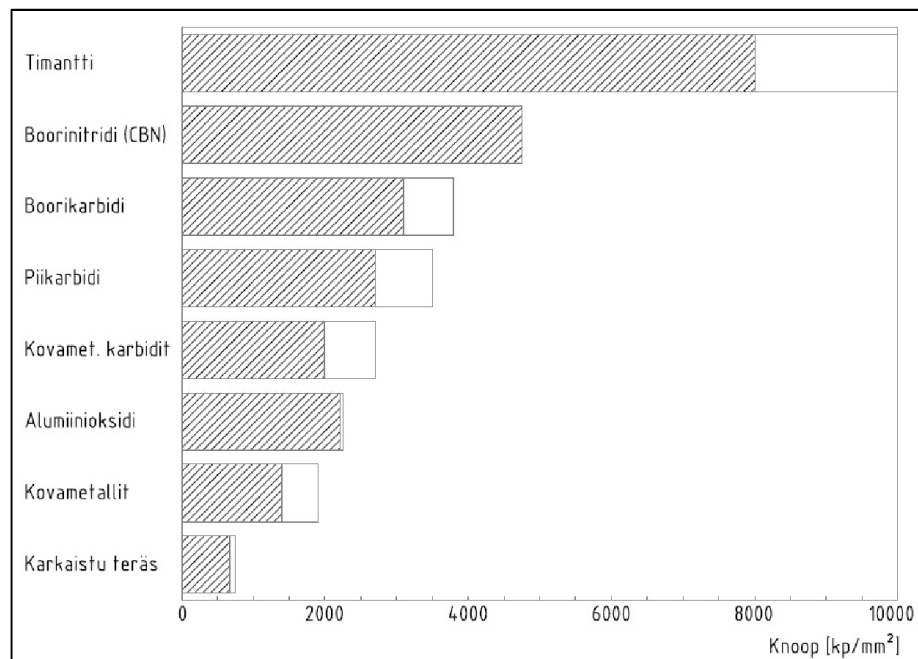
Kaikissa metallintyöstöissä leikkaukseen kulunut energia muuttuu lämmöksi. Näin käy riippumatta siitä onko terä geometrisesti määrätty tai määräämätön. Lastuamisessa lämpö syntyy sekä liukutasolla leikkaantumisesta sekä rintapinnalla terän ja lastun välisestä kitkasta. Hiomarakeiden huippujen lämpötilat ovat kuitenkin suurempia kuin sorvi- ja jysintätyökalujen kärkien lämpötilat. Jälkimmäisissä työkalun lämpötila voi saavuttaa lämpötilan 900–1200 °C. Hiomarakeen kärjen lämpötila voi nousta kuitenkin jopa 1700–1800 °C lämpötilaan asti. Tämä lämpötila muodostuu muutamassa mikrosekunnissa. Lyhyestä kosketusajasta johtuen sulamista ei välttämättä tapahdu. (Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)

Selkeänä silmin havaittavana erona geometrisesti määrätyllä terällä työstämiseen verrattuna ovat hiomisessa syntyvät kipinät ja suuri lastuamisnopeus. Kipinät ovat itse asiassa hohtavia hiomalastuja. Kipinöitä ei kuitenkaan havaita hapettomassa ympäristössä. Hiomalastut voivat jopa sulaa. Lastuamisnopeus on hionnassa 10–60-kertainen esimerkiksi tavanomaiseen jyrshintään verrattuna. Lastuamisnopeus hionnassa on yleisesti 15–60 m/s. Myös taulukosta 4 voi huomata lastuamisnopeuksien olevan pieniä geometrisesti määrätyille terälle. (Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003)

3.2.2 Hioma-aineet: abrasiiviset partikkelit

Hiominen on abrasiivista työstämistä. Siinä lastuja muodostuu abrasiivisten partikkelien pienistä leikkausta tekevistä särmistä. Abrasiivisia partikkeleja kutsutaan myös hioma-ainerakeiksi. Hiomisessa vaikuttavien rakeiden leikkausta tekevien särmien voidaan kuvitella vastaavan geometrisesti määritellyn lastuamisen terää. Kuitenkin rakeiden reunat ovat paljon pienempiä ja niitä on useita. Tämän lisäksi useat hiomarakeet leikkaavat terästä samanaikaisesti hyvin vaihtelevilla rintakulmilla. Abrasiivisessa työstämisessä partikkelit ovat joko vapaina, päällystettyinä kuten hiomapaperissa tai kiinnitettyjä laikkaan sideaineiden välityksellä. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Rowe 2009)

Abrasiivisen partikkelin tärkein ominaisuus on sen kovuus. Kuvassa 27 on esitetty joidenkin abrasiivisina partikkeleina käytettyjen materiaalien Knoop-kovuuksia.



Kuva 27. Hioma-aineiden kovuuksia 20 °C:ssa (Ihalainen 2003)

Kovuuden lisäksi kovuuden säilyminen korkeissa lämpötiloissa on tärkeää. Myös partikkelin lohkeaminen on oleellista. Partikkelin lohjetessa siitä paljastuu uusia teräviä särmiä, jotka pystyvät jatkamaan hiomista. Jos partikkeli ei lohkea helposti muuttuu se

tylsemmäksi ja hiomisen tehokkuus vähenee. Helposti lohkeavat partikkelit teroittavat itseään. Hioma-aineen lisäksi partikkelin itseteroittumiskykyyn vaikuttavat myös hiomarakeen koko ja muoto. Pitkät ja ohuet partikkelit lohkeavat lohkomaisia partikkeleja helpommin. Isommissa partikkeleissa taas on suuremmalla todennäköisyydellä rakenteellisia virheitä, mikä edistää niiden lohkeilua. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Rowe 2009)

Hioma-aineina käytetään joko luonnonaineita tai synteettisiä aineita. Nykyään synteettisiä aineita käytetään huomattavasti enemmän. Tämä johtuu siitä että niiden ominaisuuden tunnetaan paremmin ja ne ovat tasalaatuisempia. Ainoita nykyään kaupallisesti merkittävät luonnon hioma-aineita ovat kvartsi, hiekka ja timantti. Hioma-aineet voidaan karkealla tasolla jakaa perinteisiin- ja superabrasiiveihin. Perinteisiä abrasiiveja ovat piikarbidi ja alumiinioksidi kun taas timantti ja kuutiohilainen boorinitridi katsotaan superabrasiiveiksi.

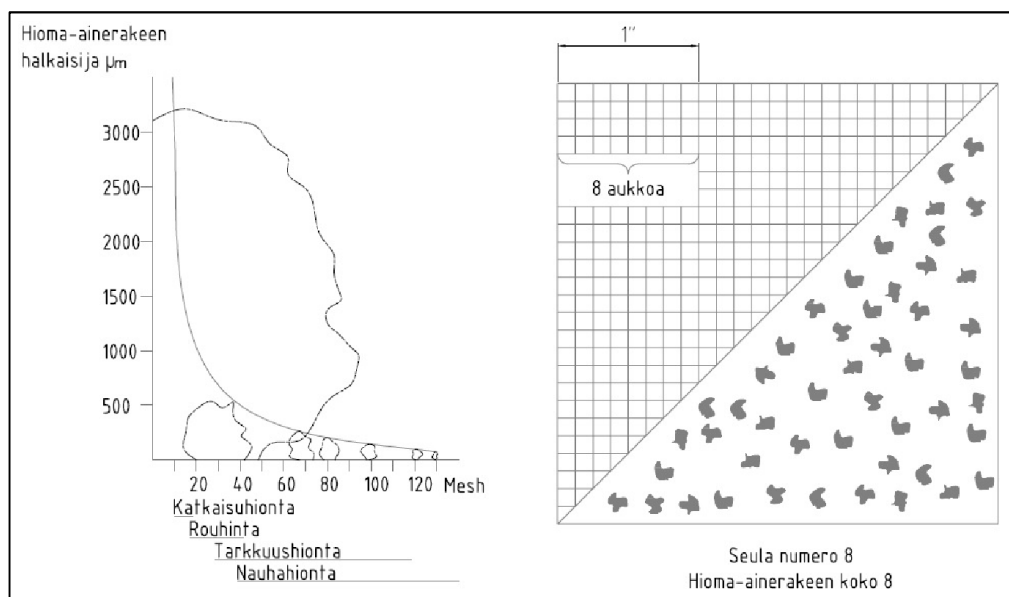
Piikarbidi, SiC, on ensimmäinen synteettinen hioma-aine. Sitä valmistettiin ensimmäisen kerran vuonna 1891. Piikarbidi omaa yleensä alumiinioksidia paremman lohkeavuuden. Sillä hiotaan kovametalleja sekä usein myös valurautaa ja muita kuin rautametalleja. Tämän lisäksi sitä käytetään myös muiden aineiden kuin metallien hiontaan. Piikarbidi on toiseksi eniten käytetty hioma-aine. Alumiinioksidia valmistettiin ensimmäisen kerran vuonna 1893. Alumiinioksidi, Al_2O_3 , on kaikista yleisimmin käytetty hioma-aine. Se soveltuu kaikkein parhaiten useimpien teräslaatujen hiontaan. Vaikka alumiinioksidi on piikarbidia pehmeämpää, kuten kuvasta 27 voi nähdä, on se sitä sitkeämpää mikä tekee siitä paremman moneen kohteeseen soveltuvan yleisabrasiivin. Sekä alumiinioksidi- että piikarbidilaikoilla voidaan hioa myös alumiinia ja lasia. Molemmat näistä hioma-aineista valmistetaan sähköuunissa.

Timantti on maailman kovin aine. Hiomisessa voidaan käyttää sekä luonnon- että teko- timantteja, mutta jälkimmäistä käytetään enenevässä määrin. Timanttilaikkoja käytetään pääasiassa kovametallien ja keraamien hiontaan, koska se reagoi korkeissa lämpötiloissa raudan kanssa. Mikäli timantilla halutaan hioa terästä, täytyvät timanttirakeet suojata nikkellillä tai kuparilla. Timantin korkeasta hinnasta johtuen, sitä käytetään vain niissä tapauksissa, joissa halvemmilla hioma-aineilla ei saada aikaan haluttuja tuloksia. Kuutiohilainen boorinitridi, CBN, on maailman toiseksi kovin aine. Se on synteettisesti valmistettava hioma-aine. Vaikka CBN ei ole yhtä kovaa kuin timantti, säilyttää se kovuutensa paremmin lämpötilan noustessa. Lämpötilan saavuttaessa $650\text{ }^{\circ}C$ saattaa timantti alkaa palautumaan hiilidioksidiksi, mutta CBN säilyttää kovuutensa ja kemiallisen eheyensä. Vasta $1400\text{ }^{\circ}C$ lämpötilassa CBN muuttuu kuutiollisesta hilarakenteesta heksagoniseen hilarakenteeseen ja menettää kovuutensa. Sillä voidaan hioa rautaa, terästä, raudan seoksia, nikkelpohjaisia seoksia ja muita materiaaleja. Se toimii hyvin myös karkaistuille materiaaleille ja pikaterästen ja työkaluterästen hiontaan. Hioma-laikkojen yhteydessä superabrasiiveja käytetään vain laikan ulkokehällä laikan sisäosien

ollessa muuta materiaalia. Tämä johtuu niiden korkeasta hinnasta. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1997; Ihalainen 2003; Rowe 2009)

3.2.3 Hiomarakeen koko

Hionnassa käytetään monia erikokoisia hiomarakeita riippuen käyttötarkoituksesta. Katkaisuhionnassa ja rouhinnassa käytetään isoja rakeita kun taas tarkkuushionnassa ja nauhahionnassa pienempiä. Pienempi rae tuottaa pienemmän pinnankarkeuden. Kuvassa 28 on havainnollistettu raekokoa. Tavanomaisin tapa kuvata raekokoa on käyttää mesh-jaottelua. Tässä raekokoa kuvaa numero, joka kertoo kuinka monta reikää raekoon määrittämiseen käytetyssä seulassa on tuumaa kohti. Esimerkiksi mesh-numeron 24 omaava rae läpäisisi seulan jossa on 24 reikää tuumaa kohti. Mitä isompi mesh-numero on, sitä pienemmästä rakeesta on kysymys. Kaupallisissa sovelluksissa numeroita 4–24 pidetään karkeina, numeroita 30–60 keskikokoisina ja numeroita 70–600 hienoina. Tällä tavoin ilmoitetaan myös hiomapapereiden karkeus. On olemassa myös järjestelmiä, joissa raekoko määritellään suoraan rakeen halkaisijan mukaan mikrometreinä. (DeGarmo 1988; Ihalainen 2003)



Kuva 28. Raekoon havainnollistaminen (Perustuu lähteisiin Ihalainen 2003 ja DeGarmo et. al. 1988)

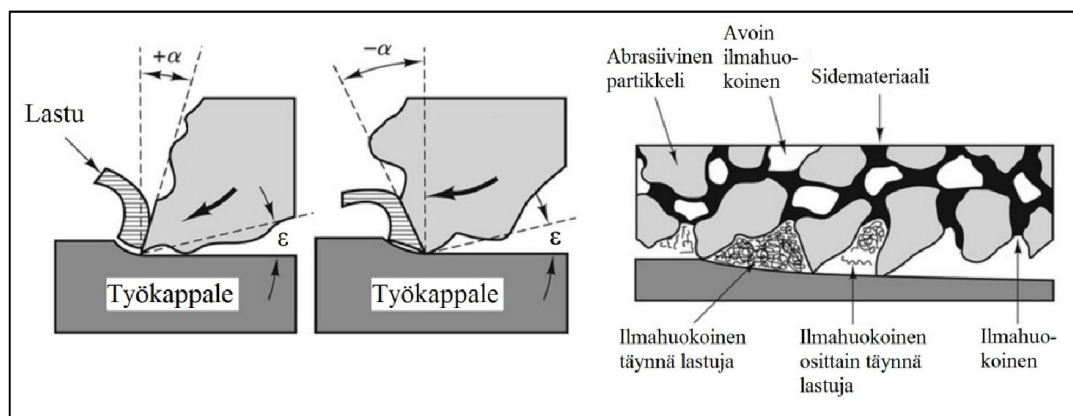
Rakeen halkaisijalle saadaan arvio millimetreissä kaavan 24 mukaisesti (Rowe 2009)

$$d_g = \frac{15.2}{M} \quad (24)$$

missä M on mesh-numero. Oli rakeen koko mikä tahansa, vain hyvin pieni osa (2-5 %) sen pinnasta on aktiivisena hionnassa. Leikkauksen syvyys on siis hyvin pieni rakeen halkaisijaan nähden. Tästä johtuen hionnan lastut ovat myös pieniä. (DeGarmo 1988)

3.2.4 Hiomarae laikassa

Rakeen särmä toimii hionnassa leikkaavana teränä. Tämän takia rakeen muoto on tärkeä, koska se määrää suoraan rakeen ryntö- ja päästökulman. Kuvassa 29 on esitetty vasemmalla yksittäisen rakeen erilaiset kosketukset työkappaleen kanssa. Geometrisesti määrättyllä terällä lastuamisesta poiketen hiomisessa ryntökulma vaihtelee hyvin paljon. Se voi olla 45° positiivinen tai jopa 80° negatiivinen. Yleisesti hionnassa ryntökulma on negatiivinen, jolloin arvot $-30^\circ \dots -40^\circ$ ovat tavallisia. Aikaisemmin kaavassa 17 todettiin liukukulman pienenevän rintakulman pienentyessä. Hionnassa liukukulmat ovat siis pieniä. Tämän lisäksi rakeiden kulmat ovat laikassa keskenään erilaisia. Kuvassa 29 oikealla puolella on näytetty hiomalaikan pinnan ja työkappaleen välinen kosketus. Useat rakeet, kuvassa pisteytetyt osiot, ovat kosketuksissa työkappaleen kanssa. Laikassa rakeita pitää yhdessä sideaine, joita on olemassa useita erilaisia. Sideaine on esitetty kuvassa mustalla. Sideaineen ja rakeiden lisäksi oleellinen asia laikassa on ilmahuokoiset, jotka ovat kuvassa esitetty valkoisella. Ilman ilmahuukoisia laikka menisi välittömästi tukkoon rakeiden irrottamista pienistä lastuista. Ilmahuukoisten tehtävänä on jäähdyttää laikkaa ja mikäli jäähdytysnestettä käytetään, pääsee se vaikuttamaan laikkaan ilmahuukoisia pitkin. (DeGarmo 1988; Ihalainen 2003)



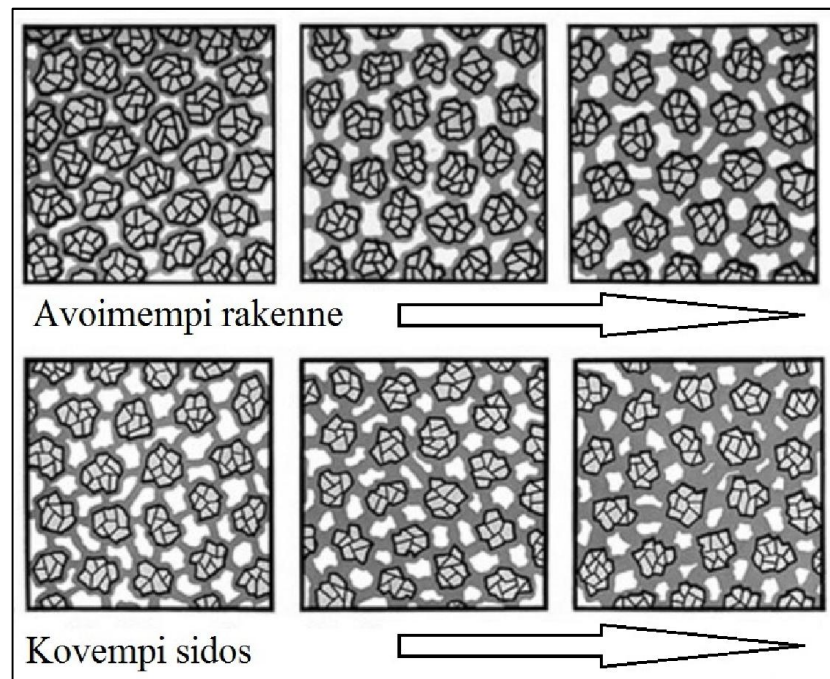
Kuva 29. Yksittäisen rakeen kosketus työkappaleen kanssa (vasen) ja hiomalaikan rakenne (oikea) (perustuu lähteeseen DeGarmo et. al. 1988)

Hiomisen edetessä laikka kuluu kolmella eri tavalla. Ensimmäkin rakeiden terävät särmät tylsistyvät abrasiivisen kulumisen johdosta. Tämä aiheuttaa rakeisiin tasaisia alueita (wear flats), jotka eivät kykene hiomaan. Tällöin tehokkuus kärsii. Tasaisten alueiden muodostuminen johtuu sekä fysikaalisista että kemiallisista reaktioista rakeen ja työkappaleen välillä. Näiden muodostumista voidaan välttää, kun hiomarae ja työkappale ovat kemiallisesti mahdollisimman reagoimattomia keskenään. Halutumpi kulumismekanismi on rakeiden murtuminen. Tämän avulla rakeista tulee esille uusia teräviä reunoja, jotka voivat edelleen hioa. Rakeiden ei kuitenkaan haluta halkeavan liian helposti, jotta laikka ei kuluisi loppuun turhan nopeasti. Lopuksi rakeet irtoavat sideaineesta, jolloin puhutaan sideaineen murtumasta. Näin tapahtuessa esiin tulee uusia rakeita, jot-

ka kykenevät hiomaan. Rakeiden hajoamisen ja irtoamisen johdosta kulloinkin hiomista tekevien rakeiden määrä ja ryntökulmat muuttuvat jatkuvasti. (Kalpakjian 1997)

3.2.5 Hiomarakeen rakenne ja kovuus

Abrasiivisten partikkeleiden keskinäistä tiheyttä kutsutaan rakenteeksi (structure). Kuvan 30 yläosassa on havainnollistettu kolme erilaista rakennetta. Rakenteen avoimuus kasvaa tässä oikealla siirryttäessä. Avonaisessa rakenteessa hiomarakeet sijaitsevat kaukana toisistaan, kun taas tiiviissä rakenteessa ne ovat lähellä toisiaan. Rakeet eivät voi olla aivan kiinni toisissaan, koska muodostuneet lastut tarvitsevat tilaa. Rakeiden määrän ollessa 60 % laikasta, puhutaan erittäin tiiviistä rakenteesta (Rowe 2009). Loput laikasta koostuu ilmahuukoisista ja sideaineesta. Yksi tyypillinen laikan koostumus on 50 % rakeita, 10 % sideainetta ja 40 % ilmahuukoisia (DeGarmo 1988). Kuvan 30 kaikissa ylärivien tapauksissa sideainetta on rakeiden välillä yhtä paljon. (DeGarmo 1988)



Kuva 30. Hiomalaikan rakenne (ylhäällä) ja hiomalaikan sidoksen kovuus (alhaalla) (perustuu lähteeseen DeGarmo et. al. 1988)

Kuvan 30 alaosaa taas selventää laikan kovuutta (grade). Tätä ei sovi sekoittaa aikaisemmin, kuvassa 27, esiteltyyn rakeen Knoop-kovuuteen. Kovuus kertoo kuinka vahvasti rakeet ovat sidottuina toisiinsa laikassa. Kovuus muodostuu itse asiassa kahdesta asiasta; rakeiden välisen sideaineen tyypistä ja määrästä. Kuvan 30 vasemmassa alalaidassa on pehmeä sidos, mutta se muuttuu kovemmaksi oikealla siirryttäessä. Tämä johtuu siitä, että sidosaineen määrä rakeiden välillä kasvaa. Sideaineen oletetaan pysyvän kaikissa tapauksissa samoina. Jos rakeiden irrottamiseen sideaineesta tarvitaan suuri voima, puhutaan kovasta sidoksesta. Pienen irrottamisvoiman tapauksessa taas käytetään termiä pehmeä sidos. Laikkoja kutsutaan vastaavasti koviksi tai pehmeiksi niissä

käytetyn sidoksen mukaan. Laikan rakenne ja kovuus vaikuttavat suuresti aikaisemmin esiteltyyn rakeiden irtoamiseen ja täten laikan kulumiseen. Kova laikka kuluu hitaasti, pehmeä nopeasti. (DeGarmo 1988; Rowe 2009)

Laikan materiaalinirrottamiskyvylle on määritelty mitta. Tätä kutsutaan suhteeksi G ja se on määritelty kaavan 25 mukaisesti (Rowe 2009)

$$G = \frac{V_{work}}{V_{disc}} \quad (25)$$

missä V_{work} on poistettu materiaalin tilavuus työkappaleesta ja V_{disc} on laikasta kulunut tilavuus. Perinteisessä hionnassa G saa arvoja suhteiden 20:1 ja 80:1 välillä (DeGarmo 1988). Erittäin hankalissa hiomiskohteissa G voi olla niinkin pieni kuin 1. Toisaalta G :n arvo voi olla jopa 5000. (Rowe 2009)

3.2.6 Laikan sidemateriaalit

Sidemateriaalilla on suuri merkitys hiomalaikan toiminnassa. Ensinnäkin se määräi laikan vahvuuden, joka puolestaan määrää suurimman sallitun pyörimisnopeuden. Myös rakeiden elastinen käyttäytyminen ja laikkaan painuminen perustuvat sidemateriaaliin. Laikat valmistetaan joko koviksi ja jäykiksi tai joustaviksi. Tämän lisäksi sidemateriaali määrittää rakeen siteestä irrottamiseen tarvittavan voiman. Laikoissa käytettävien sidemateriaalien kestävyys sovitetaan yhteen käytettyjen rakeiden kulumiseen. (DeGarmo 1988)

Laikoissa käytetään kolmea erilaista sidemateriaalia. Eniten käytettyjä ovat keraamisitoiset (vitrified) hiomalaikat. Näiden osuus kaikista sideaineista on 70 % (Työterveyslaitos 2007). Käytännössä sideaine on lasia. Raakamateriaaleina keraamisessa sideaineessa käytetään savea ja sulatetta kuten maasälpää tai booraksia. Nämä aineet sekoitetaan hiomarakeiden kanssa, kostutetaan ja muotoillaan paineen alla hiomakiekoiksi. Nämä tuotteet muistuttavat hieman jauhemetallurgian tuotteita. Seuraavaksi hiomakiekot kuumennetaan hitaasti suunnilleen 1250 °C asteen lämpötilaan, jossa tapahtuu lasin sulautuminen ja rakenteellisen vahvuuden muodostuminen. Lopuksi tuotteet jäädytetään hitaasti, jotta lämpötilasta johtuvaa halkeilua ei tapahtuisi, ja viimeistellään oikean muotoisiksi. Keraamiset sideaineet muodostavat vahvoja, kovia ja huokoisia laikkoja, jotka kestävät öljyjä, happoja ja vettä. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1977; Rowe 2009)

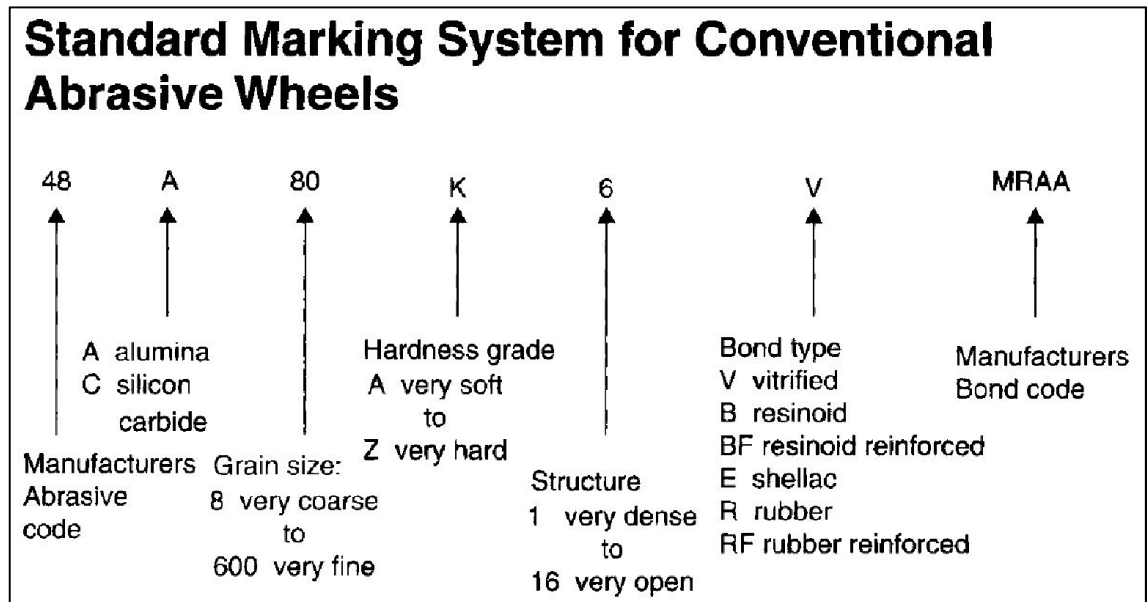
Toinen sideaineryhmä on orgaaniset sideaineet. Tärkeimpinä niihin kuuluvat fenoli ja ureapohjaiset hartsit sekä kumit. Hartsin avulla valmistettavat orgaanista sideainetta käytettävät laikat valmistetaan sekoittamalla abrasiiviset partikkelit nestemäisen tai jauhemaisen hartsin sekä lisäaineiden kanssa. Tämän jälkeen sekoitus puristetaan hiomalaikan muotoon ja lämmitetään noin 175 °C lämpötilaan. Tällä tavalla laikka voidaan valmistaa hyvin monilla erilaisilla koostumuksilla ja ominaisuuksilla, mistä johtuen niitä voidaan käyttää laajalle skaalalle hitsauskohteita. Nämä ovat pienemmän kimmo-

kertoimensa takia joustavampia kuin keraamiset laikat. Näitä laikkoja valmistetaan myös vahvistettuina. Tässä tapauksessa laikan rakenteeseen asetetaan yksi tai useampi lasikuitumatto vahvikkeeksi. Tämä tarkoituksena on estää laikan kontrolloimaton pirstoutuminen, mikäli laikka sattuu hajoamaan. Kumi kuuluu myös orgaanisiin sidemateriaaleihin. Se on kaikista sidemateriaaleista elastisin. Yleensä siitä valmistetaan ohuita katkaisulaikkoja, joita käytetään sahan tapaan suurten materiaalmäärien poistamiseen. Kumisidoksisien laikkojen valmistaminen koostuu raaka kumin, rikin ja hiomarakeiden sekoittamisesta, seoksen litteäksi levyksi valssaamisesta, ympyröiden leikkaamisesta tästä levystä sekä näiden ympyröiden paineenalaisesta lämmittämisestä kumin vulkanoimiseksi. Tällä tavalla valmistetuille katkaisulaikoille voidaan sallia kehänopeudeksi jopa 80 *m/s*. Joustavuuden takia orgaaniset sideaineet sopivat tilanteisiin, joissa hiominen aiheuttaa vääntäviä voimia laikan sivuille. Samasta syystä ne toimivat hyvin tilanteissa, joissa laikkaan kohdistuu iskuja. Orgaanista sideainetta valittaessa elastisuus on usein tärkein kriteeri. Niitä käytetään lähinnä perinteisten abrasiivien kanssa. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1977; Rowe 2009)

Kolmas sideaineryhmä on metalliset sideaineet. Niitä käytetään lähinnä superabrasiivien kanssa. Metallisitoiset laikat ovat hieman erilaisia verrattuna kahdella edellä esitellyllä sideaineella valmistettuihin laikat. Metallisitoisissa laikoissa hiomarakeet, yleensä timantti tai CBN, ovat sidottu ainoastaan laikan ulkokehälle noin 6 *mm* syvyydelle. Tämä saadaan aikaan hyödyntämällä jauhemetallurgiaa. Hiomarakeen ja laikan ytimen välille muodostuu metallisidos korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Varsinainen laikan ydin voi olla esimerkiksi alumiinia, pronssia, terästä, keraamia tai komposiittia. Laikan ytimen materiaalivalinta riippuu käyttökohteen lujuus-, jäykkyys- ja mitanpitävyysvaatimuksista. (DeGarmo 1988; Kalpakjian 1977; Rowe 2009)

3.2.7 Laikkojen merkintäjärjestelmä

Edellä esitellyt laikan ominaisuudet ovat painettuna laikkoihin. Kuvassa 31 on esimerkki eräästä standardoidusta merkintätavasta perinteisiä abrasiiveja käyttäville laikoille. Merkintätapoja on myös muita ja tämän lisäksi superabrasiiveja käyttäville laikoille ovat omat merkinnät. (Rowe 2009)



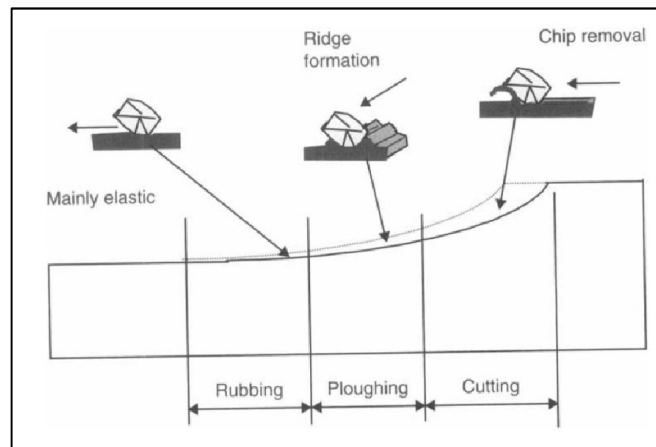
*Kuva 31. Standardoitu merkintätapa perinteisiä abrasiiveja käyttäville laikoille
(Rowe 2009)*

Kuvassa 31 reunimmat merkinnät ovat valmistajan omia merkintöjä. Toisena vasemmalla on käytetty hiomarae. Kirjain A tarkoittaa alumiinioksidia ja C piikarbidia. Seuraavaksi määritellään raekoko mesh-numerolla. Sen jälkeen listassa on kovuus ilmoitettuna kirjaimilla A-Z. Tässä asteikossa A on pehmein ja Z kovin. Tämän jälkeen merkitään laikan rakenne numerolla 1-16. Mitä suurempi luku on, sitä avoimemmasta rakenteesta on kysymys. Toiseksi viimeinen merkintä kertoo käytetyn sideaineen. Nämä kuvataan kirjaimilla, joissa esimerkiksi V tarkoittaa keraamista sideainetta. (Rowe 2009)

3.2.8 Hiomarakeen ja työkappaleen erilaiset kosketukset

Hiomarakeen ja työkappaleen kosketus on erilainen riippuen rakeen tunkeutumissyvyydestä. Hiomarakeen ja työkappaleen väliset erilaiset kosketukset voidaan jakaa kolmeen erilaiseen tilanteeseen kuvan 32 mukaisesti. Siinä vasemmalla oleva rae uppoaa vähiten ja oikealla oleva eniten. Mikäli rae uppoutuu vain hieman työkappaleeseen, puhutaan hankaamisesta. Hankaamisessa kosketus on lähinnä elastinen, eikä materiaalin irtoamista tapahdu muuta kuin marginaalisesti. Energiaa kuitenkin kuluu kitkaan. Kitkallisia kosketuksia muodostuu aikaisemmin esiteltyjen tylsistyneiden rakeiden tasaisille kuluma-alueille. Mitä kuluneempia rakeet ovat, sitä suurempi on hankauksen osuus kaikista kosketusmuodoista. Hankaukseen kuluva energia on verrannollinen tasaisten kuluma-alueiden pinta-alaan. Rakeen tunkeutuessa hieman syvemmillä, puhutaan kyntämisestä. Tässäkin tapauksessa materiaalia ei irtoa vaan rae auraa uran, jonka reunoille muodostuu harjanteita. Muodonmuutos on plastista. Kyntämiseen tarvittava energia vähenee lastuvirran kasvaessa. Kun rakeen voimat edelleen kasvavat ja se uppoutuu vielä syvemmillä, tapahtuu varsinainen leikkaus. Tällöin rae irrottaa lastuja työkappaleesta.

Leikkauksessa muodonmuutos on plastista. Lastujen muodostumiseen tarvittavan energian on huomattu olevan lähellä energiaan, joka tarvitaan sulattamaan lastuina irronnut materiaali. Hankaukseen ja kyntämiseen kuluva energia (lämmöstä) 100 % siirtyy työkappaleeseen kun taas leikkaamisessa 95–98 % siirtyy lastuun (DeGarmo 1988). Rakeiden tylsistymistä, murtumista ja sideaineesta irtoamista tapahtuu jatkuvasti. Tästä johtuen hankaamisen, kyntämisen ja leikkaamisen keskinäiset suhteet muuttuvat koko ajan laikan kuluessa. (DeGarmo 1988; Rowe 2009)



Kuva 32. Hiomarakeen ja työkappaleen kolme erilaista kosketusta (Rowe 2009)

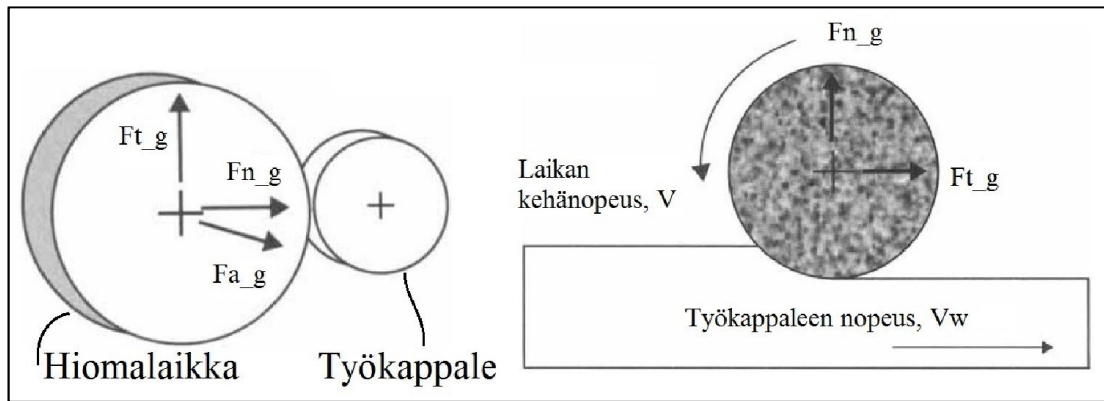
3.2.9 Teho ja ominaisenergia hiomisessa

Hiomalastun muodostamiseen tarvittava ominaisenergia muodostuu edellä esitellyn kolmen erilaisen kosketuksen ominaisenergioista kaavan 26 (Kalpakjian 1997) mukaisesti

$$u = u_{lastu} + u_{kyntö} + u_{hankaus} \quad (26)$$

jossa u_{lastu} on lastun irrottamiseen, $u_{kyntö}$ kyntämiseen ja $u_{hankaus}$ hankaamiseen kuluva ominaisenergia. Mikäli hionnassa ilmenevän ominaisenergian lisäksi lastuvirta on tiedossa, voidaan hionnan tarvitsema teho laskea. Tällöin käytetään geometrisesti määrätyn terän yhteydessä esiteltyä kaavaa 19. (Kalpakjian 1997)

Teho voidaan laskea myös mittaamalla hiomisvoimat. Hiomisvoimat voidaan jakaa kolmeen toisiinsa nähden kohtisuoraan komponenttiin. Nämä ovat kuvassa 33 esitetty tangentialivoima F_{t_g} , normaalivoima F_{n_g} ja aksiaalivoima F_{a_g} . Tilanne on hyvin samanlainen kuin sorvauksen kolme voimaa kuvassa 26. (Rowe 2009)



Kuva 33. Kolme hionnan voimakomponenttia (Kalpakjian 1997)

Hiomisteho voidaan laskea kaavan 27 (Rowe 2009) mukaisesti

$$P_{grind} = F_{t_g} * (V \pm V_w) + F_{n_g} * V_{fn} + F_{a_g} * V_{fa} \quad (27)$$

missä V on lastuamisnopeus kuten tässä teoriaosuudessa on aikaisemminkin esitetty. Se on siis hiomarakeen kehänopeus laikan ulkokehällä. Hiomisessa laikan pyörimisen lisäksi työkappale liikkuu nopeudella V_w laikkaan nähden. Työkappaleen nopeuden lisääminen tai vähentäminen lastuamisnopeuteen riippuu siitä, onko kysymyksessä myötä- tai vastahionta. Kuvan 33 oikealla puolella on esitetty myötähionta. Siinä laikan rakeet liikkuvat samaan suuntaan kuin työkappale, silloin kun ne ovat kosketuksissa työkappaleeseen. Normaalinopeus V_{fn} ja aksiaalinopeus V_{fa} ovat samannimisten voimien suuntaisia. Käytännössä työkappaleen nopeudella on pieni vaikutus, koska lastuamisnopeus on tyypillisesti 60–200 kertaa suurempi. Samoin V_{fn} ja V_{fa} ovat paljon lastuamisnopeutta pienempiä, joten lastuamisteho voidaan laskea yksinkertaisesti tulolla $F_{t_{grind}} * V$. Tämä on sama kuin aikaisemmin esitetty kaava 18. (Rowe 2009)

Taulukko 6. Arvioituja kokonaisominaisenergioita hionnassa (perustuu lähteeseen Kalpakjian 1997)

Työkappaleen materiaali	Kokonaisominaisenergia (J/mm^3)
Alumiini	7–27
Valurauta (luokka 40)	12–60
Niukkahiilinen teräs (1020)	14–68
Titaaniseos	16–55
Työkaluteräs (T15)	18–82

Taulukossa 6 on esitelty tyypillisiä hionnassa ilmeneviä ominaisenergioita eri materiaaleille. Verrattaessa tätä taulukkoon 5 huomataan ominaisenergioiden olevan huomattavasti suurempia hionnassa. Energian tarve irrotettua ainemäärää kohti onkin hionnassa 5–15-kertainen sorvaukseen tai jrsintään nähden (Ihalainen 2003). Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että ominaisenergioita kasvattavat pienet liukukulmat, mitkä ovat tyypillisiä

hiomiselle. Tämän lisäksi hiomalastut ovat pieniä verrattuna geometrisesti määrätyn terän muodostamiin lastuihin. Kokoero on noin kaksi dekadia. Pienemmät lastut ovat lujempia ja sitkeämpiä kuin suuret johtuen niin sanotusta kokoilmiöstä (size effect). Kokoilmiö perustuu siihen, että pienemmässä metallin palassa on pienemmällä todennäköisyydellä rakenteellisia virheitä, railoja ja epätäydellisyyksiä kuin suuressa metallin palassa. Hionnassa leikkaustasokin on pienempi, joten siinä on suurempi dislokaatiotiheys. Myös hiomarakkeisiin muodostuvat tasaiset alueet hankaavat pintaa irrottamatta lastuja. Geometrisesti määrättylläkin terällä leikatessa syntyy terän päästöpinnalle vastaavan tapaisia tasaisia alueita, mutta niiden koko lastuun verrattuna on hyvin pieni. Hionnassa rakeiden tasaiset alueet taas ovat paljon suurempia kuin hiontalastut. Energian kulutusta nostaa vielä pienestä ryntökulmasta ja liukukulmasta johtuvat suuret leikkausmyötymät kaavan 5 mukaisesti. Kaiken lisäksi kyntäminen kuluttaa energiaa irrottamatta materiaalia. (Kalpakjian 1997)

3.2.10 Mahdollinen katkaisupaksuus

Katkaistaessa terästä katkaisulaikalla ei teoriassa katkaisupaksuudelle ole rajaa. Käytäntö on kuitenkin toinen asia. Ensinnäkin laikan fyysinen koko vaikuttaa mahdolliseen katkaisupaksuuteen. Mitä suurempi katkaisulaikka on käytössä, sitä syvemälle se pysyy dimensioidensa puolesta katkaisemaan. Kuitenkin katkaisulaikan kiinnitys koneeseen vie tilaa, minkä takia katkaisulaikka on mahdoton käyttää täysin loppuun. Tämän on totta riippumatta katkaisulaikan halkaisijasta. Toiseksi katkaisulaikat kuluvat sitä enemmän, mitä suurempi katkaisupaksuus on. Tämä johtaa siihen, että katkaisemiseen kuluu enemmän aikaa. Tästä johtuen laikat myös kuluvat nopeasti loppuun jolloin tilalle pitää vaihtaa uusi laikka. Tämä ottaa aina oman aikansa.

Katkaisulaikalle on vaikea määrittää suurin mahdollinen katkaisupaksuus. Tämä johtuu siitä, että mahdolliseen katkaistavaan paksuuteen vaikuttaa hyvin moni asia. Näitä ovat ainakin katkaisulaikan koko ja materiaali, kone johon laikka on liitetty, katkaisun tekevän henkilön ammattitaito sekä katkaistava materiaali. Ottaen huomioon katkaisulaikkojen kulumisen ja paksumman materiaalin aiheuttaman katkaisuun kuluvan suuremman ajan, ei käytännössä käsikäyttöisillä kulmahiomakoneilla katkaista 12 mm paksumpia teräksiä. Katkaisulaikkoja käytetään kuitenkin mielellään vain alle 6 mm paksuisille teräksille. Tämä on kirjoittajan omiin kokemuksiin perustuva mielipide.

3.3 Teräksen katkaisu polttoleikkaamalla

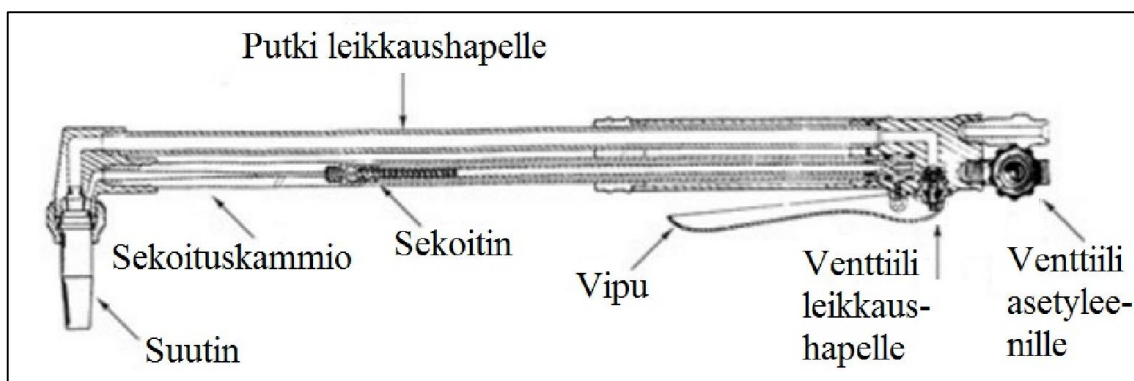
Polttoleikkaus on eniten käytetty terminen leikkausmenetelmä. Se perustuu teräksen palamiseen riittävän korkeassa lämpötilassa hapen läsnä ollessa. Tarkemmin sanottuna teräs kuumennetaan noin 900 °C:n lämpötilaan ja kuumennuskohtaan ohjataan puhdas leikkaushappisuihku. Tässä lämpötilassa teräs yhtyy happeen eli hapettuu. Suuren lämpö määrän vuoksi palamistuloksena syntyvät rautaoksidit säilyvät sulassa tilassa. Leika-

nessa kaasusuihkun paine poistaa rautaoksidit leikkausrailosta. Yleisin lämmittämiseen käytettävä kaasu on asetyleenin ja hapen seos. Kuitenkin nestekaasun tai maakaasun käyttäminen on joissain tapauksissa parempia vaihtoehtoja. (DeGarmo 1988; Autio 1992; Lepola & Makkonen 2004)

Polttoleikkauksessa tapahtuva hapettuminen voidaan kuvata kaavan 28 (DeGarmo 1988) mukaisesti



jossa yhtälön oikealla puolella oleva yhdiste on rautaoksidi. Raudan sulamisen alettua ei lisälämpöä teoriassa tarvita. Kuitenkin lämpöhäviöt perusaineen pinnalla ovat niin suuret, että lisälämpö on pakollinen palamisen ylläpitämiseksi. Se saadaan samasta asetyleenin ja hapen seoksesta, millä teräs aluksi lämmitettiin. (DeGarmo 1988; Lepola & Makkonen 2004)



Kuva 34. Kaasuleikkauspolttimen tärkeimmät osat (perustuu lähteeseen DeGarmo 1988)

Käsivaraisessa polttoleikkauksessa käytettävä kaasuleikkauspoltin on esitetty kuvassa 34. Tämä liitetään normaaliin kaasuhitsauslaitteeseen. Polttimen varren sisällä kulkee kaksi putkea. Alemmassa putkessa kulkee lämmittämiseen käytettävä asetyleenin ja hapen seos. Se yhdistyy suuttimeen sen yläosan kehällä olevista pienistä rei'istä. Yläpuolisessa putkessa taas kulkee leikkaushappi, joka liittyy suuttimeen sen yläosassa olevasta isosta reiästä. Sekä leikkaushapelle että asetyleenin ja hapen seokselle ovat omat venttiilit. Leikkaushapen venttiili avataan kuvassa näkyvästä vivusta, kun teräs on saatu lämmitettyä riittävästi. (DeGarmo 1988)

Polttoleikkattavan materiaalin tulee täyttää seuraavat kolme kriteeriä (Lepola & Makkonen 2004).

- Metallin tulee riittävästi kuumennettuna palaa hapessa.
- Metallin syttymislämpötilan tulee olla alhaisempi kuin sen sulamislämpötila.
- Palamisessa syntyneiden oksidien sulamispisteen tulee olla alhaisempi kuin metallin sulamispiste

Kaikkia materiaaleja ei voi polttoleikata. Polttoleikkaus soveltuu hyvin seostamattomalle teräkselle. Tämän lisäksi hiilipitoisuuden tulee olla alle 0,3 %. Jos hiiltä on tätä enemmän, tulee leikattava kappale esikuumentaa karkenemisvaaran vuoksi noin 300 °C:n lämpötilaan. Tämän takia tavallisilla polttoleikkausmenetelmillä ei voi leikata ruostumatonta terästä, kuparia, messinkiä tai alumiinia. Näiden leikkaamiseen käytetään yleisimmin plasmaa ja laseria. (Autio 1992; Lepola & Makkonen 2004)

Polttoleikkauksella voidaan valmistaa koneenosia $\pm 0,1$ mm tarkkuudella. Tämän lisäksi leikkauuspinta saadaan sellaiseksi, että jälkityöstöä ei tarvita. Leikkauksen laatuun vaikuttaa kuitenkin usea asia. Ensinnäkin polttoleikkauslaite tulee valita kohteen mukaisesti. Tässä tärkeää on sopivan suuttimen käyttäminen. Myös leikkausnopeus ja hapen työpaine tulee valita oikein. Tämän lisäksi suutin tulisi pitää leikkauksen ajan vakioetäisyydellä leikattavan kappaleen pinnasta. Noin 2 mm on sopiva etäisyys. Taulukossa 7 näkyy eräitä suositeltuja prosessiparametreja eri paksuisten levyjen polttoleikkaamiseen. Taulukosta voi huomata, että ohuita levyjä pystytään leikkaamaan jopa yli metri minuutissa. Toinen mainitsemisen arvoinen asia on polttoleikkauksen soveltuminen jopa 50 mm ainevahvuudelle. (Lepola & Makkonen 2004)

Taulukko 7. Polttoleikkauksessa suositeltavia arvoja (perustuu lähteeseen Lepola & Makkonen 2004)

Aineen paksuus, mm	Suuttimen sarja n/o	Suuttimen sarja n/o		Leikkausnopeus, mm/min	Hapen työpaine, bar
		Kuumennus	Leikkaus		
1	1	0,6	0,5	1200	1,5
3	1	0,6	0,5	600	1,5
3	2	0,6	0,7	500	1,5
8	2	0,6	0,7	380	2,0
8	3	0,7	1,0	380	3,0
20	3	0,7	1,0	320	4,0
20	4	0,7	1,5	320	4,0
50	4	0,7	1,5	200	4,5

Asetyleenin työpaine 0,05-0,8 bar

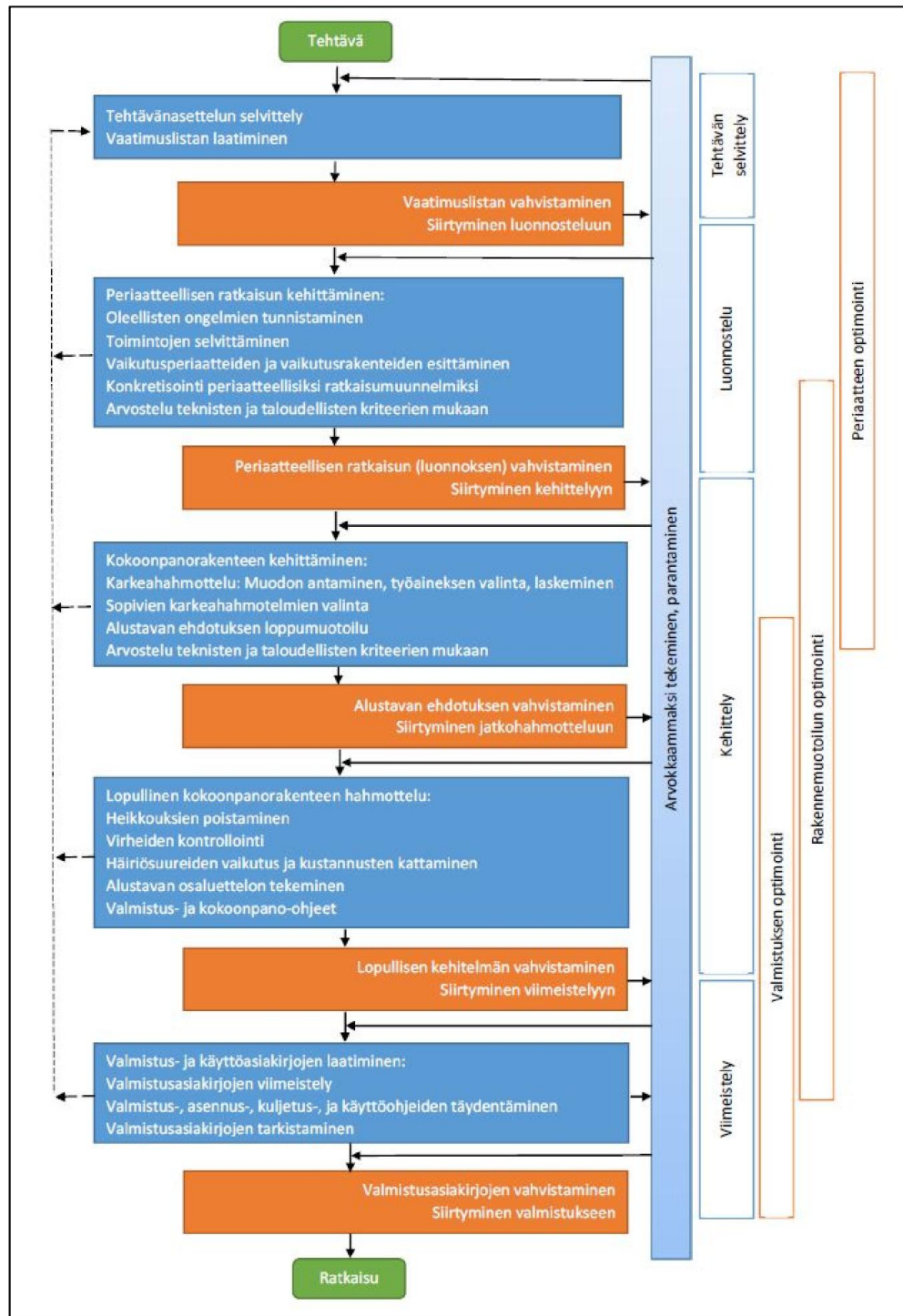
4. SUUNNITTELUMETODIIKKA

Onnistuakseen tuotekehitysprojektin tulee koostua selkeistä vaiheista. Tällä tavalla projektin etenemistä on helppo seurata ja jakaa siihen liittyvä työ loogisiin kokonaisuuksiin. Jokaiseen vaiheeseen on määritetty tiettyjä asioita, jotka tulee saavuttaa. Vaiheet rakentuvat tuotteen toteuttamisen kannattavuudesta kohti mahdollisten toteutustapojen tutkimista aina tarkasti määritettyyn lopputuotteeseen asti. Seuraavaan vaiheeseen voidaan siirtyä edellisen toteutuessa, mutta toisinaan tuotekehityksen edetessä joudutaan tekemään muutoksia edellisiin vaiheisiin ja päivittää uudet vaiheet niiden mukaisiksi.

4.1 Kirjallisuudessa esitetty tuotekehitysprojektin rakenne

4.1.1 Perusidea

Tässä diplomityössä esiteltävä kirjallisuudesta löytyvä tuotekehittelymalli perustuu Pahl:n ja Beitz:n (1990) tutkimuksiin. He ovat kehittäneet aikaisempia tutkimuksia jalostamalla kehyksen, jota seuraamalla suunnittuprosessi etenee järkevästi. Tämä prosessi on esitetty kuvassa 35. He kutsuvat tätä kaavioita konstruoimisen työaskeliksi. Konstruoinnin voidaan ymmärtää tarkoittavan yksinkertaisesti suunnittelua. Kaavion lähtökohtana kaaviossa on ylhäällä tehtävä ja alhaalla lopputuloksena ratkaisu. Ratkaisu kuvastaa suunniteltua tuotetta ja tämän jälkeen siirrytään valmistukseen. Valmistukseen liittyvät vaiheet eivät siis sisälly tähän kehykseen. Kaaviossa on neljä päävaihetta. Ne ovat tehtävän selvittely, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely ja ne ovat esitetty kuvan 35 oikealla puolella pystysuuntaisesti sinikehyksissä laatikoissa. Kuhunkin vaiheeseen liittyvät tehtävät ja päätökset ovat esitetty kuvan vasemmalla puolella vaakasuunnassa.



Kuva 35. Konstruoimisen työaskeleet (perustuu lähteeseen Pahl & Beitz 1990).

Tehtävät sijaitsevat sinisen ja päätökset oranssin laatikon sisällä. Kaaviossa edetään ylhäältä alaspäin seuraavaan vaiheeseen aina kun edellinen vaihe on onnistuneesti toteutunut. Suunnittelun kohde muuttuu myös arvokkaammaksi kaaviossa alaspäin edetessä. Laatikoita yhdistävät ehjät nuolet kuvastavat tilannetta, jossa edeltävää vaihetta ei ole onnistuttu toteuttamaan toivotulla tavalla. Tällöin on palattava johonkin aikaisempaan vaiheeseen. Taaksepäin mentävien askelten määrä riippuu ongelmasta. Käytännössä tässä vaiheessa tarvitaan lisää informaatiota päätöksen tekoon ja seuraavaan vaiheeseen

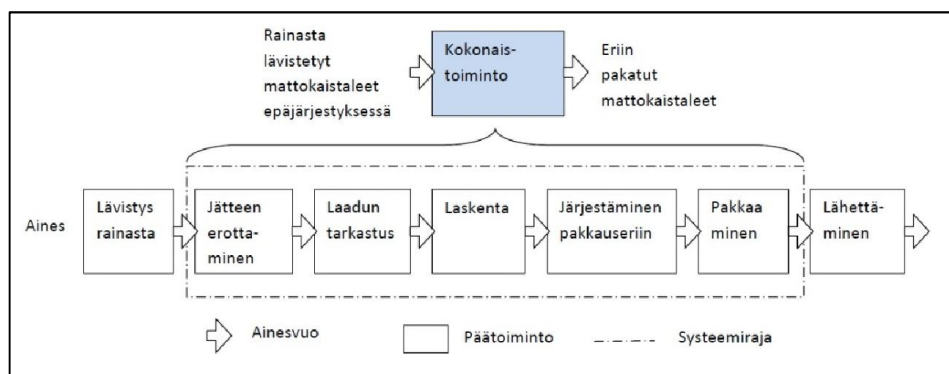
etenemiseen. Kaaviossa ei ole esitetty tilannetta, jossa suunnittelu lopetetaan kesken kaiken, mutta tämän tulisi kuitenkin olla mahdollista ylitsepääsemättömien ongelmien kohdalla. Tehtäessä projektin kannalta tärkeitä päätöksiä tulee niiden yhteydessä tarpeen tullen myös miettiä kannattaako tuotteen kehittelyä jatkaa enää ollenkaan. Mikäli työaskeleen toistaminen siedettävien uhrauksien ei ole tuloksia lupaavaa, kannattaa kehittäminen lopettaa. Johdonmukaisesti ja ajoissa tehty lopettamispäätös toivottomalta näyttävässä tilanteessa säästää suurilta kustannuksilta ja pettymyksiltä.

4.1.2 Vaihe 1: Tehtävän selvittely

Ensimmäisessä päävaiheessa, tehtävän selvittelyssä, kerätään informaatiota. Ensimmäisenä suoritetaan tehtävän asettelun selvittely. Tästä opitun tiedon avulla selvitetään ratkaisulle asetettavat vaatimukset ja reunaehdot. Nämä kirjoitetaan ylös vaatimuslistan muodossa. Vaatimuslista ottaa huomioon konstruktiivisen kehittämisen tarpeen. Seuraavat kaavion askeleet toteutetaan vaatimuslistan mukaisesti. Kuvassa 35 esitetyt katkoviivanuolet kuvaavat tiedon kulkua ja sen mukaista vaatimuslistan päivittämistä. Vaatimuslistaa tulee siis sovittaa sitä mukaan kuin suunnittelussa opitaan uusia asioita ratkaisuun liittyen. Kun vaatimuslista on vahvistettu, voidaan siirtyä luonnosteluun. (Pahl & Beitz 1990)

4.1.3 Vaihe 2: Luonnostelu

Luonnosteluvaiheessa kehitetään esitettyjä vaatimuksia toteuttavia periaatteellisia ratkaisuja. Nämä eivät vielä ole tarkkaan määriteltyjä ratkaisuja vaan enemmänkin karkeita ideoita ongelman ratkaisemiseksi. Näissä ideoissa kerrotaan millä tavalla ongelma voitaisiin ratkaista ja mitä fysikaalisia ilmiöitä näissä hyödynnettäisiin. Usein tätä varten luodaan toimintorakennetta kuvaava lohkokaavio, kytkentäkaavio tai kulkukaavio. Kuvassa 36 on esimerkkinä toimintorakenne mattokaistaleen työstöstä.



Kuva 36. Mattokaistaleen työstön toimintoketju (Perustuu lähteeseen Pahl & Beitz 1990).

Vapaakätinen luonnos tai karkeamittakaavainen piirustus voivat myös tulla kyseeseen. Periaatteellisia ratkaisuja voidaan etsiä abstrahoinnin avulla. Tässä pyritään pääsemään

eroon ennakkoluuloista ja käsitellä tilannetta pelkistetyllä tasolla. Tällöin ongelman luonne tulee selkeämmin esille eikä vanhoja ratkaisuja käytetä väkisin uudestaan. Luonnosteluvaiheessa on tarkoituksena selvittää mitä toimintoja ratkaisussa vaaditaan, jotta se toteuttaa sille asetetut vaatimukset. Ratkaisuperiaatetta konkretisoidaan työaineksen, mitoituksen ja teknisten mahdollisuuksien suhteen sen verran, että riittävän tarkka kaavio tai piirustus saadaan aikaiseksi periaatteellisten ratkaisujen vertailua varten. Luonnosteluvaiheessa mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja tulisikin olla useampi. Eri vaihtoehdot arvostellaan teknisten ja taloudellisten kriteerien mukaan ja paras vaihtoehto kehitetään pidemmällä. Oikeanlaisen ratkaisuperiaatteen valinta on oleellisen tärkeää, koska seuraavien vaiheiden, kehittelyn ja viimeistelyn aikana, ei voida juurikaan poistaa luonnoksen perustavaa laatua olevia heikkouksia. On kuitenkin syytä todeta, että tarkoituksenmukaisiksikin osoittautuneiden periaatteiden ratkaisujen vaikeudet aiheutuvat tavallisimmin myöhemmin esiin tulevista yksityiskohdista. (Pahl & Beitz 1990)

4.1.4 Vaihe 3: Kehittely

Kehittely tarkoittaa rakennemuodon vahvistamista. Kehittelyvaiheessa luonnosteluvaiheen periaatteellisesta ratkaisusta suunnitellaan teknisen tuotteen kokoonpanorakenne täydellisesti ja yksikäsitteisesti teknisten ja taloudellisten näkökohtien mukaan. Osa kehittelyä on karkeahahmottelu, jossa periaatteelliselle ratkaisulle annetaan muoto, valitaan työaines ja suoritetaan tarvittavia laskelmia. Koska luonnosteluvaiheessa ratkaisuvaihtoehtojen informaatiotaso on vielä hyvin matala, tulee toisinaan tehdä useita rinnakkaisia mittakaavaisia alustavia ehdotuksia, jotta niitä voitaisiin paremmin vertailla keskenään. Vertailun jälkeen yleensä jokin vaihtoehdoista vaikuttaa muita paremmalta. Tämän alustava ehdotus lyödään lukkoon ja siirrytään jatkohahmotteluun. Valittua ehdotusta voidaan vielä kehittää ja siihen voidaan saada ideoita hylättyjen vaihtoehtojen toimivilla osaratkaisuilla. Tällä tavalla saadaan poistettua valitun ratkaisun heikkouksia. Lopullisen ratkaisun rakennemuotoilusta päätetään tässä vaiheessa ja se tapahtuu tarkistamalla ainakin toiminnot, kestävyys ja tilankäyttö. Tässä yhteydessä viimeistään osoitetaan, että kustannuksia koskevat vaatimukset voidaan täyttää. Kehittelyvaiheeseen kuuluu myös alustavan osaluettelon ja valmistus- ja kokoonpano-ohjeiden laatiminen. Ennen viimeistelyyn siirtymistä lopullinen kehitelmä vahvistetaan. (Pahl & Beitz 1990)

4.1.5 Vaihe 4: Viimeistely

Viimeistelyvaiheen tarkoituksena on ratkaisun valmistustekninen määrittäminen. Tässä vaiheessa teknisen rakennelman kokoonpanorakenne tarkastetaan lopullista muotoa, kaikkien yksittäisten osien mitoitusta, pinnanlaatua ja työaineiksia koskevien määräysten valossa. Myös valmistusmahdollisuudet ja lopulliset kustannukset tarkistetaan. Suunnitelman aineellista toteuttamista varten laaditaan sitovat piirustukset ja muut valmistus ja käyttöasiakirjat. Kun tarvittavat dokumentit ovat vahvistettu, siirrytään valmistukseen. Viimeistely vaihe vaatii konstruktorilta suurta tarkkaavaisuutta. Kuten aikaisemmin

mainittiin, virheen mahdollisuus piilee toisinaan yksityiskohdissa, eikä ole tavanomaista että viimeistelyssä aletaan uudestaan korjata virheitä, mikä johtaa aikaisempien vaiheiden uudelleen läpikäyntiin. (Pahl & Beitz 1990)

4.1.6 Mallin soveltuvuus käytäntöön

Edellisissä kappaleissa esitettyä toimintamallia ei voi todellisuudessa seurata täysin suoraviivaisesti. Suunnittelijan tulee käyttää omaa järkeään eikä väkisin edetä kuvan 35 mukaisesti vaiheesta vaiheeseen. Aina vaiheita ei voida suorittaa juuri tässä järjestyksessä. Yksi syy siihen on se, että joissakin tilanteissa periaatteellisia ratkaisuja ei voida riittävän tarkasti vertailla keskenään ennen kuin ne on suunniteltu pidemmälle. Tällöin joudutaan tekemään kehittäely vaiheen tehtäviä, jotta paras toteutustapa voidaan päättää. Tähän tilanteeseen joudutaan esimerkiksi silloin kun ratkaisun toiminta vaatii tarkkojen mittojen toteuttamista. Tämä vaatii eri toteutusvaihtoehtojen tarkkaa mitoitusta, jotta voidaan varmistua niiden toimivuudesta. Päinvastaisessa tilanteessa pääpiirteinen mittakaavainen tutkielma riittää seuraavaan vaiheeseen siirtymiseen. Toisinaan taas suunnittelun kohde sisältää komponentteja, joidenka mitoittaminen vaatii laskentaa niiden järkevää vertailua varten. Tämän lisäksi on mahdollista, että ratkaisun jokin osa-alue voidaan optimoida lähes loppuun asti sen vaikuttamatta ratkaisun muihin osiin. Tällöin siis näiden osa-alueiden osalta voidaan siirtyä nopeasti seuraaviin vaiheisiin. Edellä esitetyt asiat riippuvat suuresti tehtävänasettelusta ja tuotelajista. (Pahl & Beitz 1990)

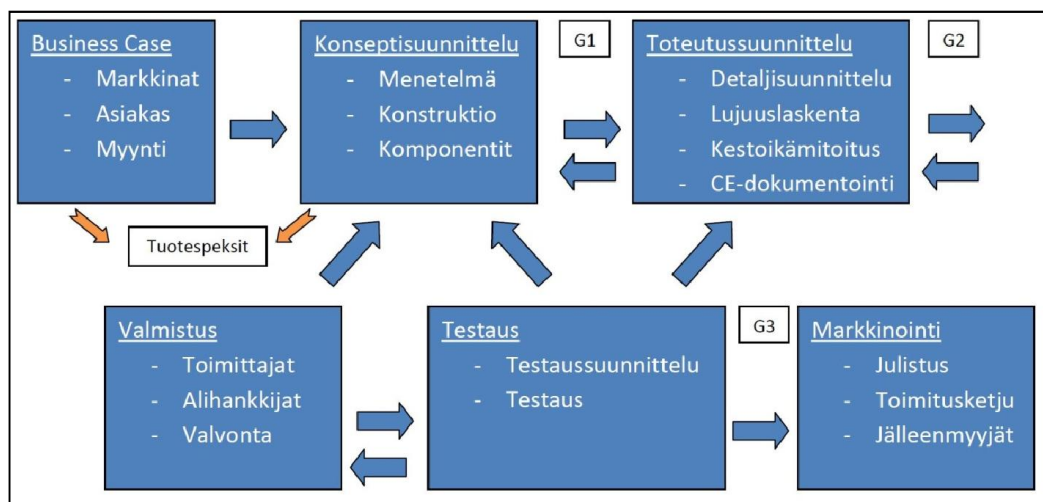
Kuvan 35 mallissa ei ole kommentoitu prototyypin valmistamista. Tämä johtuu siitä, että sen ajatellaan kuuluvan informaation hankkimisen piiriin. Lisää tietoa tuleekin aina hankkia silloin kuin sitä tarvitaan, oli päävaihe mikä tahansa. Malleja ja prototyyppejä voidaan tehdä jo luonnosteluvaiheessa, kun on tarkoituksena selvittää perustavaa laatua olevia kysymyksiä. Prototyyppejä tarvitaan erityisesti suunniteltaessa tuotteita, joissa on paljon toisiinsa nähden liikkuvia osia. Esimerkiksi eri komponenttien törmäystarkasteluja on vaikeaa, ellei mahdotonta, simuloida karkean mallin avulla. Ainakin hienomekaniikassa, elektroniikassa ja suursarjoja valmistavissa yrityksissä tämä on yleinen toimintatapa. Raskaiden koneiden prototyyppejä taas ei voida valmistaa ennen kuin ratkaisusta on saatavilla viimeistelyvaiheen tietoja. Toisaalta raskaissa koneissa voi olla detaljiongelmia, mitkä voidaan selvittää muusta kokonaisuudesta erillisenä tehtävänä. (Pahl & Beitz 1990)

Päävaiheiden leikkautuminen toisiinsa nähden on esitetty kuvan 35 oikeassa laidassa näkyvillä pystysuuntaisilla optimoinnin eri tasoilla. Nämä tasot ovat periaatteen-, rakennemuotoilun- ja valmistuksen optimointi. Nämä tasot ovat vuorovaikutuksissa toisiinsa nähden ja niihin kuuluu useita päävaiheita. On olemassa joitakin selkeitä asioita, mitkä voidaan sisällyttää periaatteen optimointiin. Esimerkiksi jotkin valmistusnäkökohdat, kuten suurin valmistettavissa oleva koko tai poissuljettu valmistustapa, voivat jo periaatteen määrittelyssä esittää ratkaisevaa osaa. Tämän lisäksi rakennemuotoilun aspektit voivat jo varhaisessa vaiheessa vaikuttaa päätöksen tekoon tietyn ratkaisuperiaat-

teen puolesta. Näitä ovat esimerkiksi työaineksen asettamat rajoitukset tai ratkaisuperiaatteen vaatima tilankäyttö. Kuitenkin varsinainen yksityiskohtaisempi rakennemuotoilun optimointi ja valmistuksen optimointi tulevat ratkaisun konkretisoinnin edetessä tärkeämmiksi. (Pahl & Beitz 1990)

4.2 Toteutetun projektin rakenne

Toteutetun paalunkatkaisulaiteprojektin rakenne seuraa pääpiirteittäin edellisessä kappaleessa esitettyä rakennetta. Työvaiheilla ei ole samoja nimiä, mutta käytännössä samat asiat käydään lävitse projektin edetessä. Kuvassa 37 on esitetty toteutetun projektin rakennekaavio. Kuvaan 35 verrattuna tämä on huomattavasti tiivistetympi. Yhtenä kaavion tarkoituksena onkin itse asiassa auttaa suunnittelijan yhdellä silmäyksellä hahmottaa projektin rakenne. Tämä helpottaa ymmärtämään projekti kokonaisuutena ja seurata sen etenemistä vaiheiden täytyessä.



Kuva 37. Paalunkatkaisulaiteprojektin rakenne ja siihen liittyvät vaiheet (oma kuva).

Kuvassa 37 esitetyt laatikot ovat projektin eri vaiheita. Laatikoiden sisällä on mainittu kunkin vaiheen oleelliset tehtävät. Todellisuudessa suunniteltavan tuotteen valmistamiseksi vaiheissa tulee tehdä myös niissä mainitsemattomia tehtäviä, mutta suurimman osan näistä suunnittelija tekee automaattisesti niitä sen suuremmin tiedostamatta. Itse asiassa vaiheissa esitellyt tehtävät ovatkin oikeastaan laajempia selvitettäviä asioita, jotka vaativat tilanteen mukaan mitoitusta, laskemista, informaation keräämistä tai muuta selvittelyä. Suunnittelijan tulee itse päättää ja arvioida, mitä kaikkea tulee tehdä kunkin vaiheen loppuunsaattamiseen. Eräiden vaiheiden perässä olevat merkinnät G1, G2 ja G3 kuvaavat portteja (gate). Näissä kohdissa porttia edeltävä vaihe arvioidaan ja päätetään onko järkevää jatkaa eteenpäin.

Mikäli kaikki asiat menevät ensimmäisellä kerralla oikein, voidaan edellisen vaiheen valmistuessa siirtyä suoraan seuraavaan vaiheeseen. Suunnittelun luonteeseen kuitenkin

kuuluu, että kaikki etenemiseen tarvittava tieto ei ole aina saatavilla. Joitakin asioita pitää arvioida ja jopa arvata. Aluksi ei välttämättä edes tiedetä mitä tietoa tulisi etsiä, vaan suunnittelun edetessä opitaan uusia asioita ja näitä päivitetään lähtötietoihin. Pahl:n ja Beitz:n esittämän mallin tapaan kuvassa 37 on nuolia, jotka kuvaavat tilannetta jossa on palattava aikaisempaan vaiheeseen. Esimerkiksi testausvaiheessa voidaan huomata, että laitteen lujuus tulee laskea uudestaan.

Ensimmäisen vaiheen nimi on Business Case. Tässä vaiheessa selvitetään tuotteen mahdollisia markkinoita. Tärkeänä yksittäisenä asiana tässä vaiheessa on selvittää Suomessa asennettavien paalujen määrä. Muita tärkeitä asioita ovat paalun katkaisuun käytetty nykyinen välineistö, katkaisun kustannukset, katkaisuaika, ja paalujen eri koot. Osa näistä asioista on käyty läpi paalujen esittelyn yhteydessä. Muutoin business case-vaiheen löydöksiä ei esitellä sen tarkemmin tämän diplomityön yhteydessä. Tämän vaiheen päättyessä tulisi olla hyvä yleiskäsitys paalunkatkaisun markkinoista. Markkinoita selvittäessä luonnollisesti tulee esille jo joitakin asioita mitkä vaikuttavat itse tuotteen mahdolliseen rakenteeseen. Kuvassa 37 nämä ovat esitetty niin sanottuina *tuotespekseinä*. Nämä voivat olla esimerkiksi tuotteen pääkomponenttien tärkeimpiä suoritusarvoja. Verrattaessa Pahl:n ja Beitz:n esittämään malliin, vastaa tämä vaihe lähinnä heidän kaavionsa päävaihetta tehtävien selvittely. Tämän vaiheen löydökset raportoidaan ja käsitellään projektiorganisaation kanssa.

Konseptisuunnitteluvaiheessa pohditaan ongelman mahdollisia toteutusvaihtoehtoja. Tämän diplomityön projektissa tässä tapauksessa mietitään millä kaikin tavoin paaluja voidaan katkaista ja miltä nämä ratkaisut näyttäisivät tuotteina. Ratkaisuja hahmotellaan sen verran että niitä on mielekästä vertailla keskenään. Tässä vaiheessa luodaan myös kappaleessa 2.4 esitellyt suunnitteluvaatimukset. Osa näistä vaatimuksista on päätetty heti projektin aluksi ja osa on opittu business case-vaiheesta. Suunniteltavia konsepteja tehdään suunnitteluvaatimukset huomioiden. Tässä vaiheessa nimetään myös tuotteen avainkomponentit ja mitoitetaan niiden tärkeimmät toiminnalliset arvot. Tämä on esitetty kuvassa 37 konseptisuunnitteluvaiheesta tulevista *tuotespekseistä*. Myös alustava kustannuslaskenta tehdään valitusta konseptista. Konseptisuunnitteluvaiheen jälkeen on ensimmäinen portti, G1, jossa päätetään ovat tuotteen kustannukset järkeviä ja markkinat riittävät. Verrattaessa edellisen kappaleen kehukseen, vastaa tämä vaihe parhaiten päävaihetta luonnostelu. Tässä vaiheessa on kuitenkin myös joitakin tehtäviä kehittelypäävaiheesta.

Toteutussuunnitteluvaiheessa valitusta konseptista viimeistellään toimiva tuote. Tätä varten tarvittaville kohdille tehdään lujuuslaskenta ja kestoikämitoitus. Tuotteesta tehdään myös piirustukset, joidenka pohjalta se voidaan valmistaa ja asentaa. Piirustuksiin kuuluu varsinaisten valmistuspiirustusten lisäksi kaavioita ja ohjeistavia dokumentteja, jotka ovat välttämättömiä tuotteen täysimittaiseen dokumentointiin. Tämän lisäksi toimilaitteiden kiinnitys toisiinsa ja runkoon nähden varmistetaan. Myös liikkuvien osien liikeradat tulee tarkistaa tässä vaiheessa. Tämän tapaisten yksityiskohtien mitoittamista

ja tarkistamista kutsutaan *detaljisuunniteluksi*. Kun tekninen toiminnallisuus on saatu suunniteltua, voidaan aloittaa CE-dokumentointi. Tähän kuuluu tuotteen käyttöohjeet ja tarvittavat turvallisuuden huomioivat selosteet. Näitä asioita ei esitellä tässä diplomityössä sen enempää. Vaiheen lopussa olevassa portissa, G2, pohditaan vielä tuotteen toteutuskelpoisuutta ja mahdollisia tarvittavia muutoksia ennen seuraavaan vaiheeseen siirtymistä. Edellisen kappaleen malliin verrattuna tämän projektin toteutussuunnitteluvaihe on jonkinlainen yhdistelmä päävaiheita kehittäminen ja viimeistely.

Valmistusvaiheessa aikaisempien vaiheiden suunnitelmat toteutetaan varsinaiseksi konkreettiseksi tuotteeksi. Tämän aikaansaamiseksi suunnittelutoimiston tulee lähettää konepajoille tarjouspyyntöjä. Tarjouspyynnössä on esitetty mitä tulee valmistaa ja siinä onkin mukana tarvittavat valmistusdokumentit. Toisinaan tarjousvaiheessa voidaan lähettää vain osa dokumenteista. Tällöin saatetaan lähettää yksinkertaistettu esitys tuotteen valmistamisesta. Tähän voi olla syynä joidenkin tuotteen osa-alueiden salaaminen. Kaikkia *detaljeja* ei ole välttämättä haluta paljastaa tarjousvaiheessa eikä yksityiskohtainen selostus aina ole tarpeen tarjouksen tekemiselle. Tarjouspyynnöt lähetetään usealle konepajalle, jonka jälkeen niitä vertaillaan ja paras valitaan. Tässä projektissa tuote on sen verran pieni, että ensimmäinen valmistettava kappale on myös prototyyppi. Isompien tuotteiden kohdalla sen osa-alueista voitaisiin tehdä erikseen prototyyppisiä jo aikaisemmissa vaiheissa. Valitun valmistajan luona tehdään myös riittävä määrä tarkastuskäyntejä asianmukaisen etenemisen varmistamiseksi. Pahl:n ja Beitz:n mallissa ei ole erikseen esitelty valmistusvaihetta. Tarjouksiin ja valmistuksen seuraamiseen liittyviä asioita ei ole sisällytetty tähän diplomityöhön.

Testausvaiheessa tuotteen toiminnalliset vaatimukset testataan käytännössä. Testausvaihe on tärkeä, koska suunnittelussa on mahdotonta ottaa kaikkia asioita täysin todellisuudenmukaisesti huomioon. Suunnitteluun liittyvissä laskuissa tehdään aina joitakin oletuksia ja yksinkertaistuksia joiden paikkansapitävyys tulee varmistaa testien avulla. On myös mahdollista, että testien yhteydessä huomataan tuotteeseen liittyviä asioita, jotka eivät tulleet suunnittelun yhteydessä edes mieleen. Testit tulevat myös suunnitella. On oleellista, että ennen testejä mietitään mitä tuotteen toiminnallisuuksia tullaan testaamaan ja millä tavoin. Tärkeätä on myös pohtia miten testattavat kohteet mitataan. Testin tulokset kirjataan sovitulla tavalla ylös, jotta niiden avulla voidaan todentaa tuotteen oikea toiminta ja myös parantaa sitä. Tämän lisäksi yritetään parhaan mukaan varautua ongelmatilanteisiin ja jo etukäteen miettiä miten niiden yhteydessä tulisi toimia. Testeissä valmistettua laitteen prototyyppiä koekäytetään oikeata käyttötilannetta vastaavissa tilanteissa. Testivaiheen jälkeisessä portissa, G3, mietitään vielä tulisiko edellisten vaiheiden kohtia muuttaa tai parantaa.

Viimeisenä vaiheena tämän projektin kehityksessä on markkinointi. Tässä vaiheessa mietitään millä tavalla tuote olisi järkevintä julkistaa markkinoille. Myös sopivat toimitusketjut ja jälleenmyyjät etsitään. Markkinointivaihetta ei esitellä tässä diplomityössä tarkemmin.

5. ERILAISET KONSEPTIVAIHTOEHDOT

Tuotekehityksessä hyödynnetään konsepteja. Ne ovat hahmotelmia tuotteelle asetettujen vaatimusten toteuttamiseksi. Suunnittelun edetessä konseptit kuitenkin tarkentuvat ja osa huomataan toisia paremmiksi. Lopulta parhaaksi nähty konsepti viedään loppuun asti ja siitä tehdään prototyyppi. Tässä kappaleessa esitellään erilaisia periaatteellisia ratkaisuja ja siihen liittyvien konseptien kehittelyä. Myös prototyypin rakenne ja toiminta kuvataan tässä yhteydessä. Lopuksi prototyyppiä verrataan suunnitteluvaatimuksiin.

5.1 Erilaisia periaatteellisia ratkaisuja

Paalunkatkaisulaite voidaan toteuttaa hyvin monella tavalla. Tämä on totta, vaikka tuotetta on kappaleessa 2.4 jo rajattu alustavasti jonkin verran. On olemassa useita toteutusvaihtoehtoja liittyen esimerkiksi katkaisumekanismiin, kiinnitysmekanismiin ja voimanlähteeseen.

Sijainti	Laite paalun ulkopuolella		Laite paalun sisäpuolella
Kiinnitysmekanismi	Kiinnitys paalun ympäri <ul style="list-style-type: none"> • Ketju • Remmi 	Kiinnitys paalun sivuilta <ul style="list-style-type: none"> • Puristuvat tarraimet 	Kiinnitys paalun sisäpintaan <ul style="list-style-type: none"> • Puristuvat tarraimet
Liike paaluun nähden	Laite pyörii paaluun nähden	Laite leikkaa suoraan paalun läpi kiertämättä sitä	Laite pyörii paaluun nähden
Katkaisumekanismi	Pyörivä terä (P, H ja S)	Pyörivä terä (P, H ja S)	Pyörivä terä (P, H ja S)
Voimanlähteet <ul style="list-style-type: none"> • P=pneumatiikka • H=hydrauliikka • S=sähkö 	Korkea veden paine (H)	Sahaava terä (P, H ja S)	Korkea veden paine (H)
	Kuuma liekki (S)	Yhteen puristuvat terät (H)	Kuuma liekki (S)
		Timanttivaijeri (H)	

Kuva 38. Karkean tason laitteen ratkaisumahdollisuuksia.

Toteutusvaihtoehtoja on eritelty kuvassa 38 karkealla tasolla. Kuvaa tulee tulkita siten, että punaisen viivan oikealla puolella ylemmissä laatikoissa mainitut asiat kuuluvat myös niiden alla oleviin laatikoihin, jotka edelleen määrittävät tuotetta tarkemmin. Kuvassa mainitut asiat eivät vielä kata kaikkia mahdollisia toteutusvaihtoehtoja vaan edustavat niitä toteutuksia, mitä suunnittelija on tähän projektiin ottanut huomioon. Toinen huomio liittyy katkaisumekanismeihin. Esimerkiksi sahaavaa terää voitaisiin teoriassa käyttää vaikka laite pyörisikin paalun ympäri. Myös yhteen puristuville terille voitaisiin käyttää voimanlähteenä sähköä. Taulukossa on kuitenkin esitetty vain ne tapaukset, joi-

denka oletetaan olevan käytännöllisimpiä. Korkean veden paineen käyttämä vesihydrauliikka ajatellaan tässä taulukossa hydrauliseksi voimanlähteeksi.

Aluksi tulee päättää laitteen sijainti paaluun nähden. Katkaisu voi tapahtua joko paalun sisältä tai ulkoa käsin. Tämä päätös rajaa laitteen mahdollista muotoa hyvin paljon, koska tarttumapinta ympyräpoikkileikkaukselliseen paaluun on hyvin erilainen sisältä ja ulkoa. Myös tilaa on paalun sisällä luonnollisesti vähemmän. Jos katkaisu tapahtuu paalun ulkopuolelta, täytyy edelleen päättää pyörikö laite paaluun nähden vai leikkaako se suoraan sen lävitse kiertämättä sitä. Ensin mainitussa tapauksessa kiinnitys voitaisiin toteuttaa remmin tai ketjun avulla. Näiden kanssa tarvittaisiin myös koneisto, joka vetäisi remmiä tai ketjua saaden aikaan laitteen pyörimisen paalun ympäri. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa käytännöllisempi kiinnitystapa olisi jonkinlaiset paalun sivulle puristuvat tarraimet. Mikäli laite sijaitsee paalun sisällä, tulee kiinnitys toteuttaa myös tarraimien avulla. Tarraimet voisivat esimerkiksi puristua paalun sisäpintaan sylintereitä käyttämällä.

Kiinnitysmekanismi ja laitteen liike paalun nähden rajaavat myös katkaisumahdollisuuksia. Mikäli laitteeseen kiinnitytään paalun ulkopuolelta ja katkaisu tapahtuu laitteen pyörien paalun ympäri, on katkaisuun käytännöllisintä käyttää joko pyörivää terää, korkeaa veden painetta tai polttoleikkausta. Terän pyöriminen voi saada tehonsa niin pneumatiikasta, hydraulikasta kuin sähköstäkin. Korkea vedenpaine saadaan aikaan vesihydrauliikan avulla ja polttoleikkaus taas tarvitsee aina toimiakseen sähköä. Jos taas laitteeseen kiinnitytään edelleen paalun ulkopuolelta, mutta laite ei kierrä paalua jäävät polttoleikkaus ja korkean veden paineen käyttö pois. Tämä johtuu siitä, että ne katkaisevat terästä vain pieneltä keskittyneeltä alueelta. Näillä tavoilla on siis mahdotonta katkaista paalua kerrasta koko sen leveydeltä. Pyörivää terää voidaan tässä tapauksessa edelleenkin käyttää, mutta terän halkaisijan tulee olla suurempi kuin paalun halkaisija, jotta se voisi työntyä paalun läpi kerrasta. Tähän voidaan saada teho edelleen mistä vaan kolmesta edellä mainituista lähteistä. Leikattaessa suoraan paalun läpi kiertämättä sitä on kuitenkin mahdollista käyttää keinoja, jotka olisivat mahdottomia tai epäkäytännöllisiä kiertämistä hyödynnettäessä. Näitä ovat yhteen puristuvat terät, sahaava terä ja timanttivaijeri. Kaikissa tapauksissa katkaisevan elementin tulee olla leveämpi kuin paalun halkaisija. Sahaava terä voitaisiin toteuttaa millä vain mainituista voimanlähteistä, mutta yhteen puristuvat terät ja timanttivaijeri kannattaisi varmaankin toteuttaa hydraulikalla suuren voiman tarpeen takia. Näin on toimittu kappaleessa 2.2.2 esiteltyjen tuotteiden kohdalla. Viimeisimpänä jää pohdittavaksi katkaisuvaihtoehdot tilanteelle jossa laite on paalun sisällä ja pyörii siihen nähden. Edelleen millä tahansa mainituista tavoista tehonsa saava pyörivä terä on mahdollinen katkaisumenetelmä. Tällöin terän tulee kuitenkin olla huomattavasti paalua pienempi. Kuten laitteen pyöriessä paalun ympäri sen ulkopuolella, on sisälläkin mahdollista käyttää polttoleikkausta ja korkeaa veden painetta mainituilla tehon lähteillä mikäli ne eivät vie liikaa tilaa.

5.2 Valittu periaatteellinen ratkaisu

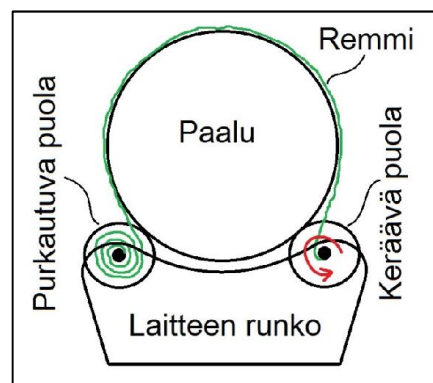
Valittuun periaatteelliseen ratkaisuun vaikuttaa usea asia. Ensinnäkin tuote suunnitellaan lähtökohtaisesti pienille paaluille, joita esimerkiksi työsilloissa käytetään. Tämän takia on päätetty, että laite sijaitsee paalun ulkopuolella. Pienissä paaluissa paalun sisällä on yksinkertaisesti liian vähän tilaa.

Yksi suunnitteluvaatimuksista on yksinkertaisuus. Tästä johtuen esimerkiksi korkean vedenpaineen käyttöä ei ole nähty järkeväksi vaihtoehdoksi liian teknisenä ratkaisuna. Korkeaa vedenpainetta ei valittu senkään takia, että sen käyttö on vaikea toteuttaa maan päällä tapahtuvissa leikkauksissa. Tätä tekniikkaa käyttämällä laitteesta tulisi myös liian iso. Paalun kerrasta koko leveydeltä katkaisevat mekanismit, yhteen puristuvat terät ja timanttivaijeri, johtaisivat myös liian raskaaseen tuotteeseen. Jäljelle jää vaihtoehto, jossa laite pyörii paalun ympäri paalun ulkopuolella. Yksinkertaisuuden ja keveyden nimissä on päätetty toteuttaa laite pyörivällä terällä ja käyttää voimanlähteenä paineilmaa. Helpon käytön nimissä kaikki paineilmalaitteet valitaan sellaisiksi, että ne toimivat voitelemattomana.

5.3 Valitun periaatteellisen ratkaisun erilaisia toteutuksia

5.3.1 Konsepti 1: Remmiveto

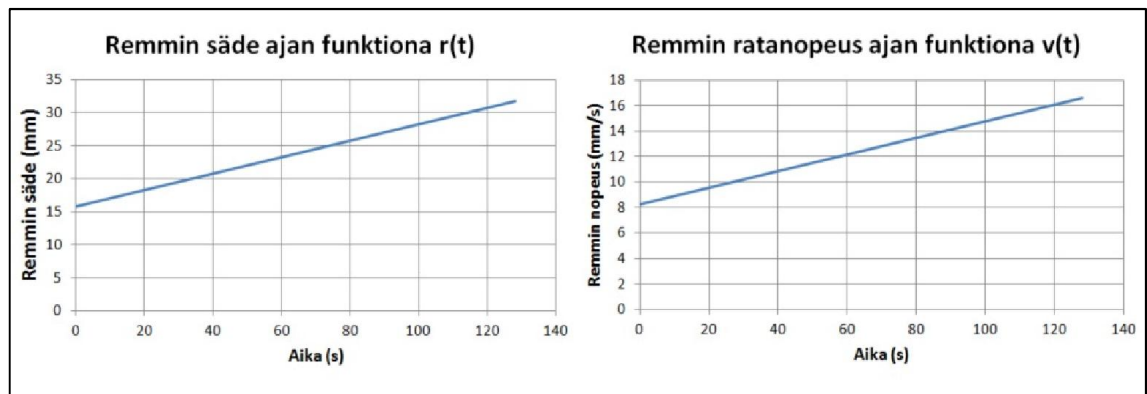
Ensimmäinen konsepti suunniteltiin toteutettavan remmin avulla. Remmi kiristää laitteen paaluun kiinni ja myös pyörittää laitetta paaluun nähden. Laitteessa olisi siis kaksi puolaa. Toinen puola on aluksi täynnä ja toinen tyhjä. Tämä konsepti on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 39. Siinä vihreä viiva kuvaa remmiä. Punaisella nuolella on kuvattu keräävän puolan pyörimissuuntaa. Laite lähtisi siis pyörimään paalun ympäri kuvassa vastapäivään.



Kuva 39. Remmikonseptin yksinkertaistus.

Valittuun konseptiin liittyy kuitenkin haasteita. Tämä johtuu siitä että, remmi kerääntyy kerroksille itsensä päälle toisella puolalla. Puolalle kertyneen uloimman remmikerrok-

sen etäisyys puolan keskelle siis kasvaa koko ajan. Tätä etäisyyttä kutsutaan remmin säteeksi ja sillä tarkoitetaan remmin paksuussuuntaisen keskikohdan etäisyyttä puolan pyörimisakselista. Kertymisen määrän tutkimista varten suoritettiin muutamia laskuja, jotka ovat tarkemmin esitetty liitteessä 1. Siinä on käytetty seuraavia lähtöarvoja: paalun halkaisija 320 mm , remmin vahvuus $1,5\text{ mm}$, puolan halkaisija 30 mm ja moottorin kierrosnopeus 5 1/min . Moottorin kierrosnopeus on vakio. Kuvan 40 vasemmalla puolella näkyy laskuista saatu remmin säteen kasvaminen ajan funktiona. Kuvaaja on piirretty ajalle, jossa laite kiertää paalun kerran ympäri. Tässä ajassa remmin halkaisija noin kaksinkertaistuu. Vaaka-akselin voi kuvitella olevan puolan akseli ja sinisen viivan remmin keskikohta, joka koko ajan liikkuu kauemmaksi akselista.



Kuva 40. Puolalle kertyneen remmin säde ja ratanopeus ajan funktiona.

Remmin mahdollista liukumista ei oleteta tapahtuvan. Tällöin remmin kehänopeus on sama nopeus jolla laite pyörii paalun ympäri paalun kehällä. Tällöin remmiä pyörittävän moottorin nopeuden pysyessä vakiona remmin kehänopeus kasvaa sen kertyessä puolalle. Remmin puolalle kertymisen johdosta laite siis kiihtyisi sen pyöriessä paalun ympäri. Nopeuden halutaan kuitenkin olevan vakio. Kuvan 40 oikealla puolella on esitetty laskuista saatu remmin keskikohdan nopeus ajan funktiona. Myös se noin kaksinkertaistuu ajassa, jossa laite kiertäisi paalun ympäri. Tämän lisäksi tyhjenevällä puolalla tulisi olla moottori jotta se pystyisi jarruttamaan remmin vetämistä. Tämä on pakollinen sen takia että remmin pitää pystyä olemaan kireänä samalla kun sitä keritään. Näin mahdollistetaan laitteen pysyminen paalun ympärillä. Purkautuvankaan puolan kierrosnopeus ei ole vakio, koska sen säde vastaavasti pienenee remmin poistuessa puolalta.

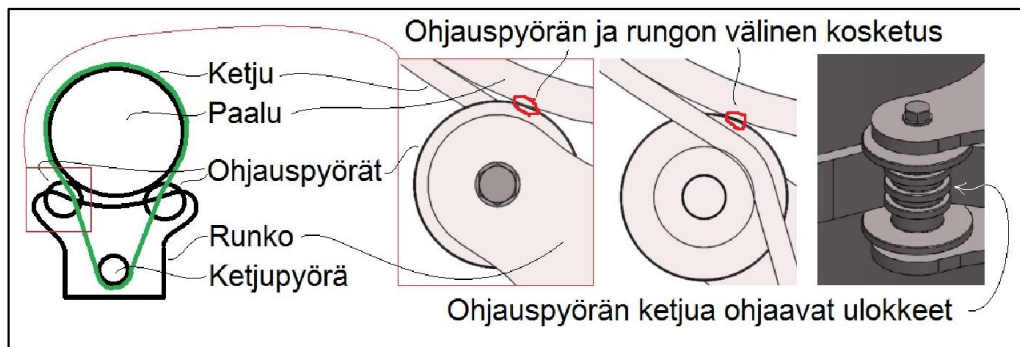
Remmin käyttöön liittyy myös muita ongelmia. Laitteen käytön kannalta on pakollista, että remmi saadaan kiinnitettyä paalun ympäri. Se ei siis voi olla kiinteästi rungossa kiinni. Koska remmi on luonteeltaan jatkuva, tulisi toisessa puolassa olla pikaliitos. Tämä on hankala toteuttaa, koska puolassa tulisi olla myös moottori. Remmi ei myöskään ole helposti jatkettavissa tai vaihdettavissa erikokoisille paaluille.

Tätä konseptia ei suunniteltu rungon tai muiden osien kohdalta eteenpäin. Ainoastaan remmin käyttöä laskettiin ja tutkittiin sen verran, että kyseinen konsepti saatettiin todeta

liian haastavaksi ja epäkäytännölliseksi. Tämän takia vaihtoehtoisia konsepteja alettiin etsiä ja ideoida.

5.3.2 Konsepti 2: Ketjuveto yhdellä sylinterillä

Tässä konseptissa päätettiin käyttää ketjuvetoa. Ketjuna käytetään kolmirivistä ketjua jäməkämmän kiinnittymisen aikaansaamiseksi. Ketju kulkee ketjupyörän, ohjauspyörin ja paalun pintaa pitkin. Ohjauspyörät ovat erikseen suunniteltavat ja valmistettavat osat. Ne ovat muotoiltu siten, että rullaketju pysyy oikealla korkeudella niissä olevissa ulokkeissa. Ohjauspyörän ylä- ja alareuna ovat kyseisen osan uloimmat kohdat, joita pitkin kosketus paalun ja laitteen välillä tapahtuu. Ohjauspyörän pyöriminen on riippumaton ketjun liikkeeseen nähden, koska ketju rullaa ohjauspyörän keskiosaa pitkin. Käytetty ketju on rullaketju tämän liikkeen helpottamiseksi. Kosketus laitteen ja paalun välillä tapahtuu siis ohjauspyörän ylä- ja alareunan sekä ketjun kautta. Kuvassa 41 on selvennetty esiteltyjen osien muotoa ja sijaintia laitteessa.

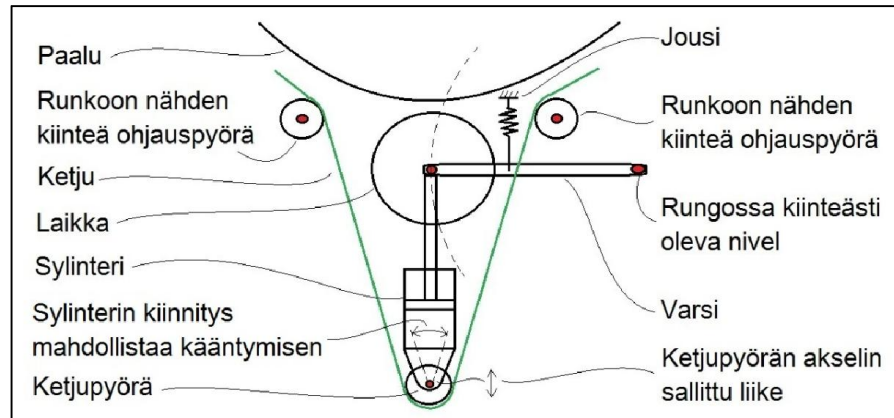


Kuva 41. Ohjauspyörän toiminta.

Vasemmassa reunassa on näytetty yksinkertaistettu hahmotelma tärkeimpien osien keskinäisestä sijainnista. Ketju on piirretty vihreällä. Seuraava kuva oikealle siirryttäessä on 3d-mallista otettu suurennos kohdasta, jossa laitteen ja paalun välinen kosketus tapahtuu. Sen oikealla puolella on näytetty sama alue leikattuna ketjun puolesta välistä sen korkeussuunnassa. Ketju siis kulkee ohjauspyörän keskellä olevien ulokkeiden kautta ja ketju osuu paalun vasta sen poistuessa ketjupyörästä. Kuvan oikeassa reunassa on vielä esitetty isometrinen kuvanto tilanteesta. Tämä on ainoa kuvanto, jossa mainitut ulokkeet näkyvät.

Tässä konseptissa katkaisuun ja kiristämiseen vaadittava liike suunniteltiin toteutettavan yhdellä sylinterillä. Tämä on mahdollista hyödyntäen esijännitettyä jousia ja nivelmekanismia. Tilannetta on esitelty kuvassa 42. Siinä leikkausmekanismi on kiinnitetty sylinterin männän päähän, joka liikkuu nivelöidyssä vivussa. Sylinterin työntyessä ulos terä ei kuitenkaan heti työnny eteenpäin, koska jousen esijännitys vastustaa liikettä. Sylinterin on siis pakko liikkua toiseen suuntaan jolloin ketjun kiristyminen tapahtuu. Ketjupyörän akselin liike on sallittu vain eteen ja taakse. Sylinterin liikettä edelleen jatk-

taessa jousen esikiristys ylitetään ja leikkausmekanismi lähtee työntymään eteenpäin. Sylinterin perän kiinnitys on sellainen, että se mahdollistaa sylinterin kääntymisen. Tämä on oleellista, koska leikkausmekanismi liikkuu ympyrän kaarta. Kiinteästi kiinnitetyn sylinterin mäntä sallisi vain suoran liikkeen.



Kuva 42. Yhdellä sylinterillä toteutettavan konseptin osat.

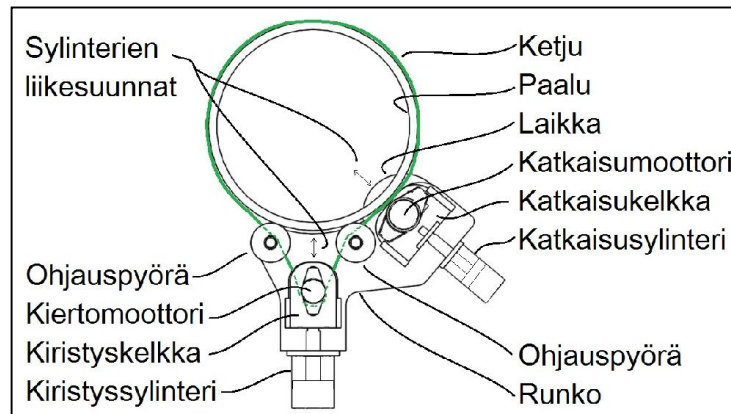
Yhden sylinterin konsepti on kuitenkin hankala toteuttaa. Ensinnäkin huomattiin, että järkevän kokoisia esijännityksellisiä jousia ei ole. Tilanne yritettiin korjata lautasjousilla. Koska nämä eivät ole esijännitettyjä, sallittiin kiristykseen sellainen jousen puristuma, että terä ei vielä osu paaluun. Jousi siis aloittaa puristumisen heti kun sylinteri lähtee työntymään ulos, mutta kiristyksen saavutettua terä ei ole vielä koskettanut paaluun. Jatkettaessa sylinterin liikettä terä työntyy paalun läpi. Lautasjousia käyttämällä rakenteesta tuli kuitenkin aivan liian suuri. Kuvaa 42 katsoessa kannattaa myös huomioida, että laikan ja ketjupyörän akselille tarvitaan vielä moottori. Ne olisivat siis rungossa peräkkäin. Tämän takia rakenteesta tulisi liian pitkä ja laitteen painopiste sijaitisi turhan kaukana paalusta.

Yhden sylinterin käytöstä saatava hyöty on siis hyvin pieni. Sylinteri on halpa komponentti, joten niiden käyttöä ei kannata säästellä. Tähän konseptiin liittyviä laskuja ei ole esitellä tässä työssä.

5.3.3 Konsepti 3: Ketjuveto kahdella sylinterillä kiinteässä rungossa

Tähän konseptiin on edellisestä konseptista säilytetty ketjun käyttö. Tässäkin konseptissa on siis käytetty kolmirivistä ketjua, ketjupyörää ja kahta ohjauspyörää samaan tapaan kuin aiemmin. Ketjun kiristykselle ja leikkaukselle on kuitenkin omat sylinterit. Molemmat sylinterit ovat kiinteästi kiinni rungossa ja niiden männänvarret ovat kiinnitetty liukuviin kelkkoihin, joissa sijaitsevat kiristys ja leikkausmoottorit. Kuvassa 43 on esitetty tämä idea. Siinä ketju on piirretty vihreällä värillä. Ketjupyörä ei tässä kuvannossa näy, koska se sijaitsee kiristyskelkan sisällä kiertomoottorin akselilla. Kiristyskelkka pystyy liikkumaan vain eteen ja taakse. Samalla tavalla liikkuu myös katkaisukelkka.

Kuvassa sylinterien aiheuttamien liikkeiden suunnat ovat esitetty ohuilla nuolilla. Pyörivä laikka on kiinni katkaisumoottorin akselilla ja se sijaitsee rungon alapuolella. Rungon pohjassa on katkaisukelkan alla pitkä reikä, joka mahdollistaa pyörivän akselin läpiviennin rungon alle. Kuvan tilanteessa katkaisusylinteri on asennossa, jossa terä on leikannut itsensä paalun läpi. Sylinterin ollessa lyhimmällään laikka on hieman paalusta irti.



Kuva 43. Kahdella sylinterillä ja kiinteällä rungolla toteutettu konsepti.

Kiinteän rungon käyttö ei ole kuitenkaan täysin ongelmaton. Sen avulla on vaikea toteuttaa rakenne, jolla pystyttäisiin katkaisemaan mahdollisimman monta eri paalukokoa. Tähän vaikuttaa oleellisesti rungon muoto, laikan halkaisija ja katkaisusylinterin iskun pituus. Rungon etäisyys paalusta voidaan optimoida vain yhdelle paalukoolle. Lähtökohtaisesti halutaan tietysti, että runko on hieman irti paalusta. Mitä kauempana runko on paalusta sitä pidemmän liikkeen katkaisusylinterin on tehtävä katkaisun mahdollistamiseksi. Tarvittaisiin siis isompi sylinteri. Jos runko on liian kaukana paalusta, tarvitsee laikan halkaisijaa suurentaa, jotta se ylettyy leikkaamaan paalun läpi. Tämä johtuu siitä, että katkaisusylinterin ei sallita työntävän katkaisukelkkaa rungon ylitse. Erilaisia rungon, katkaisusylinterin ja laikan yhdistelmiä kokeiltiin, mutta niitä muuttelamalla ei päästy riittävän hyvään tulokseen.

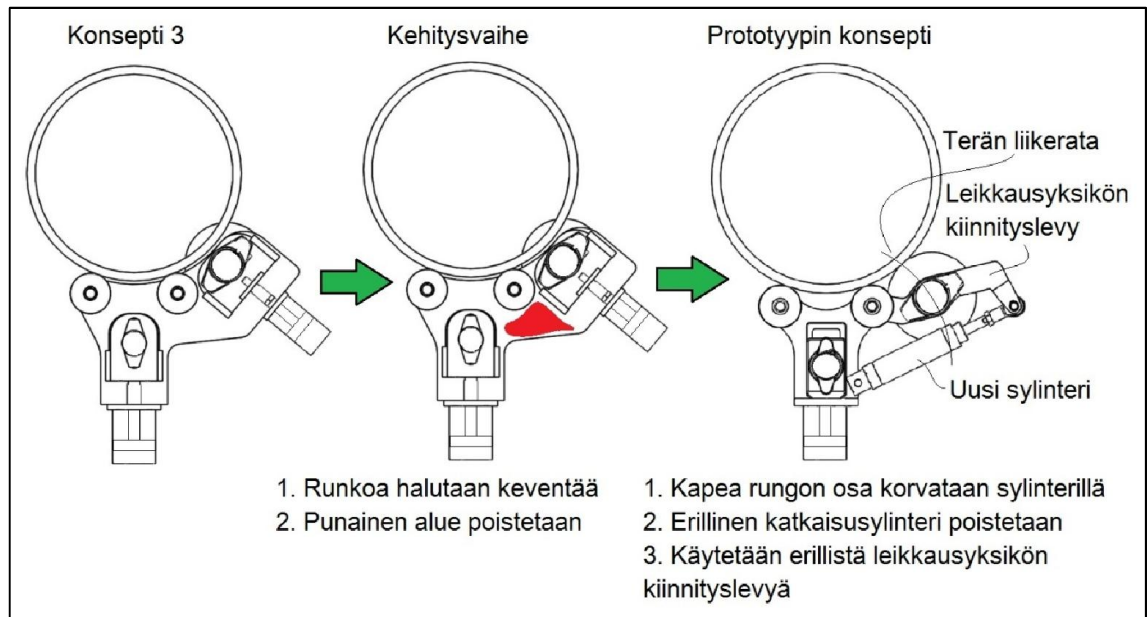
Tämä konsepti voisi olla toteutettavissa yhdelle paalukoolle. Sen suunnittelu usealle paalukoolle on kuitenkin epäkäytännöllistä. Tästä johtuen konseptia kehitettiin edelleen.

5.4 Prototyypin konsepti

5.4.1 Idean lähtökohta

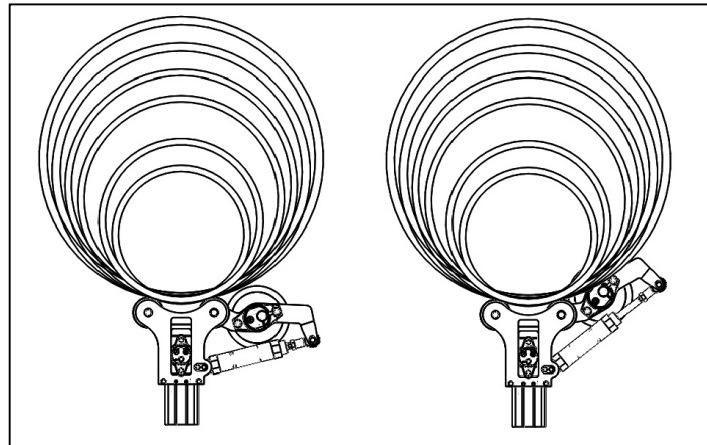
Tämän konseptin idea syntyi edellisen konseptin kehitysideasta ja toisaalta rakenteen yksinkertaistuksesta. Idean pohjalla oli halu keventää rakennetta. Kiristys- ja leikkausosan väliä ei nähty tarpeelliseksi toteuttaa kokonaan levyllä, joten siihen tehtiin reikä. Tämä reikä sai rungon levyn näyttämään hieman kummalliselta, mutta samaan aikaan se herätti vaihtoehdon toteuttaa runko kahdesta osasta. Nämä osat päätettiin yhdistää toi-

siinsa nivelellä ja sylinterillä, jolloin myös leikkausosan liikerata kasvoi. Kyseinen sylinteri on kiinni laitteen perässä ja se työntää hieman vinosti levyä, jossa leikkausyksikkö on kiinni. Tässä vaiheessa huomattiin myös, että edellisen mallin leikkaussylinteriä ei enää tarvita. Tämä johtuu siitä, että uusi sylinteri työntää leikkausyksikön kiinnityslevyä paalua kohti ja siitä pois päin. Tällöin sekä terä että runko liikkuvat yhden sylinterin avulla. Terä ei enää liiku lineaarisesti vaan se liikkuu ympyräkaarta pitkin, mutta tämä ei haittaa. Jotta rungon kahden eri osan kiinnitys saatiin kompaktiksi, yhdistettiin leikkausyksikön kiinnityslevy toinen nivel samaan akseliin toisen ohjauspyörän kanssa. Kuvassa 44 on näytetty tämä konseptin kehityskulku.



Kuva 44. Prototyypin konseptin idean lähtökohta.

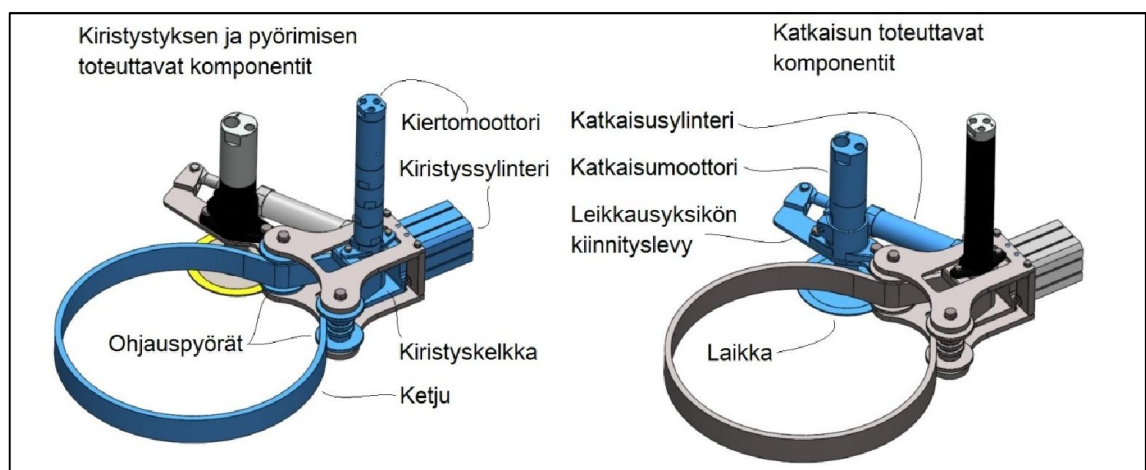
Nivelöity runko mahdollistaa useamman paalukoon katkaisun. Tämä on esitetty kuvassa 45. Kuvan vasemmalla puolella katkaisusylinteri on täysin kiinni. Siinä laikka on vielä hieman irti isoimmasta katkaistavasta paalusta. Oikealla puolella katkaisusylinteri taas on työntynyt täysin ulos, jolloin laikka vielä leikkaa kokonaan pienimmän paalun läpi. Kuvassa 45 on näytetty yhtä aika kaikki paalukoot, joidenka katkaisun laitteen leikkausyksikön liikerata mahdollistaa. Tähän kuuluu kuuden eri ulkohalkaisijan omaavaa paalua; RD270-RD550. Näiden paalujen mitat näkyvät tarkemmin paaluja esittelevässä kappaleessa 2.1.4 kuvassa 5.



Kuva 45. Nivelöity runko mahdollistaa paalujen RD270-RD550 katkaisemisen.

5.4.2 Oleellisimpien osien esittely

Laite koostuu rungosta johon on kiinnitetty kaksi sylinteriä ja kaksi moottoria. Runko on toteutettu levyrakenteena. Sen kasaamisessa on käytetty sekä hitsausta, että ruuviliitoksia. Kaikki toimilaitteet toimivat paineilmalla. Näiden lisäksi laitteeseen kuuluu ketju, ketjupyörä, kaksi ohjauspyörää sekä akseleita ja niihin kiinnitettyjä laakereita. Laitteessa on myös paljon pneumatiikkakomponentteja ja erilaisia liittimiä. Kuvassa 46 on näytetty prototyypin konseptin toiminnan ymmärtämisen kannalta tärkeimmät osat. Siinä laite on jaettu kiristysten ja pyörimisen toteuttaviin sekä katkaisun toteuttaviin komponentteihin. Ensimmäiseksi mainitun ryhmän osat ovat näytetty vasemmalla ja toisen oikealla. Selvyyden vuoksi joitakin laitteen osista, kuten kantokahva, on piilotettu. Nämä osat eivät ole oleellisia laitteen toiminnan ymmärtämisen kannalta. Paaluakaan ei ole näytetty, mutta se luonnollisesti sijaitsee ketjun tekemän lenkin sisällä.



Kuva 46. Prototyypin oleelliset osat.

Rungon perään kiinnitetty kiristyssylinteri liikuttaa rungon sisällä olevaa kiristyskelkkaa. Sylinterin aiheuttama kelkan liike tilanteen mukaan kiristää tai löysää laitteen paa-

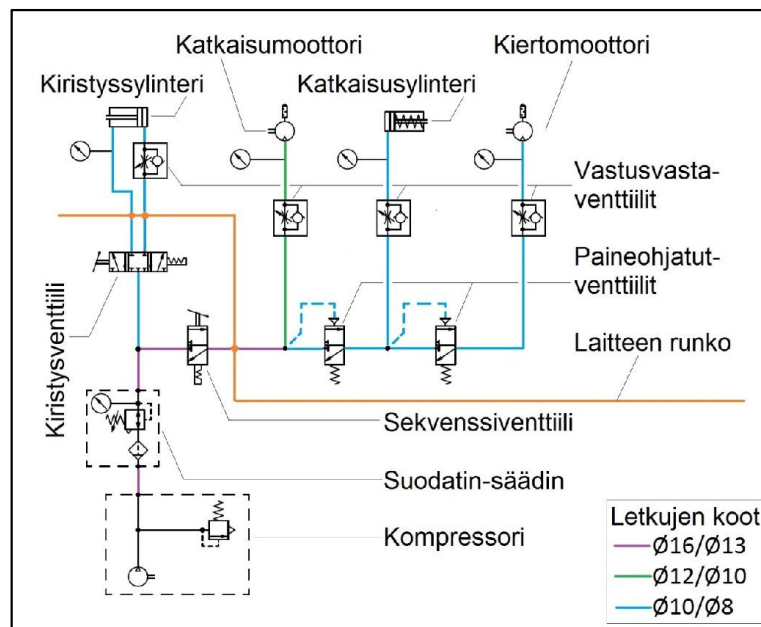
lun ympärille. Kiristyskelkkaan on kiinnitetty ketjua pyörittävä kiertomoottori. Tämä moottori on kiinnitetty kelkkaan kelluvasti siten, että kelkassa olevat laakerit ottavat vastaan kiristuksen aiheuttamat radiaalikuormat ja moottori välittää vain momentin. Ketjua pyörittävä moottori on hitaasti pyörivä moottori. Kiristyskelkan sisällä, kierto-
moottorin akselilla, sijaitsee ketjupyörä.

Kahden nivelen välissä sijaitseva kapeampi ja pidempi katkaisusylinteri liikuttaa run-
gossa kiinni olevaa leikkausyksikön kiinnityslevyä. Tässä levyssä on kiinni paalun kat-
kaiseva katkaisumoottori laikkoineen ja kiinnitysosineen.

Ketjun, ketjupyörän ja ohjauspyörien käyttö on toteutettu samaan tapaan kuin konsep-
teissa 2 ja 3. Kuitenkin leikkausyksikön kiinnityslevyn toinen nivel on samalla akselilla
toisen ohjauspyörän kanssa minkä takia tälle akselille tarvitaan hieman lisää laakeroin-
tia, jotta leikkausyksikön liike voi olla ohjauspyörän liikkeestä riippumaton. Ketjun
liike on edelleen sekä leikkausyksikön että ohjauspyörän liikkeeseen nähden riippuma-
ton.

5.4.3 Pneumatiikkakaavio

Laitteen toiminta on helppo ja selkeä ymmärtää pneumatiikkakaavion avulla. Tämä on
esitetty kuvassa 47. Siinä näkyvät edellisessä kappaleessa esitetyt sylinterit ja moottorit.
Näiden toimilaitteiden käytön kannalta tarpeelliset venttiilit ja muut pneumatiikkakom-
ponentit näkyvät myös tässä pneumatiikkakaaviossa.



Kuva 47. Laitteen pneumatiikkakaavio.

Jokaisen toimilaitteen edessä käytetään vastusvastaventtiiliä. Näiden avulla kaikkien
toimilaitteiden nopeutta voidaan säätää. Moottoreiden tapauksessa säätö kohdistuu kier-

rosnopeuteen ja sylintereiden tapauksessa iskunopeuteen. Pneumatiikkakaavio ei ota kantaa toimilaitteiden keskinäiseen sijaintiin tuotteessa. Kuvaan 47 on kuitenkin piirretty oranssi viiva, joka kuvaa laitteen runkoa. Kaikki komponentit tämän yläpuolella ovat välittömästi kiinni laitteessa ja viivan alapuolella olevat komponentit sijaitsevat niin sanotussa ohjausyksikössä kauempana laitteesta. Tältä ohjausyksiköltä laitteelle tulevat letkut ovat pitkiä kun taas viivan yläpuoliset laitteen sisällä olevat letkutukset ovat lyhyitä. Kuvassa 47 on myös esitetty käytetyt letkukoot väreihin. Ohjausyksiköstä laitteen runkoon tulee kolme letkua: kaksi pienempää ja yksi isompi.

Pneumatiikkakaavion voidaan tulkita jakautuvan toiminnallisesti kahteen osaan. Nämä osat ovat jaettu suuntaventtiileillä, jotka kaaviossa ovat nimetty kiristysventtiiliksi ja sekvenssiventtiiliksi. Molemmat ovat normaalisti kiinni. Kiristysventtiilin tehtävänä on ohjata vain kiristyssylinteriä. Laitteen toiminnan kannalta on oleellista, että tätä venttiiliä voidaan avata ja sulkea muiden laitteiden liikkeestä riippumatta. Laitteen käytön yhteydessä tämä tarkoittaa sitä, että se halutaan kiristää tukevasti paalun ympärille ennen kuin muita toimilaitteita käynnistetään. Kiristysventtiili on 5/3-venttiili, koska kiristyssylinteriä tulee pystyä ohjaamaan molempiin suuntiin.

Toinen toiminnallinen osuus käynnistyy avattaessa sekvenssiventtiili. Sekvenssiin kuuluu katkaisumoottori, katkaisusylinteri ja kiertomoottori. Toimilaitteet käynnistyvät sekvenssissä tässä järjestyksessä. Laitteiden käynnistyminen vuoron perään on toteutettu paineohjatuilla venttiileillä. Nämä eivät päästä ilmaa seuraavalle toimilaitteelle, ennen kuin riittävä paine on saavutettu edellisellä toimilaitteella. Sekvenssiventtiili on 3/2-venttiili, koska sen käyttö edellyttää vain että ilma joko päästetään läpi tai ei päästetä.

Laitetta käytettäessä esiteltyt toiminnalliset osuudet käynnistetään mainitussa järjestyksessä. Ensin kiristysventtiili kytketään siten päin, että kiristyssylinteri tekee miinusliikkeen, joka aiheuttaa ketjun kiristymisen paalun ympärille. Tämän jälkeen sekvenssiventtiili avataan. Kiristysventtiili pysyy edelleen auki, jotta laite pysyy paalussa kiinni. Sekvenssissä ensimmäisenä katkaisumoottori käynnistyy jolloin laikka lähtee pyörimään. Tässä vaiheessa laikka on vielä irti paalusta. Kun paine on katkaisumoottorilla kasvanut riittävästi, jatkuu sekvenssi katkaisusylinterille. Tällöin katkaisusylinteri tekee plus-liikkeen minkä johdosta pyörivä laikka alkaa lähestyä paalun pintaa. Kun paine katkaisusylinterillä on riittävä ja terä on leikannut paalun läpi, jatkuu sekvenssi kiertomoottorille. Tällöin laite lähtee pyörimään paalua ympäri leikaten sitä.

5.4.4 Laitteen toimintasykli

Laitetta käytettäessä tulee suorittaa tietyt vaiheet. Nämä ovat lueteltu kuvassa 48. Kuvan esittämässä laitteen toimintajärjestyksessä toiminta on jaettu 12 vaiheeseen. Toimittaessa näiden ohjeiden mukaisesti on laitteen käyttö selkeää ja turvallista.

Toimintajärjestyksen ymmärtämisen kannalta on tärkeää määritellä lähtötilanne. Tämä on siis tilanne ennen ensimmäistä vaihetta. Kuvaa tulee tulkita siten, että ennen ensimmäistä vaihetta on tapahtunut viimeinen vaihe. Paalu on siis katkaistu ja laite on nostettu katkaistun paalun yläosan kanssa maalle. Koska laite katkaisee paalun kiinnityskohdan alapuolelta, jää paalu katkaisun jälkeen kiinni katkaistun paalun yläosaan. Tästä eteenpäin laitetta voidaan käyttää esiteltyjen vaiheiden mukaan ja viimeisen vaiheen jälkeen voidaan uudestaan siirtyä ensimmäiseen.

1. Kiristyssylinterin sammutus
2. Letkujen irroittaminen laitteesta
3. Laitteen irrottaminen paalusta (ketjun avaus)
4. Terän ja muiden osien kunnon tarkistaminen
5. Laitteen asettaminen paalun ympärille (ketjun kiinnitys)
6. Paalun yläosaan kiinnittyminen kaivurilla tai vastaavalla
7. Letkujen kiinnitys laitteeseen
8. Laitteen laskeminen veteen (jos katkaisu vedessä)
9. Vedon aiheuttaminen paalun yläosaan
10. Laitteen käynnistäminen
<ul style="list-style-type: none"> • Kiristyssylinterin käynnistäminen • Sekvenssin käynnistäminen • Katkaisumoottorin käynnistys • Katkaisusylinterin käynnistys • Kiertomoottorin käynnistys
11. Koneen sammutus
<ul style="list-style-type: none"> • Sekvenssi sammutetaan, mutta kiristyssylinterin pysyy päällä
12. Paalun yläosan nosto ja laskeminen maalle

Kuva 48. Laitteen toimintajärjestys

Ensimmäisessä vaiheessa kiristyssylinteri sammutetaan. Tällöin ketju paalun ympärillä löystyy. Tässä vaiheessa laitteen alla pitää olla jokin teline tai sen pitää olla hyvin lähellä maata, jotta se ei tipahda korkealta ja vaurioidu. Toisaalta laite on niin kevyt, että sitä voidaan tukea yksinkertaisesti käsivoimin. Toisessa vaiheessa laitteen runkoon tulevat letkut irrotetaan. Seuraavaksi, vaiheessa kolme, laite irrotetaan paalusta avaamalla ketju.

Ketjun avauskohdan pitäisi olla sellaisessa paikassa, että siihen päästään käsiksi helposti. Tämä johtuu siitä, että ketjun kiinnitys on suoritettu tämänlaisesta paikasta ja katkaisussa laite on pyörinyt tasan kierroksen. Ennen uutta katkaisua terän ja muiden osien kunto tarkastetaan. Tarpeen tullen terä vaihdetaan. Tämä on vaihe neljä.

Vaihe 5 aloittaa uuden katkaisun ja laite jälleen asetetaan paalun ympärille. Tämä tapahtuu asettamalla laite paalun lähelle ja sulkemalla ketju paalun ympäri. Mikäli katkaisu tapahtuu erikokoisella paalulle kuin edellinen katkaisu, vaihdetaan tähän sopiva ketju. Laite kannattaa tässä vaiheessa asettaa jonkin telineen päälle, jotta ketjun kiinnitys on helpompaa ja laite pysyy suunnilleen suorassa. Seuraavaksi vaiheessa 6 katkaistavan paalun yläosaan kiinnitytään kaivurilla tai vastaavalla. Tämä on tärkeää tulevia vaiheita ajatellen. Vaiheessa 7 letkut kiinnitetään jälleen paaluun. Letkut tulee asettaa paalun ympäri kiertäen siten, että kierto avautuu laitteen pyöriessä paalun ympäri katkaisun aikana. Tässä tulee siis huomioida laitteen pyörimissuunta. Mikäli letkut asetetaan suoraan paaluun, kiertyvät ne paalun ympäri katkaisun aikana. Katkaisun jälkeen ne tulisi siis kiertää takaisin vaiheen 2 yhteydessä. Tämä ei kuitenkaan varsinaisesti haittaa laitteen käyttöä. Vaihe 7 tarvitsee suorittaa, jos katkaisu tapahtuu vedessä. Tällöin laite lasketaan veteen runkoon kiinnittyvien letkujen avulla. Nämä letkut ovat kiinni rungossa siten, että niistä voidaan roikottaa laitetta. Tässä vaiheessa ketju on paalun ympärillä vielä löysästi, joten laite voidaan laskea veden alle siten että se pysyy oikeassa asennossa paaluun nähden.

Ennen varsinaista katkaisua aiheutetaan vaiheen 9 mukaisesti paaluun yläosaan veto. Tämä toteutetaan vaiheessa 6 paalun kiinnittyneellä laitteella. Tämä on pakollista, jotta katkaisu voidaan suorittaa loppuun asti. Mikäli paalua ei katkaisun aikana vedettäisi ylöspäin, painaisi katkaisukohdan yläpuolinen paalun massa pyörivää laikkaa. Mitä enemmän paalua on katkaistu, sitä enemmän yläpuolinen paalu painaisi terää. Kun veto on saatu aikaiseksi, voidaan siirtyä vaiheeseen 10 ja käynnistää laite. Tämä tapahtuu kappaleessa 5.4.3 esitetyllä tavalla; ensin laitteen kiristys paalun ympärille ja sitten muiden laitteiden sekvenssin käynnistäminen. Kun laite on leikannut paalun kokonaan ympäri, suoritetaan vaiheen 11 mukainen koneen sammutus. Tässä vaiheessa kiristyssylinteri pidetään kuitenkin vielä päällä. Tämän johdosta laite pysyy edelleen paalun ympärillä kiinni. Lopuksi, vaiheessa 12, paalua kiinnittävä kaivuri nostaa katkaistun paalun yläosan, jossa laitekin on kiinni, maalle. Tämän jälkeen voidaan siirtyä jälleen ensimmäiseen vaiheeseen.

5.4.5 Suunnitteluvaatimuksien toteutuminen

Kappaleessa 2.4 esiteltiin laitteelle asetettuja suunnitteluvaatimuksia. Näistä ensimmäinen oli yksinkertaisuus. Ottaen huomioon useat toiminnot ja liikkeet jotka laitteen tulee kyetä toteuttamaan, voidaan tämän vaatimuksen sanoa täyttyneen. Laitteen neljä pääkomponenttia, kaksi moottoria ja kaksi sylinteriä, ovat helppokäyttöisiä. Riittää, että niille ohjataan venttiilien avulla ilma. Prototyyppi onnistuttiin myös valmistamaan hyvin

kompaktiksi rakenteeksi. Laitteen runkoon on tehty useaan pintaan koneistuksia, mistä johtuen komponenttien kiinnitykset ja toiminnalliset liikkeet saadaan tehtyä melko pienessä tilassa. Prototyypin varten erikseen valmistettavien osien määrä ja monimutkaisuus olivat myös konepajaystävällisiä.

Kokoonpannun laitteen massa oli lopulta pikkaisen alle 13 kg. Suunnitteluvaatimuksissa esitetty 10 kg:n paino oli hieman optimistinen, mutta melko lähelle sitä kuitenkin päästiin. Laitteen käsittelyä helpottaa siihen suunniteltu kahva, jonka voi huomata prototyypin testejä käsittelevässä kappaleessa 7.4 kuvassa 64. Suunnitteluvaatimuksissa oli myös mainittu mahdollisimman monen eri paalukoon katkaisumahdollisuus. Tämä on mahdollista, koska laitteen katkaisuyksikköä voidaan liikuttaa sylinterillä, kuten kappaleen 5.4.1 kuvassa 45 näkyy. Laitteen huoltamista helpottaa toimilaitteiden mahdollinen irrottaminen rungosta avaamalla yksinkertaisesti laitteen ja rungon väliset ruuviliitokset. Kukin komponentti voidaan siis irrottaa laitteesta erikseen. Myös rungon ylälevy voidaan irrottaa rungosta, jolloin rungon sisällä olevia osia kuten kiristyskelkkaa voidaan huoltaa.

Suunnitteluvaatimuksissa esitettyyn 5000 €:n myyntihintaan ei esitettyllä prototyypillä voida päästä. Konepajoilta saatujen tarjousten perusteella prototyypin toteutuskustannus, joka sisältää valmistuksen ja komponenttien hankinnan, on liian suuri kun huomioidaan, että laitteen pitäisi maksaa ajan kanssa itsensä takaisin. Tarkemmin sanottuna myyntihinnan ja toteutuskustannuksen erotuksen tulisi olla niin suuri, että sillä voitaisiin kattaa valmistuskustannukset viimeistään tuhannen myydyin laitteen kohdalla. Merkittävien syy liian suuriin toteutuskustannuksiin on laitteen paineilmamoottoreiden hankintakustannukset. Prototyypin kallein osa on kiertomoottori.

Joidenkin suunnitteluvaatimusten täyttymisen toteaminen vaatii testejä. Tämän takia suunnitteluvaatimusten toteutumista on käsitelty lisää prototyypin testien esittelyn yhteydessä kappaleessa 7.7.

6. TOIMILAITTEIDEN JA KOMPONENTTIEN VALINTA

Optimaaliseen laitteiden ja rungon mittoihin on päästy iteroimalla. Tämä tarkoittaa, että joitakin mitoitusarvoja on aluksi täytynyt arvata. Joidenkin laitteiden mitoitus riippuu myös muista laitteista. Esimerkiksi rungon geometriaa tulee mitoittaa riittävästi, jotta toimilaitteille vaadittavat voimat ja muut suoritusarvot voidaan ratkaista. Toisaalta suuremman voiman tuottama laite on isompi ja se vaikuttaa myös rungon mahdollisiin mittoihin. Varsinaiset laskutoimitukset ovat katkaisusylinterin, kiristyssylinterin, katkaisumoottorin ja kiertomoottorin osalta liitteessä 2. Liitteen laskentaraportin alussa on kerrottu lähtöarvot. Mainittakoon tässä suunnittelupaineen oleva 6 bar . Tämä on ilmoitettu ylipaineena. Prototyypin toimilaitteet ovat laskettu paalulle, jonka halkaisija on $323,9 \text{ mm}$ ja seinämänvahvuus 5 mm . Tässä kappaleessa esitetään vain laskujen perusteella saadut lopputulokset. Muiden osien, kuten laakerien, osalta ei esitetä laskuja liitteessä eikä tässä kappaleessa.

6.1 Terää työntävä sylinteri

Terää työntävää paineilmasylinteriä kutsutaan tässä työssä katkaisusylinteriksi. Itse asiassa se liikuttaa koko katkaisuyksikköä. Sylinterin männänvarren puoleinen pää on kiinnitetty tähän katkaisuyksikköön, joka taas on kiinni toisen ohjauspyörän akselilla. Sylinterin peräpää on nivelöity rungon peräpään sivuun. Katkaisusylinterin sijainti laitteessa näkyy kuvassa 46.

Terän työntämiseen tarvittavan voiman arvioimiseksi suoritettiin yksinkertainen testi. Tässä käytettiin apuna henkilövaakaa. Vaaka asetettiin pöydälle sellaiselle korkeudelle, jolla kulmahiomakonetta normaalisti seisten käytetään. Tämän jälkeen vaakaa painettiin käsin siinä asennossa, jossa leikkaus kulmahiomakoneella tavallisesti tehtäisiin. Tällöin lukema vaakaa näytöllä oli 10 kg . Tämä vastaa siis pyöreästi 100 N suuruista voimaa. Vertailun vuoksi kokeiltiin myös tilannetta, jossa vaakaa työnnettiin niin suurella voimalla kuin se katkaisuasennosta vain ilman suurta vaivaa oli mahdollista. Tässä tilanteessa vaakaa näytön lukema oli 30 kg . Tarvittava katkaisuvoima on siis noin 300 N . Nivelmekanismista johtuen sylinterin voima ei ole suoraan terää työntävä voima. Terää työntävä voima saadaan kuitenkin helposti ratkaistua laitteen geometriasta.

Riittävä voima saadaan aikaiseksi 32 mm sylinterin männän halkaisijalla. Nivelmekanismiin vaatima sylinterin iskunpituus on löydetty kokeilemalla 3d-mallissa erilaisia iskunpituuksia. Sylinterin ääriimitat tulevat olla sellaiset, että terä on sylinterin kiinni

ollessa riittävän kaukana paalusta ja jonkin verran paalun läpi sylinterin ollessa auki. Sylinterin iskunpituudeksi valittiin lopulta 50 mm, joka on standardimallin iskunpituus.

Valittu sylinteri on valmistaja SMC:n malli CM2E32-50SZ. Se on alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettu jousipalautteinen yksitoiminen sylinteri. Kun sylinterille ei ohjata painetta, se irrottaa jousen vaikutuksesta terän paalusta. Tärkeimpiä valintaperusteita sylinterityypille olivat keveys, ruostumaton materiaali, toimivuus ilman voitelua ja saatavuus monilla eri männän halkaisijoilla ja iskun pituuksilla. Tämän lisäksi sylinterin moninaiset kiinnitysvaihtoehdot olivat tärkeitä. Valitussa sylinterissä männänvarren päässä on uroskierre ja sylinterin peräpäässä haarukkavipu. Kuvassa 49 on näytetty sylinterin teknisiä tietoja ja valitun sylinterin 3d-malli. Valitun sylinterin massa on noin 0,5 kg. Sylinterille päätetyllä suunnittelunopeudella (100 mm/s) ilmankulutus normaalilitroina minuutissa on 33,4 l/min. Laitteen toiminnan kannalta katkaisusylinterin nopeudella ei ole paljoa väliä. Laitteen paalun ympäri pyörimiseen verrattuna terän paalun pintaan työntymiseen kuluva aika on lähes merkityksetön. Tämän takia suunnittelunopeus on valittu melko pieneksi. Nopeuden säätämiseksi sylinterin eteen asetetaan vielä säädettävä kuristin.

Specifications					
Bore size (mm)		20	25	32	40
Action		Single acting, Spring return/Single acting, Spring extend			
Type		Pneumatic			
Cushion		Rubber bumper			
Fluid		Air			
Proof pressure		1.5 MPa			
Maximum operating pressure		1.0 MPa			
Minimum operating pressure		0.18 MPa			
Single acting, Spring return		0.23 MPa			
Single acting, Spring extend		0.23 MPa			
Ambient and fluid temperature		Without auto switch: -10°C to 70°C With auto switch: -10°C to 60°C (No freezing)			
Lubrication		Not required (Non-lube)			
Stroke length tolerance		+0.4 0 mm			
Piston speed		50 to 750 mm/s			
Allowable kinetic energy	(Male thread)	0.27 J	0.4 J	0.65 J	1.2 J
	(Female thread)	0.11 J	0.18 J	0.29 J	0.52 J

Standard Strokes	
Bore size (mm)	Standard stroke (mm)
20	25, 50, 75, 100, 125, 150
25	25, 50, 75, 100, 125, 150
32	25, 50, 75, 100, 125, 150, 200
40	25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250

Kuva 49. SMC:n jousipalautteisen sylinteriperheen CM2 teknisiä tietoja ja valitun CM2E32-50SZ sylinterin 3d-malli (perustuu lähteeseen SMC Air Cylinder Series CM2).

Katkaisusylinterille on laskettu myös lateraalin kuorman kesto ja sallittu kineettinen energia. Lateraalin kuorman kesto tarkoittaa että männänvarrtta ei saa kuormittaa sen pituussuuntaan nähden kohtisuorasti liian suurella voimalla. Kineettinen energia liittyy sylinterin liikkumisnopeuteen ja liikutettavan kuorman massa.

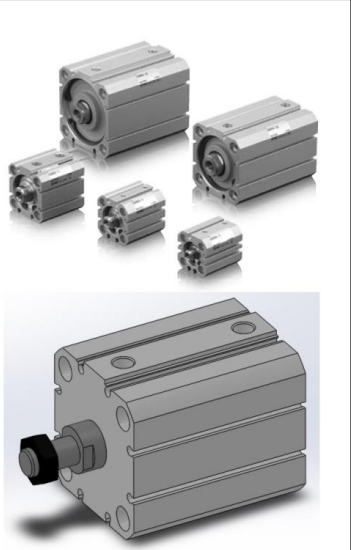
6.2 Laitteen paalun ympärille kiristävä sylinteri

Laitteen paalun ympärille kiristävää paineilmasylinteriä kutsutaan tässä työssä kiristys-sylinteriksi. Sen tehtävänä on nimensä mukaisesti kiristää laite tiukasti paalun ympärille. Tällöin laitetta on turvallista käyttää ja leikkaukselle on hyvät edellytykset. Kiristys-sylinteri sijaitsee rungon perässä. Sylinterin männänvarsi on kiinnitetty rungon sisällä olevaan kiristyskelkkaan. Sylinterin rungon etulevy on kiinnitetty laitteen rungon taka-levyyn. Kiristys-sylinterin sijainti laitteessa näkyy kuvassa 46.

Kiristys-sylinterin mitoitus varten tuotteesta on laadittu yksinkertaistettuja vapaakappalekuvia. Näiden avulla on saatu arvio kolmirivisen ketjun suuntaiselle voimalle ja sitä kautta voima, jolla sylinterin tulee tehdä kiristys. Riittävä kiristysvoima saadaan aikaan sylinterillä, jonka männän halkaisija on 50 mm. Sopiva iskun pituus on arvioitu siten, että ennen kiristystä ketju on kaikkialta paalun pinnasta 10 mm irti. Lopulta päädyttiin iskupituuteen 35 mm, joka on standardi-iskunpituus.

Specifications		
Type	Pneumatic (Non-lube)	
Action	Double acting, Single rod	
Fluid	Air	
Proof pressure	1.5 MPa	
Maximum operating pressure	1.0 MPa	
Minimum operating pressure	0.05 MPa (ø20 to ø63), 0.03 MPa (ø80, ø100)	
Ambient and fluid temperature	Without auto switch: -10 to 70°C (No freezing) With auto switch: -10 to 60°C (No freezing)	
Cushion	Rubber bumper on both end	
Stroke length tolerance ^{Note)}	+1.0 0 mm	
Mounting	Through-hole/Both ends tapped common	
Piston speed	ø20 to ø63	50 to 500 mm/s
	ø80, ø100	50 to 300 mm/s

Standard Stroke	
Bore size (mm)	Standard stroke (mm)
20 to 63	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 125, 150
80, 100	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 125



Kuva 50. SMC:n kaksitoimisen kompaktin C55 sylinterituoteperheen teknisiä tietoja ja valitun sylinterin C55B50-35M 3d-malli (perustuu lähteeseen SMC Compact Cylinder Series C55).

Valitun sylinterin valmistaja ja malli ovat SMC ja C55B50-35M. Valittu sylinteri on valmistettu suurimmaksi osaksi alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä. Se on kaksitoiminen, koska ketjun avaus ja kiristys tulee pystyä ohjaamaan erikseen. Sylinteri kuuluu SMC:n kompakteihin sylintereihin. Se on iskupituutensa nähden hyvin lyhyt sylinteri, mikä helpottaa laitteen rungon suunnittelemista mahdollisimman sieväksi. Valinta-perusteet kiristys-sylinterille olivat samat kuin katkaisusylinterille. Katkaisusylinterin tapaan männänvarren päässä on uroskierre, mutta se eroaa rungon päätyjen kiinnityksessä. SMC:n kompakteissa sylintereissä rungon etu- ja takaosan saa kiinnitettyä neljällä ruuvilla. Valmistettavassa laitteessa käytetään etuosan kiinnitystä. Kuvassa 50 on esitetty sylinterin teknisiä tietoja ja valitun sylinterin 3d-malli.

Valitun sylinterin massa on 0,72 kg. Kiristyssylinterille on katkaisusylinterin tapaan tarkastettu lateraalin kuorman kesto ja sallittu kineettinen energia. Suunnittelunopeudella (100 mm/s) ilmankulutus normaalilitroina minuutissa on 68,5 l/min. Kiristyssylinterin nopeudella ei ole laitteen toiminnan kannalta suurta merkitystä. Jopa laitteen pienimmällä sallitulla nopeudella sylinterin liike tapahtuu alle sekunnissa. Tämän takia suunnittelunopeus on valittu melko hitaaksi. Nopeuden säätämiseksi sylinterin eteen asetetaan säädettävä kuristin.

6.3 Terää pyörittävä moottori

Terää pyörittävää paineilmamootoria kutsutaan suunniteltavassa tuotteessa katkaisumoottoriksi. Katkaisumoottori on kiinnitetty katkaisuyksikön levyyn, jota liikuttaa katkaisusylinteri. Katkaisumoottorin akselille on kiinnitetty laikka erikseen suunnitellun laikan liitospalan ja kulmahiomakoneille vakioitujen mutterin ja aluslevyn avulla. Katkaisumoottorin sijainti laitteessa näkyy kuvassa 46.

Katkaisumoottorilta vaaditaan samantapaisia suoritusarvoja kuin kulmahiomakoneelta. Taulukossa 8 on esitetty viiden erilaisen kulmahiomakoneen arvoja. Valmistajan ilmoittaman tehon ja vapaan kierrosnopeuden avulla on laskettu momentti. Tämä ei ole leikkaustilanteen momentti, mutta se on helppo laskea ja siitä saadaan arvio momentin suuruusluokasta. Laikan koko ilmoittaa, minkä kokoista laikkaa kyseisellä kulmahiomakoneella on tarkoitus käyttää.

Taulukko 8. Eräiden kulmahiomakoneiden suoritusarvojen vertailua (Makita 2014).

	Kulmahiomakone 1	Kulmahiomakone 2	Kulmahiomakone 3	Kulmahiomakone 4	Kulmahiomakone 5
Teho (W)	720	840	1100	2000	2 600
Pyörimisnopeus (rpm)	11 000	11 000	11 000	6 600	6 600
Laikan halkaisija (mm)	125	125	125	230	230
Momentti (Nm)	0,6	0,7	1,0	2,9	3,8

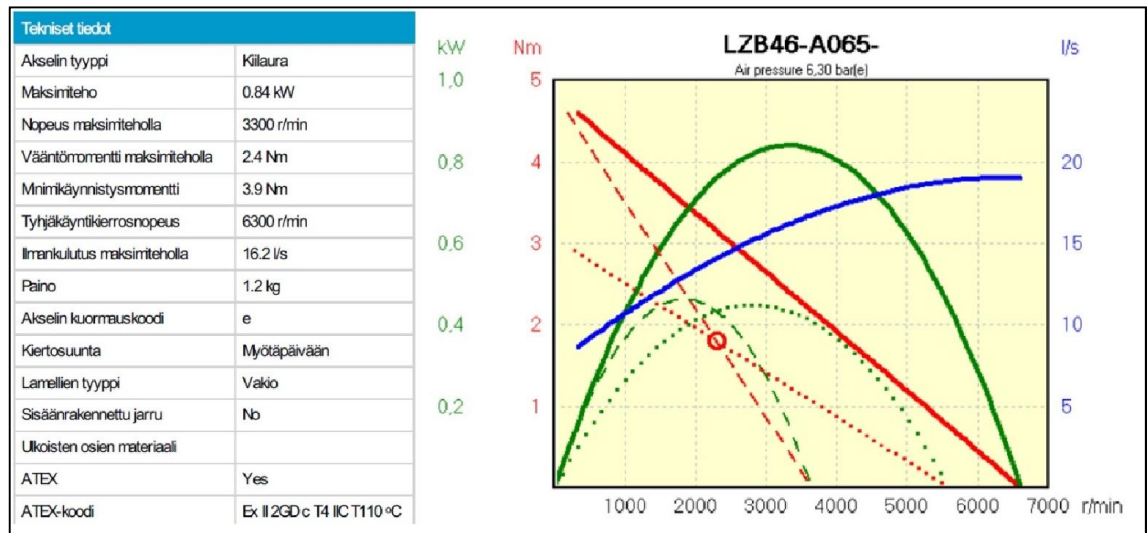
Kulmahiomakoneiden pyörimisnopeuksien ja laikkojen halkaisijoiden suhde perustuu laikkojen suurimpiin sallittuihin kehänopeuksiin. Yleinen laikoille sallittu suurin kehänopeus on 80 mm/s (Würth 2016). Tämän avulla voidaan laskea taulukossa 9 esitetyt suurimmat sallitut pyörimisnopeudet erikokoisille laikoille.

Taulukko 9. Suurimmat sallitut pyörimisnopeudet erikokoisille laikoille (perustuu lähteeseen Würth).

Pyörimisnopeus (rpm)	15 300	13 300	12 250	8 500	6 650
Laikan halkaisija (mm)	100	115	125	180	230

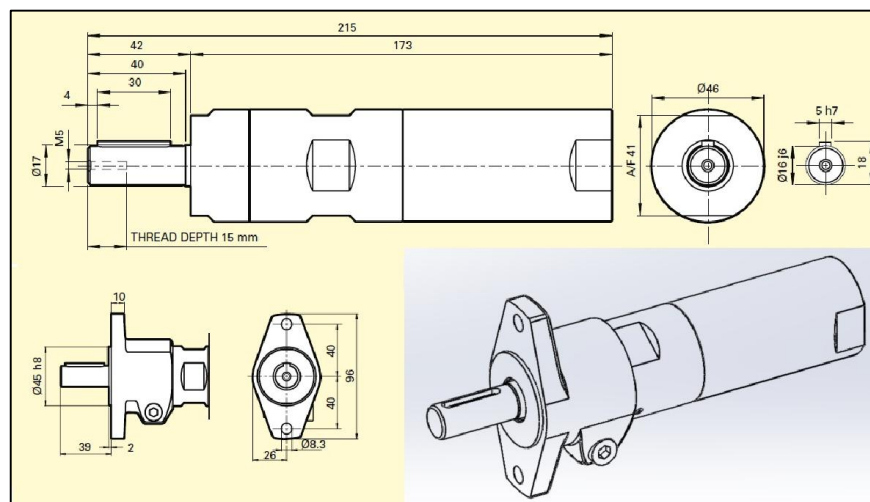
Laitteen katkaisumoottoriksi on valittu Atlas Copco:n malli LZB46-RL-A065. Tämä on planeettavaihteistolla varustettu paineilmamoottori. Moottorin valinnassa kriteerinä oli sen saatavuus ruostumattomana, vaikka prototyypissä käytetäänkin korroosion kestävästä alumiinista ja nitrokarburoidusta teräksestä valmistettua versiota. Syynä tähän on ruostumattoman moottorin korkeampi hinta. Kun verrataan saatavilla olevia ruostumattomia paineilmamoottoreita taulukon 8 kulmahiomakoneiden arvoihin, jäi ainoaksi mahdollisuudeksi valita jokin Atlas Copco:n 840 W:n tehoisista moottoreista. Tämä on suurin teho, jota ruostumattomista paineilmamoottoreista on tarjolla. Saman tehoisia moottoreista on saatavissa useilla eri nopeuksilla ja momenteilla. Momentti ja pyörimisnopeus käyttäytyvät siten että, mitä suurempi pyörimisnopeus moottorilla on, sitä pienempi on sen momentti. Pyörimisnopeus huomioiden järkeviksi vaihtoehdoiksi jäi jäljelle mainitun teholuokan suurimman ja toiseksi suurimman pyörimisnopeuden omaavat mallit. Kun kuitenkin otetaan huomioon taulukon 9 osoittamat laikkojen sallitut maksimipyörimisnopeudet ja riittävä momentti laikalle veden alla toimimista varten, jää vaihtoehdoksi enää toiseksi suurimmalla nopeudella pyörivä malli. Nopein malli pyörii vapaana liian nopeasti (21 500 rpm) jopa pienimmälle laikalle eikä sen momentti riitä pyörittämään laikkaa veden alla. Valittu laikka on halkaisijaltaan 125 mm.

Kuvassa 51 on näytetty valitun katkaisumoottorin tekniset tiedot vasemmalla sekä suorituskäyrästä oikealla. Käyrästä tulee tulkita seuraavasti; vihreä on teho, punainen on momentti ja sininen ilmankulutus. Tehon yksikkö on kW, momentin Nm ja ilmankulutuksen l/s. Ilmankulutus on valmistajan mukaan normaalilitroja minuutissa. Moottoria voidaan rajoittaa kuristamalla ja painetta säätämällä. Kuvan 51 oikeanpuolen käyrästä pitkätkatkoviivat kuvaavat tilannetta, jossa moottori on äärimmilleen kuristettu ja pistekatkoviiva tilannetta, jossa moottori on painesäädetty äärimmilleen. Kuvaaja on luotu Atlas Copco:n paineilmamoottoreiden valintaan suunnitellulla ohjelmalla, mikä on heidän kotisivuillaan ilmaiseksi ladattavissa.



Kuva 51. Atlas Copco:n paineilmamoottorin LZB46-RL-A065 teknisiä tietoja ja suorituskäyrästä (perustuu lähteisiin Atlas Copco LZB46 A065-11: Paineilma-moottori, planeettavaihteistolla ja Atlas Copco Selection tool program)

Oleellinen valintaperuste katkaisumoottorille oli pieni koko ja suuri teho-painosuhte. Myös aikaisemmin todettu ruostumattoman moottorin mahdollisuus on tärkeä kriteeri. Muita valintaan vaikuttavia seikkoja olivat kiinnitysmahdollisuus laipalla, toimiminen ilman voitelua ja suoritusarvojen säätömahdollisuudet. Valitun moottorin massa on 1,2 kg ja sen ilmankulutus normaalilitroina minuutissa on 972 l/min. Kaikista toimilaitteista katkaisumoottori kuluttaa selkeästi eniten ilmaa. Myös tämän toimilaitteen edessä on säädettävä kuristin. Kuvassa 52 näkyy valitun katkaisumoottorin mittapiirustus ja isometrinen kuvanto sen 3d-mallista. Valitussa mallissa on kuvan vasemmassa alakulmassa näkyvä laippa.



Kuva 52. Valitun katkaisumoottorin LZB46-RL-A065 mittapiirros ja isometrinen kuvanto (perustuu lähteeseen Atlas Copco Air Motors)

Tärkeä osa moottorien mitoituksessa on tarkistaa niiden akselleille sallitut kuormat. Nämä kuormat liittyvät moottorin laakereiden kestoan. Moottorivalmistajat ilmoittavat

heidän laakereillensa sallitut kuormat. Atlas Copco ilmoittaa ohjeissaan moottorin akselille sallitut radiaali- ja aksiaalikuormat käyrästönä. Vapaakappalekuvista lasketut kuormat ovat huomattavasti pienempiä kuin mitä moottorille sallitaan, joten moottori on tässä suhteessa sopiva.

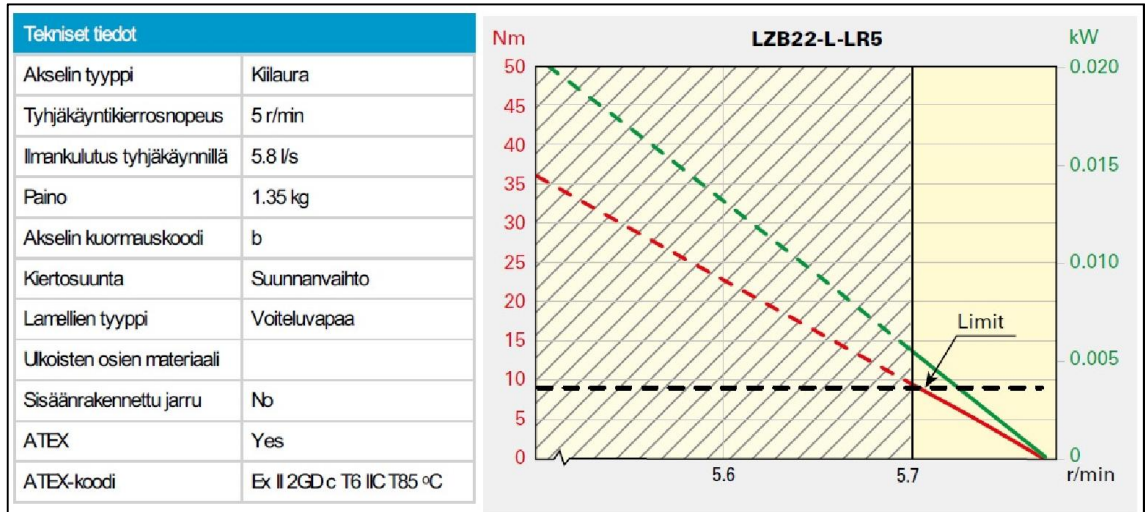
6.4 Laitetta paalun ympäri pyörittävä moottori

Laitetta paalun ympäri pyörittävää paineilmamoottoria kutsutaan tässä työssä kiertomoottoriksi. Kiertomoottori sijaitsee rungon sisällä liikkuvan kiristyskelkan päällä kuvan 46 mukaisesti. Se on kiinni tässä laippakiinnityksellä. Moottorin akselille on kiinnitetty erikseen valmistettava liitosakseli, jolla ketjupyörä sijaitsee.

Kiertomoottorilta vaadittavan pyörimisnopeuden selvittämiseksi tehtiin katkaisutesti. Tämä avulla pyrittiin saamaan arvio katkaisunopeudesta pinta-alaa kohti. Tässä testissä kulmahiomakoneella katkaistiin paalua, jonka halkaisija oli 90 mm ja seinämänvahvuus 3,2 mm. Paalu katkaisuja suoritettiin useita ja näistä laskettiin katkaisuun kuluva keskimääräinen aika. Tätä verrattiin katkaistuun pinta-alaan, jonka perusteella saatiin lasketua katkaisunopeus pinta-alaa kohti. Saatua arvoa käytettiin paalukoolle, jota tultaisiin käyttämään prototyypin testaamisessa. Tämän avulla saatiin ratkaistua kiertomoottorilta vaadittava kierrosnopeus. Tämän laskun perusteella vaadittu kierrosnopeus on 2,1 *l/min*, mikä on todella hidas pyörimisnopeus. Vaadittuun kierrosnopeuteen vaikuttaa oleellisesti ketjupyörän jakohalkaisija. Ketjupyörän koko on valittu sellaiseksi, että voidaan järkevästi valmistaa kiinnitettäväksi moottorin akselin jatkoksi.

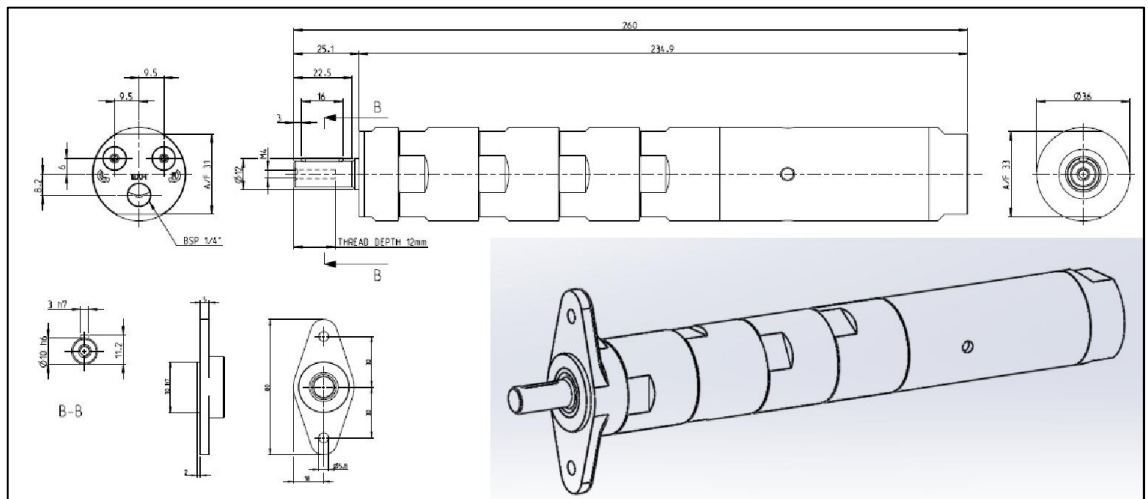
Vaadittu momentti ratkaistiin katkaisutilannetta kuvaavasta yksinkertaistetusta vapaakappalekuvasta. Tässä kiertomoottorilta vaadittavaan momenttiin vaikuttavat tekijät ovat katkaisumoottorin momentti, laikan halkaisija ja ketjupyörän halkaisija. Momentti-vaatimus on hyvin vaatimaton; vain 0,7 *Nm*.

Kiertomoottoriksi valittiin Atlas Copco:n hitaasti pyörivistä moottoreista kaikkein hitain ruostumattomana saatava versio. Prototyypissä käytetään vastaavaa korroosion kestävästä alumiinista ja nitrokarburoidusta teräksestä valmistettua versiota kustannussyistä. Tämän moottorin malli on LZB22-L-LR5-11. Kyseessä on erikoismalli, jonka pyörimisnopeus on hidas ja lähes vakio. Valittu moottori ei pyöri aivan niin hitaasti kuin laskenta vaatii, mutta se on ainoa vaihtoehto, joka pyörii samassa suuruusluokassa. Hitaasti pyörivistä moottoreista on tarjolla suurempi- ja pienempimomenttista versiota, joista valittiin pienempi. Tämänkin maksimimomentti, 9 *Nm*, on jo turhan paljon, mutta kierrosnopeus on kuitenkin määräävä tekijä. Liian suuri momentti ei silti haittaa toimintaa. Kuvassa 53 on näytetty valitun kiertomoottorin tekniset tiedot sekä suorituskäyrästä. Moottorin edessä käytetään säädettävää kuristinta pyörimisnopeuden kontrolloimiseksi.



Kuva 53. Atlas Copco:n paineilmamoottorin LRB22-L-LR5-11 teknisiä tietoja ja suorituskäyrästä (perustuu lähteisiin Atlas Copco LRB22L LR5-11: Paineilmamoottori, planeettavaihteistolla ja Atlas Copco Air Motors)

Pyörimisnopeuden ja momentin lisäksi moottorin valintaan vaikuttivat pieni massa ja saatavuus laippakiinnityksellä. Myös toimiminen voitelemattomana oli oleellinen valintakriteeri. Valitun moottorin massa on 1,35 kg ja sen ilmankulutus normaalilitroina minuutissa on 348 l/min. Ilmankulutukseltaan kiertomoottori on tuotteen toiseksi eniten ilmaa kuluttava komponentti. Kuitenkin verrattuna katkaisumoottoriin kuluttaa se vain reilun kolmanneksen katkaisumoottorin tarvitsemasta ilmasta. Kuvassa 54 on esitetty valitun kiertomoottorin mittapiirustus ja isometrinen kuvanto sen 3d-mallista. Moottorin pitkä runko johtuu hitaasta pyörimisnopeudesta. Hitaan pyörimisnopeuden aikaansaamiseksi täytyy planeettavaihteisto toteuttaa useammassa kerroksessa.



Kuva 54. Valitun kiertomoottorin LRB22-L-LR5-11 mittapiirros ja isometrinen kuvanto (perustuu lähteeseen Atlas Copco LRB22-L-LR5-11 Mittapiirros)

Myös kiertomoottorin yhteydessä huomioitiin sallitut kuormat moottorin laakereille. Kiertomoottorin akselia radiaaliksi kuormittava voima on kiristyssylinterin vetävä voi-

voima. Tämä on jonkin verran suurempi kuin laakereille sallitut kuormat. Valmistaja on ilmoittanut sallittujen kuormien kuvaavan tilannetta, jossa moottori kestää 10 miljoonaa kierrosta. Moottorin laakerointia ei siis hajoisi välittömästi vaan kestäisi jonkin verran pienemmän määrän kierroksia. Kuormituksen kestosta halutaan kuitenkin olla varmoja. Tähän on päästy ulkoista laakerointia apuna käyttäen. Suuret radiaalikuormat siirretään pois moottorin akselilta. Tämä on toteutettu moottorin kelluvana kiinnityksenä, mikä tarkoittaa sitä, että pyörivä akseli, jolla ketjupyöräkin sijaitsee, on laakeroitu tukevasti runkoon. Tämä laakerointi vastaanottaa radiaalikuormat ja moottori siirtää vain momentin. Tällöin ei tarvitse valita moottoria, joka kestää suuret radiaalikuormat. Ulkoiset laakerit ovat moottoreiden hintaan nähden erittäin halvat, joten ne eivät lisää juurikaan laitteiston kokonaiskustannuksia.

6.5 Erikseen valmistettavat osat

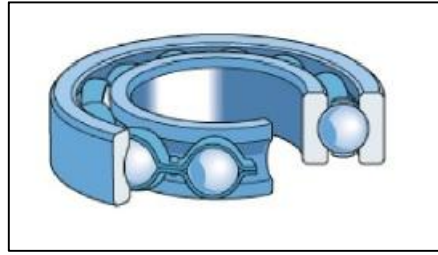
Tilattavien toimilaitteiden ja osien lisäksi laite koostuu monesta erikseen suunnitellusta konepajalla valmistetusta osasta. Näiden ja valittujen toimilaitteiden kokoonpanosta muodostuu varsinainen tuote.

Prototyypin runko on valmistettu levyistä, joiden materiaalina on käytetty terästä S355J2G3. Prototyyppiin ei siis käytetä ruostumatonta terästä. Laitteessa olevat akselit ovat valmistettu karkaistusta teräksestä MoC210M. Moottoreiden akseleiden kiilaliitoksissa käytettävät kiilat ovat valmistettu kiilateräksestä C 45 K.

Rungon valmistuspiirustuksia ei tässä työssä esitetä. Todettakoon kuitenkin, että esimerkiksi toimilaitteiden kiinnityksiä varten rungon osiin on tehty lukuisia kierteitä ja reikiä. Tämän lisäksi laakereiden kiinnitysten ja kiristyskelkan rungon sisällä liikkumisen varmistamiseksi useat osat ovat myös toleroitu ja koneistettu.

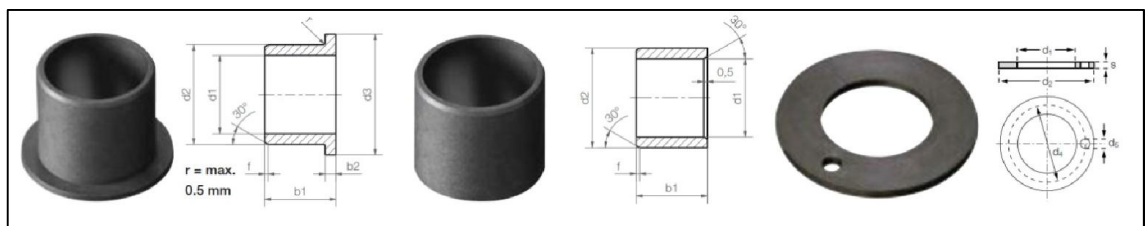
6.6 Laakerit

Laitteessa on käytetty laakereita useammassa paikassa. Kappaleessa 6.4 mainittiin kiertomoottorin akselia radiaalisti kuormittavien voimien siirtämistä ulkoisille laakereille. Nämä laakerit sijaitsevat rungon sisällä liikkuvassa kiristyskelkassa. Toinen sijaitsee ketjupyörän ylä- ja toinen alapuolella. Valitut urakuulalaakerit ovat SKF:n 61903-2RS1 ja 61807-2RS1. Nämä laakerit pystyisivät ottamaan vastaan paljon suurempia kuormia, kuin mitä laite niille kiristyessään muodosta, mutta tärkein valintaperuste näille laakereille oli koko. Ne tuli pystyä järkevästi sijoittamaan kiristyskelkan runkoon. Kuvassa 55 on näytetty osittainen poikkileikkaus SKF:n urakuulalaakerista.



Kuva 55. Osittainen poikkileikkaus SKF:n urakuulalaakerista (perustuu lähteeseen SKF Single row deep groove ball bearings)

Laitteessa on käytetty myös liukulaakereita. Nämä sijaitsevat ohjauspyörien akseleilla. Näille akseleille valittiin liukulaakerit, koska ne mahtuvat muihin laakerityyppeihin verrattuna hyvin pienempään tilaan, mutta kuitenkin kestävät riittävästi tilanteen kuormat ja nopeudet. Ohjausrullat pyörivät kiertomoottorin pyörimisnopeudesta johtuen hyvin hitaasti. Ohjausrullalla, jolla katkaisuyksikkö ei sijaitse, käytettiin kahta laippaliukulaakeraa. Toinen sijaitsee ohjausrullan ylä- toinen alapuolella. Ohjausrulla, jonka akselilla myös katkaisuyksikön levy sijaitsee, tuli laakeroida hieman monimutkaisemmin. Tämä johtuu siitä, että katkaisuyksikön ja ohjausrullan tulee pystyä pyörimään toisistaan riippumatta. Tämän takia tämän ohjausrullan akselilla on käytetty laippaliukulaakerin lisäksi myös holkki- ja paineliukulaakeraa. Liukulaakereiksi valittiin SKS:n iglidur-liukulaakerit. Nämä ovat valmistettu muovista. Tärkeimmät valintaperusteet olivat saatavuus monissa eri koissa niin laipallisena, holkilla varustettuna kuin painelaakerina. Myös riittävä pintapaineen kesto, halpa hinta ja toimiminen voitelemattomana olivat merkittävät tekijöitä valinnassa. Valitun laippa-, holkki- ja paineliukulaakerin mallit ovat GFM-1517-17, GSM-1517-10 ja GTM-1522-008 tässä järjestyksessä. Kuvassa 56 on esitetty SKF:n erityyppiset liukulaakerit.



Kuva 56. SKS:n laippa-, holkki- ja paineliukulaakeri (perustuu lähteeseen SKF The General Purpose Bearing - iglidur G)

6.7 Laikat

Karkeasti ottaen katkaisuun suunniteltuja laikkoja on saatavilla kahta eri tyyppiä. Nämä ovat katkaisulaikka ja timanttilaikka. Katkaisulaikalla tarkoitetaan perinteisiä abrasiiveja käyttävää laikkaa ja timantti on eräs superabrasiivi. Näitä esiteltiin tarkemmin kappaleessa 3.2.2. Teräkselle suunnatut katkaisulaikat maksavat vain muutaman euron, mutta ne kuluvat katkaistaessa verrattain nopeasti. Katkaisulaikkojen halkaisija siis pienenee katkaisun edetessä. Timanttilaikat maksavat muutamasta kympestä muutama sataan

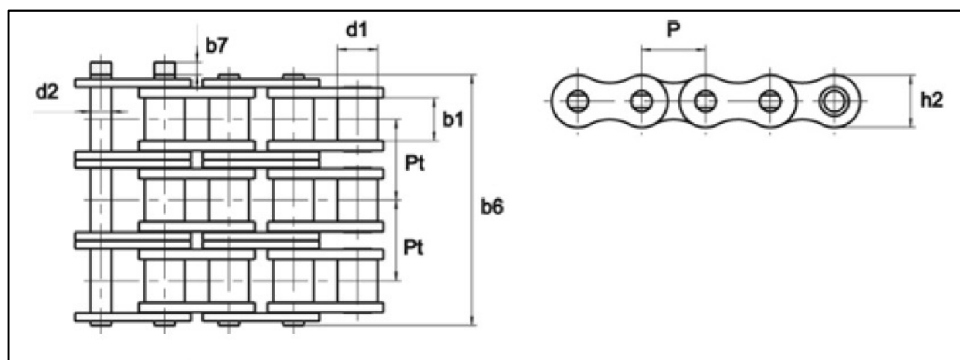
euroon riippuen niiden halkaisijasta ja materiaaleista, joita niillä voi katkaista. Timanttilaikkojen ulkokehällä on noin sentin timanttikehä, joka kuluu hyvin hitaasti. Prototyypin testejä varten hankittiin molempien tyyppisiä laikkoja. Kuvassa 57 on näytetty sekä katkaisulaikka että timanttilaikka. Laitteeseen valitun laikan halkaisija on 125 mm.



Kuva 57. Timanttilaikka (vasemmalla) ja katkaisulaikka (oikealla) (perustuu lähteeseen IKH Timanttilaikka ja IKH Katkaisulaikka)

6.8 Ketju

Laitteen käyttämällä ketjulla on kaksi tehtävää. Se välittää kiristyssylinterin kiristävän voiman paalun ympärille ja mahdollistaa laitteen pyörimisen paalun ympärille. Ketju kulkee kiristyskelkassa olevan ketjupyörän takaa, ohjausrullia pitkin ja paalun ympäri. Kolmirivistä ketjua päätettiin käyttää suuremman tartuntapinta-alan aikaansaamiseksi. Koska jo pienillä ketjuilla on laitteen toiminnalle riittävä murtokuorma, valitaan ketjun jaoksi 3/8". Tämä on monien ketjumyyjien pienin tarjoama koko. Suurempaa ketjua ei myöskään valita sen takia, että ne ovat painavampia. Pelkän murtokuorman perusteella ketju voisi olla yksirivinen, mutta se on liian kapea pitämään laite suorassa sen ollessa paaluun kiinnittyneenä. Ketjuksi valittiin korkean laadun Sedis 06B-3 Delta ketju liitoksella Numero 206. Kuvassa 58 on näytetty kolmirivisen ketjun kuvannot päältä ja sivulta. Jako näkyy siinä esitettynä p kirjaimella.

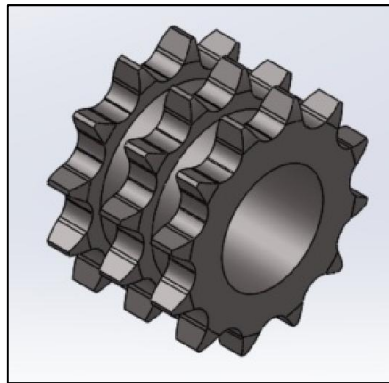


Kuva 58. Kolmirivinen ketju päältä ja sivulta (Konaflex Oy 2009)

6.9 Ketjupyörä

Ketjupyörä täytyy valita ketjulle sopivaksi. Tämän takia ketjupyöräkin on kolmirivinen ja sen jako on $3/8''$. Ketjupyörän tehtävänä on kiinnittyä ketjuun ja välittää kiertomoottorilta tuleva pyöriminen ketjulle ja täten mahdollistaa laitteen paalun ympäri kiertyminen. Ketjupyörä sijaitsee kiertomoottorin ulostuloakselilla rungon sisällä olevassa kiristyskelkassa. Se on kiinnitetty hitsaamalla erikseen valmistettavaan liitosakseliin. Tämä akseli on kiilaliitoksella kiinni kiertomoottorissa.

Ketjupyörän halkaisija haluttiin mahdollisimman pieneksi. Tämä ennen kaikkea sen takia, että laitteen kiertonopeus paalun ympäri saataisiin mahdollisimman pieneksi. Toki pienempi ketjupyörä on myös kevyempi. Toisaalta ketjupyörän tulee olla sen verran kookas, että se voidaan vaivattomasti valmistaa kiertomoottorin akselille liitettäväksi. Lopulta päädyttiin 12 hampaiseen levyketjupyörään. Tämän jakohalkaisija on $36,8 \text{ mm}$. Valitun levyketjupyörän tunnus on 3-R. $3/8''$ Z012 (06B-3). Kuvassa 59 on näytetty valitun levyketjupyörän 3d-malli.



Kuva 59. Ketjupyörän 3d-malli.

6.10 Vastusvastaventiilit

Laitteen molemman sylinterin ja moottorin kanssa käytetään vastusvastaventiiliä eli säädettävää kuristinta. Laitteessa on siis yhteensä 4 vastusvastaventiiliä. Näiden avulla voidaan säätää kunkin toimilaitteen nopeutta; sylinterien tapauksessa lineaariliikettä ja moottorien tapauksessa pyörimisnopeutta. Kuristimien säätöalueet ovat valittu siten, että ne täysin aukinaisena päästävät lävitseen ainakin kyseiselle laitteelle suunnitellun ilmamäärän.

Valituissa kuristimissa on uroskierre ja letkupikaliitin. Kierrepää liitetään suoraan toimilaitteen naaraskierteeseen. Kuristimen letkupikaliittimeen asetetaan letku, jolla ilma viedään edelleen seuraavalle laitteelle. Varsinainen säätö tapahtuu kiertämällä kuristimen päällä olevaa nuppia. Säädettyjen kierrosten määrä näkyy kuristimen päällä numeroina 0-12. Mitä suurempi tämä lukema on, sitä vähemmän kuristusta tapahtuu. Lait-

teessa on käytetty SMC:n vastusvastaventtiileitä. Taulukossa 10 on näytetty kullekin laitteelle valitut venttiilit.

Taulukko 10. Laitteen sylintereille ja moottoreille valitut vastusvastaventtiilit.

	Vastusvastaventtiilin malli
Katkaisusylinteri	AS2211FSG-01-10S
Kiristyssylinteri	AS2201FSG-01-10S
Katkaisumoottori	AS3211FSG-02-12S
Kiertomoottori	AS2211FSG-02-10S

Tärkein valintakriteeri oli riittävä tilavuusvirran läpäisy ja selkeä kuristuksen säätö. Kuristimet on myös helppo kiinnittää kiertämällä ja pikaliitintä käyttämällä. Mahdollisimman monta osaa haluttiin myös hankkia samalta valmistajalta, joten kuristimet valittiin samalta valmistajalta kuin sylinteritkin. Kuvassa 60 on näytetty SMC:n vastusvastaventtiilejä. Mitä suurempi kuristin on, sitä enemmän se läpäisee ilmaa.



Kuva 60. SMC:n vastusvastaventtiilejä (SMC Speed controller with indicator Series AS-FS).

6.11 Suuntaventtiilit

Laitteessa on yhteensä 4 suuntaventtiiliä. Kaksi näistä on käsin ohjattavia ja kaksi on paineohjautuvia. Tärkein valintakriteeri näille kaikille venttiileille olivat oikeat suuntasäätömahdollisuudet ja toimiminen riittävän isolla tilavuusvirralla. Toinen tärkeä kriteeri oli toimiminen ilman voitelua. Kaikkien valittujen venttiilien runko on alumiinia.

Kiristyssylinteriä ohjaavaa venttiiliä kutsutaan tässä työssä kiristysventtiiliksi. Sitä tulee pystyä ohjaamaan erikseen eteen ja taakse. Tämän takia sen täytyy olla 5/2-suuntaventtiili. Kiristyssylinterin ilmantarve on hyvin vaatimaton joten tämä kriteeri täyttyi helposti. Valitun sylinterin ilmanläpäisykyky normaalilitroina minuutissa on 650 l/min. Kiristyssylinteriä ohjaavaksi suuntaventtiiliksi valittiin Polarteknik:n malli A1MA173LL. Tämä on mekaanisesti ohjattava ja ohjaamattomana normaalisti suljettu. Se myös pysähtyy plus- ja miinusliikkeen ohjausasettoon, minkä takia ohjausvipua ei

tarvitse pitää pohjassa ohjausta tehdessä. Kiristyssylinterin suuntaventtiilin sijainti näkyy kuvassa 47, jossa on esitetty yksinkertaistettu pneumatiikkakaavio. Se ei ole laitteessa kiinni vaan sijaitsee sen ulkopuolella olevassa ohjausyksikössä.

Katkaisusylinteriä ja kahta moottoria ohjaavaa sekvenssiventtiiliä tulee pystyä yksinkertaisesti kytkemään vain päälle ja pois. Tämän takia siihen on valittu 3/2-suuntaventtiili. Tämän venttiilin tulee pystyä päästämään lävitseen kaikkien sekvenssissä olevien laitteiden tarvitsema tilavuusvirta, kuten pneumatiikka kaaviosta, kuvasta 47, voi nähdä. Valitun venttiilin läpäisemä virtaus on jo huomattavasti vaadittua enemmän, mutta kokoa pienempi sylinteri läpäisi liian vähän. Valittu sylinteri läpäisee normaalilitroina minuutissa jopa 3200 *l/min*. Valittu sylinteri on MetalWork Pneumatic:n malli MAV 43 LEB OO. Tämä on mekaanisesti ohjattava, joka ohjauksen yhteydessä lukittuu auki asentoon. Tällöin ohjausvipua ei tarvitse painaa jatkuvasti, mikä tekee sen käytöstä vaivatonta. Kiristysventtiilin tapaan sekvenssiventtiili ei sijaitse laitteessa kiinni vaan samassa ohjausyksikössä kiristysventtiilin kanssa.

Laitteessa on myös kaksi paineohjautuvaa suuntaventtiiliä. Sekvenssiventtiilin tapaan näidenkin venttiilien tulee pystyä kytkeytymään vain päälle ja pois. Pneumatiikkakaaviosta, kuvasta 47, voi nähdä että toisen paineohjautuvan venttiilin tulee kyetä läpäisemään kiertomoottorin tarvitsema ilmamäärä ja toisen tämä ilmamäärä ja katkaisusylinterin tarvitsema ilmamäärä. Katkaisusylinteri tarvitsee kuitenkin kiertomoottoriin verrattuna hyvin vähän ilmaa, joten venttiilit ovat valittu samoiksi. Valitut venttiilit läpäisevät normaalilitroina minuutissa 960 *l/min*. Tämä toteuttaa helposti vaaditun ilmantarpeen. Paineohjatut venttiilit ovat Polarteknik:n mallia 3122-25-NC-3. Se valittiin tarkoituksella samalta valmistajalta kuin kiristysventtiili. Valittu paineohjautuva venttiili on normaalisti suljettu ja avautuu ohjauspaineen ylittäessä 1,5 *bar* paineen. Paineohjatut venttiilit ovat ruuviliitoksella kiinni laitteen kantokahvassa.

Valitut suuntaventtiilit ovat esitetty kootusti taulukossa 11. Vasemmalla kuvassa on kiristysventtiili, keskellä sekvenssiventtiili ja oikealla paineohjautuva venttiili. Kuvassa on esitetty niiden havainnollistava mittapiirros, pneumaattinen piirrosmerkki, malli ja läpäisykyky normaalilitroina minuutissa.

sisälle. Tämä suojaa kaikkia näitä letkuja, pitää ne yhdessä ja siitä voidaan myös nostaa koko laite.

Laitteessa letkuja on kiinnitetty monin tavoin. Ensinnäkin laitteen ulkopuolelta tulevat letkut ovat laitteen rungossa kiinni läpivientiliittimillä. Nämä ovat kierteellisiä osia, jotka ovat kiinnitetty kantokahvassa oleviin reikiin. Näiden avulla laitteen sisällä olevat letkut eivät liiku, vaikka ulkopuolisista letkuista vedettäisiinkin. Läpivientiventtiili toimii siis vedon poistona. Toiseksi laitteisiin ei voi liittyä suoraan letkulla, koska niiden sisään- ja ulostulot ovat toteutettu naaraskierteillä. Näihin väleihin on tarvittu kulmayhteitä, t-yhteitä ja suoria liittimiä. Letkujen välisissä liitoksiin taas on tarvittu supistava liitos, y-liitos sekä useita suoria liittimiä ja kulmapaloja. Letkun välisissä liitoksissa on käytetty kulmapaloja, koska letkun taivutussäde on liian suuri toimilaitteiden välisiin etäisyyksiin ja sijainteihin nähden. Kaikki liittimet ovat valittu samalta valmistajalta kuin käytetyt sylinteritkin.

Ennen laitteen molempia sylintereitä ja moottoreita on käytetty painemittareita. Näillä voidaan seurata laitteen toimintaa paremmin erityisesti prototyypin testeissä. Laitteessa on käytetty kahta erikokoista painemittaria. Nämä ovat SMC:n valmistamat mallit G46-10-02 ja G33-10-01. Molempien näiden paineasteikko on 0-10 *bar*.

Molempien moottoreiden kanssa on käytetty äänenvaimentimia. Nämä ovat valittu niille sallitun tilavuusvirran mukaisesti. Katkaisumoottorin perässä on yksi äänenvaimennin ja se on SMC:n malli AN40-04. Kiertomoottorin perässä on kaksi äänenvaimenninta ja ne ovat SMC:n mallia AN10-01.

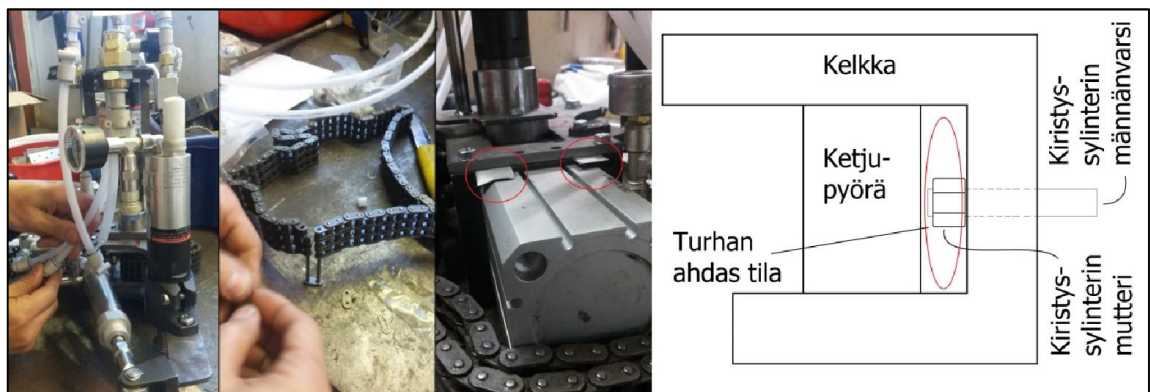
Kaikki toimilaitteet ovat kiinnitetty runkoon ruuviliitoksella. Tällöin ne voidaan myös irrottaa helposti esimerkiksi huollon takia. Laitteessa on käytetty sinkittyjä kiinnitysosia. Myös rungon ylälevyn sekä ohjausrullien akseleissa on käytetty ruuviliitosta.

7. PROTOTYYPIN TESTIT

Tuotekehitysprojekteissa suunnittelu vaatii rinnalle testejä. Pelkästään mitoituslaskelmia ja 3d-malleja tekemällä ei voida varmistua laitteen toiminnasta. Uudet laitteet tulevat aina testata käytännössä. Tätä varten on tässäkin projektissa suoritettu prototyypille erinäisiä testejä. Aluksi tässä kappaleessa esitellään testejä yleisellä tasolla ja sen jälkeen käydään tehdyt testit vaiheittain läpi. Lopuksi on vedetty yhteen tärkeimpiä testeissä opittuja asioita.

7.1 Testivalmistelut

Valittu konepaja valmisti teräsosat ja kokoonpani laitteen. Pneumatiikkaosista myös paineohjatut venttiilit, säädettävät kuristimet, painemittarit ja äänenvaimentimet olivat kiinnitetty paikoilleen konepajan puolesta. Tuotteen suunnittelurytityksen henkilöistä koostuva testausryhmä jatkoi tästä tekemällä piirustusten mukaiset tarvittavat toimilaitteiden väliset letkuliitokset. Liitokset toteutettiin 90 asteen kulmaliittimillä, jotka toimivat pikaliittimillä. Näiden asennus näkyy kuvassa 61 ensimmäisenä vasemmalla. Kulmaliittimiä käytettiin sen takia, että letkujen taivutussäde oli liian suuri toimilaitteiden keskinäisiin etäisyyksiin ja suuntiin nähden. Kulmapaloilla on mahdollista tehdä suunnan muutoksia pienemmässä tilassa kuin taivuttamalla letkua. Tämän jälkeen kolmirivinen ketju asetettiin ketjupyörän hampaille ja ketju suljettiin liitoksella kuten kuvan 61 toisesta kuvasta vasemmalla voi nähdä. Ketjun pituus myös säädettiin sopivaksi testin paalulle.



Kuva 61. Letkun kulmapalojen kiinnitys, ketjun pikakiinnityksen sulkeminen, lisätyt simmilevyt ja kiristyskelkan tila-ahtaus (vasemmalta oikealle).

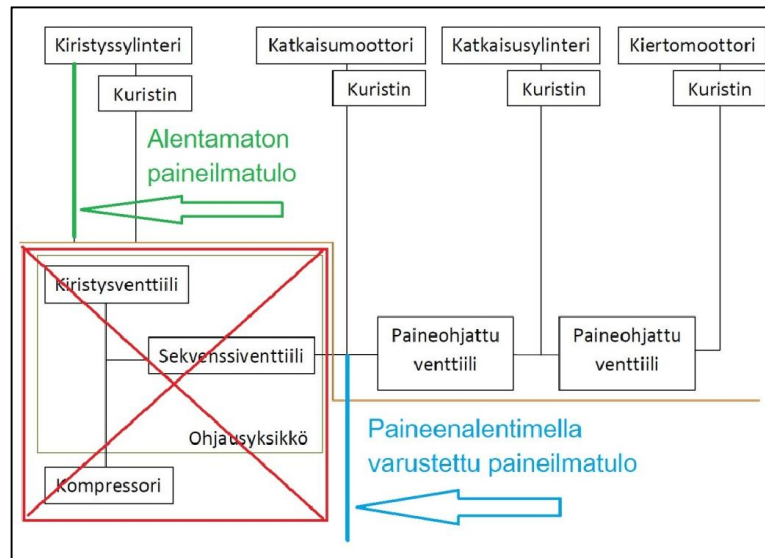
Ennen kuin laitetta edes testattiin paineen kanssa, huomattiin jo muutama muutostarve. Ensinnäkin rungon takalevyn ja yläkannen väliin tuli lisätä simmilevyt, jotta kiristys-

kelkka pääsi liikkumaan riittävän vaivattomasti. Simmilevyt näkyvät kuvan 61 kolmanesta kuvasta vasemmalta. Ilman simmilevyjä kiristyskelkka jäi liian tiukasti rungon sisään. Toiseksi ketjun asentamiselle oli kiristyskelkassa melko niukasti tilaa. Kiristyskelkan takaosaan tulee kiinni kiristyssylinterin männänvarsi mutterilla. Tämä on hyvin lähellä ketjupyörää. Kyseinen tilanne näkyy kuvan 61 oikeassa reunassa. Prototyypissä ketju onnistuttiin kuitenkin saamaan paikalleen asentamalla se ketjupyörän hampaille ja ajamalla se kiertomoottoria käyttämällä ketjupyörän takaa. Kätevämpää kuitenkin olisi, jos ketju voitaisiin pujottaa kiristyskelkan ja ketjupyörän välistä. Myös kantokahvassa olevaa kiertomoottorin reikää tuli hieman suurentaa. Tämä puute oli helppo korjata viilalla.

7.2 Testipaikka ja -laitteisto

Prototyypin testit suoritettiin erään maatilan konehallissa. Paikka oli sopiva, koska työkaluja oli asentamista ja muutoksia varten helposti käytettävissä ja hallissa oli sisäänrakennettu paineilmajärjestelmä. Kompressori oli Gardner Denver-merkinen ruuvikompressori. Tämä kompressori tuotti vaivatta vaadittavan tilavuusvirran. Tästä järjestelmästä voitiin hyödyntää testiä varten kahta erillistä paineilmatuloa, jotka saatiin kumpikin avattua ja suljettua erikseen sulkuventtiileillä. Toisesta tuli järjestelmän paine alentamatta. Sen arvo oli noin 10 bar. Toiseen paineilmatuloon oli liitetty mittarilla varustettu paineenalennin. Tämän avulla katkaisulaitteen joitakin toimilaitteita voitiin testata eri tulopaineen arvoilla.

Testien paineilmakeaavio ei ole sama kuin aikaisemmin kappaleessa 5.4.3 kuvassa 47 esitetty. Aikaisemmin esitetystä paineilmakeaaviosta, tässä testissä ei ollut käytössä kompressorin jälkeistä kiristysventtiiliä eikä sekvenssiventtiiliä. Tämä on esitetty kuvan 62 yksinkertaistetussa paineilmakeaaviossa punaisella ruksilla. Tämän paineilmakeaavion pohja on sama kuin aikaisemmin kuvassa 47 esitetty, mutta toimilaitteet ovat symbolien sijaan esitetty sanallisesti. Testi saatiin suoritettua todellista toimintatilannetta melko hyvin vastaten kahta paineilmatuloa hyödyntäen. Alentamaton paineilmatulo, kuvassa 62 vihreä linja, kiinnitettiin suoraan kiristyssylinterin männänvarrenpuoleiseen liittimeen. Kun tähän linjaan päästetään paine, aiheuttaa se sylinterin miinus-liikkeen eli ketjun kiristyksen paalun ympärille. Suunnitellun tuotteen paineilmakeaavion mukaisella kytkennällä ketju voitaisiin myös löysätä suuntaventtiilin asentoa muuttamalla, mutta tässä testissä tämä toteutettiin yksinkertaisesti sulkemalla alentamaton paineilmatulo. Tällöin ketju pikku hiljaa löystyi. Alennuksella varustettu paineilmatulo, kuvassa 62 sininen linja, taas kytkettiin suoraan pneumaattikakaaviossa esitettyyn sekvenssikytkentään. Toisella linjalla siis kiristetään laite paalun ympärille ja toisella käynnistetään sekvenssi. Kuvan 62 esittämässä pneumaattikakaaviossa vasemmalla ylhäällä on kiristyssylinteri jolle syötetään alentamaton paine. Loput kolme toimilaitetta jakavat alennetun paineen.



Kuva 62. Prototyypin testin pneumatiikkakaavio jossa näkyy testin alentamaton paineilmatulo (vihreä), paineenalentimella varustettu paineilmatulo (sininen) ja laitteisto jota ei ole testissä (punainen).

Katkaisutesti tehtiin vaakasuuntaiselle paalulle. Näin toimittiin, koska testijärjestelyt olisi ollut paljon vaikeampi järjestää pystysuuntaiselle paalulle. Testissä noin neljä metriä pitkä paalu makasi kahden peltitynnyrin päällä. Jotta paalu pysyisi tynnyrien päällä, oli siihen kiinnitetty kiilaavat puupaalut kiristysremmeillä. Paalun kiinnitysjärjestely on esitetty kuvassa 63 vasemmalla puolella. Käytetyn paalun halkaisijaksi ja seinämänvahvuudeksi mitattiin 320 mm ja 6 mm kuten kuvan 63 oikealta puolelta voi huomata. Tätä kokoa käytetään siltojen työsilloissa yleisesti. Paalun materiaali oli S355J2H.



Kuva 63. Paalun vaakasuuntainen kiinnitys (vasemmalla) ja paalun poikkileikkaus (oikealla).

7.3 Ensimmäinen testi: ilman painetta

Ennen varsinaisia paineistettuja testejä paalunkatkaisulaitteen toiminta testattiin niin sanotusti kuivana. Sylinterien ja rungossa olevan kelkan liikkuvuus tarkastettiin niitä käsin liikuttellessa. Myös tehtyjen letkuliitosten joustojen riittävyys varmistettiin, sillä

katkaisusylinterin liikkeessa letkujen täytyy antaa hieman periksi. Tämä johtuu siitä, että letkujen toinen pää on kiinni kiinteässä rungossa ja toinen liikkuvassa sylinterissä. Tämän lisäksi laitteen yleinen kunto tarkastettiin silmämääräisesti.

7.4 Toinen testi: kiristyminen

Paalunkatkaisijan eri toiminnallisuuksia testattiin mahdollisuuksien rajoissa erikseen. Kaikkia toimilaitteita, kahta paineilmamoottoria ja -sylinteriä, ei siis ensimmäisessä paineistetussa testissä kytketty päällä. Päätettiin kokeilla ensin laitteen kiristyminen paalun ympärille. Laitte nostettiin käsin vaakasuuntaisen paalun päälle kuvan 63 vasemman puolen mukaiseen asentoon. Koska laite painoi noin 13 kg, onnistui nostaminen vaivatta yhdeltä henkilöltä. Ennen paineen kytkemistä kiristysylinteri on täysin ulkona ja ketju on löysänä. Tässä asennossa ketju on sen verran löysä, että laite saadaan asetettua paalun ympärille avaamatta ketjua, vaikka paalu ei olisikaan aivan tasainen. Kun paine kytkettiin kiristysylinterin männänvarren puoleiseen tuloon, kiristyi se nopeasti, noin sekunnissa, ja asettui jäämäkästi paalun kiinni. Kuvassa 64 näkyy laite kiristyneenä paalun päällä. Laitetta saattoi jopa yrittää käsin heilutella, mutta silti kiinnitys pysyi tiukkana. Kiristysylinterin mitoitus voitiin pitää siis ainakin tämän testin osalta onnistuneena. Kuitenkin paalun puoleisen paineohjautuvan-venttiilin huomattiin olevan melko lähellä paalua. Vaikka tämä etäisyys laitteen kiristyessä hieman kasvoi, voisi rungon dimensioiden kasvattaminen näiltä kohdin olla perusteltua. Testissä kiristysylinterin kiristimen arvo oli 6 eikä sen muuttamiseen nähty tarvetta. Laitteen toiminnan kannalta ei ole juurikaan väliä kiristyykö laite paalun ympärille alle sekunnissa vai muutamassa sekunnissa. Kuvassa 64 näkyy myös lukijaa kohti oleva kantokahva.



Kuva 64. Prototyyppi kiristyneenä paalun päälle onnistuneesti.

7.5 Kolmas testi: toiminta ilman laikkaa

Seuraavassa testissä paineenalennimella varustettu paineilmatulotulo liitettiin laitteen sekvenssiosuuteen. Edellisen testin kiristysylinterin alentamaton paineilmatulotulo pidettiin luonnollisesti edelleen päällä, jotta laite pysyi paalun ympärillä. Tämä on laitteen käy-

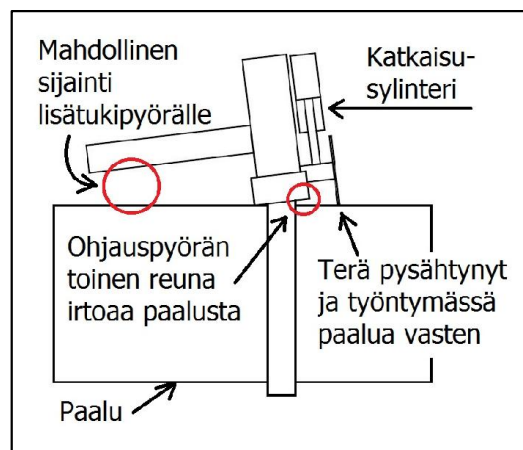
tössäkin ensimmäinen suunniteltu kytkettävä toiminto, joten sen tulee olla aina pohjalla. Myöhemmin esiteltävissä testeissä tämä kytkentä on aina päällä. Tässä testissä katkaisumoottoriin ei kuitenkaan kiinnitetty vielä laikkaa, koska ensin haluttiin testata sekvenssin toimivuutta, ja kiertomoottorin aiheuttamaa pyöritysnopeutta. Testiä varten paineenalentimen arvoksi säädettiin 3 *bar*. Turvallisuussyistä aluksi aloitettiin pienellä paineella. Avattaessa alennetun painetulon sulkuventtiili, käynnistyi sekvenssi odotusten mukaisesti; katkaisumoottori lähti pyörimään ensin, katkaisusylinteri aloitti plusliikkeensä seuraavaksi ja kiertomoottori viimeisenä. Sekvenssi tapahtui kuitenkin niin nopeasti, muutamassa sekunnissa, että laitteiden käynnistymistä voidaan pitää lähes yhtäaikaisena. Kun kaikki toimilaitteet olivat olleet hetken käynnissä, pysähtyi sekä katkaisusylinteri että kiertomoottori. Pienen miettimisen jälkeen tämän pääteltiin johtuvan letkujen väärästä kytkennästä paineohjautuville venttiileille. Ne oli kytketty vahingossa siten, että venttiili oli aluksi auki ja sulkeutui paineen kasvaessa. Toiminnan tuli olla päinvastoin. Kytkennät korjattiin ja testi tehtiin uudestaan.

Sekvenssi tapahtui edelleen hyvin nopeasti myös oikealla paineohjattujen venttiilien kytkennällä. Katkaisusylinterin liike jatkui kuitenkin useiden sekuntien ajan ennen kuin katkaisuyksikkö saavutti paalun pinnan. Tämä johtui siitä, että katkaisusylinterin kuristus oli säädetty lähes maksimiin, mutta sen liike haluttiin tarkoituksella pitää hitaana, jotta terä ei työntyisi paalun sisälle liian nopeasti siinä vaiheessa kun testi tehdään laikan kanssa. Kiertomoottori pyöritti laitetta paalun ympäri onnistuneesti koko kierroksen. Kun kiertomoottorin kuristusta lisättiin, hidastui laitteen pyörimisnopeus paalun ympäri. Näin kuristuksen kuuluukin toimia. Ohjauspyörät näyttivät olevan tukevasti paalua vasten ja ketju liikkui vaivatta paalun pintaa, ohjauspyöriä ja ketjupyörää pitkin. Tämän testin perusteella laitetta paalun ympäri pyörittävät osat ovat siis mitoitettu sopiviksi. Katkaisumoottori pyöri ilman laikkaa koko testin ajan, mutta sen pyörimisnopeuden arvioimiseksi ei ollut mittareita. Toimilaitteiden painemittareiden lukemat olivat katkaisumoottorille 2 *bar*, katkaisusylinterille 2,5 *bar* ja kiertomoottorille 1 *bar*. Viimeiselle laitteelle eli kiertomoottorille tulee suurin painehäviö. Tässä tapauksessa siis 2 *bar*. Tämän testin yhteydessä katkaisusylinteriä työnnettiin kokeilun vuoksi sisään käsivoimin. Siis vastakkaiseen suuntaan kuin mihinkä sylinteri terää katkaistaessa työntää. Tällä tavoin arvioitiin kuinka lujasti sylinteri painaa terää paalua kohti. Katkaisuyksikkö nousi paalun pinnasta hyvin pienellä vaivalla. Toisaalta kun järjestelmän paineen arvoksi asetettiin 5 *bar*, täytyi sylinteriä työntää jo huomattavasti suuremmalla voimalla, jotta katkaisuyksikkö saatiin irrotettua paalun pinnasta. Tämä on luonnollista, koska sylinterin tuottama voima on suoraan verrannollinen paineeseen.

7.6 Neljäs testi: toiminta laikan kanssa

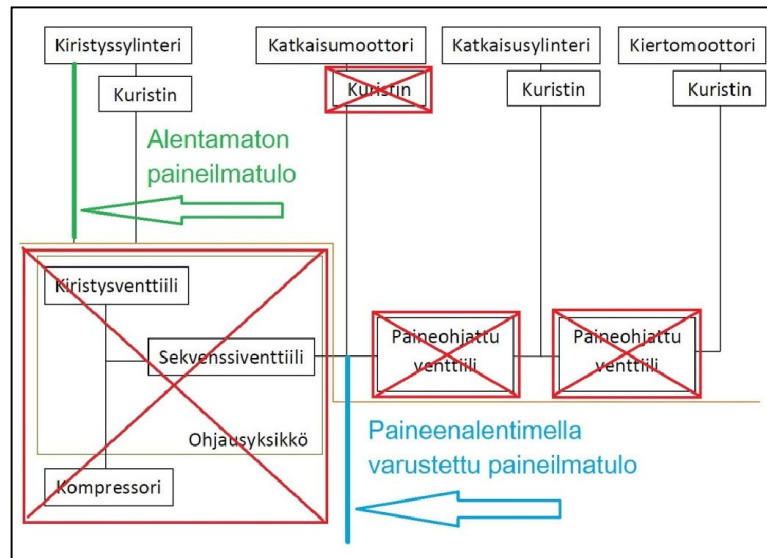
Seuraavassa testissä katkaisumoottoriin kiinnitettiin laikka. Testiä varten käyttöön oli hankittu sekä timantti- että katkaisulaikka. Katkaisutestejä tehtiin molemmilla terillä. Katkaisulaikalla tehdyissä testeissä onnistuttiin paremmin, mutta nämä myös kuluvat

nopeammin minkä takia ne ovat melko epäkäytännöllisiä oikeassa käyttötilanteessa. Ensimmäisissä laikalla varustetuissa katkaisutesteissä terä työntyi paaluun niin kovasti, että terä pysähtyi eikä kiertomoottori aloittanut laitteen pyörittämistä paalun ympäri. Katkaisusylinteri työnsi terää paalua kohti siis liian voimakkaasti. Tämä todennettiin katkaisuyksikköä käsin paalun pinnasta nostamalla. Kun terä irtosi paalun pinnasta, lähti se jälleen pyörimään. Terän liiallinen painautuminen huononsi myös laitteen kiinnityksen tukevuutta paalun ympärille. Terän ollessa pysähtyneenä paalun seinämän sisällä pyrkii katkaisusylinteri edelleen jatkamaan plus-liikettään. Tämä liike on sen verran voimakas, että se sai ohjauspyörien teränpuoleiset ulokkeet irtoamaan paalun pinnasta. Tämä tilanne on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 65. Tästä ongelmasta päätäisiin todennäköisesti eroon, jos laitteen vastakkaiselle puolelle sijoitettaisiin lisätukipyörä. Tällä otettaisiin vastaan katkaisusylinterin aiheuttama laitetta kallistava voima. Toisaalta parempi vaihtoehto olisi varmaankin käyttää yksinkertaisesti pienempää katkaisusylinteriä. Tällöin se aiheuttaisi samalla paineella pienemmän voiman. Se myös liikkuisi nopeammin samalla ilmamäärällä. Kuten aikaisemmin todettiin, voisi katkaisusylinterin nopeus olla suurempi. Pienempi sylinteri on myös kevyempi.



Kuva 65. Ohjauspyörien alapuolisten ulokkeiden irtoaminen paalun pinnasta katkaisusylinterin työntäessä pysähtynyttä terää ja mahdollisen lisäohjauspyörän sijainti.

Testejä jatkettiin laitteen säätöjä ja kytkentöjä muuttamalla. Ensinnäkin katkaisumoottorin kuristus avattiin täysin, jotta se saisi enemmän ilmaa. Lopulta päädyttiin kuitenkin ottamaan katkaisumoottorin kuristin kokonaan pois, jotta sille saataisiin ilmaa mahdollisimman paljon. Tämän lisäksi molempien paineohjattujen venttiilien yli päätettiin mennä yksinkertaisesti letkulla. Nämä muutokset ovat esitetty kuvan 66 pneumatiikkakaaviossa. Näin toimittiin sen takia, että sekvenssi toimiessaan on hyvin nopea eli laitteet voivat yhtä hyvin kytkeytyä päälle samanaikaisesti. Tämän lisäksi venttiileissä tapahtuu aina painehäviötä, mikä tarkoittaa vähemmän painetta niitä seuraaville laitteille. Tässä tapauksessa katkaisusylinterille ja erityisesti kiertomoottorille, koska sitä ennen on kaksi paineohjattua venttiiliä.



Kuva 66. Prototyypin testin muunneltu pneumatiikkakaavio, josta on testien alkuperäiseen pneumatiikkakaavioon nähden ohitettu molemmat paineohjautuvat venttiilit ja katkaisumoottorin kuristin.

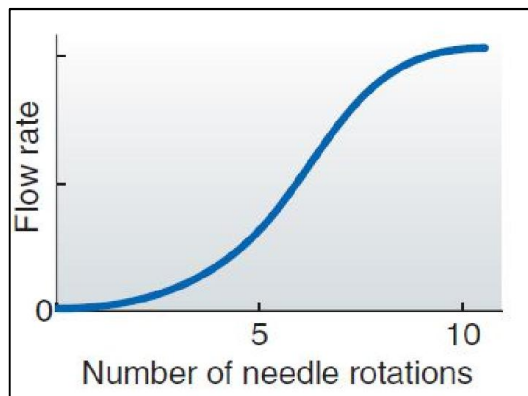
Edellä esitellyillä muutoksilla testejä tehtiin alennetun paineilmatulon eri arvoilla ja toimilaitteiden kuristuksia säätämällä. Näin laite saatiin hetkittäin toimimaan asiallisesti. Se leikkasi paalun läpi ja laite pyöri paalun ympäri sitä leikaten parhaimmillaan yhtäjaksoisesti noin neljäsosakierroksen ajan. Kuvassa 67 on näytetty tilanne, jossa laite toimii oikein. Jotta oikeanlaiseen toimintaan päästiin, kasvatettiin säädettävän paineilmatulon arvoksi 7,5 bar. Tällöin katkaisumoottorin painemittarin arvo vaihteli 5,5-6 bar välillä. Kiertomoottorin painemittarin lukema oli noin 1 bar. Vaikka kokonaista kierrosta ei saatu katkaistua niin terän kiinnityksen ja kipinöiden lentosuunnan huomattiin toimivan hyvin. Teräsuojus ei näytä olevan pakollinen, koska kipinät lentävät laitteesta pois päin.



Kuva 67. Testin tilanne, jossa laite toimii oikein.

Toimiakseen myös kiertomoottorin kuristusta tuli säätää ajon aikana. Lähtötilanteessa ilmaa kuristettiin paljon; kiertomoottorin kuristimen lukema oli 3. Tällöin laite ei pyöri-

nyt paaluun nähden. Avattaessa kuristusta, noin arvoon 6 asti, lähti kiertomoottori pyörittämään laitetta paalun ympäri, mutta jopa liian nopeasti. Tällöin kuristusta lisättiin hieman ja kiertonopeus hidastui, mutta liike kuitenkin pysyi. Kiertomoottori tarvitsee siis riittävästi ilmaa käynnistääkseen liikkeensä. Jos kuristusta lisättiin liikaa, laitteen kierto pysähtyi, mutta käynnistyi taas uudelleen kuristusta vähennettäessä. Tämä säätö oli hyvin herkkä. Selityksenä tähän lienee kuristimien ominaiskäyrän muoto. Kuristimen ominaiskäyrässä, kuvassa 68, on esitetty kuristimen läpipääsevä ilma kuristimen säätölukeman funktiona. Tämä on hieman s-kirjaimen muotoinen käyrä minkä johdosta ilmanläpäisy muuttuu paljon keskisuurien säätölukemien arvoilla. Näitä ovat noin arvot 5-7.



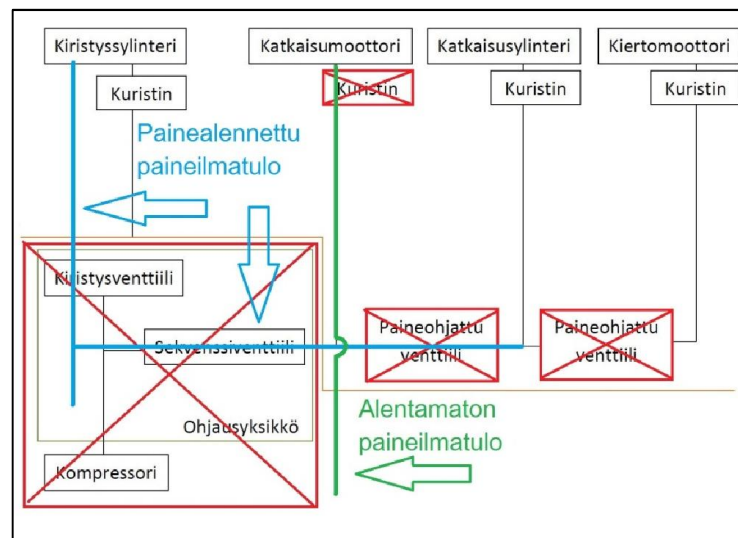
Kuva 68. Kuristusventtiilin ominaiskäyrä (SMC Speed controller with one touch fitting Series AS)

Laite käyttäytyi myös erilailla riippuen sen asennosta vaakasuuntaiseen paalun nähden. Alamäkeen katkaistaessa terä pysähtyi helpommin ja ylämäkeen laite toimii paremmin. Terän pysähtyminen katkaistaessa alamäkeen johtunee siitä, että tällöin katkaisusylinterin työntövoiman lisäksi terää työntää paalun sisälle jonkin verran myös laitteen oma paino. Ylämäkeen mentäessä tilanne taas on päinvastainen; laitteen oma paino keventää terän työntymistä paalun sisälle. Laite on kuitenkin suunniteltu pystysuuntaisten paalujen katkaisuun, jolloin tätä ongelmaa ei ole.

7.7 Lopputulos ensimmäisistä testeistä

Näiden testien perusteella ei voida kaikkien suunnitteluvaatimusten toteutumista varmistaa. Ensinnäkään katkaisuaikaa ei onnistuttu määrittämään, koska testeissä ei saatu katkaistua paalua koko kierroksen mitalta. Samasta syystä kappaleessa 2.2.1. esiteltyä paalutusohjeen katkaistun pään kohtisuoruus- ja tasomaisuusvaatimusta ei voida verrata testien katkaisuihin. Näiden testien perusteella ei myöskään voi kommentoida laitteen toimivuutta vedessä. Lisätestejä tarvitaan tämän lisäksi pystysuuntaisille ja erikokoisille paaluille.

Näistä testeistä huomattiin, että testejä tarvitsee tehdä lisää. Laite toimii välillä, mutta ei ole vielä täysin luotettava. Testien lopussa tuli mieleen eräs testattava asia, joka voitaisiin toteuttaa käytetyillä testivälineillä. Tätä varten pneumatiikkakytkentöjä jälleen hie- man muutettaisiin. Ideoidun testin pneumatiikkakaavio on esitetty kuvassa 69. Koska katkaisumoottori tarvitsee selkeästi eniten ilmaa, kytkettäisiin se alentamattomaan painelinjaa ja muut laitteet alennettuun. Tällöin kiristyssylinteri, katkaisusylinteri ja kiertomoottori käynnistyisivät avattaessa alennettu painelinja. Varsinaisen laitteen käyttöä ajatellen tämä on huono toimintamalli, mutta sen avulla voitaisiin tehdä testi, jossa katkaisumoottori varmasti saa riittävästi ilmaa. Todellisuudessa, laite halutaan ensin kiinnittää paaluun, eli käynnistää kiristyssylinteri, ja sen jälkeen ottaa käyttöön katkaisulaitteet. Suunnitellussa testissä avattaisiin ensin alennettu painelinja, jonka johdosta laite kiristyisi paalun ympäri, alkaisi työntää katkaisusylinteriä paalua kohti ja pyörittämään laitetta paalun ympäri. Katkaisumoottorille menevä alentamaton painelinja avattaisiin heti perään. Koska katkaisusylinterin liike on hyvin hidas, ehdittäisiin alentamaton painelinja avaamaan ennen kuin terä saavuttaa paalun pinnan.



Kuva 69. Ideoidun testin pneumatiikkakaavio.

Osaa testien aikana mieleen tulleita kehitysideoita ei voi suorittaa nykyisiä testiolosuhteita modifioimalla. Nämä vaatisivat enemmän tai vähemmän tuotteen muokkaamista. Ensinnäkin katkaisusylinterin työntövoima todettiin liian suureksi. Tämän takia terä pysähtyi testeissä useasti, mikä johti ohjauspyörien osittaiseen irtoamiseen paalusta. Katkaisusylinteri olisi järkevää vaihtaa pienemmäksi, jolloin se tuottaisi samalla paineella pienemmän voiman. Nykyiseen sylinteriin voitaisiin myös lisätä paineenalennin. Aikaisemmin esiteltyä lisätukipyörään voitaisiin myös tarpeen tullen käyttää. Toinen ongelma testeissä oli kiertomoottorin käynnistyminen. Sen sijaan, että kiertomoottori käynnistyisi paineohjatuksi eli paineen kasvaessa riittävästi edellisillä laitteilla, voitaisiin käynnistys tehdä riippuvaiseksi katkaisusylinterin asennosta. Toiminnan kannalta järkevää olisi, että kiertomoottori käynnistyisi juuri kun katkaisusylinteri on työntänyt terän paalun läpi. Toinen vaihtoehto olisi käyttää kiertomoottoria ennen sähköohjattua 2/2-

venttiiliä, jolloin sille voitaisiin ohjata paine nappia painamalla. Kun ohjausta ei ole, venttiili olisi suljettuna. Tällä tavoin kiertomoottori saataisiin muiden laitteiden toiminnasta riippumatta käynnistettyä halutulla hetkellä. Koska kiertomoottori toimiessaan pyörittää laitetta paalun ympäri jopa liian nopeasti voitaisiin samasta venttiilistä pyöriminen tarpeen tullen pysäyttää ja odottaa, että terä on taas päässyt paalun seinämän läpi. Kiertomoottoria voitaisiin myös hidastaa suunnittelemalla sen perään vielä alennusvaihe. Tämän lisäksi laitteen pyörimisnopeutta paalun ympäri voitaisiin hidastaa käyttämällä pienempää ketjupyörää. Edellä esitellyt ideat luonnollisesti vaatisivat muutoksia tuotteen rakenteessa. Niillä on myös omat heikkoutensa. Miten esimerkiksi sähköohjautuva venttiili osataan avata oikeaan aikaan? Katkaisukoneen ollessa veden alla oikeaa käynnistyshetkeä ei välttämättä voida silmin nähdä. Sitä paitsi lisättäessä laitekohtaisia ohjaussyntereitä kasvaa laitteelle tulevien letkujen määrä. Suunnitellussa tuotteessa laitteelle tulee vain sekvenssilaitteille yksi letku ja kiristyssylinterille kaksi letkua.

8. YHTEENVETO

Työn kohteena oli paalunkatkaisulaitteen suunnittelu. Suunniteltava tuote on tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan teräsputkipaaluille. Tuotteen halutaan toimivan 320 mm:n halkaisijan omaaville paaluille ja mahdollisimman monelle tämän lähikoolle. Laitteen tulisi toimia sekä vedessä että maalla. Tärkeimmät suunnitteluvaatimukset olivat keveys, yksinkertaisuus, helppokäyttöisyys sekä kilpailukykyinen hinta ja katkaisuaika. Eräs laitteelle suunniteltu käyttökohde on siltatyömailla käytettävien työsiltojen paalujen katkaisu. Työ ulottuu ensimmäisen prototyypin testeihin asti.

Työn alkupuolella tutustuttiin paaluihin yleisesti. Tämän lisäksi luotiin katsaus eräisiin nykyään käytössä oleviin katkaisumenetelmiin. Teoriaosuudessa on käsitelty teräksen katkaisu pyörivällä laikalla laajasti ja polttoleikkaus päällisin puolin. Myös tuotekehityksestä on esitelty yksi kehys kirjallisuudesta. Tämän jälkeen toteutetun projektin rakenne on kuvailtu ja sitä on verrattu edelliseen kehukseen.

Paalunkatkaisulaitteen toteuttamiseksi pohdittiin ensiksi tuotteelta vaadittavia toimintoja. Tämän jälkeen näihin liittyen kehiteltiin erilaisia periaatteellisia ratkaisuita ja niitä vertailtiin. Sopivimmaksi todetusta periaatteellisesta ratkaisusta kehiteltiin konseptteja, joita parantelemalla päädyttiin valmistettavan prototyypin konseptiin. Laitteen voimalllähteenä käytetään paineilmaa ja sen pääkomponentteina ovat kaksi sylinteriä ja kaksi moottoria. Nämä saavat aikaan laitteen kiinnittymisen paaluun, katkaisulaikan pyörimisen, laikan työntämisen paalun läpi ja laitteen pyörittämisen paalun ympäri. Mainitut neljä toimintoa suoritetaan tässä järjestyksessä. Toiminnoista ensimmäistä voidaan kytkeä päälle ja pois erikseen ja kolme viimeistä käynnistyvät peräkkäin sekvenssinä. Laitteen käyttö on suunniteltu siten, että sen apuna käytetään kaivinkonetta tai vastaavaa laitetta mikä löytyy työmaalta. Apukoneen tehtävänä on vetää katkaistavan paalun yläosaa, jotta se ei kaadu paalun päälle katkaisun loppuvaiheessa. Myös nykyiset paalun katkaisuun suunnitellut laitteet tarvitsevat apulaitteita. Prototyypin suunniteltaessa sen rakennetta ja komponentteja mitoitettiin laskelmiin pohjautuen. Lopulta prototyypin testattiin käytännössä.

Prototyyppi täytti osan suunnitteluvaatimuksista. Tuotteesta haluttiin niin kevyt, että se olisi käsikäyttöinen. Suunnitteluvaatimuksissa esitetty 10 kg:n paino osoittautui kuitenkin hieman optimistiseksi arvioksi. Prototyyppi painoi lopulta aavistuksen alle 13 kg:a. Valmistetun kantokahvan ansiosta se oli kuitenkin helposti yhden henkilön nosteltavissa. Tuotteesta haluttiin myös yksinkertainen. Ensinnäkin valmistuksen kannalta tässä onnistuttiin, koska laitetta varten erikseen valmistettavien osien määrä ja monimutkaisuus pystyttiin toteuttamaan konepajaystävällisesti. Useat komponentit kyettiin valitse-

maan samoilta valmistajilta, mikä yksinkertaisti tuotetta osien tilaamisen suhteen. Prototyypin rakenteesta tuli myös kompakti ja siinä olevat komponentit saatiin liitettyä runkoon järkevillä koneistuksilla. Ottaen huomioon useat toiminnot ja liikkeet, jotka laitteen tulee kyetä toteuttamaan, voidaan laitteen käyttämistä pitää helppona. Laitteen komponenteille ohjataan yksinkertaisesti paineilma venttiilejä avaamalla. Laitteen rakenne onnistuttiin tekemään sellaiseksi, että se mittojensa ja liikeratojensa puolesta kykenee katkaisemaan useaa paalukokoa. Nämä paalukoot ovat RD270-RD550. Tehtyjen testien perusteella laitteen paalun ympärille kiristävä sylinteri mitoitettiin onnistuneesti. Ohjattaessa sylinterille paine, kiinnittyi laite tiukasti paalun ympärille.

Suunnitteluvaatimuksissa mainittuun 5000 €:n myyntihintaan ei esitetyllä prototyypillä voida päästä. Konepajoilta saatujen tarjousten perusteella prototyypin toteutuskustannus, joka sisältää valmistuksen ja komponenttien hankinnan, on liian suuri kun huomioidaan, että laitteen pitäisi maksaa ajan kanssa itsensä takaisin. Tarkemmin sanottuna myyntihinnan ja toteutuskustannuksen erotuksen tulisi olla niin suuri, että sillä voitaisiin kattaa valmistuskustannukset viimeistään tuhannen myydyin laitteen kohdalla. Suurin syy liian suuriin toteutuskustannuksiin on laitteen paineilmamootoreiden hankintakustannukset. Prototyypin kallein osa on kiertomootori, joka toteuttaa laitteen pyörimisen paalun ympäri.

Prototyypin testit suoritettiin ainoastaan yhden kokoiselle vaakasuuntaisella paalulle maalla. Näin toimittiin testien toteuttamisen helpottamiseksi. Testeissä käytetyn paalun halkaisija oli 320 mm:ä. Ensimmäisten testien perusteella ei voida kommentoida laitteen toimimista vedessä. Tämän lisäksi nämä testit eivät mahdollistaneet laitteen käyttämistä erikokoisten paalujen kanssa tai pystysuuntaisille paaluille. Näistä käyttötilanteista tarvitaan lisää testejä. Koska prototyypillä ei onnistuttu katkaisemaan paalua koko kierrokselta, ei katkaistun pään kohtisuoruutta ja tasomaisuutta eikä katkaisuaikaa voida sen enempää arvioida.

Tuote tarvitsee vielä lisää kehitystä ja testejä. Ensimmäisen prototyypin testeissä paalu onnistuttiin katkaisemaan ¼ kierroksen matkalta. Laitteen paineilmalla toimivien pääkomponenttien kuristuksia säätämällä laite saatiin ajoittain toimimaan oikein. Näitä säätöjä tuli kuitenkin muuttaa ajon aikana, jotta laite saatiin toimimaan halutulla tavalla. Laitetta paalun ympäri pyörittävä moottori, kiertomootori, liikkeelle lähtiessään pyöritti laitetta liian nopeasti. Nopeutta pystyttiin säätämään kuristimella, mutta tämä säätö osoittautui liian herkäksi. Moottorin nopeutta voisi yrittää pienentää alennusvaihteella, mutta koska juuri kiertomootori on laitteen kallein osa, kannattaa harkita myös vaihtoehtoisia toteutuksia laitteen pyörittämiseksi.

Laitteen sekvenssi toimi oikeassa järjestyksessä. Tämä oli kuitenkin niin nopea, että prototyypin testeissä sekvenssin toteuttavat venttiilit ohitettiin. Laitteen ohjauksen kannalta olisi parempi, mikäli jokaista pääkomponenttia voitaisiin kontrolloida erikseen. Paineilmalla toteutettuna tämä merkitsisi kuitenkin letkujen määrän huomattavaa kas-

vamista. Yksi mahdollisuus olisi ohjata pääkomponentteja sähköisesti, mutta tämäkään ei ole ongelmatonta. Esimerkiksi käytettäessä laitetta veden alla ei välttämättä voida nähdä oikeata käynnistyshetkeä toimilaitteille.

Pyörivää laikkaa työntävä sylinteri, katkaisusylinteri, osoittautui liian voimakkaaksi. Tästä johtuen laikka työntyi paaluun liian kovaa, mikä pysäytti sekä laikan pyörimisen että laitteen pyörimisen paalun ympäri. Jos tilalle vaihdettaisiin pienempi sylinteri, saataisiin tilanne korjaantua. Tällöin rakenne myös hieman kevenisi. Tehdyissä testeissä käytettiin sekä katkaisulaikkaa että timanttilaikkaa. Katkaisulaikalla tehdyissä testeissä onnistuttiin paremmin, mutta niiden käyttö on nopean kulumisen takia epäkäytännöllisempää.

Katkaisun tekevää laikkaa pyörittävä moottori, katkaisumoottori, tuli valita huomioiden katkaisun erilaisuus maalla ja vedessä. Maalla laikan pyörimistä rajoittaa valmistajan laikalle ilmoittama suurin sallittu kehänopeus. Vedessä taas moottorin tulee kyetä aikaansaamaan riittävä momentti veden vastuksen voittamiseksi. Katkaisumoottori valittiin näiden kahden kriteerin kompromissina. Prototyypin testien perusteella katkaisumoottori tarvitsisi kuitenkin lisää pyörimisnopeutta maalla. Suuremman kierrosnopeuden omaavan moottorin pyörimisnopeutta tulisi kuitenkin pystyä mittaamaan ja säätämään luotettavasti, jotta se ei rikkoisi laikkaa liian nopeasti pyöriessään. Koska vesi ja ilma ovat hyvin erilaiset ympäristöt, saattaisi olla perusteltua suunnitella näihin tilanteisiin eri laitteet. Näin tehdessä tulisi kuitenkin varmistaa markkinoiden riittävyys kyseisillä alueilla erikseen. Parempi vaihtoehto olisi tutkia vaihtoehtoisia katkaisumenetelmiä, joita voitaisiin käyttää sekä maalla että vedessä. Tätä varten tulisi tehdä testejä eri katkaisumenetelmillä eri ympäristöissä. Katkaisua olisi myös perusteltua tutkia testein muusta tuotteesta erillisenä osa-alueena johtuen sen laaja-alaisuudesta. Katkaisun teoreettinen tutkiminen on hankalaa, koska se riippuu useasta tekijästä. Näitä ovat ainakin katkaisun tekevä materiaali, katkaistava materiaali, ympäristö ja koneen käyttäjä.

LÄHDELUETTELO

Aalto-yliopisto. (2014). Rak-50.2126 Geotekniikka Paaluperustukset. 13 s.

https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.2126/luennot/Rak-50_2126_luentomateriaali_5.pdf (viitattu 04.06.2015)

Aggregate Technologies. Cutting steel piles.

<http://www.aggregatetechnologies.com/cutting-steel-piles/> (viitattu 01.09.2015)

Atlas Copco. Atlas Copco Air Motors. 90 s.

http://www.atlascopco.com/Images/Atlas_Copco_Airmotors_Catalogue_UK_2014_1_tcm509-1188313.pdf (viitattu 14.01.2016)

Atlas Copco. LZB22L LR5-11 Mittapiirros.

http://webbox.atlascopco.com/webbox/dimdrw/cadfiles/8411021614_lzb22-lr5-11_00.pdf (viitattu 14.01.2016)

Atlas Copco. LZB22L LR5-11: Paineilmamoottori, planeettavaihteistolla.

<http://www.atlascopco.fi/fius/products/ilmamoottorit/1401305/1466928/> (viitattu 14.01.2016)

Atlas Copco. LZB46 A065-11: Paineilmamoottori, planeettavaihteistolla.

<http://www.atlascopco.fi/fius/products/ilmamoottorit/1401305/1466767/> (viitattu 14.01.2016)

Atlas Copco. Selection tool program.

<http://www.atlascopco.com/airmotors/productrange/selectiontool/> (viitattu 14.01.2016)

Autio, A. (1992). Metallityöt. WSOY. 200 s.

Collin, J. (2015). Timber Pile Design & Construction Manual. Timber Piling Council Southers Pressure Treaters' Association. 133 s.

<http://timberpilingcouncil.org/wp-content/uploads/2015/08/TimberPileManual.2015.pdf> (viitattu 23.10.2015)

DeGarmo, E., Black, J., Kohser, R. (1988). Materials and processes in manufacturing Seventh edition. Macmillian publishing company. 1172 s.

E.H. Wachs. (2014). Diamon Wire Saw. 2 s.

<http://www.ehwachs.com/resources/pdf/proddatasheet-20140116143429.pdf> (viitattu 03.09.2015)

E.H. Wachs. (2015). E.H. Wachs Industrial Machine Tools Catalog. 92 s.
<http://www.ehwachs.com/Industrial-Catalog> (viitattu 02.09.2015)

Hannu Vesämäki. (2013). Aidot ja alkuperäiset RR- ja RD-paalutuotteet. 17 s.
<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Seminaarimateriaalit/Teraspaalupaiva%202013/Aidot%20ja%20alkuperaiset%20RR%20ja%20RDpaalutuotteet%20%20Hannu%20Vesamaki%20Ruukki%20%20Teraspaalupaiva%202013.pdf> (viitattu 20.10.2015)

Hartikainen, J. (2000). Classification of Micropile Types. 3rd International Workshop on Micropiles, Turku, Finland, 2000. 14 s.
<http://www.ismicropiles.org/uploads/Proceedings/2000/Session%202%20-%201C-%20Hartikainen.pdf> (viitattu 21.10.2015)

HTM Yhtiöt Oy. (2014). HTM Teräspaalut HT-paalujen suunnittelu- ja asennusohjeet ver 9/2014. 13 s.
http://htmyhtiöt.fi/assets/files/pdf/HT-teraspaalujen_suunnittelu_ja_asennusohje.pdf (viitattu 19.10.2015)

IKH. Katkaisulaikka 125X2,0 INOX IMA.
<http://www.ikh.fi/product.asp?sua=1&lang=1&s=39012&nav=3001002> (viitattu 15.01.2016)

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M., Sihvonen, P. (2003). Valmistustekniikka. Otatieto. 490 s.

IKH. Timanttilaikka 125X22,2 SILENTMAX KAIKKI MAT.
http://www.ikh.fi/Hiomatarvikkeet/MAR101_TIMANTTILAikka_125X222_SILENTMAX_KAIKKI_MAT (viitattu 15.01.2016)

Jääskeläinen, R. (2009). Pohjarakennuksen perusteet. Tammertekniikka. 233 s.

JRS Adriatic Commercial Diving. (2013).
http://www.jrs.com.hr/index_en.php#!prettyPhoto/8/ (viitattu 24.10.2015)

Kalpakjian, S. (1997). Manufacturing processes for engineering materials Third edition. Addison-Wesley publishing company. 950 s.

Konaflex Oy. (2009). Sedis ketjuluettelo. 44 s.
http://www.konaflex.fi/datafiles/userfiles/onet/fi/attachments/Sedis_ketjuesite_web.pdf (viitattu 15.01.2016)

Lepola, L., Makkonen, M. (2004). WSOY Konetekniikka. 560 s.

Makita. (2016). Tuoteluettelo 2016. 316 s.

http://www.makita.fi/pam/custom/files/Makita%20tuoteluettelo%202016_FNA176.pdf
(viitattu 13.01.2016)

Metalwork Pneumatic. General Catalogue. 1222 s.

<http://media.metalwork.it/catalogue-eng/index.html> (viitattu 15.01.2016)

MotoCut Oy. (2014). MotoCut Koneellistaa paalunkatkisun.

http://www.motocut.fi/wp-content/uploads/2014/04/Motocut_Katkaisukoura-2014-3-3.pdf (viitattu 31.08.2015)

Onninen, N. (2005). Rajasaaren työsillan rakentaminen. Tampereen Ammattikorkeakoulu. 42 s.

Pahl, G. & Beitz, W. (1990). Koneensuunnitteluoppi. Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET. 608 s.

Pile Buck Magazine. (2014). Cut pile with one man and one machine. The international pipe drivers', deep foundations & marine contractor's magazine. Volume 30 Issue 2. 60 s.

<http://www.editionduo.com/publication/frame.php?i=203644&p=16&pn=&ver=flex>
(viitattu 25.10.2015)

PMC Polarteknik. Mekaanisesti ohjatut venttiilit.

<http://www.pmcgroup.se/Global/Subsidiaries/PMC-Polarteknik/Images/Products/Pneumatics/Brochures/Vanhat/Valves/3%20%20%20Mekaaniset%20venttiilit.pdf?epslanguage=fi> (viitattu 15.01.2016)

PMC Polarteknik. Putkistoasenteiset venttiilit.

http://www.pmcgroup.se/Global/Subsidiaries/PMC-Polarteknik/Images/Products/Pneumatics/Brochures/Vanhat/Valves/1%20Putkistoasenteiset_venttiilit.pdf?epslanguage=fi (viitattu 15.01.2016)

Pålkommisionen. (2014). Pålstatistik för Sverige 2013. 10 s.

<http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=220> (viitattu 24.10.2014)

Prime Marine Services INC. Pile Cutting.

<http://www.pilecutter.com/pile-cutting> (viitattu 25.10.2015)

Prime Marine Services INC. 24” Model Shears.

<http://www.pilecutter.com/steel-concrete-shears-24> (viitattu 25.10.2015)

Rakennusteollisuus. (2011). Tuotelehti PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön RT-2011. 24 s.

http://htmyhtiot.fi/assets/files/pdf/paalutuotelehti_RT2011.pdf (viitattu 28.08.2015)

Rakennustietosäätiö RTS. (2010). InfraRYL 2010 Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1: Väylät ja alueet. Rakennustieto Oy. 555 s.

Rantakankaan Saha. Kiinteät Laiturit. 8 s.

http://www.rantakankaansaha.fi/esitteet/rakennusohjeet_ja_esitteet/laituri_rakennusohjeet.pdf (viitattu 19.10.2015)

Rantamäki, M., Tammirinne, M. (2000). Pohjarakennus. Otatieto. 232 s.

Rowe, W.B. (2009). Principles of modern grinding technology. William Andrew. 416 s.

Ruukki. (2015). Lyötävät RR-suurpaalut. 5 s.

<http://www.ruukki.fi/Teras/Infrastruktuuriratkaisut/Teraspaalut/Lyotavat-RR-suurpaalut> (viitattu 27.05.2015)

Ruukki. (2015). Porattava RD-pienpaalut. 5 s.

<http://www.ruukki.fi/Teras/Infrastruktuuriratkaisut/Teraspaalut/Porattavat-RD-pienpaalut> (viitattu 27.05.2015)

Ruukki. (2015). Porattavat RD-suurpaalut. 4 s.

<http://www.ruukki.fi/Teras/Infrastruktuuriratkaisut/Teraspaalut/Porattavat-RD-suurpaalut> (viitattu 27.05.2015)

Ruukki. (2010). RD-paalutusohje, Suunnittelu- ja asennusohjeet porattaville RD- ja RDs-paaluille. 9 s.

<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20RD-paalutusohje.pdf> (viitattu 27.05.2015)

Ruukki. (2010). RR-paalutusohje, Suunnittelu ja asennusohjeet lyötäville RR-paaluille. 102 s.

<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20RakMk%20-%20RR-paalutusohjeet%20ja%20loppuly%C3%B6ntitaulukot.pdf> (viitattu 27.05.2015)

Ruukki. 2015. SSAB:n teräspaalut Suunnittelu- ja asennusohjeet. 52 s.

<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Teraspaalut%20esitteet%20ja%20ohjeet/Tekninen%20ohje%20-%20EUROCODE%20->

[%20SSAB%20ter%C3%A4spaalut%20-%20Suunnittelu-%20ja%20asennusohjeet.pdf](#)
(viitattu 27.05.2015)

Ruukki. Tukiseinäratkaisu kaikkiin olosuhteisiin Ruukki RD-Paaluseinä. 24 s.
<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Tukiseinat%20esitteet%20ja%20ohjeet/Ruukki-Esite-RD-paaluseina.pdf> (viitattu 27.08.2015)

SEOKANG Piling Ltd. (2015).
<http://seokangpiling.com/ductile-pile/> (viitattu 23.10.2015)

SKF. Single row deep groove ball bearings.
<http://www.skf.com/uk/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/index.html> (viitattu 15.01.2016)

SKS. The General Purpose Bearing – iglidur G.
[http://www.sks.fi/www/sivut/3BEA96994F2F9A51C2257B6A001F7CAB/\\$FILE/iglidur%20G.pdf](http://www.sks.fi/www/sivut/3BEA96994F2F9A51C2257B6A001F7CAB/$FILE/iglidur%20G.pdf) (viitattu 15.01.2016)

SMC. Air Cylinder Series CM2. 108 s.
https://content2.smcetech.com/pdf/CM2-Z-C_EU.pdf (viitattu 11.01.2016)

SMC. Compact Cylinder ISO Standards [ISO/21287] Series C55. 24 s.
https://content2.smcetech.com/pdf/C55-B_EU.pdf (viitattu 11.01.2016)

SMC. Speed controller with indicator Series AS-FS. 28 s.
https://content2.smcetech.com/pdf/AS-FS-B_EU.pdf (viitattu 15.01.2016)

SMC. Speed controller with one touch fitting Series AS. 36 s.
https://content2.smcetech.com/pdf/AS-1F_FG-A-C_EU.pdf (viitattu 15.01.2016)

Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys Sgy ry. (1995). RIL 212-1995 Suurpaalutusohje 1995 SPO-95. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 142 s.

Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys Sgy ry. (2005). RIL 223-2005 Lyöntipaalutusohje LPO-2005 Teräsbetoni- ja puupaalut. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, 134 s.

Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys Sgy ry. (2007). RIL 230-2007 Pienpaalutusohje PPO-2007 Teräksiset lyönti-, pora- ja puristuspaalut. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 226 s.

Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys Sgy ry. (2011). RIL 254-2011 Paalutusohje 2011 PO-2011 osa 1: suunnittelun perusteet ja osa 2: paalutusohje. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 261 s.

T-Drill Oy. PCS Pipe Cutting System. 2 s.

http://www.t-drill.com/documents/key20151025131502/Tuotetiedostot/Brochures/Portable/T-DRILL_PCS_GB_US.pdf (viitattu 04.09.2015)

Työterveyslaitos. (2007). KAMAT-tietokortti Metallin hionta. 9 s.
<http://www.ttl.fi/partner/kamat/tietokortteihin/Documents/Metallinhionta.pdf> (viitattu 06.03.2016)

Warren, C., Lauseng, N. (2013). Chukar Waterjet Helps Stop Gulf of Mexico Oil Spill. Modern Plumping Today. August 2013. 60 s.
<http://epagepub.com/publication/?i=172405> (viitattu 26.10.2015)

Würth. (2016). Würth Hiomatarvikkeet Laatus Ammattikäyttöön. 57 s.
http://www.wurth.fi/site/media/pdf/tuotekuvasto/tuotteet/3_Hiomatarvikkeet.pdf (viitattu 13.01.2016)

Kelauksen tutkiminen, Liite A

Lähtöarvoja

Paalun ulkohalkaisija	Remmin vahvuus	Puolan halkaisija	Moottorin kierrosnopeus
$D_{\text{paalu}} = 320 \text{ mm}$	$t_{\text{remmi}} = 1,5 \text{ mm}$	$d_{\text{puola}} = 30 \text{ mm}$	$n_{\text{moot}} = 5 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

Leikkausnopeus, nopeus jolla laite liikkuu paalun pinnalla

$$v_{\text{leikkaus}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{puola}}}{2} \cdot n_{\text{moot}}$$

$$v_{\text{leikkaus}} = 7,9 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Aika, jossa laite kiertää paalun ympäri

$$t_{\text{paaluympäri}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{paalu}}}{v_{\text{leikkaus}}}$$

$$t_{\text{paaluympäri}} = 128 \text{ s}$$

Remmin keskikohdan etäisyys pyörimisakselista (säde)

Ensimmäisellä kierroksella

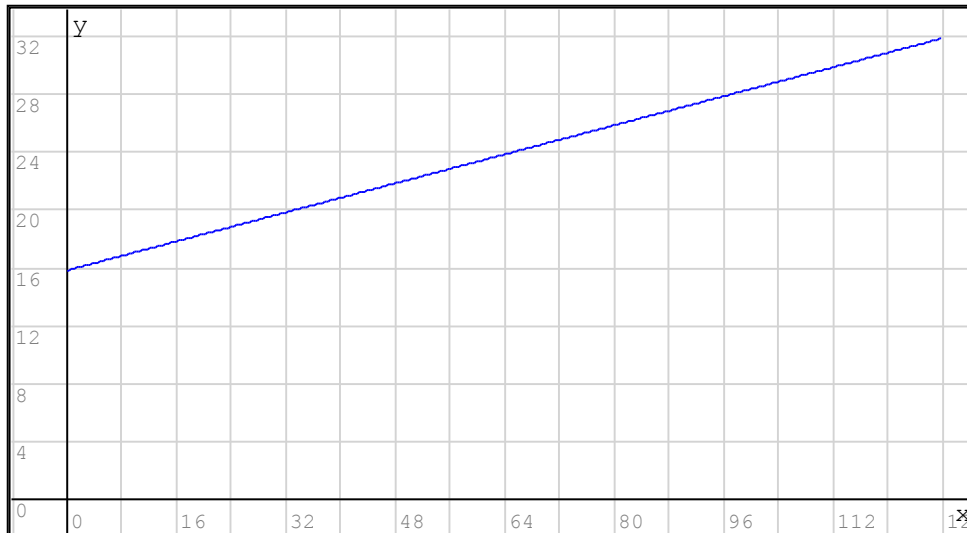
$$r_{\text{veto1}} = \frac{d_{\text{puola}} + t_{\text{remmi}}}{2}$$

Ajan funktiona

$$r_{\text{veto}}(t_1) = r_{\text{veto1}} + n_{\text{moot}} \cdot t_1 \cdot t_{\text{remmi}}$$

$$r_{\text{veto}}(0 \text{ s}) = 15,75 \text{ mm} \quad r_{\text{veto}}(t_{\text{paaluympäri}}) = 32 \text{ mm}$$

Kelaavan remmin säde ajan funktiona



```

if (x > 0) ^ (x <  $\frac{t_{\text{paalu ympäri}}}{s}$ )
   $\frac{r_{\text{veto}}(x \cdot s)}{\text{mm}}$ 
else
  "not defined"

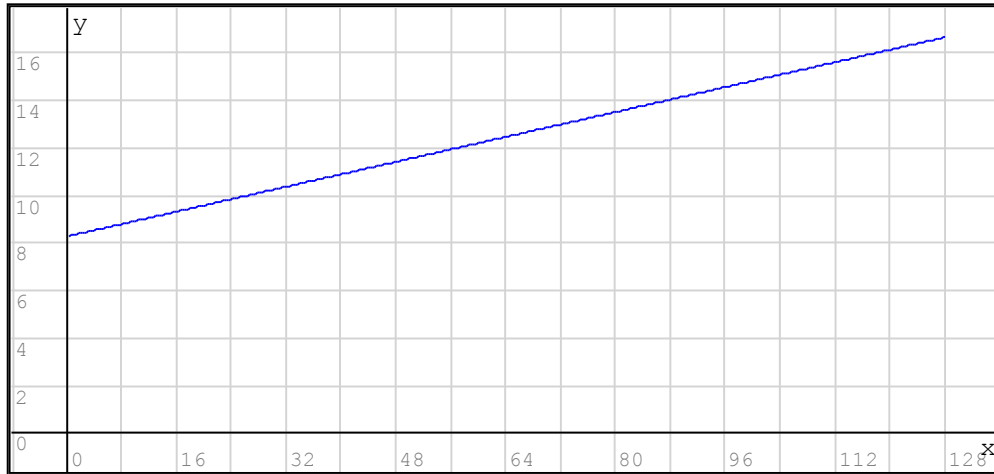
```

Vetopyörän remmin keskikohdan ratanopeus

$$v_{\text{vetorata}}(t_1) := 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{moot}} \cdot r_{\text{veto}}(t_1)$$

$$v_{\text{vetorata}}(0 \cdot s) = 8 \frac{\text{mm}}{s} \quad v_{\text{vetorata}}\left(t_{\text{paalu ympäri}}\right) = 16,6 \frac{\text{mm}}{s}$$

Remmin ratanopeus ajan funktiona



```

if (x > 0) ∧ (x <  $\frac{t_{\text{paalu ympäri}}}{s}$ )
   $\frac{v_{\text{vetorata}(x, s)}}{\frac{mm}{s}}$ 
else
  "not defined"

```

Toimilaitteiden mitoitus, Liite B

Lähtöarvoja suunnittelua varten

Suunnittelupaine (ylipaineena ilmaistuna)

$$p_{\text{Käyttö}} := 6 \text{ bar}$$

Normaali ilmanpaine (ylipaineena ilmaistuna)

$$p_{\text{Ilma}} := 1,013 \text{ bar}$$

Suunnittelumassa

$$m_{\text{Suun}} := 8 \text{ kg}$$

Nesteen tiheys

$$\rho_{\text{Vesi}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Veden dynaaminen viskositeetti (t=20C)

$$\mu_{\text{Vesi}} := 1,0020 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$$

Veden kinemaattinen viskositeetti

$$\nu_{\text{Vesi}} := \frac{\mu_{\text{Vesi}}}{\rho_{\text{Vesi}}}$$

$$\nu_{\text{Vesi}} := 1,002 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Paalun suunnittelu ulkohalkaisija

$$D_{\text{Paalu}} := 323,9 \text{ mm}$$

Paalun suunnitteluvahvuus

$$t_{\text{Paalu}} := 5 \text{ mm}$$

Paalun suunnittelu sisähalkaisija

$$d_{\text{Paalu}} := D_{\text{Paalu}} - 2 \cdot t_{\text{Paalu}}$$

$$d_{\text{Paalu}} = 313,9 \text{ mm}$$

Paalun poikkileikkauksen pinta-ala

$$A_{\text{Paalu}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{Paalu}}^2 - d_{\text{Paalu}}^2)}{4}$$

Kitkakerroin (teräs-teräs, ei voitelua, lepo)

$$\mu = 0,15$$

Teräksen Poissonin luku

$$\nu_{\text{Teräs}} = 0,3$$

Ketjupyörän jakohalkaisija (3/8", 12 hammasta, kolmirivinen)

$$D_{\text{P}_\text{KP}} = 36,8 \text{ mm}$$

Ketjun leveys (3/8", kolmirivinen)

$$W_{\text{KP}} = 37,3 \text{ mm}$$

Ketjun jako (3/8")

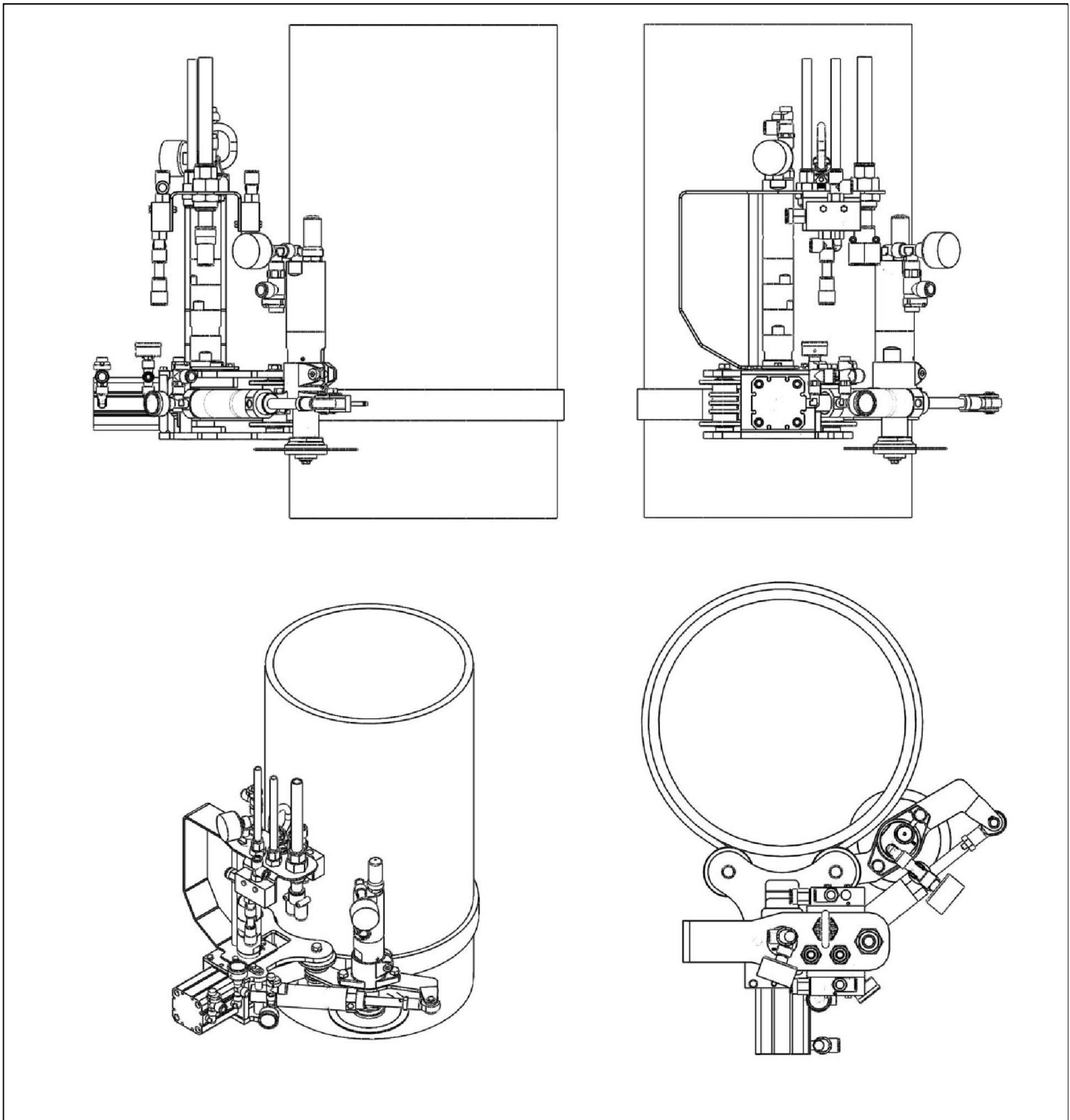
$$p_{\text{Ketju}} = 9,525 \text{ mm}$$

Laitteiston massakeskipisteen etäisyys paalun ulkoreunasta

$$L_1 = 140 \text{ mm}$$

$$\text{litra} = 1 \text{ dm}^3$$

Tämä laskenta on tehty prototyyppiä varten tehtävälle laitteelle.
Prototyypin paalun kooksi on oletettu 323,9x10.



Kuva 1. Havainnollistavia kuvia laitteen konstruktiosta.

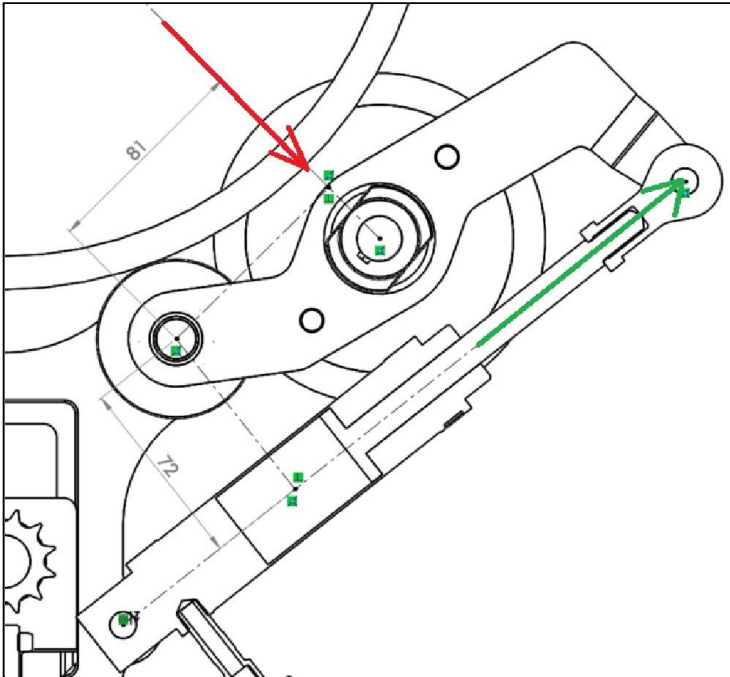
Katkaisusylinteri

Vaadittava voima leikkaukseen

Kokeilemalla on huomattu että putkea katkaistaessa kulmahiomakoneella täytyy konetta painaa noin 10kg vastaavalla voimalla eli 100 N voimalla. Maksimivoima jolla käsin voi painaa vastaa noin 30 kg painoa eli 300 N voimaa.

Katkaisuun vaadittava maksimivoima (sylinterin ulostyöntyessä)

$$F_{\text{KatkMax}} = 300 \text{ N}$$



Kuva 2. Leikkauksen nivelmekanismi prototyypin paalulle.

Kuvan 2 tilanteessa katkaisusylinteri on työntynyt täysin ulos. Kokeilemalla on huomattu tämän tilanteen aiheuttavan suurimman voiman sylinterille.

Kuvan 2 mitat

$$a_1 = 81 \text{ mm}$$

$$b_1 = 72 \text{ mm}$$

Koska leikkaus on kuitenkin toteutettu nivelmekanismilla täytyy sylinteriltä vaadittava voima laskea momenttiyhtälöllä kuvan 2 tilanteista.

$$F_{\text{KatkSylMax}} = \frac{a_1}{b_1} \cdot F_{\text{KatkMax}}$$

$$F_{\text{KatkSylMax}} = 338 \text{ N}$$

Sylinterin tulee myös voittaa kitkat mutta näitä ei lasketa vaan sylinteri yksinkertaisesti mitoitetaan hieman suureksi.

Huomataan, että 32 mm sylinteri on pienin joka riittävästi ylittää tarvitavan voiman.

Katkaisusylinterin männän halkaisija

$$D_{\text{KatkSyl}} = 32 \text{ mm}$$

Katkaisusylinterin männän varren halkaisija

$$d_{\text{KatkSyl}} = 16 \text{ mm}$$

Sylinteri antama voima plus-liikkeessä käyttöpaineella

$$F_{\text{KatkSylKäyttö}} = p_{\text{Käyttö}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{KatkSyl}}^2$$

$$F_{\text{KatkSylKäyttö}} = 483 \text{ N}$$

Varmuus katkaisusylinterin aiheuttamalle katkaisuvoimalle

$$n_{\text{KatkaisuVoima}} = \frac{F_{\text{KatkSylKäyttö}}}{F_{\text{KatkSylMax}}}$$

$$n_{\text{KatkaisuVoima}} = 1,43$$

Vaadittava iskun pituus

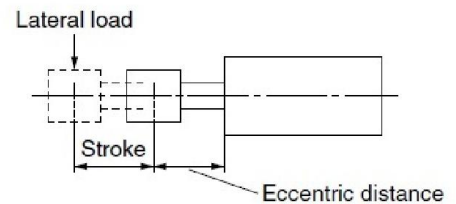
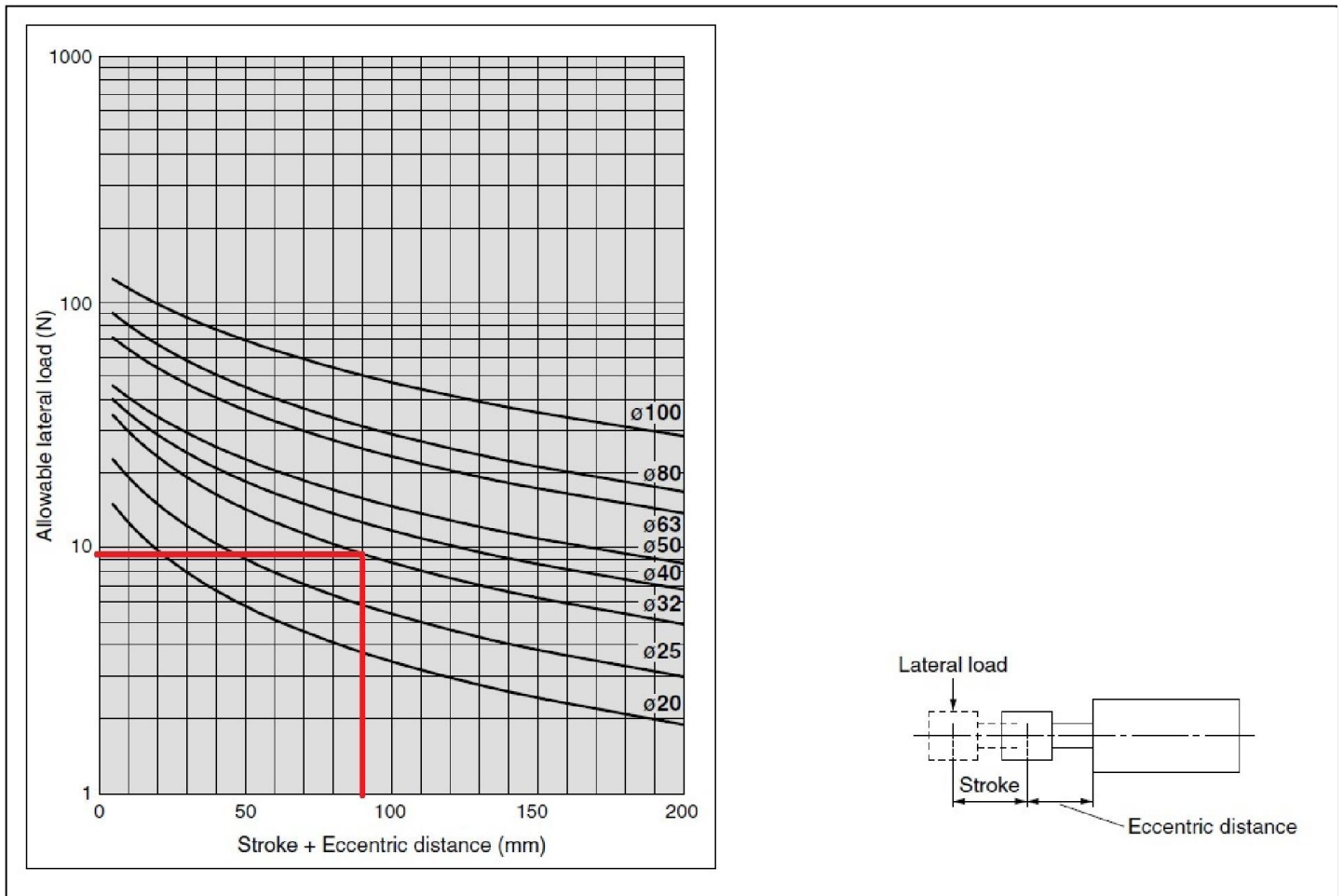
Nivelmekanismiratkaisun vaatima iskunpituus on löydetty kokeilemalla

Leikkaussylinterin iskun pituus

$$L_{\text{LeikkausSylIsku}} = 50 \text{ mm} \quad \text{Tämä on standardi isku-pituus}$$

Valittu leikkaussylinteri SMC:n CM2E32-50SZ.

Katkaisusylinterin lateraalikuorman kesto



Kuva 3. Sylinterin sallittu lateraalikuorma.

Kuorman arvioitu etäisyys sylinterin päädystä

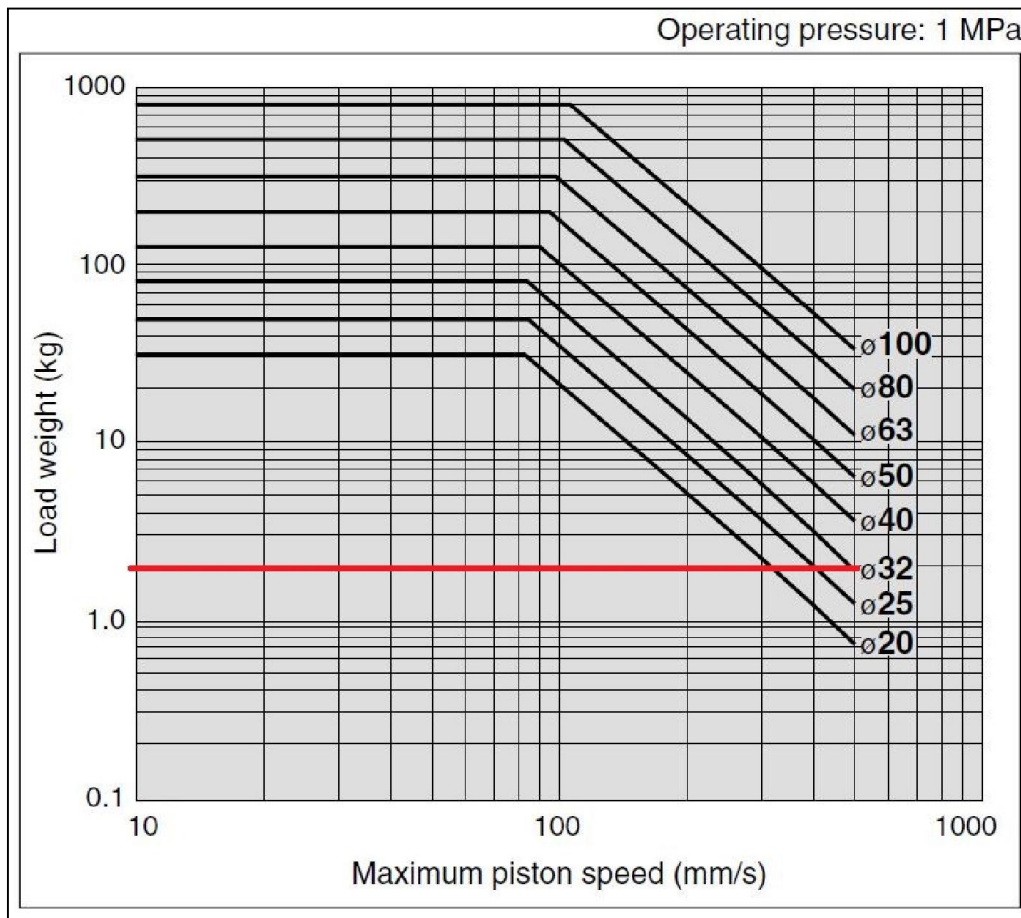
$$l_{\text{LeikkausSylKuorma}} = 90 \text{ mm}$$

Sallittu lateraali kuorma leikkauksessa

$$F_{\text{SylKatKLateraaliMax}} = 9 \text{ N}$$

Ideaalissa nivelmekanismissä sylinteriin ei kohdistu lateraaleja kuormia. Sylinterillä liikuteltava kelkka (levy + moottori) on tuettu runkoon, joten sen massasta ei pitäisi aiheutua sylinterille lateraaleja kuormia. Toisaalta esimerkiksi veden virtaus voi aiheuttaa lateraaleja kuormia.

Katkaisusylinterille sallittava kineettinen energia



Kuva 4. Sylinteri sallittu kineettinen energia.

Valitun sylinterin sallitut nopeudet ovat 50–500 mm/s. Liikutettaessa 32 mm sylinteriä maksimi nopeudella, on sallittu kuorma 2 kg. Kuorma tuskin tulee olemaan edes näin iso eikä sylinteriä tulla liikuttamaan täydellä nopeudella. Nopeuden säätämiseksi sylinterin eteen tullaan laittamaan kuristus.

Katkaisusylinteri on jousipalautteinen, joten miinus liikettä ei tarvitse tarkastella.

Katkaisusylinterin suunnittelunopeus (plus-liikkeessä)

$$v_{\text{KatkSylSuun}} = 100 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Tarvittava ilmamäärä

Tarvittava tilavuusvirta käyttöpaineessa

$$Q_{\text{KatkSylSuun}} = v_{\text{KatkSylSuun}} \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{KatkSyl}}^2}{4} \right)$$

$$Q_{\text{KatkSylSuun}} = 5 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

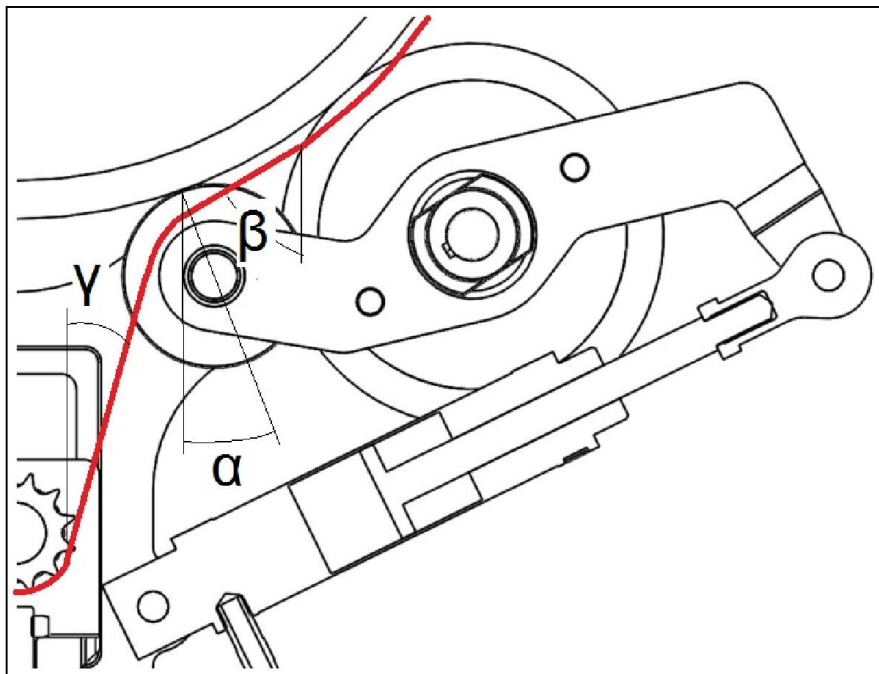
Tarvittava tilavuusvirta normaalilitroina minuutissa

$$Q_{\text{KatkSylNormSuun}} = \left(\frac{p_{\text{Käyttö}} + p_{\text{Ilma}}}{p_{\text{Ilma}}} \right) \cdot Q_{\text{KatkSylSuun}}$$

$$Q_{\text{KatkSylNormSuun}} = 33,4 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Kiristyssylinteri

Kiristyssylinteriltä tarvittava voima lasketaan kahdella eri tavalla ja niistä valitaan suurempi. Ensimmäisessä tilanteessa varmistetaan että ketjun leveys on riittävä tukemaan laitteen paino. Toisessa tilanteessa otetaan huomioon ketjun ja paalun välinen kitka.



Kuva 5. Kiristyssylinterinvoiman laskemisen kannalta oleellista geometriaa. Punainen viiva on ketjun keskilinja.

Tukivoiman ja pystysuoran välinen kulma

$$\alpha_1 := 20 \text{ deg}$$

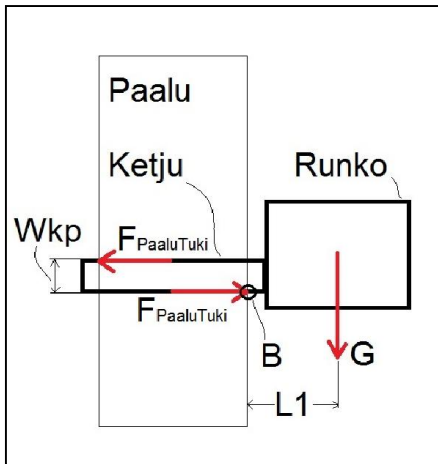
Ketjun voiman ja pystysuoran välinen kulma paalulla

$$\beta_1 := 57 \text{ deg}$$

Ketjun ja pystysuoran välinen kulma ketjupyörällä

$$\gamma_1 := 16 \text{ deg}$$

1. Ketjun leveyden riittäminen tukemaan laitteen painoa



Kuva 6. Yksinkertaistettulaitteen vk-kuva, kun terä on irti paalusta.

Laitteiston paino

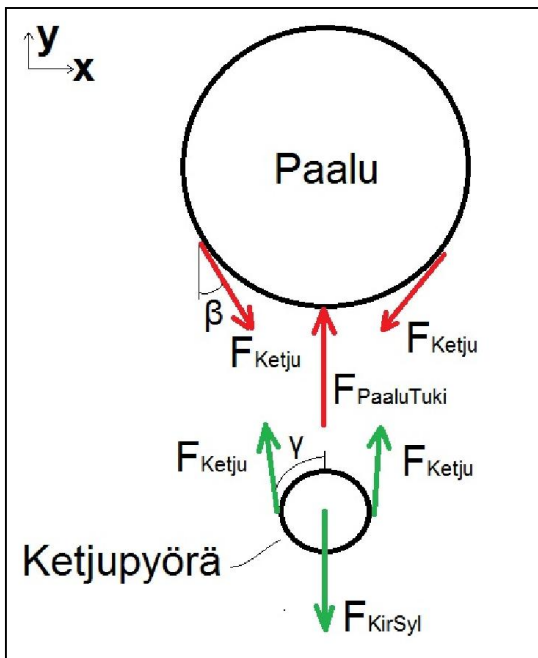
$$G_{\text{Laitte}} = m_{\text{Suun}} \cdot g_e$$

$$G_{\text{Laitte}} = 78 \text{ N}$$

Pisteen B momenttiyhtälöstä paalun laitteeseen aiheuttama tukivoima

$$F_{\text{PaaluTuki}} = \frac{L_1}{W_{\text{KP}}} \cdot G_{\text{Laitte}}$$

$$F_{\text{PaaluTuki}} = 294 \text{ N}$$



Kuva 7. Yksinkertaistettupaalun ja ketjupyörän vk-kuva, kun terä on irti paalusta. Ketjut ovat katkaistu juuri siltä kohtaa mistä ne irtoavat paalusta ja ketjupyörästä. Punaiset voimat ovat paaluun kohdistuvia voimia. Vihreät nuolet ovat ketjupyörään kohdistuvia voimia.

Kuvassa 7 näkyvä FpaaluTuki on molemmilta ohjauspyöriltä yhteensä tuleva voima yksinkertaistettuna.

Ketjun voiman pystykomponentti paalulla

$$F_{\text{KetjuPaaluY1}} = \frac{F_{\text{PaaluTuki}}}{2}$$

$$F_{\text{KetjuPaaluY1}} = 147 \text{ N}$$

Ketjun voima ketjun suunnassa

$$F_{\text{Ketju1}} = \frac{F_{\text{KetjuPaaluY1}}}{\cos(\beta_1)}$$

$$F_{\text{Ketju1}} = 270 \text{ N}$$

3/8 tuuman jaolla olevan kolmirivisen rullaketjun murtokuorma on 23 600 N

Ketjuvoiman pystykomponentti ketjupyörällä

$$F_{\text{KetjupyöraY1}} = F_{\text{Ketju1}} \cos(\gamma_1)$$

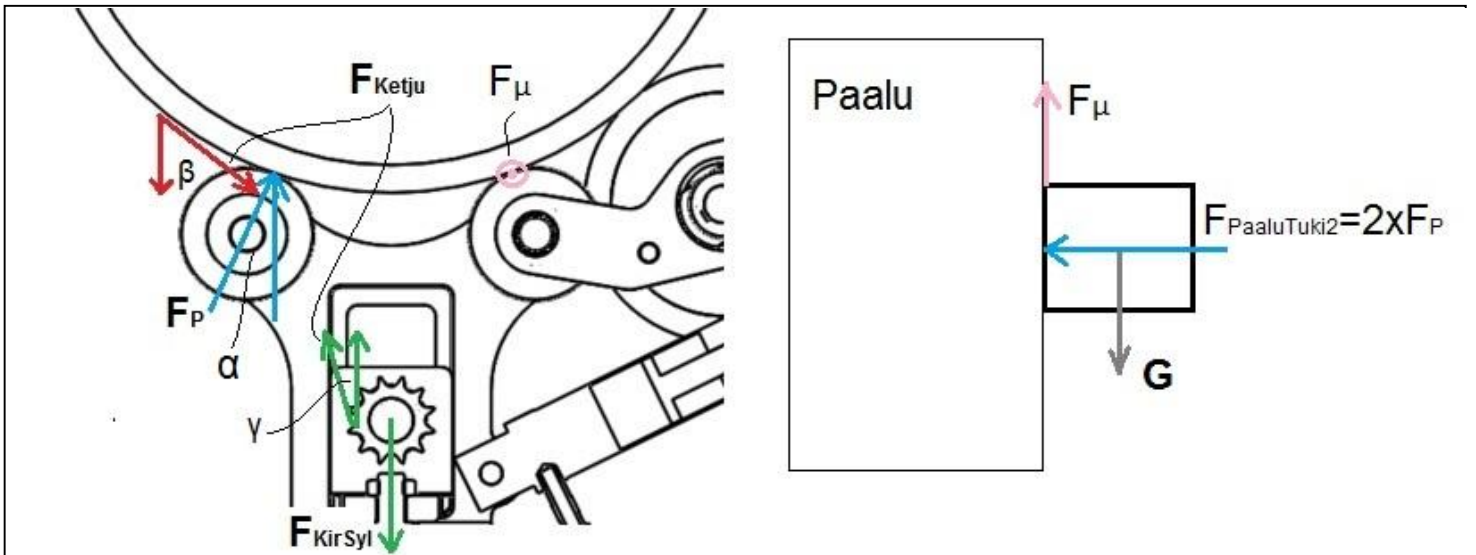
$$F_{\text{KetjupyöraY1}} = 260 \text{ N}$$

Sylinteriltä vaadittava kiristävä voima

$$F_{\text{KirSyl1}} = 2 \cdot F_{\text{KetjupyöraY1}}$$

$$F_{\text{KirSyl1}} = 520 \text{ N}$$

2. Kitkaan perustuva laskentatapa



Kuva 8. Laitteiston paaluun kohdistamat voimat (punainen ja sininen). Punainen voima kuvaa ketjua, joka on paalussa kiinni ja sininen ohjauspyörän paaluun aiheuttamaa tukivoimaan. Myös kitkavoima on paaluun kohdistuva voima.

Kiristyskelkan voimat on näytetty vihreällä. Näistä vain vasemman puolen voimat on piirretty näkyviin. Oikeanpuoleisessa yksinkertaistetussa esityksessä $F_{\text{paalutuki 2}}$ on molemmilta ohjauspyöriltä yhteensä tuleva voima paalulle. Kitkavoima (vaaleanpunainen) tulee vasemmanpuoleisessa kuvannossa suoraan lukijaa kohti. Tämä voima on näytetty vain oikeanpuoleiselle tukipyörälle. Paalua vasten nojautuvilta tukipyöriltä vaadittava tukivoima on kitkavoimaa kohtisuorasti vastaan oleva voima. Kitkavoiman tulee olla yhtä suuri kuin laitteen painon.

Kokonaisuudessa tarvittava tukivoima riittävän kitkan aikaansaamiseksi

$$F_{\text{Paalutuki2}} = \frac{G_{\text{Laite}}}{\mu}$$

$$F_{\text{Paalutuki2}} = 523 \text{ N}$$

Tukivoima yhdellä pyörällä

$$F_p := \frac{F_{\text{Paalutuki2}}}{2}$$

$$F_p = 262 \text{ N}$$

Tukivoiman pystykomponentti

$$F_{pY} := F_p \cdot \cos(\alpha_1)$$

$$F_{pY} = 246 \text{ N}$$

Ketjun paalua vetävän voiman pystykomponentti tulee olla yhtä suuri

$$F_{\text{KetjupaaluY2}} = F_{\text{py}}$$

Ketjulta vaadittava vetävä voima ketjun suunnassa

$$F_{\text{Ketju2}} = \frac{F_{\text{KetjupaaluY2}}}{\cos(\beta_1)}$$

$$F_{\text{Ketju2}} = 451 \text{ N}$$

3/8 tuuman jaolla olevan kolmirivisen rullaketjun murtokuorma on 23 600 N

Ketjupyörää vetävän voiman pystykomponentti

$$F_{\text{KetjupyöräY2}} = F_{\text{Ketju2}} \cos(\gamma_1)$$

$$F_{\text{KetjupyöräY2}} = 434 \text{ N}$$

Kiristyssylinteriltä vaadittava vetävä voima kiristykseen (miinus-liike)

$$F_{\text{KirSyl2}} = 2 \cdot F_{\text{KetjupyöräY2}}$$

$$F_{\text{KirSyl2}} = 867 \text{ N}$$

Kiristyssylinteriltä vaadittava voima laskettuna kahdella eri tavalla

Laskutapa 1

$$F_{\text{KirSyl1}} = 520 \text{ N}$$

Laskutapa 2

$$F_{\text{KirSyl2}} = 867 \text{ N}$$

Laskentatapa 2 vaatii kiristyssylinteriltä suuremman voiman.

Sylinterin tulee myös voittaa kitkat mutta näitä ei lasketa vaan sylinteri yksinkertaisesti mitoitetaan hieman suureksi.

Huomataan, että 50 mm sylinteri on pienin joka riittävästi ylittää tarvitavan voiman.

Valitaan sylinterin männän kooksi 50 mm.

Kiristyssylinterin männän halkaisija

$$D_{\text{KirSyl}} = 50 \text{ mm}$$

Kiristyssylinterin männän varren halkaisija

$$d_{\text{KirSyl}} = 20 \text{ mm}$$

Sylinteri antama voima miinus-liikkeessä käyttöpaineella

$$F_{\text{KirSylKäyttöP}} = p_{\text{Käyttö}} \frac{\pi}{4} \left(D_{\text{KirSyl}}^2 - d_{\text{KirSyl}}^2 \right)$$

$$F_{\text{KirSylKäyttöP}} = 990 \text{ N}$$

Varmuus kiristyssylinterin aiheuttamalle kiristysvoimalle

$$n_{\text{KiristysVoima}} = \frac{F_{\text{KirSylKäyttöP}}}{F_{\text{KirSyl2}}}$$

$$n_{\text{KiristysVoima}} = 1,14$$

Valitun sylinterin aiheuttama ketjua vetävä voima

$$F_{\text{Ketju}} = \frac{F_{\text{KirSylKäyttöP}}}{2 \cdot \cos(\gamma_1)}$$

$$F_{\text{Ketju}} = 515 \text{ N}$$

Vaadittava iskun pituus

Kiristäessä laitetta paalun ympärille tulee ketjun olla ensin löysästi paalun ympärillä. Ketjun tulee olla niin löysällä että ketju saadaan vaivattomasti asennettua laitteeseen. Liiallinen ketjun löysyys kuitenkin kasvattaa ketjun pituutta joka vastaavasti kasvattaa sylinteriltä tarvittavaa iskun pituutta ja täten koko laitteen kokoa.

Arvioidaan että riittävä löysyys saavutetaan kun ketju on löysänä paalun pinnasta irti 10 mm koko paalun piirin alueelta.

Ketjun etäisyys paalusta koko piirin matkalta ennen kiristystä

$$l_{\text{KetjuPaalunPinnasta}} = 10 \text{ mm}$$

Tällöin mitta joka ketjua tulee kiristää on kahden sellaisen ympyrän piirin erotus joidenka säteet eroavat toisistaan 10 mm. Tämä mitta ei riipu ympyröiden halkaisijoista vaan ainoastaan halkaisijoiden erosta. Otetaan kuitenkin huomioon, että ketju on paalun ympärillä vain noin 5/6 osa kierrosta.

Ketjua tulee kiristää

$$l_{\text{KetjunKir}} = \frac{5}{6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot l_{\text{KetjuPaalunPinnasta}})$$

$$l_{\text{KetjunKir}} = 52,4 \text{ mm}$$

Mikäli ketjut liikkuisivat kiristyessä sylinterin männänvarren suuntaisesti tulisi sylinterin tehdä vain puolet edellä lasketusta mitasta riittävän kiristyksen aikaan saamiseksi. Kuvasta 8 voi kuitenkin nähdä että ketjut ovat hieman kulmassa. Tämän takia sylinterin liikkeeksi tulee valita hieman suurempi kuin edellä lasketun arvon puolikas.

Kiristyssylinteriltä vaadittava iskun pituus yhdensuuntaisessa tilanteessa

$$L_{\text{KirSylIskuVaad}} = \frac{l_{\text{KetjunKir}}}{2}$$

$$L_{\text{KirSylIskuVaad}} = 26,2 \text{ mm}$$

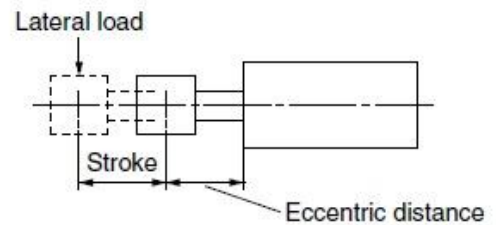
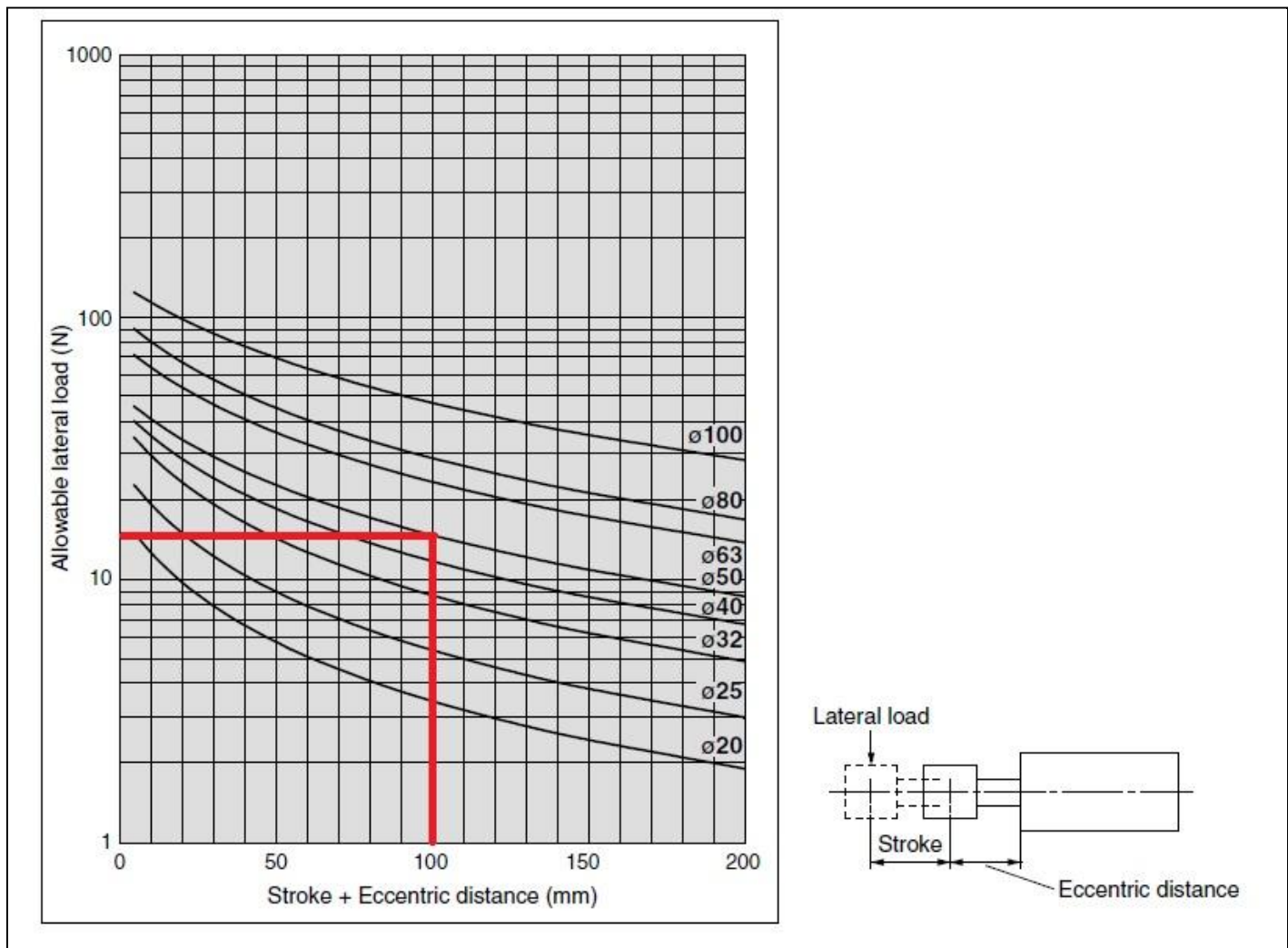
Sylinterin liike valitaan ketjujen vinoudesta johtuen hieman suuremmaksi jotta ketjua saadaan kiristettyä riittävästi.

Kiristyssylinterin iskun pituus

$$L_{\text{KirSylIsku}} = 35 \text{ mm} \quad \text{Tämä on standardi isku-pituus}$$

Valittu kiristyssylinteri SMC:n C55B50-35M

Kiristyssylinterin lateraalikuorman kesto



Kuva 9. Sylinterin sallittu lateraalikuorma.

Kuorman arvioitu etäisyys sylinterin

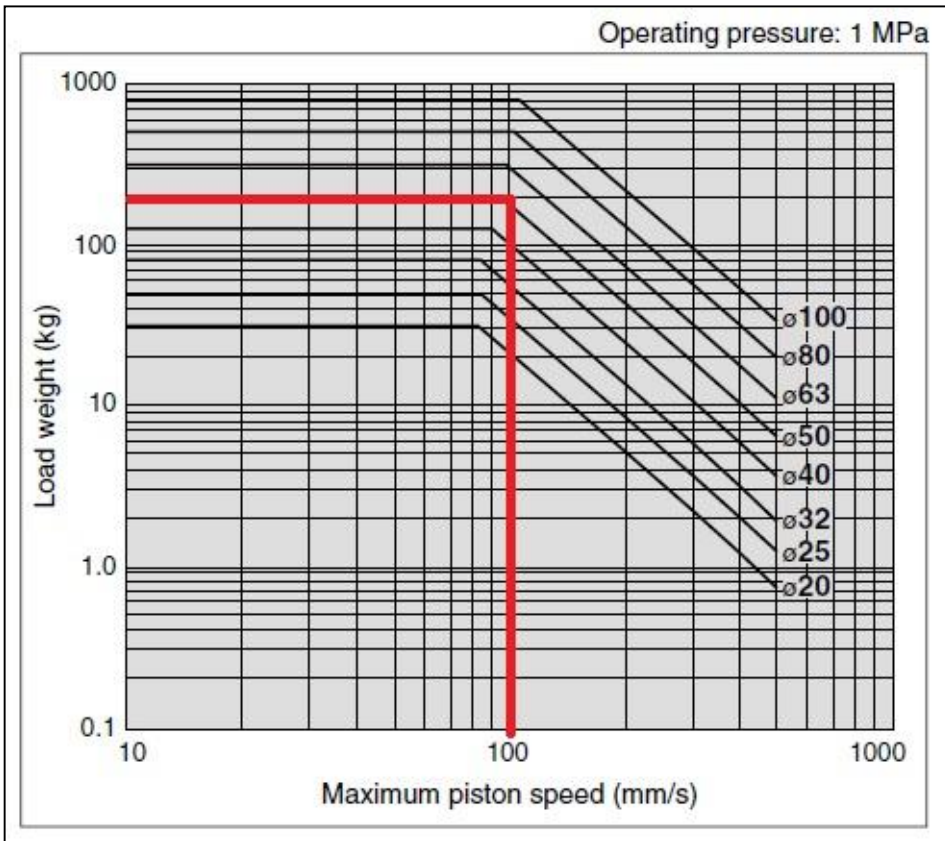
$$l_{\text{KirSylKuorma}} = 100 \text{ mm}$$

Sallittu lateraali kuorma leikkauksessa

$$F_{\text{SylKatkLateraaliMax}} = 14 \text{ N}$$

Liikuteltava kuorma on rungon sisällä tuettuna joten siihen ei kohdistu lateraaleja kuormituksia.

Kiristyssylinterille sallittava kineettinen energia



Kuva 10. Sylinteri sallittu kineettinen energia.

Sylinterin nopeus ja liikuteltava kuorma

Sylinterille halutaan melko hidas nopeus. Alle 100 mm/s.

Suurin sallittu liikuteltava massa

$$m_{\text{SylKirKLiikuteltavaMassaMax}} = 200 \text{ kg}$$

Liikuteltava massa ei missään tapauksessa tule olemaan näin iso

Tarvittava ilmamäärä

Valitun sylinterin sallitut nopeudet ovat 50-500 mm/s. Sylinteriltä ei vaadita nopeita liikkeitä joten asetetaan nopeusvaatimus alhaiseksi.

Kiristyssylinterin suunnittelunopeus

$$v_{\text{KirSylSuun}} = 100 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Kiristyssylinterintyöliike on miinus-liike. Tämä tarkoittaa sitä, että samalla ilmamäärällä plus liike on jonkin verran hitaampi. Tällä ei ole käytännön kannalta juurikaan merkitystä, koska kiristyssylinterinnopeudella ei ole laitteen käytöntä kannalta suurta merkitystä. Kunhan liike ei ole liian nopea. Sylinteri tullaan kuitenkin kuristamaan jolloin voidaan helposti kontrolloida että se ei liiku liian nopeasti.

Tarvittava tilavuusvirta käyttöpaineessa

$$Q_{\text{KirSylSuun}} = v_{\text{KirSylSuun}} \left(\frac{\pi \cdot \left(D_{\text{KirSyl}}^2 - d_{\text{KirSyl}}^2 \right)}{4} \right)$$

$$Q_{\text{KirSylSuun}} = 10 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Tarvittava tilavuusvirta normaalilitroina minuutissa

$$Q_{\text{KirSylNormSuun}} = \left(\frac{p_{\text{Käyttö}} + p_{\text{Ilma}}}{p_{\text{Ilma}}} \right) \cdot Q_{\text{KirSylSuun}}$$

$$Q_{\text{KirSylNormSuun}} = 68,5 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Katkaisumoottori

Katkaisumoottorilta vaaditaan samantapaisia suoritusarvoja kuin kulmahiomakoneelta.

Teho (W)	720	840	1100	2000	2 600
Pyörimisnopeus (rpm)	11 000	11 000	11 000	6 600	6 600
Laikan halkaisija (mm)	125	125	125	230	230
Momentti (Nm)	0,6	0,7	1,0	2,9	3,8

Kuva 11. Eräiden kulmahiomakoneiden arvoja.

Momentit ovat leikkaukseen tarvittavia momentteja.

Leikkausta vastustava momentti on siis korkeintaan näin iso.


Kuvan 12 pyörimisnopeudet perustuvat siihen että laikoille sallitaan maksimissaan 80 m/s kehänopeus.


Pyörimisnopeus (rpm)	15 300	13 300	12 250	8 500	6 650
Laikan halkaisija (mm)	100	115	125	180	230

Kuva 12. Erikokoisten laikkojen sallitut pyörimisnopeudet.

Atlas Copcon ruostumattomien paineilmamoottorien tehokkaimman sarjan teho on 840 W.

Näistä nopeimman ja toiseksi nopeimman pyörimisnopeuden omaavat mallit ovat LZB46-RL-A200 ja LZB46-RL-A065.

PERFORMANCE CURRENT MOTOR:	
PERFORM. AT 6,30 bar(e):	
MAXPOWER POINT:	
Torque [Nm]	0,74
Speed [r/min]	10803
Max power [kW]	0,84
Air consum. [l/s]	16,2
Min Starting torque [Nm]	1,20
Free speed [r/min]	21500
Stall torque [Nm]	1,48
Product number	8411 0472 15
 Class	Ex II 2GD c T4 IIC T110 °C
REGULATE TO WORKING POINT:	
Working pressure [bar(e)]	
Or	
Restricted to free speed [r/min]	
Weight [kg]	1,80

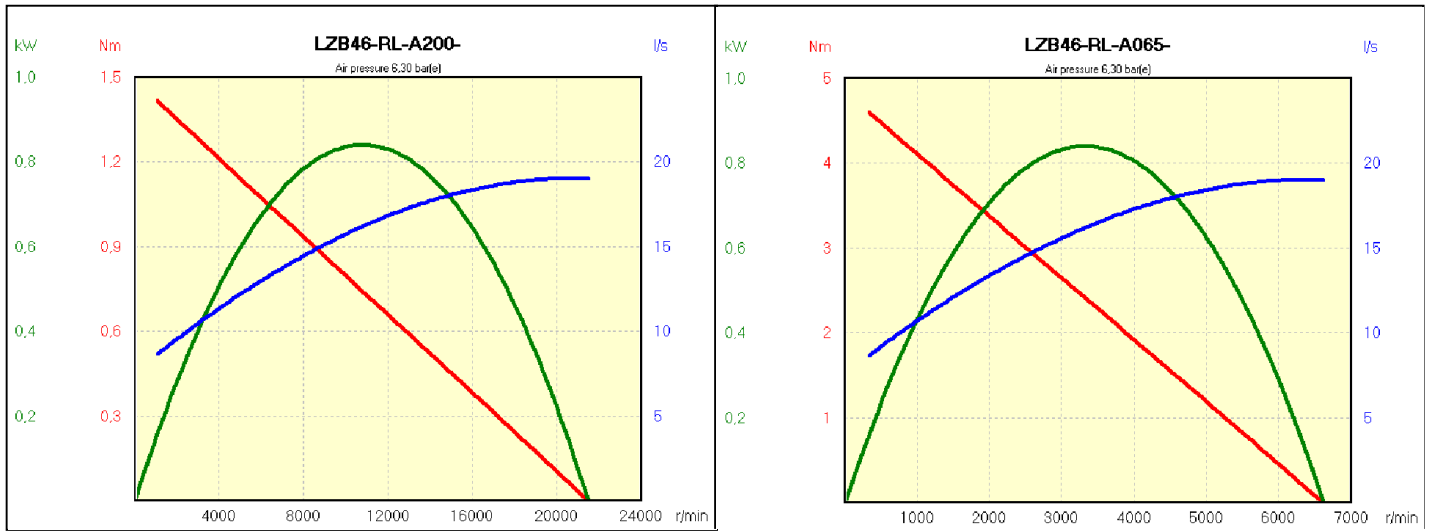
PERFORMANCE CURRENT MOTOR:	
PERFORM. AT 6,30 bar(e):	
MAXPOWER POINT:	
Torque [Nm]	2,4
Speed [r/min]	3324
Max power [kW]	0,84
Air consum. [l/s]	16,2
Min Starting torque [Nm]	3,90
Free speed [r/min]	6615
Stall torque [Nm]	4,83
Product number	8411 0472 23
 Class	Ex II 2GD c T4 IIC T110 °C
REGULATE TO WORKING POINT:	
Working pressure [bar(e)]	
Or	
Restricted to free speed [r/min]	
Weight [kg]	1,80

Kuva 13. LZB46-RL-A200 ja LZB46-RL-A065 suoritusarvoja

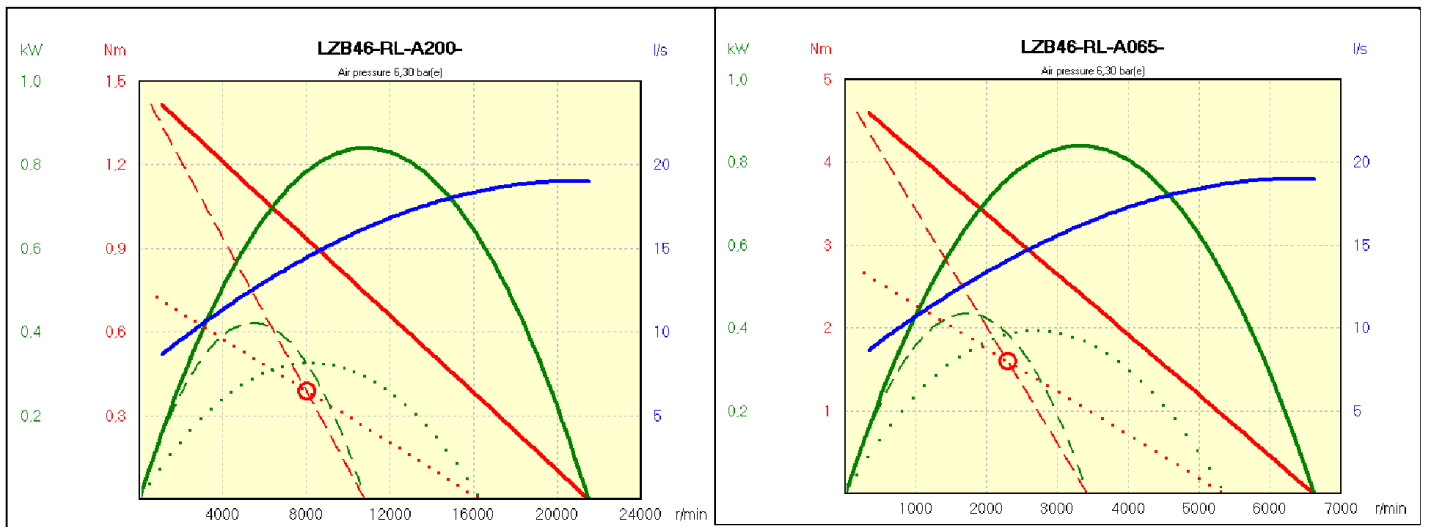
Protyyppiin hankitaan perusteräksiset mallit, jotka omaavat samat suoritusarvot. Varsinaiselle tuotteelle tarvitaan kuitenkin ruostumattomat osat.

LZB46-RL-A200 ei saa pyöriä vapaana edes pienillä laikoilla. vrt. kuva 12.

Kuvassa 13 esitetyt arvot ovat saatu Atlas Copcon Air Motor Selection Tool ohjelmalla. Myös seuraavat kuvat 14 ja 15 ovat tehty kyseisellä ohjelmalla.



Kuva 14. LZB46-RL-A200 ja LZB46-RL-A065 käyrät 6.3 bar paineella.



Kuva 15. LZB46-RL-A200 ja LZB46-RL-A065 käyrät äärimmilleen rajoitettuna. Kuristettu (pitkä katkoviiva) ja painesäätö (pistekatkoviiva)

LZB-46RL-A200 ja LZB-46RL-A065 max tehon suoritusarvoja

Momentti

$$M_{LZB46A200} = 0,74 \text{ Nm}$$

Momentti

$$M_{LZB46A065} = 2,4 \text{ Nm}$$

Kierrosnopeus

$$n_{LZB46A200} = 10803 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Kierrosnopeus

$$n_{LZB46A065} = 3324 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Kulmanopeus

$$\omega_{LZB46A200} = 2 \cdot \pi \cdot n_{LZB46A200}$$

Kulmanopeus

$$\omega_{LZB46A065} = 2 \cdot \pi \cdot n_{LZB46A065}$$

Ilmankulutus

$$Q_{LZB46A200_Norm} = 16,2 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{s}}$$

Ilmankulutus

$$Q_{LZB46A065_Norm} = 16,2 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{s}}$$

$$Q_{LZB46A200_Norm} = 972 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

$$Q_{LZB46A065_Norm} = 972 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

The performance data stated in this catalogue is valid for an air supply pressure of 6.3 bar (91 psi), gauge. Air consumption values are for free air delivery – (i.e., the volume the consumed air would occupy if allowed to expand to atmospheric pressure).

Valmistajan taulukoidut arvot ovat vapaaseen ilmaan.

Ilmankulutus käyttöpaineessa

$$Q_{LZB46A200} = \frac{p_{\text{Ilma}}}{p_{\text{Käyttö}} + p_{\text{Ilma}}} \cdot Q_{LZB46A200_Norm}$$

$$Q_{LZB46A200} = 140 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

$$Q_{LZB46A065} = \frac{p_{\text{Ilma}}}{p_{\text{Käyttö}} + p_{\text{Ilma}}} \cdot Q_{LZB46A065_Norm}$$

$$Q_{LZB46A065} = 140 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Veden alla laikan pyörimistä vastustaa momentti

Kaava on Jani Virtasen diplomityöstä nimeltä Flotaatioprosessin ilmastusreikälevysekoittimella (2003). Kyseinen kaava on mainitun diplomityön kaava 3.8, jota on sievennetty. Tämä kaava kuvaa molemmin puolin nesteessä olevaan pyörivään levyyn kohdistuvan pyörimistä vastustavan momentin.

$$M = 0,073 \cdot \rho \cdot \omega^{1,8} \cdot R^{4,6} \cdot u^{0,2}$$

Vastustava momentti laikan halkaisijan funktiona mallille A200 max teholla

$$M_{\text{vedenallaA200}}(D_{\text{laikka}}) = 0,073 \cdot \rho_{\text{Vesi}} \cdot \omega_{\text{LZB46A200}}^{1,8} \cdot \left(\frac{D_{\text{laikka}}}{2} \right)^{4,6} \cdot u_{\text{Vesi}}^{0,2}$$

Vastustava momentti laikan halkaisijan funktiona mallille A065 max teholla

$$M_{\text{vedenallaA065}}(D_{\text{laikka}}) = 0,073 \cdot \rho_{\text{Vesi}} \cdot \omega_{\text{LZB46A065}}^{1,8} \cdot \left(\frac{D_{\text{laikka}}}{2} \right)^{4,6} \cdot u_{\text{Vesi}}^{0,2}$$

Leikkaamiseen jäävä momentti kun veden vastus on voitettu mallille A200 max teholla

$$M_{\text{leikkausA200}}(D_{\text{laikka}}) = M_{\text{LZB46A200}} - M_{\text{vedenallaA200}}(D_{\text{laikka}})$$

Leikkaamiseen jäävä momentti kun veden vastus on voitettu mallille A065 max teholla

$$M_{\text{leikkausA065}}(D_{\text{laikka}}) = M_{\text{LZB46A065}} - M_{\text{vedenallaA065}}(D_{\text{laikka}})$$

Ratanopeus laikan halkaisijan funktiona mallille A200 max teholla

$$v_{\text{rataA200}}(D_{\text{laikka}}) = \omega_{\text{LZB46A200}} \cdot \frac{D_{\text{laikka}}}{2}$$

Ratanopeus laikan halkaisijan funktiona mallille A065 max teholla

$$v_{\text{rataA065}}(D_{\text{laikka}}) = \omega_{\text{LZB46A065}} \cdot \frac{D_{\text{laikka}}}{2}$$

Malli A200 veden alla max tehon kierrosnopeudella

$$M_{\text{vedenallaA200}}(115 \text{ mm}) = 2,8 \text{ N m}$$

$$M_{\text{leikkausA200}}(115 \text{ mm}) = -2,1 \text{ N m}$$

Veden vastustava momentti suurempi kuin momentti maksimiteholla!

$$v_{\text{rataA200}}(115 \text{ mm}) = 65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nopeuden puolesta moottori olisi ok.

Malli A065 veden alla max tehon kierrosnopeudella

$$M_{\text{vedenallaA065}}(115 \text{ mm}) = 0,3 \text{ N m}$$

$$M_{\text{leikkausA065}}(115 \text{ mm}) = 2,1 \text{ N m}$$

$$v_{\text{rataA065}}(115 \text{ mm}) = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{vedenallaA065}}(125 \text{ mm}) = 0,5 \text{ N m}$$

$$M_{\text{leikkausA065}}(125 \text{ mm}) = 1,9 \text{ N m}$$

$$v_{\text{rataA065}}(125 \text{ mm}) = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{vedenallaA065}}(150 \text{ mm}) = 1,2 \text{ N m}$$

$$M_{\text{leikkausA065}}(150 \text{ mm}) = 1,2 \text{ N m}$$

$$v_{\text{rataA065}}(150 \text{ mm}) = 26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{vedenallaA065}}(180 \text{ mm}) = 2,7 \text{ N m}$$

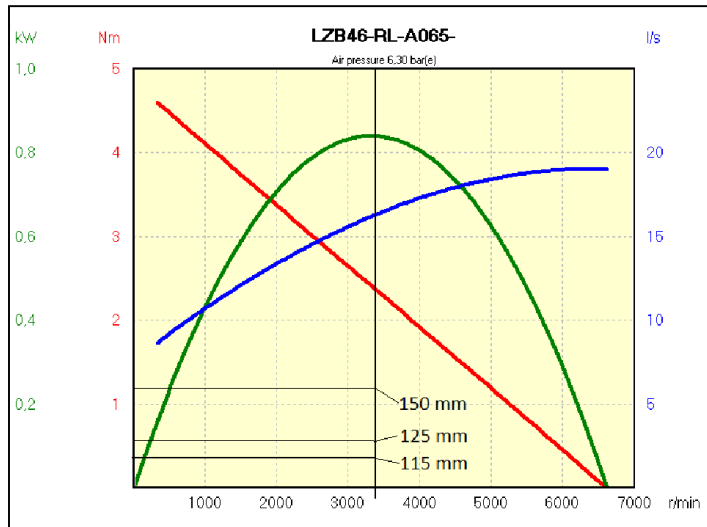
$$M_{\text{leikkausA065}}(180 \text{ mm}) = -0,3 \text{ N m}$$

Veden vastustava momentti suurempi kuin momentti maksimiteholla!

$$v_{\text{rataA065}}(180 \text{ mm}) = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

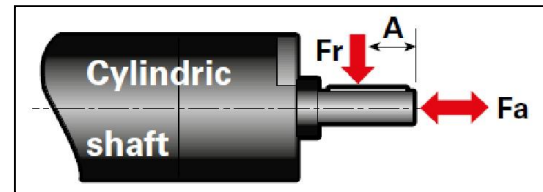
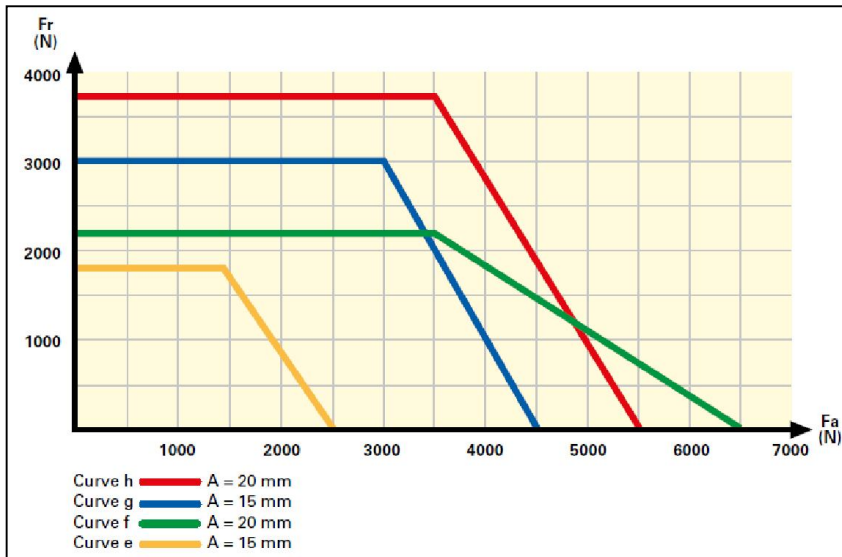
Jotta moottorin käyttö olisi mahdollista sekä veden alla että veden päällä valitaan malli LZB46-RL-A065.

Sopivin laikka lienee 115 tai 125 mm.



Kuva 16. LZB-RL-A065 moottorin veden alla pyörivien erikokoisten laikkojen aiheuttamat momentit maksimiteholla. Matka, joka jää merkittyjen halkaisijoiden vaakasuuntaisten viivojen ja momenttikäyrän väliin max teholla kuvaavat katkaisuun jäävää momenttia.

Katkaisumoottorin akseliin kohdistuvat voimat



Kuva 17. Katkaisumoottorin akselin aksiaalisen ja radiaalisen kuorman kestoja. LZB46-RL-A065 mallia kuvaa keltainen käyrä.

Katkaisumoottorille sallittu radiaalikuorma

$$F_{\text{KatkRadSai}} = 1800 \text{ N}$$

Aksiaalista kuormaa tilanteessa ei juurikaan ole joten radiaalikuormalle voidaan sallia kuvan 17 maksimi arvo.

Katkaisumoottoria radiaalisesti kuormittama voima on se voima jolla terää tulee työntää paalua kohti jotta leikkaus onnistuisi. Tämä voima on määritetty aikaisemmin.

Verrataan sylinterin aiheuttamaa katkaisuvoimaa moottorin akselille sallittuun voimaan.

$$F_{\text{KatkSylKäyttö}} = 483 \text{ N} < F_{\text{KatkRadSai}} = 1800 \text{ N}$$

Moottorin akseli kestää siis paljon suurempia kuormia kuin mitä tilanteessa oikeasti ilmenee. Radiaalinen voima ei kuitenkaan sijaitse moottorin akselilla kuvan 17 oikeanpuolimmaisesta piirustuksesta mukaisesti. Todellisuudessa laikka, ja myös sen aiheuttama radiaalinen voima, sijaitsee kauempana moottorin laakereista jolloin radiaali voiman niille aiheuttama kuormakin on suurempi. Tilanteen maksivoima on kuitenkin vain neljäsosa siitä voimasta jonka akseli kestää, joten moottorin akselin voidaan olettaa kestävänsä vaikka radiaali voima sijaitsisikin 2-3 kertaa kauempana verrattuna kuvaan 17.

Laitetta pyörittävä moottori

1. Kierrosnopeus

Pienelle paalulle (halkaisija 90 mm ja seinämävahvuus 3,2 mm) tehtiin kulmahiomakoneella katkaisutestejä. Useasta katkaisusta otettiin aika, jota verrattiin katkaistuun pinta-alaan. Tämän avulla saatiin määritettyä suunnitellua varten suuntaa-antava katkaisunopeus.

Testeissä todettu kulmahiomakoneen leikkausnopeus pinta-alalle

$$v_A := 20 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Tällöin laitteen pyörimisnopeus paalun kehällä

$$v_{\text{leikkaus_kehä}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{Paalu}}}{\left(\frac{A_{\text{Paalu}}}{v_A} \right)}$$

$$v_{\text{leikkaus_kehä}} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Ketjulla on sama nopeus

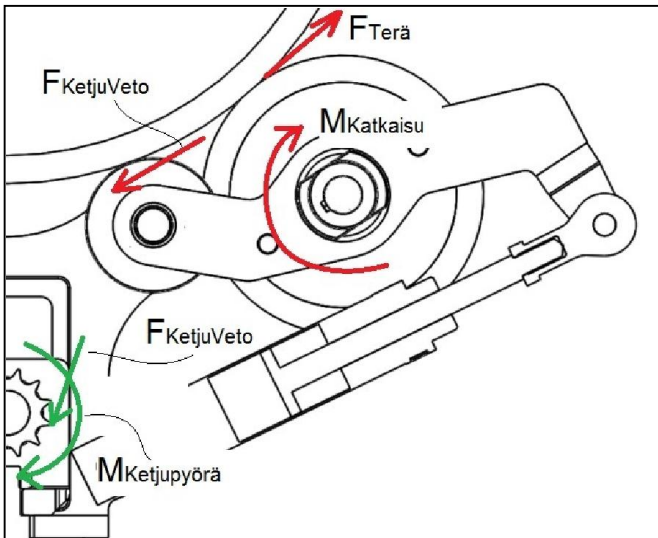
Ketjupyörän kierrosnopeus halutun ratanopeuden saavuttamiseksi

$$n_{\text{ketjupyörä}} = \frac{v_{\text{leikkaus_kehä}}}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{PKP}}}{2} \right)}$$

$$n_{\text{ketjupyörä}} = 2,1 \frac{1}{\text{min}}$$

2. Momentti

Oletetaan että vain katkaisun aiheuttama vastustava voima tulee huomioida kun lasketaan laitteen pyörittämiseen tarvittavaa momenttia. Esimerkiksi kitkat paalun ja pyörien kosketuksissa jätetään huomiotta.



Kuva 18. Leikkauksen aiheuttama voima ja sen välittyminen ketjupyörälle. Punaiset voimat ovat paaluun kohdistuvia voimia. Vihreä voima ja momentti kuvaavat ketjupyörällä olevaa voimaa ja momenttia.

Katkaisevalla terällä olevana momenttina käytetään katkaisumoottorinmomenttia maksimiteholla.

$$M_{Katkaisu} = M_{LZB46A065}$$

$$M_{Katkaisu} = 2,4 \text{ N m}$$

Terän aiheuttama voima putken pintaan (125 mm laikka)

$$F_{Terä} = \frac{M_{Katkaisu}}{\frac{125 \text{ mm}}{2}}$$

$$F_{Terä} = 38,4 \text{ N}$$

Jotta laite lähtee pyörimään paalun ympäri tulee ketjua vetää samansuuruisella voimalla.

Ketjulta vaadittava vetävä voima

$$F_{KetjuVeto} = F_{Terä}$$

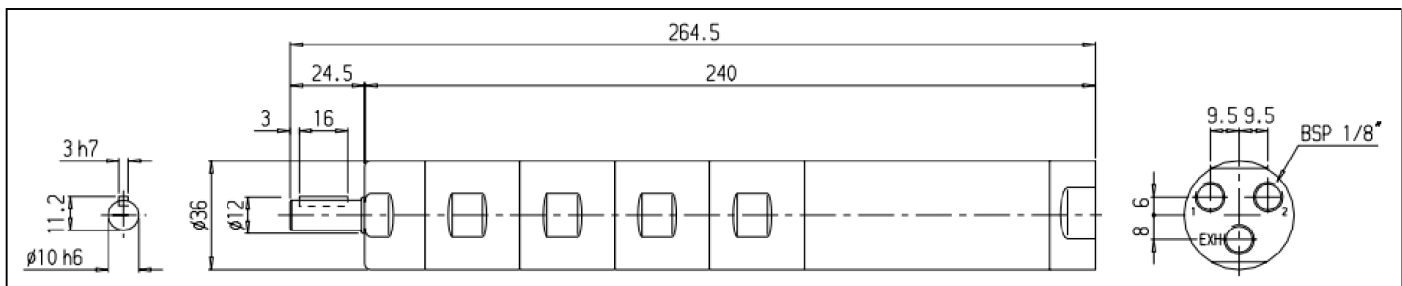
Ketjupyörää pyörittävän momentin tulee olla

$$M_{Ketjupyörä} = F_{KetjuVeto} \frac{D_{PKP}}{2}$$

$$M_{Ketjupyörä} = 0,7 \text{ N m}$$

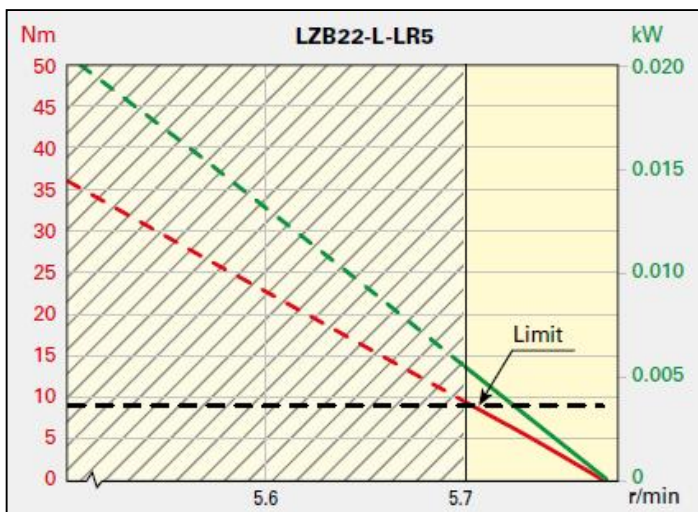
Valitaan kiertomoottoriksi Atlas Copcon hitaasti pyörivistä moottoreista kaikkein hitain ruostumaton versio. Prototyypissä käytetään vastaavaa perusteräksistä valmistettua vastaavaa versiota. Laitteen kiertomoottori vaatii todella pienen kierrosnopeuden. Valittu moottori ei pyöri näin hitaasti, mutta se on ainoa vaihtoehto, joka pyörii edes samassa suuruusluokassa. Myös katkaisutehtit tehtiin erikokoisella paalulle, joten niihin ei kannata täysin sokeasti uskoa. Prototyyppiin on siis päätetty kokeilla tarjolla olevista moottoreista hitaiten pyörivää. Tästä on valittu pienempi momenttinen versio, mutta siinäkin on tilanteeseen turhan reilusti momenttia. Kierrosnopeus on kuitenkin määräävä tekijä.

Valittu moottori LZB22-RL-LR5-11



Kuva 19. Moottorin LZB22-RL-LR5-11 etu-, sivu- ja takaprojektio.

Moottori on hyvin pitkä koska hidas pyörimisnopeus vaatii usean kerroksen vaihteita.



Kuva 20. LZB22-RL-LR5-11 suorituskäyrästä.

Data at air pressure 6.3 bar (91 psi)

Model	Free speed	Air consumption at max output		Weight		Shaft loading code ¹⁾	ATEX code	Ordering No.
		[r/min]	[l/s]	[cfm]	[kg]			
Lubrication free								
LZB22-L-LR100-11	110	5.8	12.3	0.95	2.09	b	Ex II 2GD c T6 IIC T85°C	8411 0216 22
LZB22-L-LR5-11	5	5.8	12.3	1.35	3.0	b	Ex II 2GD c T6 IIC T85°C	8411 0216 14
Stainless steel								
Lubrication free								
LZB22-RL-LR100-11	110	5.8	12.3	1.03	2.27	b	Ex II 2GD c T6 IIC T85°C	8411 0222 40
LZB22-RL-LR5-11	5	5.8	12.3	1.43	3.15	b	Ex II 2GD c T6 IIC T85°C	8411 0222 57

Kuva 21. LZB22-RL-LR5-11 suoritusarvoja.

Kiristysmoottorin vapaa kierrosnopeus

Max momentti

$$n_{\text{kmvapaa}} = 5 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$M_{\text{maxLR5}} = 9 \text{ N m}$$

Ilmantarve normaalilitroina minuutissa

$$Q_{\text{LZBRLLR511_Norm}} = 5,8 \cdot \frac{\text{litra}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{LZBRLLR511_Norm}} = 348 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Ilmankulutus käyttöpaineessa

$$Q_{\text{LZBRLLR511}} = \frac{P_{\text{Ilma}}}{P_{\text{Käyttö}} + P_{\text{Ilma}}} \cdot Q_{\text{LZBRLLR511_Norm}}$$

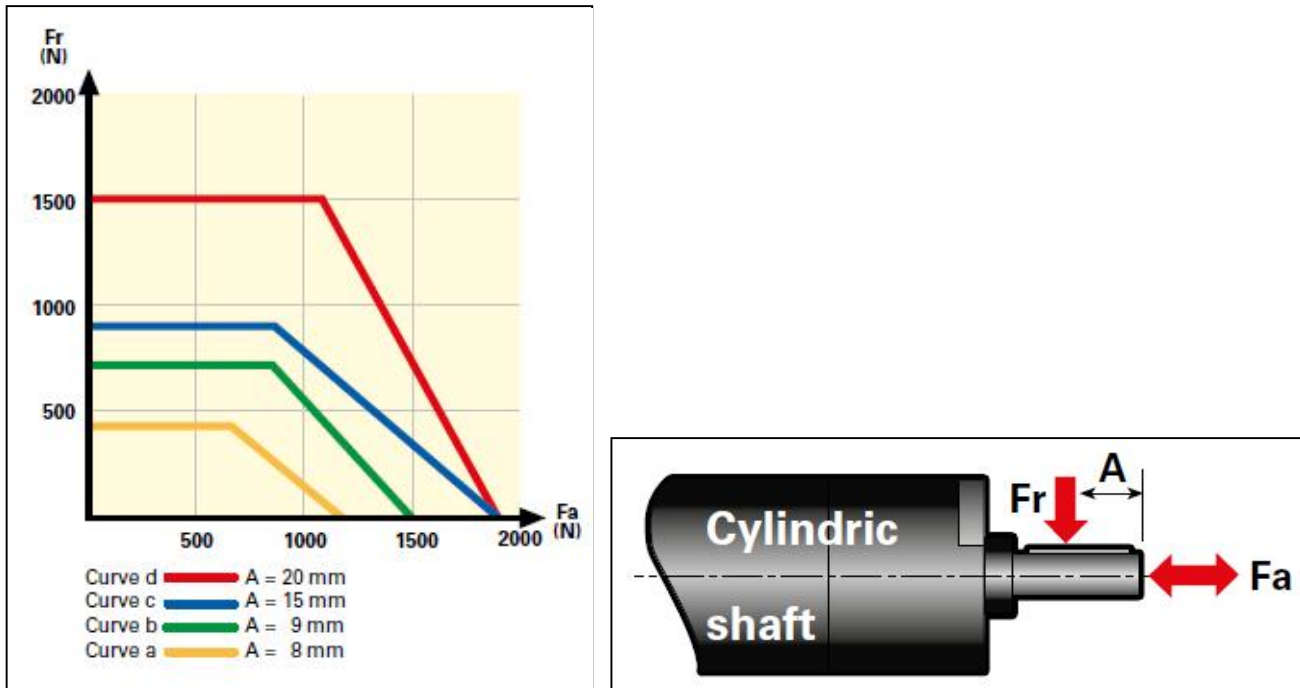
$$Q_{\text{LZBRLLR511}} = 50 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Nopeus paalun pinnalla

$$v_{\text{EiVaihdettä}} = n_{\text{kmvapaa}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{PKP}}}{2}$$

$$v_{\text{EiVaihdettä}} = 9,6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Kiristysmoottorin akseliin kohdistuvat kuormat



Kuva 22. Kiristysmoottorin akselin aksiaalisen ja radiaalisen kuorman kestoja 10 miljoonalle kierrokselle. LZB22-RL-LR5-11 mallia kuvaa vihreä käyrä.

Kiristysmoottorille sallittu radiaalikuorma

$$F_{\text{KirRadSal}} = 750 \text{ N}$$

Aksiaalista kuormaa tilanteessa ei juurikaan ole joten radiaalikuormalle voidaan sallia kuvan 22 maksimi arvo.

Kiristysmoottorin akselia vetää radiaalisti molempien puolien ketjuvoimien pystykomponentit. Tämä on sama asia kuin sylinterin vetävä voima.

Valitun kiristyssylinterin voima

$$F_{\text{KirSylKäyttö}} = 990 \text{ N} > F_{\text{KirRadSal}} = 750 \text{ N}$$

Sylinterin moottorin akselia vetävä voima on siis suurempi kuin sille sallittu radiaalikuormitus. Tämän lisäksi radiaalisen kuorman sijainti on kauempana moottorin laakereista kuin kuvan 23 tapauksessa. Tämä lisää entisestään laakereiden kuormaa. Ketjupyörä ei siis voi sijaita suoraan moottorin LZB22-RL-LR5-11 akselilla.

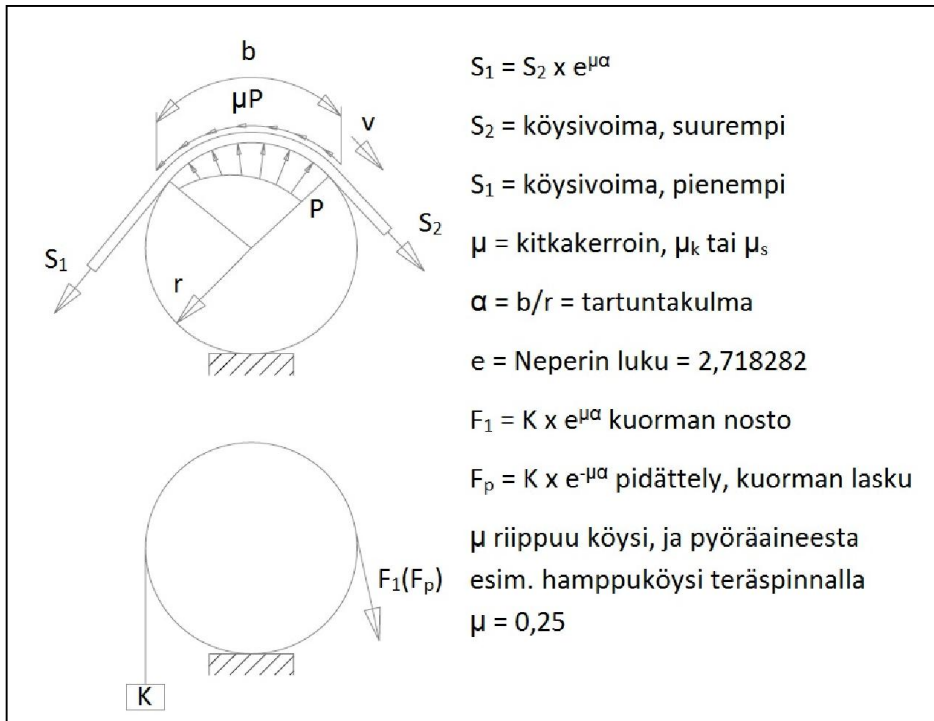
Kuvan 22 sallittu kuorma tarkoittaa kuormaa, jolla moottori kestää 10 miljoonaa kierrosta. Valittu moottori ei siis välittömästi hajoaisi vaan yksinkertaisesti kestäisi vähemmän määrän kierroksia.

Kuitenkin kuormituksen kestosta halutaan olla varmoja ja tähän on päästy ulkoista laakerointia apuna käyttäen. Suuret radiaalikuormat siirretään pois moottorin akselilta. Tämä on toteutettu moottorin kelluvana kiinnityksenä mikä tarkoittaa sitä että pyörivä akseli, jolla ketjupyöräkin sijaitsee, on laakeroitu tukevasti runkoon. Tämä laakerointi vastaanottaa radiaalikuormat ja moottori siirtää vain momentin. Tällöin ei tarvitse valita moottoria, joka kestää suuret radiaalikuormat.

Ketjupyörän akselilla on kaksi laakeria. Jo heikomman laakerin staattinen kestävyys on 2 550 N, joten nämä laakerit kestävät hyvin tilanteen kuormat.

Ketjun kiristymisen tarkistaminen liukumista vastaan leikkauksen yhteydessä

Jos ketjua ei vedetä tarpeeksi kireälle saattaa laikan aiheuttama voima liuttaa laitteistoa paalun ympäri ilman että terä leikkaa paalua. Kyseessä on siis tilanne jossa terä vetää laitetta paalun ympäri eikä ketjun ja paaluun aiheuttama kitka riitä pysäyttämään tätä liikettä.



Kuva 23. Köysikitka.

Tilanteessa voidaan hyödyntää köysikitkan kaavoja. Ketjuvoimien (kuvassa 23 köysivoimat) aiheuttaman kitkan, voimien S_2 ja S_1 erotus, tulee olla suurempi kuin voiman jolla laikka yrittää pyörittää laitetta paalun ympäri.

Ketju on paalun ympärillä noin 5/6 kierroksen matkalta.

$$\alpha_2 := \frac{5}{6} \cdot 2 \cdot \pi$$

$$\alpha_2 = 5,236$$

Terän aiheuttama voima on aiemmin laskettu. Voima näkyy kuvassa 18.

Lasketaan ketjuvoimat tilanteessa jossa liukumaa ei vielä tapahdu. Siis kitka- ja leikkausvoimien ollessa tasapainossa.

$$S_2 - S_1 = F_{\text{Terä}}$$

$$S_1 \cdot \exp(\mu \cdot \alpha_2) - S_1 = F_{\text{Terä}}$$

$$S_1 (\exp(\mu \cdot \alpha_2) - 1) = F_{\text{Terä}}$$

$$S_1 = \frac{F_{\text{Terä}}}{\exp(\mu \cdot \alpha_2) - 1}$$

$$S_1 = 32 \text{ N}$$

$$S_2 = S_1 \cdot \exp(\mu \cdot \alpha_2)$$

$$S_2 = 71 \text{ N} \quad F_{\text{Ketju}} = 515 \text{ N}$$

Varmuus ketjun kiristykselle liukumista vastaan

$$n_{\text{KetjunKiristysLiukuminen}} = \frac{F_{\text{Ketju}}}{S_2}$$

$$n_{\text{KetjunKiristysLiukuminen}} = 7,3$$

Leikkauksen aiheuttama voima ei aiheuta liukumista koska aikaisempien laskujen perusteella mitoitettu voima on riittävä.

Yhteenveto

Katkaisusylinteri

Jousipalautteinen paineilmasylinteri. Sen männän halkaisija on 32 mm ja iskun pituus 50 mm.

Merkki ja malli: CM2E32-50SZ.

Voima käyttöpaineessa

$$F_{\text{KatkSylKäyttö}} = 483 \text{ N}$$

Varmuus katkaisuvoimalle

$$n_{\text{KatkaisuVoima}} = 1,43$$

Tarvittava ilmamäärä normaalilitroina minuutissa

$$Q_{\text{KatkSylNormSuun}} = 33 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Kiristysylinteri

Kaksitoiminen paineilmasylinteri. Sen männän halkaisija on 50 mm ja iskun pituus 35 mm.

Merkki ja malli: SMC C55B50-35M

Voima käyttöpaineessa

$$F_{\text{KirSylKäyttö}} = 990 \text{ N}$$

Varmuus kiristysvoimalle

$$n_{\text{KiristysVoima}} = 1,14$$

Tarvittava ilmamäärä normaalilitroina minuutissa

$$Q_{\text{KirSylNormSuun}} = 69 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Katkaisumoottori

Yhteen suuntaan pyörivä paineilmamoottori.

Merkki ja malli: Atlas Copco LZB46-RL-A065.

Suoritusarvoja max teholla (840 W)

Momentti

$$M_{LZB46A065} = 2,4 \text{ Nm}$$

Kierrosnopeus

$$n_{LZB46A065} = 3324 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Kulmanopeus

$$\omega_{LZB46A065} = 2 \cdot \pi \cdot n_{LZB46A065}$$

Ilmankulutus

$$Q_{LZB46A065_Norm} = 972 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Kiertomoottori

Kahteen suuntaan pyörivä paineilmamoottori.

Merkki ja malli: Atlas Copco LZB22-RL-LR5-11

Suoritusarvoja

Vapaa kierrosnopeus

$$n_{kmvapaa} = 5 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Max momentti

$$M_{maxLR5} = 9 \text{ Nm}$$

Ilmantarve normaalilitroina minuutissa

$$Q_{LZBRLLR511_Norm} = 348 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Tuotteen kokonaisilmantarve normaalilitroina minuutissa

$$Q_{Kok_Norm} = Q_{KatkSylNormSuun} + Q_{KirSylNormSuun} + Q_{LZB46A065_Norm} + Q_{LZBRLLR511_Norm}$$

$$Q_{Kok_Norm} = 1422 \frac{\text{litra}}{\text{min}}$$

Tuotteen kanssa käytettävän kompressorin tulee kyetä tuottamaan vähintään näin suuri tilavuusvirta.